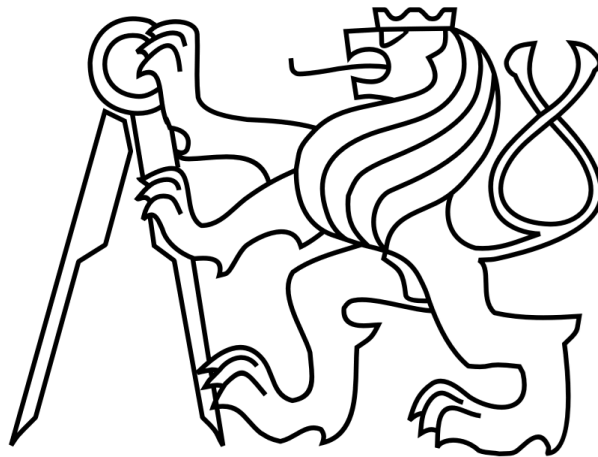


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Zkušební stanice pro 5ti osé navařování metodou WAAM

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štěpánek** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **439326**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Zkušební stanice pro 5 osé navařování metodou WAAM

Název diplomové práce anglicky:

Experienced station for 5 axis welding by WAAM method

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Předmětem práce je konstrukce a realizace zkušebního zařízení, které umožní provádět experimenty navařování kovů metodou WAAM při souvislém řízení v 5 osách. Konstrukce zahrnuje strojní i elektro část; Projektový návrh celku stanice včetně příslušenství a umístění v laboratoři U12135. Strojní konstrukce včetně maximálního využití subdodávaných celků. Elektrokonstrukce. Zajištění výroby a dodávek materiálu a komponent. Montáž a oživení. Závěrečné testování funkčnosti.; textový rozsah práce 60 - 80 stran.

Seznam doporučené literatury:

CHEN, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012.; MEHNEN, J., DING, J., LOCKETT, H., KAZANAS, P.: Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture, Proceedings of the 20th CIRP design conference, Nantes, France, 2010.; MINAŘÍK, Václav. Obloukové svařování. 2. aktualiz. vyd. Praha: Scientia, 2003. ISBN 9788071832850;8071832855; NĚMEC, Milan et al. Základy strojírenské technologie I. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 800106056X;9788001060568; Navařování metodou WAAM. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 28.03.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>; Svařovací technika - Fronius. [online]. Copyright © 2019 Fronius International GmbH [cit. 28.03.2019]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding>.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Smolík, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Ivan Diviš, ústav výrobních strojů a zařízení FS

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**

Ing. Jan Smolík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulíka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019

Datum převzetí zadání

Podpis studenta



Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 21. 7. 2019

.....

Bc. Filip Štěpánek



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl vyjádřit poděkování svému vedoucímu práce panu Ing. Janu Smolíkovi, Ph.D. a konzultantovi panu Ing. Ivanovi Divišovi za vstřícný přístup při konzultacích a za jejich odbornou pomoc s vypracováním této práce. Současně děkuji kolegům z Ústavu výrobních strojů a zařízení při Fakultě strojní Českého vysokého učení technického za spolupráci při získávání údajů pro výzkumnou část práce, jejich cenné rady a informace.



Anotace

Autor:	Bc. Filip Štěpánek
Název DP:	Zkušební stanice pro 5 osé navařování metodou WAAM
Rozsah práce:	97 str., 119 obr., 11 tab.
Školní rok vyhotovení:	2018/2019
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí DP:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Ivan Diviš
Zadavatel	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Navařování metodou WAAM v souvislém řízení v 5 osách
Klíčová slova	Aditivní technologie, metoda WAAM, MIG/MAG, navařování, konstrukce, 5ti osé navařování
Anotace:	Tato práce se zabývá konstrukcí zkušební stanice pro 5ti osé navařování pomocí metody WAAM. Cílem práce je seznámení se problematikou WAAM a s alternativy konstrukce zkušební stanice pro 5ti osé navařování. Pro zjednodušení konstrukce je použita 5ti osá gravírovací frézka a konstrukce krytování z hliníkových profilů.



ANNOTATION

Author:	Bc. Filip Štěpánek
Name of diploma dissertation:	Testing station for 5 axis welding by WAAM method
Extent:	97 p., 119 fig., 11 tab.
Academic year:	2018/2019
University:	CTU in Prague – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Jan Smolík, Ph.D.
Consultant:	Ing. Ivan Diviš
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	WAAM welding method of continuous control in 5 axes
Key words:	Additive technology, WAAM method, MIG / MAG, surfacing, construction, 5-axis surfacing
Annotation:	This work deals with the construction of a testing station for 5-axis welding using the WAAM method. The aim of this work is to introduce WAAM problems and alternatives of construction of testing station for 5-axis welding. To simplify the construction, a 5-axis engraving milling machine and aluminum profile cover construction are used.



OBSAH

SEZNAM ZKRATEK.....	8
SEZNAM VELIČIN	9
1 ÚVOD.....	10
2 POPIS METODY WAAM	12
2.1 Porovnání WAAM s jinými procesy výroby	14
2.2 Otevřená otázka z hlediska výzkumu	16
3 REŠERŠE METODY SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG	17
3.1 Seznámení s metodou svařování MIG/MAG.....	17
3.1.1 Využití metody svařování MAG	19
3.1.2 Využití metody svařování MIG	19
3.1.3 Výhody svařování MIG/MAG	20
3.1.4 Nevýhody svařování MIG/MAG	20
3.1.5 Druhy přenosu kovu při svařování	20
3.2 Svařovací materiály	21
3.2.1 Svařovací materiál od firmy Voestalpine Böhler Welding	21
4 REŠERŠE STROJŮ PRACUJÍCÍ S METODOU WAAM.....	25
4.1 GEFERTEC	25
4.1.1 GEFERTEC arc603.....	26
4.1.2 GEFERTEC arc605.....	26
4.1.3 GEFERTEC arc405.....	27
4.2 KOVOSVIT MAS.....	28
4.3 Mazak.....	31
4.4 MX3D	32
4.5 ADDALIAN	34
4.6 3D HYBRID	35
5 SHRUTÍ REŠERŠE A UPŘESNĚNÍ ZADÁNÍ PRO KONSTRUKCI.....	36
5.1 Upřesněné zadání pro konstrukci	37
5.1.1 Svářecí technika	37
5.1.2 Výběr stroje	40
5.1.3 Software	42
5.1.4 Umístění v laboratořích	43
5.1.5 Co chceme zkoumat	43
6 VLASTNÍ KONSTRUKCE.....	44
6.1 Adaptační 5ti osé stolní gravírovací frézky CNC 6040	44
6.1.1 Výběr varianty otočného stolu a její konstrukce.....	46
6.1.2 Zvýšení konstrukce kolébky.....	60
6.1.3 Zvýšení stojanu	60
6.1.4 Konstrukční změna osy Z.....	61
6.2 Elektrická zařízení a komponenty.....	64
6.2.1 Řídicí systém s integrovaným dotykovým panelem	66



6.2.2	Moduly od firmy Beckhoff.....	67
6.2.3	Rozhraní pro obsluhu	69
6.2.4	Osvětlení stroje	72
6.2.5	Průmyslová kamera	73
6.2.6	Termokamera.....	74
6.2.7	Výběr 24 V napájecího zdroje	75
6.2.8	Další komponenty	76
6.3	Krytování stroje	78
6.3.1	Konstrukce krytování	79
6.4	Celková vizualizace zkušební stanice a montáž	80
7	ZÁVĚR.....	83
	SEZNAMY.....	85
	Seznam literatury	85
	Seznam obrázků	92
	Seznam tabulek	94
	Seznam použitého softwaru	95
	Seznam příloh	95
	Výkresová dokumentace.....	95
	Elektronické přílohy.....	97



SEZNAM ZKRATEK

3D	3 dimension
AI	Analog Input
AM	Additive Manufacturing
AO	Analog Output
BTF	Buy-to-fly
CAD	Computer Aided Design
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Computer Numerical Control
ČVUT	České vysoké učení technické v Praze
DI	Digital Input
DO	Digital Output
EDP	EtherCAT Device Protocol
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MMA	Manual Metal Arc Welding
LED	Light-emitting diode
RCMT	Research Center for Manufacturing Technology
SIL	Safety integrity Level
Ti	Titan
TIG	Tungsten Inert Gas
WAAM	Wire and Arc Additive Manufacturing

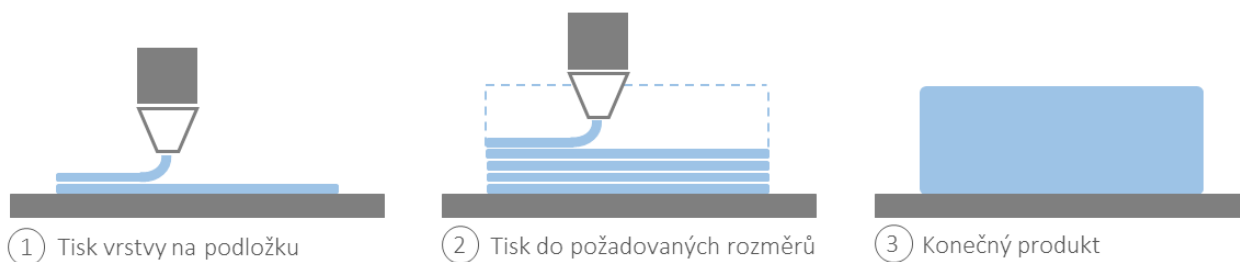


SEZNAM VELIČIN

C	[kN]	Základní dynamická únosnost
C ₀	[kN]	Základní statická únosnost
d	[mm]	Průměr
g	m/s	Tíhové zrychlení
F _{a0}	F	Silové zatížení v axiálním směru pro úhel natočení 0 °
F _{a90}	F	Silové zatížení v axiálním směru pro úhel natočení 90 °
F _{G_des}	N	Tíhová síla od návarné desky
F _{G_dil}	N	Tíhová síla od navařeného dílce
F _{G_h}	N	Tíhová síla od hřídele
F _{G_ch}	N	Tíhová síla od chladicí desky
F _{MAX_před}	N	Maximální síla předepjetí
F _{G_při}	N	Tíhová síla od příruby
F _{G_rot}	N	Tíhová síla od rotační části přívodu kapaliny
F _{G_souč}	N	Součin tíhových sil
F _{G_sp}	N	Tíhová síla od svěrného pouzdra
F _{G_vř}	N	Tíhová síla od velké řemenice
F _{r0}	N	Silové zatížení v radiálním směru pro úhel natočení 0 °
F _{r90}	N	Silové zatížení v radiálním směru pro úhel natočení 90 °
p	[1]	Exponent rovnice trvanlivosti
P	[kN]	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska
P ₀	[kN]	Ekvivalentní statické zatížení ložiska
L ₁₀	[min ⁻¹]	Základní životnost ložisek v milionech otáček
L _{10h}	mil. h.	Základní životnost ložisek v provozních hodinách
m _{des}	kg	Hmotnost návarné desky
m _{dil}	kg	Hmotnost navařeného dílce
m _h	kg	Hmotnost hřídele
m _{ch}	kg	Hmotnost chladicí desky
m _{při}	kg	Hmotnost příruby
m _{rot}	kg	Hmotnost rotační části přívodu kapaliny
m _{souč}	kg	Součin hmotností
m _{sp}	kg	Hmotnost svěrného pouzdra
m _{vř}	kg	Hmotnost velké řemenice
n	[min ⁻¹]	Otáčky (rychlost otáčení)
S ₀	[1]	Bezpečnost ložisek při statickém zatížení
v	[m/s]	Rychlost

1 ÚVOD

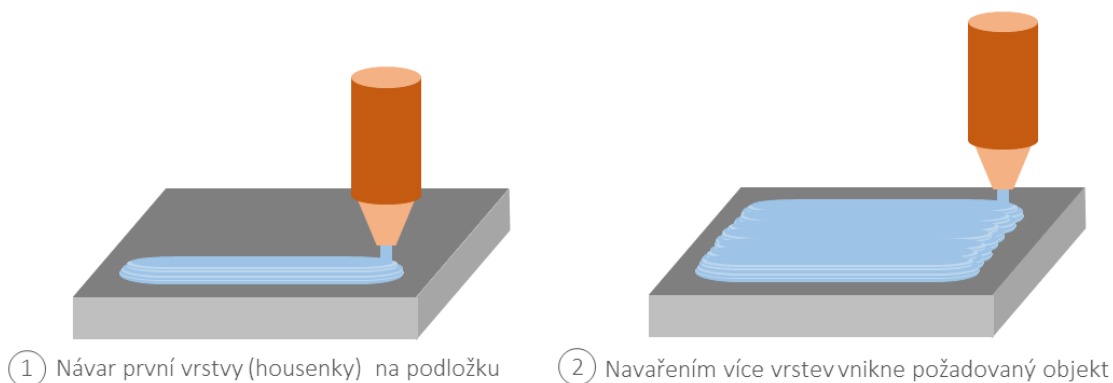
Lidstvo už od počátku své existence pomalu zdokonalovalo postup výroby. Ať se jednalo v době kamenné o primitivní opracování kamene do formy pazourku, přes vynález parního stroje až po současnost. Dnes se nacházíme v době tzv. čtvrté průmyslové revoluce, kde se v posledních letech do hledáčku dostávají aditivní technologie. Aditivní výroba (AM – Additive Manufacturing) známá lépe jako 3D tisk, je výrobní proces založený na tvorbě objektu postupným nanášením jednotlivých vrstev materiálu viz. **Obr. 1.** podle virtuálního modelu vytvořeného v CAD programu (program pro vytváření virtuálních modelů). Velkou výhodou 3D tisku je detailnost tištěných struktur a adaptivnost výroby. To ho činí značnou konkurencí oproti konvenčním technologiím z hlediska zhotovení prototypů či celkových dílů. Lze tisknout z plastu, kovu, bio materiálu a dalších druhů materiálu. Většinové zastoupení na trhu mají plastové 3D tiskárny využívané v různých průmyslových odvětvích a v domácích dílnách.



Obr. 1: Zjednodušené znázornění principu technologie 3D tisku

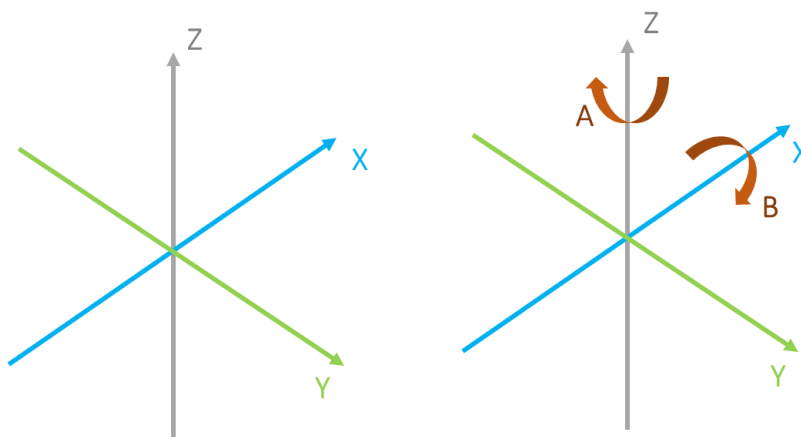
Ve strojním průmyslu jsou především používají tiskárny na kov, které se dělí do dvou skupin. První skupinou jsou tiskárny pracující s materiálem ve formě prášku, který je vysokou teplotou spékán pomocí laseru či plasmu. Do druhé skupiny se řadí 3D tisk pomocí metody Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Tento anglický název v překladu znamená „drát a oblouk aditivní výroba“. Tato metoda v sobě sdružuje aditivní technologii s technologií navařování. Zde je přídavný materiál ve formě drátu (metoda svařování MIG/MAG – tavící se elektrodu a TIG – netavící se elektrodou). Metoda WAAM spočívá v ukládání velkého počtu návarových housenek či bodů vedle se nebo na sebe viz. **Obr. 2.**

Jednou z firem, podílející se na výzkumu metody WAAM je Ústav výrobních strojů a zařízení s Výzkumným centrem pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT) ve spolupráci se společností Kovosvit MAS, a.s. Od roku 2014 zde probíhá společný výzkum, na který navazuje tato diplomová práce. V současnosti jsou v laboratořích prováděny experimenty na upravených 3osých CNC frézovacích strojích s implementovanou technologií navařování MIG/MAG.



Obr. 2: Zjednodušené znázornění principu technologie WAAM

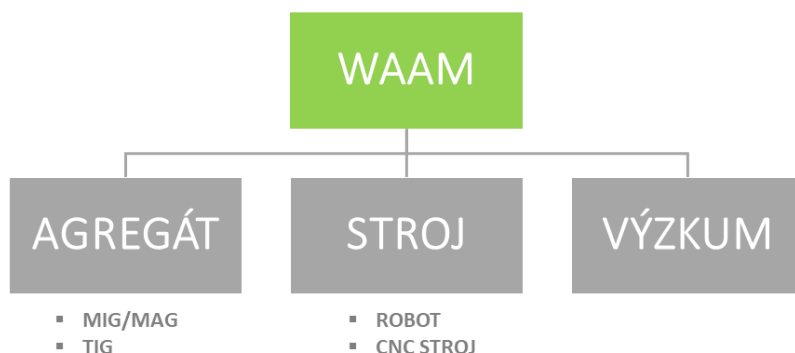
Cílem této práce je navržení a konstrukce zkušební stanice pro metodu WAAM, která bude umožňovat experimenty navařování i v 5ti osách. Návrh zahrnuje vhodnou variantu konstrukčního řešení s výběrem komponent na základě poznatků z dosavadního výzkumu. V této souvislosti je provedena rozsáhlá rešerše zabírající se metodou WAAM, průzkumem trhu z hlediska konkurence a nabízených komponent pro optimalizaci koncepčního návrhu zkušební stanice. Výstupem práce je návrh, konstrukce a oživení 5ti osé zkušební stanice pro metodu WAAM včetně výkresové dokumentace.



Obr. 3: 3osý a 5ti osý systém

2 POPIS METODY WAAM

Metoda WAAM je vyvíjena od 90. let 20. století britskou univerzitou Cranfield University a v roce 1925 byl prodán první patent. Označení WAAM vychází z anglického názvu Wire and Arc Additive Manufacture („drát a oblouk aditivní technologie“). Jedná o využití elektrického oblouku jako zdroje tepla a drátu ve formě suroviny. Současná podoba metody WAAM se skládá ze svařovacího zařízení (svařovací agregát, podavač drátu, hořák), stroje a znalostí založených na výzkumu.[1],[2]



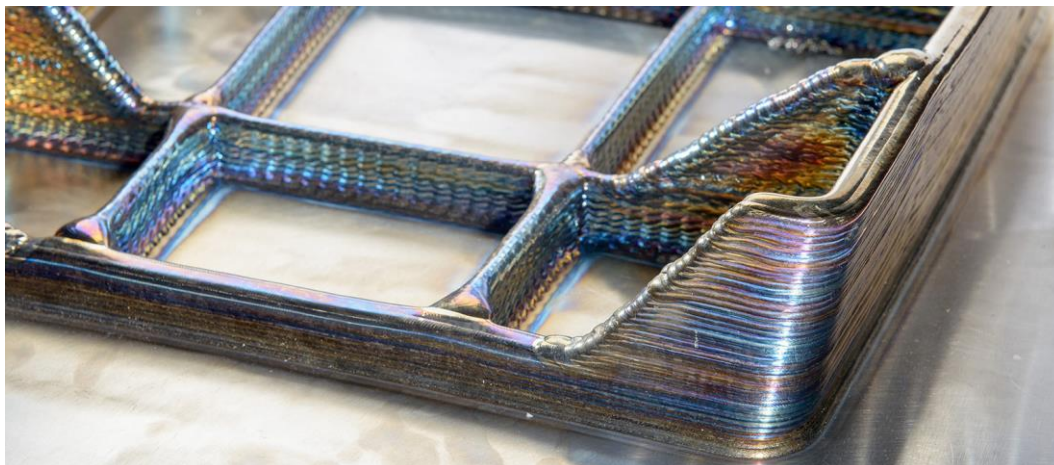
Obr. 4: Grafické zobrazení dílčích součástí metody WAAM

Na Obr. 5 je fotografie pracoviště Cranfieldské University, kde se nacházejí dva angulární roboti od firmy KUKA s implementovanými komponenty pro technologii sváření od firmy Fronius. Na konci ramene angulárního robota je připevněn hořák, jehož vnitřní strukturou je veden svařovací drát a pomocná plynná média. Prostřednictvím programu je celý systém řízen. Následným navařování vrstev viz. Obr. 2 vzniká objekt.



Obr. 5: Pracoviště s metodou WAAM Cranfieldské University [3]

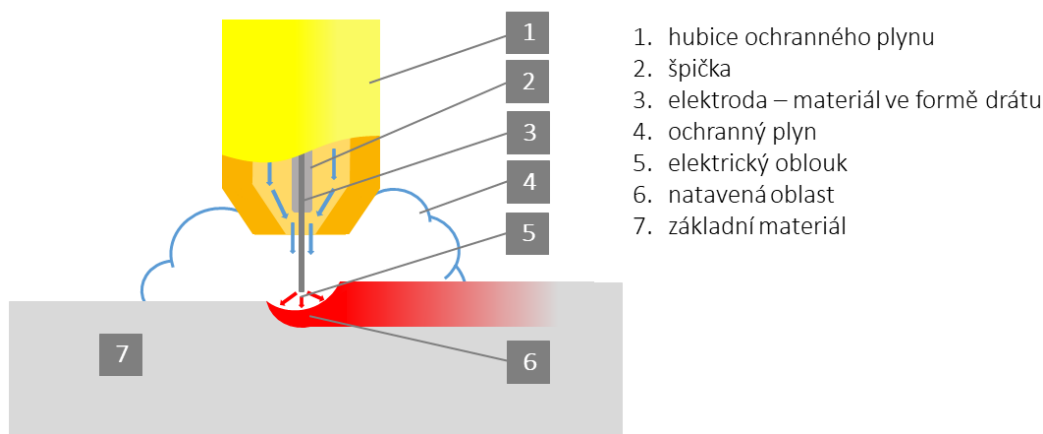
Příklad vytištěného dílce Cranfieldskou Univerzitou je zobrazen na **Obr. 6**. Vzniklý tvar lze nadále např. frézovat do finálních rozměrů. Kombinace obráběcího stroje a metody WAAM se nazývá „hybridní technologii“.



Obr. 6: Příklad výrobku Cranfieldské University [3]

V metodě WAAM se využívají tři druhy svařování v ochranné atmosféře – MIG, MAG a TIG. Metody se od sebe liší především rychlostí navařování materiálu (výkon navaření). Metodou TIG lze navářet okolo jednoho kilogramu za hodinu. Parametr je ovlivněn rychlostí navařování. S rostoucí rychlostí navařování se zvyšuje množství vneseného tepla do materiálu a docházelo by k tepelné deformaci. Zatímco metodami MIG/MAG se dosahuje rychlosti depozice neboli rychlosti nanášení návaru na destičku i několika kilogramů za hodinu, metoda TIG je oproti metodám MIG/MAG stabilnější, nedochází během návaru k rozstříku a případně ke zvýšení poróznosti. Řešením je použití modifikovaných procesů. Příkladem je metoda Cold Metal Transfer (CMT) od firmy Fronius. Metoda CMT má tzv. bezrozstříkový charakter a během procesu návaru se snižuje vnesené teplo do navařovaného materiálu. Touto problematikou se také zabývá firma EWM (Cold Arc) nebo firma Migatronic (Intelligent Arc Control) apod. Na základě provedených výzkumů se ukázalo, že pomocí modifikací se docílilo ke zvýšení kvality, bezrozstříkovému charakteru, nízkému tepelnému příkonu, vysokým výkonům navaření a možností tvorby menších tloušťek stěn, vynikající reprodukovatelnosti a jemnější mikrostruktury atd. [2], [4], [6]

Tato práce s bude zaobírat pouze svařovacími technologiemi MIG/MAG, která se používá u zkušební stanice. MIG/MAG má své specifické vlastnosti, které jsou vhodné pro určitý druh materiálu. Podrobný rozbor těchto metod je uveden v následujících kapitolách, kde je jim věnována část práce. Zjednodušený **Obr. 7** znázorňuje detail procesu navařování v místě návaru.



Obr. 7: Zjednodušené znázornění procesu navařování

2.1 Porovnání WAAM s jinými procesy výroby

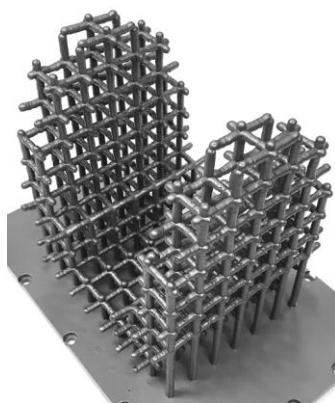
Tato podkapitola bude porovnávat metodu WAAM s jinými technologiemi depozice kovů a konvenční metodou obrábění. Výrobní procesy depozice přináší možnost výroby tvarů, které nešlo běžně konvenčními metodami dosáhnout. Technologie 3D tisku ve formě prášku spékaného pomocí laseru se využívají u malých a detailních dílců. Důvodem je malý pracovní prostor strojů. Metoda WAAM nedosahuje takové detailnosti tisku, ale umožňuje tisk středně velkých a velkých dílců. Dalo by se říci, že metoda WAAM nemá rozměrová omezení. Příkladem je nizozemská firma MX3D jejíž výrobky lze vidět v **kapitole 4.4.** [2],[5]

Potenciálem metody WAAM se zabývá i jedna z předních světových nezávislých a technologických organizací s názvem TWI. Dle výsledků z výzkumu je vývoj aditivních technologií založených na metodě oblouku (AM) poháněn potřebou zvýšení výrobní efektivity. Schopnost vyrábět polotovary blízké požadovanému tvaru bez nutnosti složitých nástrojů, forem a dalších technologických postupů, přináší výrazné snížení nákladů a času. Využití metody WAAM se nachází ve výrobě středně velkých a velkých komponent s nároky na nízkou cenu a krátkou dodací lhůtu. [5]

V současné době jsou systémy založené na obráběcích strojích, do kterých je integrováno depoziční zařízení (tzv. hybridní stroje). Metoda WAAM umožňuje vyrábět díly v téměř čistém tvaru, kde povrchová úprava a povrchová přesnost je dosažena CNC obráběcími stroji. Otvírá se tak cesta k výrobě dílů, které dříve nebylo možno vyrobit. Strojů pracujících na metodě WAAM je věnována část diplomové práce.

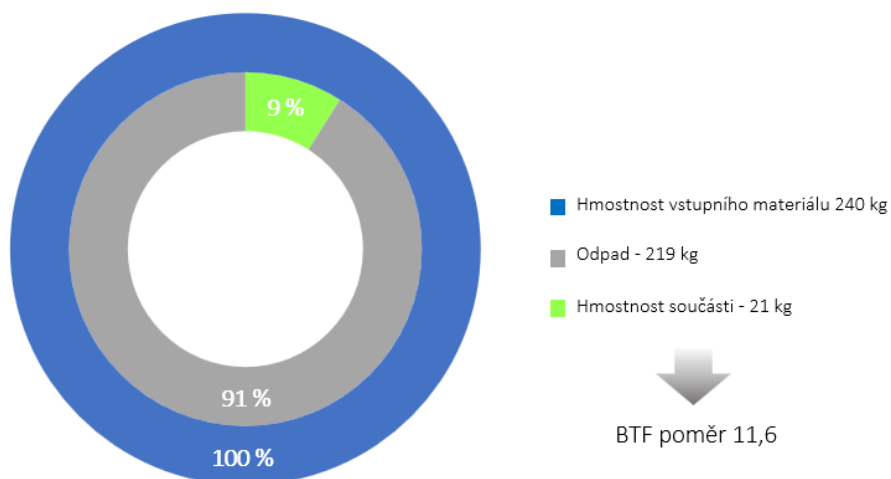
Jmenovaná organizace TWI představila dokument, v němž popisuje výzkum mechanických vlastností kovových komponent, které byly aditivně vyrobeny metodou WAAM. Výzkum ukazuje, že mechanické vlastnosti aditivně vyráběných materiálů, jako je slitina titanu, je srovnatelná s litými nebo tvářenými materiály. Dokument také shrnuje proces plánování výroby, snímání a řízení WAAM. Výsledkem je doporučení pro budoucí využití metody. Na základě současných trendů bude výzkum WAAM zahrnovat automatizované plánování procesu, monitorování a řízení. [5], [7],

Největší předností aditivní výroby je flexibilita. WAAM umožňuje výrobu různých typů konstrukcí s širokým výběrem materiálů viz. **Obr. 8**, vyrobitelnost součástí různě složitých geometrických tvarů, strukturální celistvost, vyznačuje se nízkými výrobními náklady a krátkou dodací lhůtou. Omezení je pouze v postupu nanášení vrstev materiálu. WAAM otevírá cestu k vytváření objektů různorodých tvarů, které dříve nebylo možné vyrobit. U WAAM se mění pouze elektrické parametry jako je napětí a proud. [2], [5]

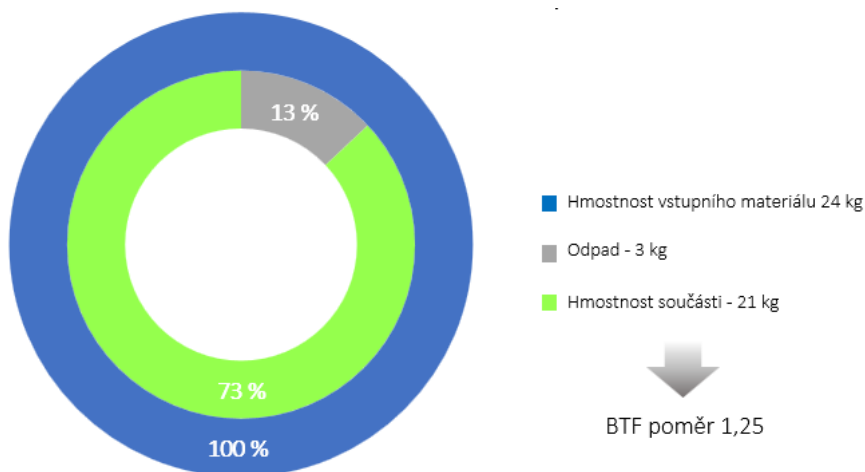


Obr. 8: Podpurná konstrukce vytvořená metodou WAAM

Porovnání konvenčního výrobního postupu (obrábění) a metody WAAM je uveden na příkladu výrobku tenkostěnného leteckého dílce ze slitiny Ti o hmotnosti 21 kg. Na obrázku **Obr. 9** jsou uvedeny parametry výroby dílů obráběním a na **Obr. 10** jsou uvedeny parametry dílů vyrobené metodou WAAM. [2]



Obr. 9: Parametry výroby dílů z Ti slitiny – obrábění



Obr. 10: Parametry výroby dílů z Ti slitiny – metoda WAAM

Značným výsledkem je BTF (Buy-to-fly je poměr využití materiálu) poměr. Vyplyvá, že u metody WAAM je poměr využití materiálu 1,25. Jedná se o více než devětkrát menší hodnotu oproti obrábění. Metoda WAAM umožňuje tzv. téměř čistý tvar (Near Net Shape) s malou ztrátou materiálu. [2]

2.2 Otevřená otázka z hlediska výzkumu

WAAM je velice mladá metoda, kde je hodně neznámých. Není zde stále vyřešeno dávkování plynu, řízení (software), technické podmínky pro kamerový systém, technologické podmínky pro všechny materiály nebo strategie navařování a další.

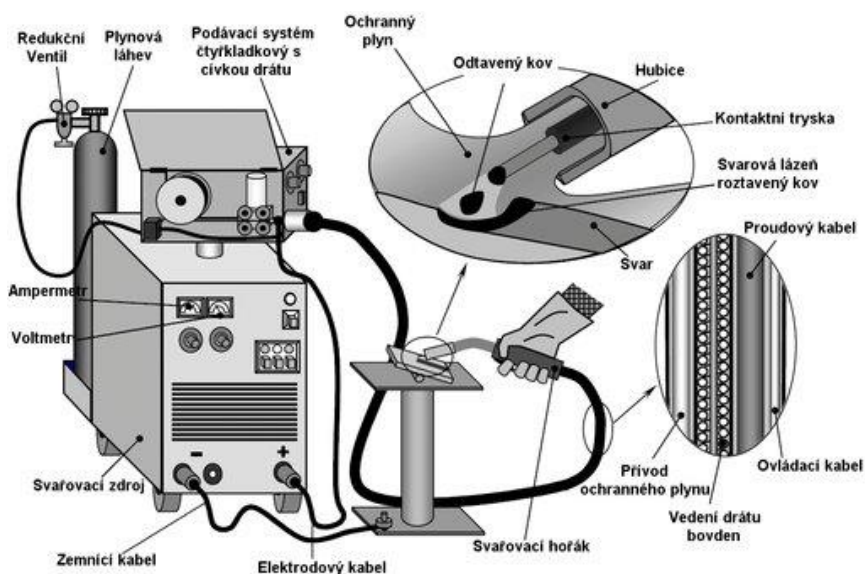
3 REŠERŠE METODY SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG

V této části práce je popsána technologie svařování MIG/MAG, která se používá u metody WAAM. Jsou zde uvedeny rozdíly mezi technologiemi navařování a přídavné materiály pro navařování od firmy Böhler specializující se na přídavné materiály pro metodu WAAM. Metoda navařování TIG zde není popsána z důvodu malého využití pro metodu WAAM.

3.1 Seznámení s metodou svařování MIG/MAG

MIG a MAG je metoda obloukového svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu. MIG je označení procesu svařování kovů v ochranné atmosféře interního plynu a MAG je svařování v atmosféře aktivního (MAG) plynu. Metoda je mnohem produktivnější než ruční svařování MMA – obalenou elektrodou. U metody MMA svářeč často vyměňuje materiál. Dochází ke ztrátám materiálu, kde pouze 65 % z 1 kg obalené elektrody jde do svaru a zbytek se vyhodí. Oproti technologii MIG/MAG je použit materiál ve formě svářecího drátu nebo svářecího trubičkového drátu, pomocí něhož se zvýší účinnost na 80-95 %. [8], [9], [10]

Svařovací proces se dělí na poloautomatický a automatický. U poloautomatického procesu je materiál tzv. svářecí drát kontinuálně přiváděn do místa svařování pomocí motorizovaného mechanismu na základě mechanických povelů svářeče, který vede ručně svařovací hořák. Jedná se zde o automatické podávání svařovacího drátu a ruční vedení svařovacího hořáku, proto poloautomatické. Příklad poloautomatického pracoviště je na **Obr. 11** a **Obr. 12**. [8], [10], [9]

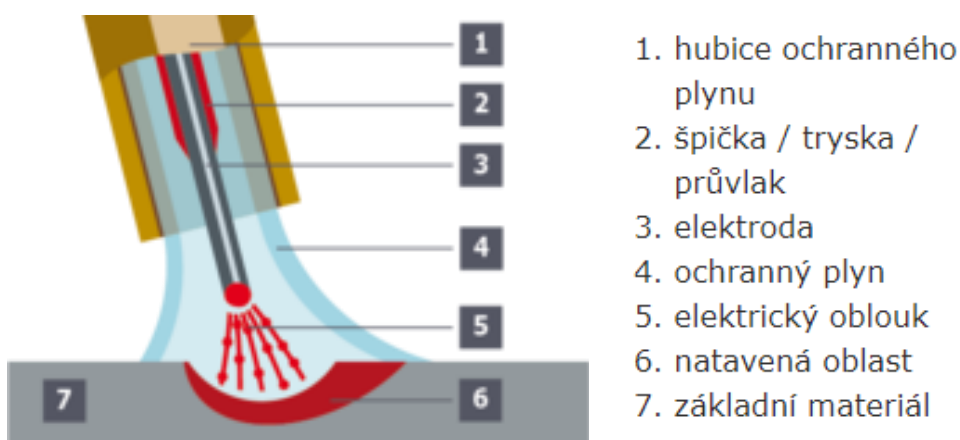


Obr. 11: Schéma MIG/MAG poloautomatického svařování [10]



Obr. 12: Příklad poloautomatického svařování technologií MIG/ MAG od firmy Fronius [11]

U automatického svařování **Obr. 14** je nahrazeno ruční vedení svařovacího hořáku za vedení hořáku robotem. Hořák je zde upevněn na rameno robota. Ruční svařování svařovacím drátem je nepravděpodobné, protože přídavný materiál (svařovací drát), který je navinutý na cívce, je podáván bowdenem v hořáku do místa svařování. Svařovacím drátem protéká proud, tvoří tak jednu elektrodu hořícího oblouku. Druhá elektroda je tvořena samotným svařovaným materiálem, který je připojen pomocí zemnicí svěrky. Místo svaru (svarové lázeň a oblouk) je chráněno ochranným plynem, který zamezuje přístupu vzduchu a tím chrání svar před degradací viz **Obr. 13**. Ochranný plyn je dodáván externě v tlakových plynových láhvích nebo vnějším rozvodem plynu. [8], [10], [9]



Obr. 13: MIG/MAG svařování – detail [12]



Obr. 14: Příklad automatického pracoviště technologie MIG/MAG od firmy Fronius [13]

Poznámka:

Bowdeny vedou dráty uvnitř hořáku viz **Obr 2**. Patří tak k nejvíce namáhaným dílům, a proto se musí před každým použitím hořáků kontrolovat. V případě poškození, zlomení, ucpání nebo jiného poškození se musí vyměnit za nové. [14]

3.1.1 Využití metody svařování MAG

Zkratka MAG pochází z anglického slova Metal Active Gas. Jedná se o svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu. Plyn chrání (zamezuje) přístupu vzduchu k roztavenému materiálu a zároveň se aktivně podílí na chemické reakci ve svarové lázni. Využívá se pro svařování těžkých kovů. Mezi používané plyny se řadí CO₂, směs Argonu + CO₂, směs Argonu + O₂ a vícesložkové směsi na bázi argonu. [8], [9], [10]

3.1.2 Využití metody svařování MIG

Zkratka MIG pochází z anglického slova Metal Inter Gas. Svařování nebo navařování se provádí v ochranné atmosféře inertního plynu. Plyn zamezuje (chrání) přístupu vzduchu do svarové lázně. Nijak se neúčastní chemických reakcí ve svarové lázni. Využívá se pro svařování lehkých kovů. Mezi nejpoužívanější inertní plyny patří Argon a směs Argonu + Helium. [8], [9], [10]

3.1.3 Výhody svařování MIG/MAG

Výhody svařování MIG/MAG jsou:

- svařování ve všech svařovacích polohách,
- vysoká svařovací rychlost = vyšší produktivita,
- odstranění prostoje na výměnu klasických elektrod (MMA),
- nižší nároky na čištění strusky,
- eliminace zplodin (kouře) oproti metodě MMA,
- oblouk i svarová lázeň je jasně viditelná,
- při svařování ve zkratovém přenosu – nižší vnesené teplo do svařence = menší deformace. [9], [10]

3.1.4 Nevýhody svařování MIG/MAG

Nevýhody svařování MIG/MAG jsou:

- svařovací zdroj je náročnější na obsluhu, pořizovací cena je vyšší,
- vyšší nároky na údržbu,
- při špatných podmínkách ventilace je riziko odfouknutí ochranného plynu,
- relativně vysoké vyzářené teplo do prostoru. [9], [10]

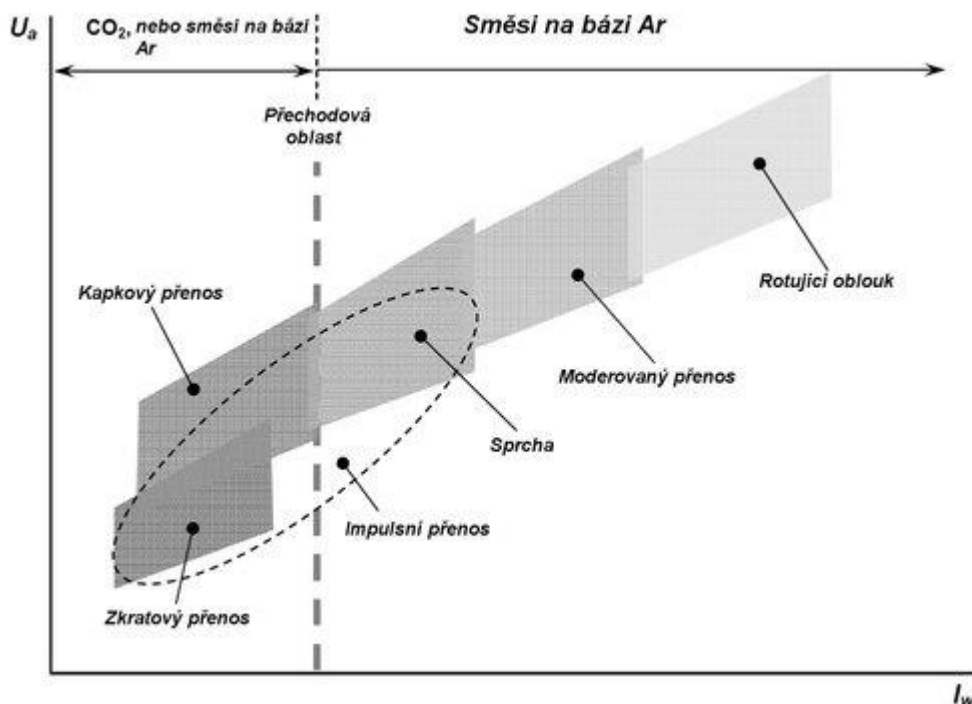
3.1.5 Druhy přenosu kovu při svařování

Technologie MIG/MAG umožňuje regulovat přenos přídavného materiálu (materiál ve formě drátu) do svarové lázně pomocí daných parametrů (U [V] – napětí a I [A] – proudu). Lze tak na základě parametrů nastavit velikost odtaveného materiálu (kapky). [10]

Druhy přenosů jsou:

- zkratový přenos,
- kapkový přenos,
- impulsní přenos,
- sprchový přenos,

- moderovaný přenos,
- rotační přenos. [10]



Obr. 15: Graf parametrů pro nastavení přenosu [10]

3.2 Svařovací materiály

Svařovací materiály, které se využívají při klasickém svařování technologií MIG/MAG se mohou použít i při svařování MIG/MAG pro metodu WAAM. Jelikož u klasického svařování se nevytváří celý díl, ale pouze se navařuje jeho malá část, nedochází k tak velkému tepelnému ovlivnění jako u výrobního procesu WAAM. Zde je postupným navařováním vrstev vytvořen celistvý díl. Dochází zde k velkému vnesení tepla. Z těchto důvodů firma Böhler upravila chemické složení drátových elektrod vyhovující pro metodu WAAM. Více informací o produktech této firmy je uveden v následující podkapitole.

3.2.1 Svařovací materiál od firmy Voestalpine Böhler Welding

Aditivní výroba kovových částí provedla zásadní změnu v technologickém světě. Postupným zaváděním do průmyslových aplikací se musel přizpůsobit i trh. Firma Böhler se zabývá výrobou kovových aditiv jak práškových slitin, tak i slitin svařovacích drátů **Obr. 16** pro technologii

WAAM. Společnost vyvinula za základě mnohaletých zkušeností novou škálu slitin od nelegovaných až po vysoce legované oceli, niklové slitiny, slitiny titanu a slitiny hliníku speciálně pro navařování metodou WAAM. Díky vyladěné chemii a specifickému povlaku a povrchové úpravě mohou tyto vodiče plně splňovat náročné požadavky WAAM procesů, pokud jde o produktivitu, celistvost materiálu, chemické a mechanické vlastnosti. V **Tab. 1** je porovnání práškové slitiny se slitou pro navařovací dráty. [15]



Obr. 16: Přídavný materiál ne formě drátu navinutý na cívce od firmy Böhler [16]

Tab. 1: Srovnání výroby pomocí práškových slitin a slitin svařovacích drátů [16]

	Práškové slitiny	Slitiny – drát
Náklady na výrobu	vysoké	Střední
Dostupnost materiálu	méně dostupných materiálů	vysoká (Ti, Fe, Ni), proměnlivý je Al
Materiálová účinnost	40 až 60 %	100 %
Recyklace	možná recyklace	není požadováno
Tisk mimo	Ne	Ano
Problémy s otáčením	souosé– ne boční posuv – ano	souosé– ne boční posuv – ano
Rychlost výroby za hodinu (v závislosti na procesu / parametrech)	2,0 kg / h	3,5 kg / h ~ 70 % více

Ve srovnání s klasickými procesy navařování či svařování je technologie WAAM pro výrobu dílců složitější. Důvodem jsou náročnější metalurgické a procesní požadavky. Produktivita výroby vede k vysokému tepelnému příkonu (vnesené teplo) a nízké rychlosti ochlazování v důsledku nanášení dalších vrstev. Fyzikální a mechanické vlastnosti musí

vyhovovat určitým podmínkám a pokud možno, aby docházelo k temperování více vrstev (tepelné vytvrzování), jeli vyžadováno. Chemické složení drátu také ovlivňuje stabilitu oblouku, tekutost roztaveného materiálu a tvorbu škodlivých vrstev na povrchu svaru, které mohou být škodlivé pro pokládání další vrstvy. Stabilita oblouku závisí také na rovnoměrném podávání drátu a stavem povrchu drátu. [15]

Proto se společnost Voestalpine Böhler Welding rozhodla vyvinout konkrétní řadu pevných drátů nazvaných 3DPrint AM, které pokrývají většinu slitin požadovaných v této oblasti. Konkrétní povrchová úprava tažených drátů byla ustálena a pro některé ze slitin bylo jemně doladěno chemické složení ve srovnání se svařovacími dráty, aby se dosáhlo požadovaných mechanických vlastností a vzhledu svaru. Metalurgické a procesní výhody drátových elektrod od firmy Böhler jsou uvedeny v **Tab. 2**. [15]

Tab. 2: Metalurgické a procesní výhody drátových elektrod od firmy Böhler [16]

Metalurgické výhody	Výhody procesu
Vyrobena pro nízké rychlosti chlazení a vysoký příkon tepla	Vysoká stabilita procesu pro robotické MIG nebo jiné mechanizované procesy
Přijme více vytvrzovacích / temperovacích cyklů více vrstvami	Závaží bubnu a cívky lze široce aplikovat na hmotnost dílů
Optimalizováno pro tepelné zpracování po tisku	Rozšířená kontrola kvality zajišťuje konzistentní chování oblouku
Hutní metalurgie pro složité materiály	Optimalizovaná povrchová technologie pro dlouhé cykly, Linery zůstávají čisté, kontaktní špičky trvají déle

Tabulka 3 ukazuje slitiny, které byly zavedeny tak, aby vyhovovaly poptávce průmyslových segmentů se zaměřením na WAAM, jako je letecký průmysl, loďařství, vodní energetika. Materiály jsou k dispozici v různých průměrech (např. 1,0 a 1,2 mm) a balení (cívka a buben různých velikostí). Zvláštní formáty mohou být také vyráběny na vyžádání. V následující **Tab. 3** jsou uvedeny přídatné materiály upravené přímo pro metodu WAAM. [15]

Tab. 3: Tabulky materiálů od firmy Böhler [15]

Název produktu	Mg	Ni	Fe	C	N	O	H	V	Zr	Mn	Al	Cu	Ti	
3Dprint AM Al 2219	<0,02	-	-	-	-	-	-	-	0,18	0,35	min.	6,3	0,14	Hliníková slitina
3Dprint AM Cu 6328	-	4,5	3,5	-	-	-	-	-	-	1	9	min.	-	Slitina mědi a hliníku
3Dprint AM Ti-5	-	-	<0,15	<0,15	<0,03	0,18	<0,01	4	-	-	6	-	min.	Vysoce pevná slitina titanu

Chemické složení v %



Název produktu	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Rp 0.2	Rm	A5	
3Dprint AM 35	0,1	0,3	1,05	-	-	-	>355 MPa	470-630 MPa	>22 %	Nízkolegovaná ocel
3Dprint AM 46	0,1	1	1,7	-	-	-	>460 MPa	560-720 MPa	>22 %	Nízkolegovaná ocel
3Dprint AM 50	0,1	0,65	1,4	-	-	1,35	>500 MPa	560-720 MPa	>18 %	Nízkolegovaná ocel
3Dprint AM 62	0,1	0,65	1,6	-	0,4	1,1	>620 MPa	700-890 MPa	>18 %	Středně legovaná ocel
3Dprint AM 70	0,08	0,6	1,7	0,2	0,5	1,5	>690 MPa	770-940 MPa	>17 %	Středně legovaná ocel
3Dprint AM 80 HD	0,09	0,4	1,7	0,35	0,6	2	820 MPa	920 MPa	20 %	Středně legovaná ocel (typické mech. vlastnosti po tepelném zpracování)
3Dprint AM P22	0,08	0,5	1	2,5	1	-	>310MPa	515-690 MPa	>18 %	Středně legovaná ocel (typické mech. vlastnosti po tepelném zpracování)

Chemické složení v %

Název produktu	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	N	
3Dprint AM 2209	0,025	0,5	1,6	23	3	9	0,14	Duplexní ocel (bez tepelného zpracování)
3Dprint AM 2205	0,025	0,5	1,5	22	3	6	0,15	Duplexní ocel (tepelného zpracování žiháním)

Chemické složení v %

Název produktu	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Cu	Nb	
3Dprint AM 304L	0,02	0,5	1,7	20	-	10	-	-	Standardní austenitická nerezová ocel s nízkým obsahem uhlíku
3Dprint AM 316L	0,02	0,5	1,7	18,5	2,6	12,3	-	-	Standardní austenitická nerezová ocel s nízkým obsahem uhlíku s Molybdenem
3Dprint AM 17-4 PH	0,02	0,4	0,5	16,5	-	4,5	3,3	0,25	Martenzitická precipitačně vytvrzená nerezová ocel
3Dprint AM 15-5 PH	0,02	0,5	0,5	14,8	-	4,5	3,3	0,28	Martenzitická precipitačně vytvrzená nerezová ocel - bez feritu (v leteckém průmyslu)
3Dprint AM 410 NiMo	0,01	0,65	0,7	13	0,5	4,7	-	-	Martenzitická nerezová ocel
3Dprint AM 430	0,07	0,8	0,7	18	-	-	-	-	Feritická nerezová ocel

Chemické složení v %

Název produktu	C	Si	Cr	Mo	Nb	Fe	Ni	W	Al	Ti	
3Dprint AM 625	<0,03	<0,25	22	9	3,6	0,5	min.	-	-	-	Slitina na bázi niklu s chromem, molybdenem a niob
3Dprint AM 718	0,03	<0,1	17,5	3	5	min.	53	-	Al	Ti	Disperzní vytvrzení niklové slitiny

Chemické složení v %

4 REŠERŠE STROJŮ PRACUJÍCÍ S METODOU WAAM

Metoda WAAM je zatím ve vývoji, a tak firem zabývajících se touto problematikou není mnoho. V následujících kapitolách budou uvedeny společnosti, které experimentují s technologií WAAM nebo prodávají konečný výrobní stroj. Jednou z těchto společností je i česká firma Kovosvit MAS jejíž stroj byl vyvíjen společně s Výzkumným centrem pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT).

4.1 GEFERTEC

Firma GEFERTEX se zabývá výrobou strojů pro aditivní technologii WAAM. Zaujímá na trhu velké postavení ve vývoji metod pro výrobu kovových dílců, které jsou běžnými výrobními procesy neproveditelné. Nabízí tak nové možnosti pro konstruktéry, inženýry a firmy. Portfolio firmy nabízí sérii tří strojů obsahující řídicí jednotku SIEMENS. Buď s třemi pohybovými osami – arc603 nebo s pěti pohybovými osami – arc605 a arc405. Pět pohybových os umožňuje maximální flexibilitu z hlediska objemu dílců. Integrace volitelného frézovacího systému do konstrukce stroje zajišťuje okamžité dokončení dílců. Firma klade důraz na snadnou implantaci zákazníka do výrobního procesu a uživatelsky nejjednodušší obsluhu stroje. [17], [18]

Stroj samozřejmě obsahuje kameru pro monitorování výrobního procesu. Přístup ke stroji je velmi uživatelsky přívětivý. Nachází se na úrovni země bez přítomnosti prahu. Rolovací dveře umožňují snadný přístup k pracovnímu stolu. Tento způsob řešení je přizpůsobený pro nakládání a vykládání pomocí jeřábu. Nechybí zde ani základová deska s aktivním chlazením. Stroj je vybaven zvukotěsným pouzdem pro nejtišší výrobu, integrovanou ventilací skříně a systémem sání. Vše řízeno uživatelsky přátelským rozhraní od firmy SIEMENS. [18]

Ke stroji je možno přidat i modulární vybavení jako je:

- Monitorování teploty integrovaným pyrometrem Sensortherm.
- Obloukový chladicí systém pro lokální chlazení chladicího plynu.
- Automatický systém čištění hořáku.
- Vodě chlazený kryt inertního plynu pro materiály citlivé na kyslík. [18]

4.1.1 GEFERTEC arc603

Prvním strojem nabízený firmou GEFERTEC je tříosý stroj GEFERTEC arc603, který umožňuje výrobou kovových dílů do 3,0 m³ s maximální hmotností 3000 kg. Tento stroj je uveden na Obr. 17. [18]



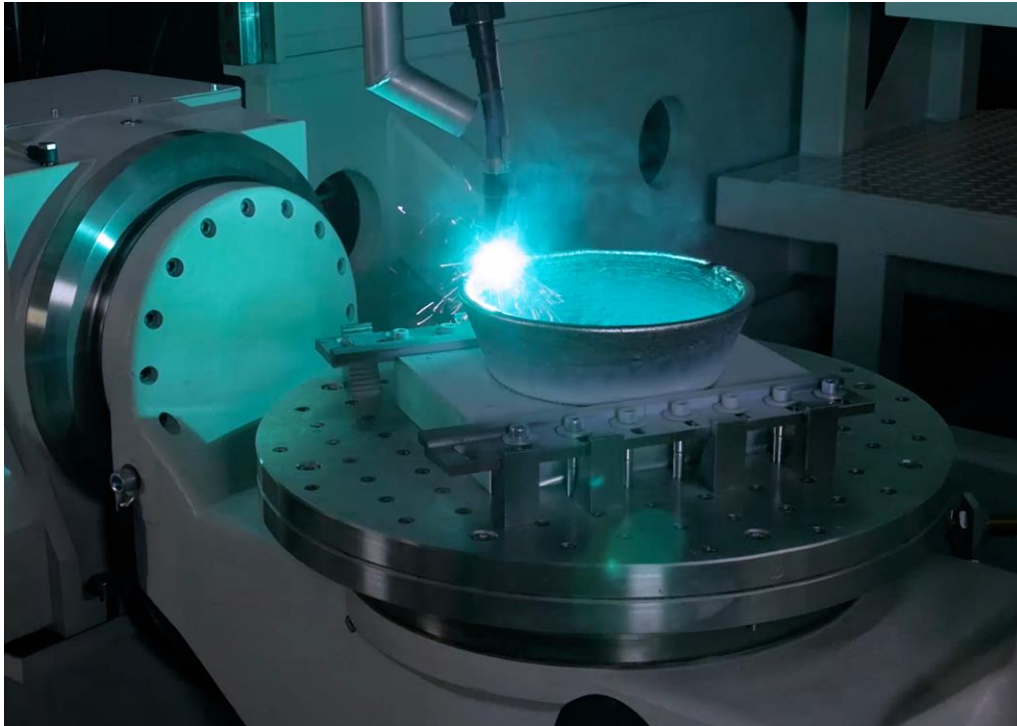
Obr. 17: GEFERTEC arc603 [18]

4.1.2 GEFERTEC arc605

Firma nabízí také 5ti osé provedení stroje. 5ti osý stroj GEFERTEC arc605 umožňuje výrobou kovových dílců do 0,8 m³ s maximální hmotností 500 kg. Čtvrtá (osa B) a pátá (osa A) osa je zajištěna otočně-sklopným stolem. Na obrázku Obr. 18. vpravo je žlutou barvou zobrazen otočně-sklopný stůl a na obrázku Obr. 19 je zobrazen příklad výroby navařovaného dílce ve stroji GEFERTEC arc605. [18]



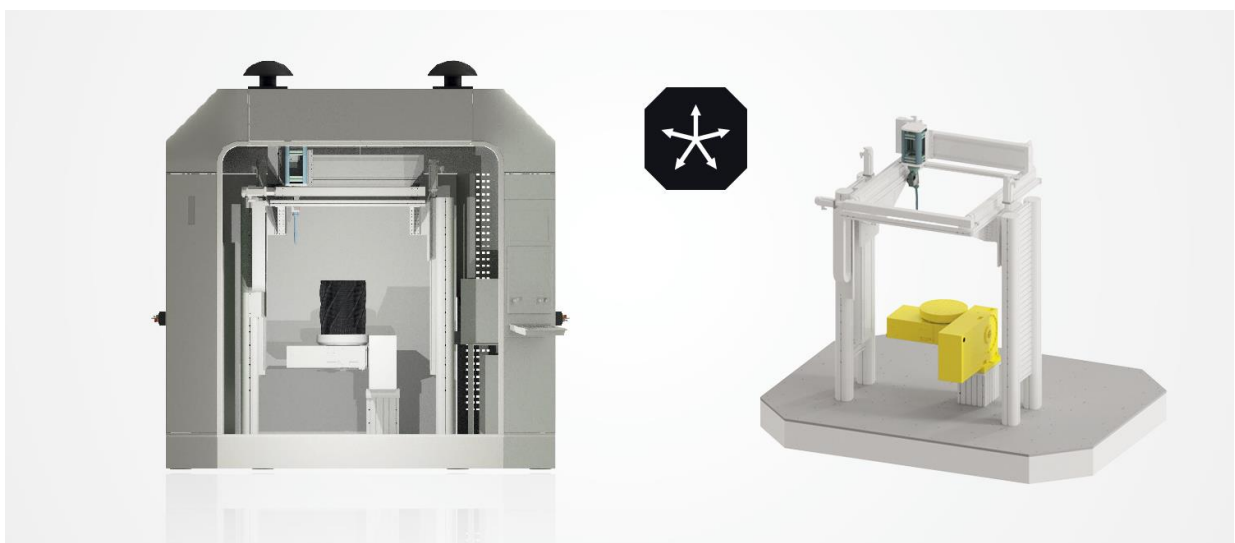
Obr. 18: GEFERTEC arc605 [18]



Obr. 19: Příklad výroby navařovaného dílce ve stroji GEFERTEC arc605 [18]

4.1.3 GEFERTEC arc405

Posledním nabízeným strojem této firmy je menší provedení předchozího stroje. 5ti osý pohyb stroje GEFERTEC arc405 umožňuje výrobou kovových dílů do 0,6 m³ s maximální hmotností 200 kg. Na obrázku **Obr. 20** je zobrazen stroj i se žlutě zvýrazněným otočně-sklopným stolem. [18]



Obr. 20: GEFERTEC arc405 [18]

4.2 KOVOSVIT MAS

Česká firma Kovosvit MAS nabízí hybridní stroj WELDPRINT MCV 5X **Obr. 21**, který v sobě kombinuje metodu WAAM a třískové obrábění. Jedná se o první stroj této koncepce v České republice. Stroj byl vyvíjen společně s Výzkumným centrem pro strojírenskou výrobní techniku a technologii (RCMT).



Obr. 21: WELDPRINT MCV 5X od firmy Kovosvit MAS [19]

Otočně-sklopný stůl umožňuje stroji pracovat v pěti osách. S implementovanou svářecí hlavou pro modifikovanou technologii MIG/MAG v konstrukci stroje dochází ke změně aditivní technologie (WAAM) na substraktivní (třískové obrábění) v řádu sekund. Otočně sklopný stůl s viditelným popisem os A a B je zobrazen na **Obr. 22**. Na obrázku je také vidět v horní části vřeteno (pro třískové obrábění) a svářecí hlava.

Zásobník na 30 nástrojů dovoluje při třískovém obrábění volbu více nástrojů bez nutnosti přerušování výrobního procesu. Samozřejmostí je zde uzavřený systém fluidního chlazení upínacího stolu.



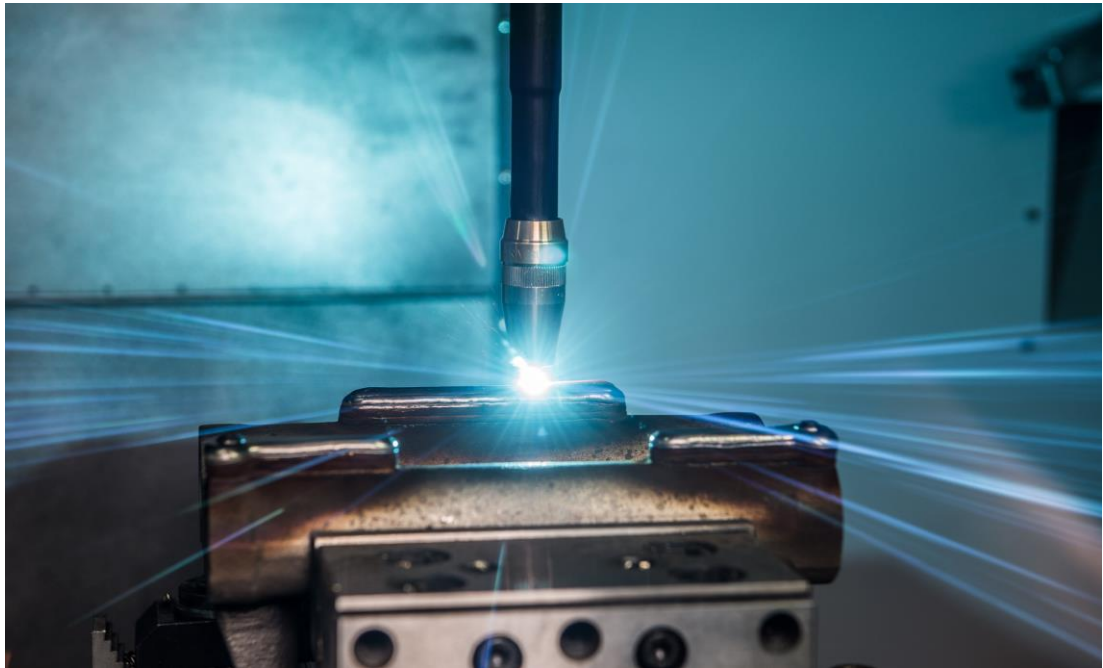
Obr. 22: Pracovní prostor stroje [19]

Další parametry stroje:

- velkoobjemovým plošným sušením a čištěním dílce vzduchem s vlastním dmychadlem,
- snímáním pracovního prostoru kamerou s visiportem a vizualizací záběru pomocí velkoplošného dotykového monitoru v kapotáži stroje,
- snímáním pracovního prostoru termokamerou pro teplotní kontrolu a analýzu,
- kapotáží s dvojitými dveřmi umožňující buď standardní práci s vizuálním pohledem obsluhy skrze bezpečnostní sklo do pracovního prostoru při operacích obrábění, nebo při uzavření druhých krycích dveří operaci navařování,
- možností záznamu procesních parametrů pro analýzu a kontrolu technologických parametrů v reálném čase (např.: poloha os, programované rychlosti, parametry aditivní technologie, číslo součásti, číslo návaru, a další) s cílem opakovatelnosti technologie či validace provedené technologie.

Více informací lze nalézt na stránkách výrobce.

Příklad navařování na stroji WELDPRINT MCV 5X je velice dobře vidět na **Obr. 23**.



Obr. 23: Ukázka navařování pomocí metody WAAM [19]

Během výrobního procesu navařování se vytváří na povrchu návaru škodlivá oxidační vrstva, kterou je nutno odstranit drátěným kartáčem jako je zobrazeno na obrázku **Obr. 24**.



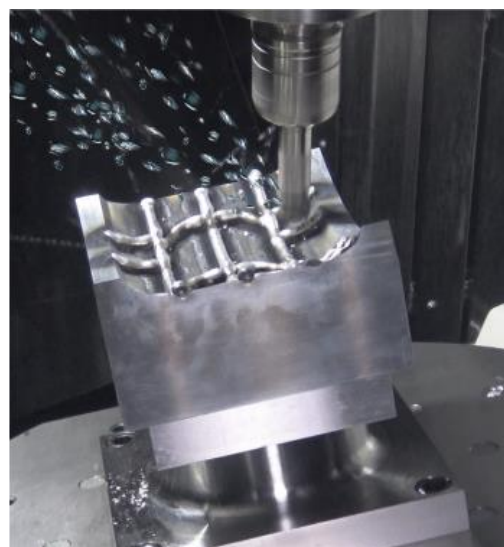
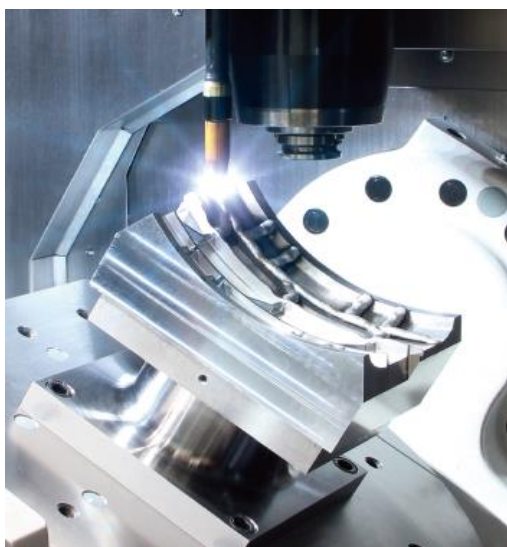
Obr. 24: Čištění dílce drátěným kartáčem [19]

4.3 Mazak

Stroj firmy Mazak **Obr. 25** s názvem VARIAXIS j-600 AM disponuje pěti navařování a obráběním v 5ti osách. Stroj dle katalogu podporuje pouze technologii svařování MIG. Dále je vybaven sklopným vřetenem s osou otáčení B a osou stolu C. Stroj je vhodný pro širokou škálu aplikací, včetně výroby a opravy leteckých dílů, forem **Obr. 26** lisovacích nástrojů a součástek pro vrtání, oleje tak, aby si tyto části zachovaly svou původní odolnost a odolnost proti opotřebení. [20], [21]



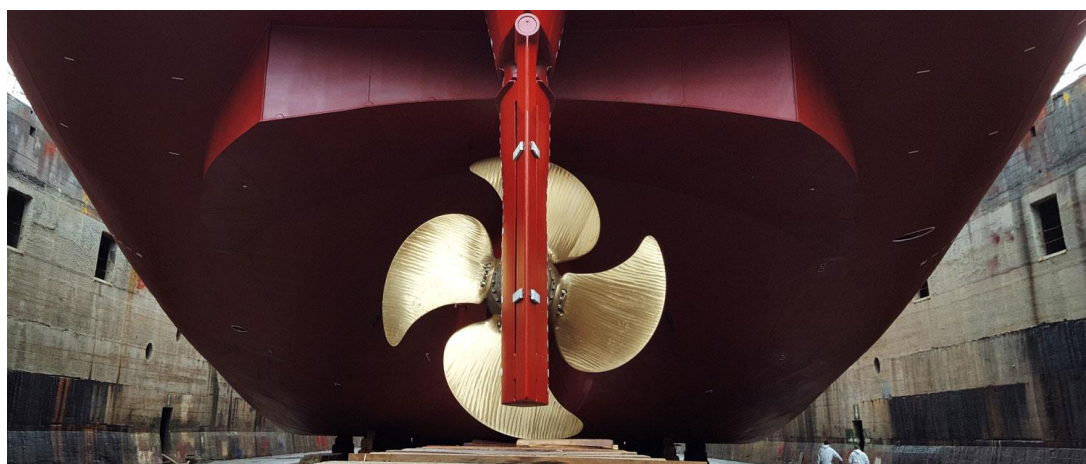
Obr. 25: VARIAXIS j-600 AM [21]



Obr. 26: Příklad navařování a následného obrábění formy pro pneumatiky [21]

4.4MX3D

MX3D je Nizozemská firma sídlící v Amsterdamu, která se specializuje na vývoj aditivní technologie WAAM pomocí robotů. Cílem firmy je automatizovaná a autonomní výroba s využitím umělé inteligence za účelem strojového učení, a tím vylepšovat robotické úkony. Nyní firma poskytuje služby v oblasti architektury, těžkém lodním průmyslu a umění. Vizí společnosti je vytvářet lehké konstrukce jako jsou mosty, kompletní stavby nebo optimalizované lodě (lodní šroub na **Obr. 27**) [22]



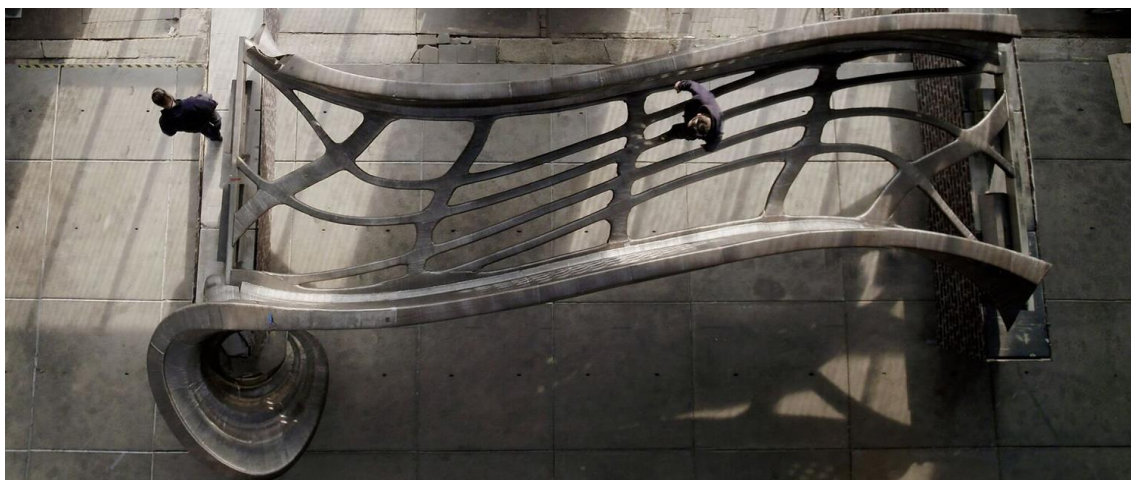
Obr. 27: Vytisknutý lodní šroub [22]

Základem technologie firmy je standardní robot, standardní svařovací zdroj a software MX3D. Příklad robota od firmy ABB, který postupným navařováním vytváří most je uveden na **Obr. 28**. Firma i tímto příkladem říká, že velikost dílců vytvořených metodu WAAM je prakticky neomezená. Materiály zde využívané jsou svařitelné kovové slitiny, jako je nerezová ocel, ocel, hliník, bronz, inconel a jiné vysoce odolné oceli. [22]



Obr. 28: Robot od firmy ABB navařující vrstvy mostu [22]

Obr. 29 hotový výrobek mostu. Most je umístěn přes kanál ve městě Amsterdam. Dokládá to využitelnost metody WAAM v praxi.



Obr. 29: Most vytvořený metody WAAM [23]

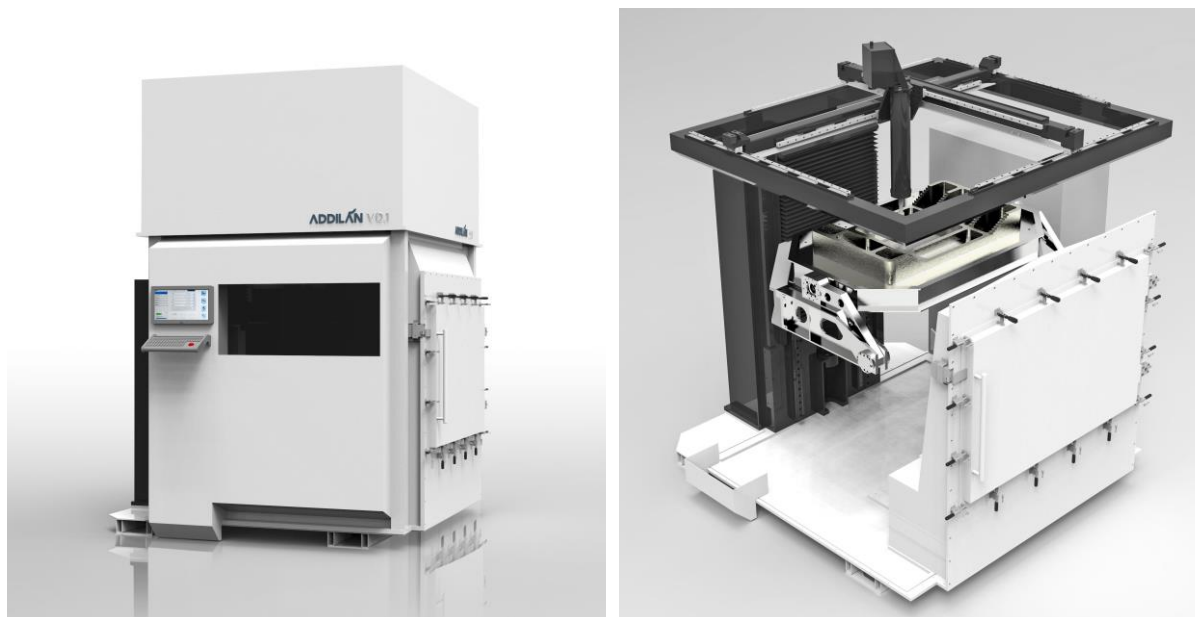
Na své si přijdou i milovníci umění. Fotka sochy nazvané Butterfly Screen je uvedena níže.



Obr. 30: Socha nazývána Butterfly Screen [24]

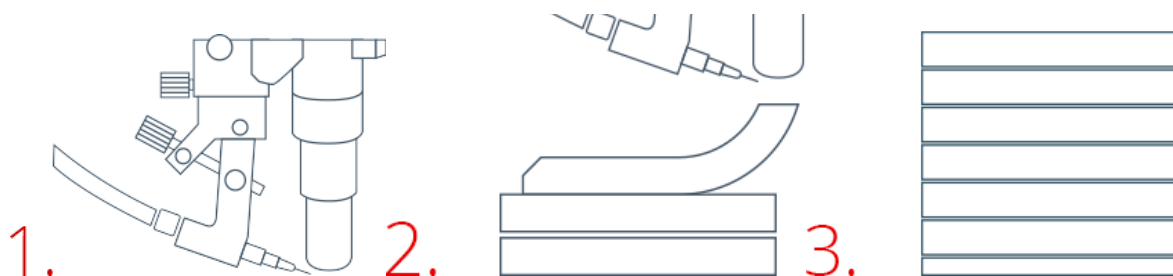
4.5 ADDALIAN

Začínající firma ADDALIAN se specializuje na metodu WAAM pracující s technologií navařování TIG. Jejich stroj je ve fázi vývoje. Předností stroje by mělo být vytváření dílců výšky až 5 metrů s rychlostí nanášení materiálu až 6 kg/hod. Stroj by měl být také vybaven vlastním CNC řízením, řízením procesu, systémovým sledováním procesu a interním prostředím. Koncept stroje je na **Obr. 31**. [25]



Obr. 31: Koncept stroje firmy ADDALIAN [25]

Na níže uvedeném **Obr. 32** je koncept pokládání materiálu metodou TIG dle koncepčního návrhu firmy.



Obr. 32: WAAM metoda dle firmy ADDALIAN [25]

4.6 3D HYBRID

Snadná a rychlá úprava stroje na 3D tisk metodou WAAM pomocí hlavice **Obr. 33** od firmy 3D HYBRID. Upevnění hlavice prostřednictvím upínacího kuželu stejné jako u upnutí u konvenčních strojů. Lze tisknout slitiny hliníku, nerezové oceli, slitin na bázi niklu a další. Slitiny jsou k dispozici ve formě drátu. [26]

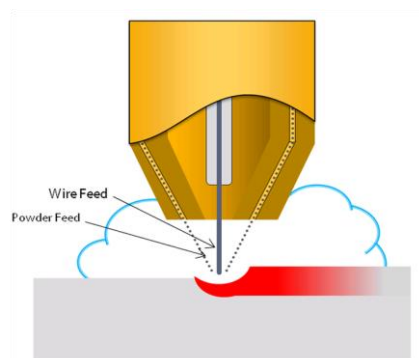


Obr. 33: Hlavice firmy 3D HYBRID [27]



Obr. 34: Příklad obrobeneho a neobrobeneho dílce [27]

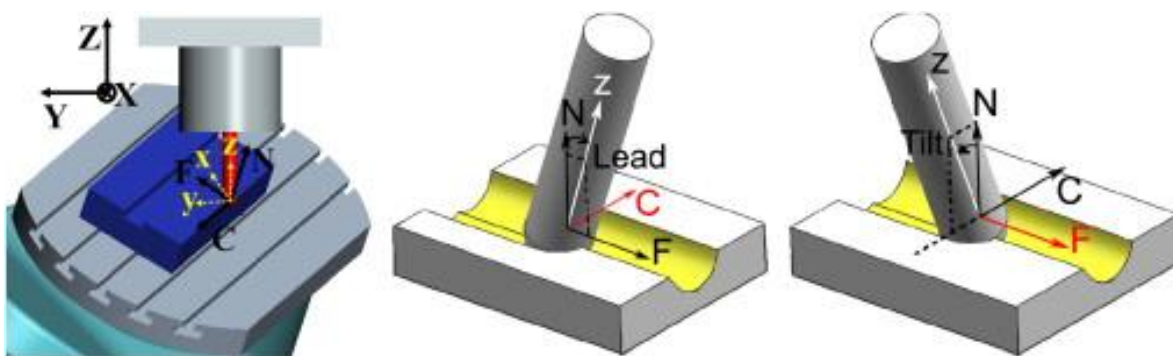
Společnost 3D hybrid vlastní patent na metodu zvanou Wire+Powred **Obr. 35**. Je to koo-depozice spojení nízkouhlíkového standartního drátu s přísadou granulovaného materiálu. Umožňuje tak tisk kompozitních struktur atd. Příklad výtisku hlavicí společnosti 3D HYBRID je na **Obr. 34**. Obrázek je velice dobrým příkladem vytištěné a následovně obrobene struktury s minimem odpadního materiálu. [26]



Obr. 35: Zjednodušené zobrazení patentu Wire+Powred [26]

5 SHRUTÍ REŠERŠE A UPŘESNĚNÍ ZADÁNÍ PRO KONSTRUKCI

Vzhledem k tomu, že metoda WAAM je rozvíjena relativně krátkou dobu (cca 10 let), existuje řasa dosud nevyřešených otázek v oblasti vhodného natavení a řízení procesních parametrů. Výzkumem a vývojem vhodných technologických parametrů navařování pro potřeby aditivní a hybridní výroby se zabývá v současnosti více výzkumných týmů a výrobců. V rámci výzkumných projektů ve spolupráci s průmyslem řeší návrh procesních parametrů WAAM také tým pracovníků Ústavu výrobních strojů a zařízení při ČVUT. Technologických parametrů, které ovlivňují proces navařování je velké množství. Mezi základní parametry patří: rychlost posuvu drátu, proud navařování, napětí navařování, korekce elektrického oblouku, rychlost posuvu hořáku vůči základu, vzdálenost hořáku od základu, zdrojový navařovací drát, složení ochranného plynu, množství ochranného plynu a řada dalších parametrů. Mezi významné parametry ovlivňující tvar a kvalitu provaření kořene návaru se základnou nebo s předchozím návarem patří rovněž prostorové úhly, které zaujímá osa hořáku, resp. osa tavitelné elektrody (navářovacího drátu) k základu. Jedná se o úhel vlečení směrem k tečně trajektorie pohybu hořáku, označovaný jako LEAD a úhlu naklonění hořáku v příčné rovině k tečně trajektorie označovaný jako TILT.



Obr. 36: Znáznornění pohybů LEAD a TILT [28]

Pro možnost vytváření verifikovaných procesních technologických parametrů je potřeba zařízení nebo stroj, který umožňuje ideálně souvislé řízení polohy hořáku (resp. polohy a směru elektrického oblouku) vůči základu. Jednou z možností je využití strojů z nabídky na trhu (viz kapitola číslo 4). Takovéto profesionální stroje jsou však určeny pro relativně velké a prostorově náročné dílce, jsou přiměřeně drahé (12-25 mil. Kč), složité pro obsluhu a údržbu a projektově náročné. Pokud by se zařízení používalo pouze pro návrh, ladění a ověřování dílčích

procesních parametrů jednotlivých návarů, nebo skupin návarů (různé kombinace návarových housenek a návarových bodů), bylo by potom by ekonomicky, prostorově i funkčně vhodnější využít jednoúčelové zkušební zařízení, resp. stand. Diplomová práce řeší návrh právě takového jednoúčelového navařovacího stand, resp. zkušební stanice, která umožní navrhovat a ověřovat procesní parametry metody WAAM. Parametry na této navrženém zkušební stanici mohou být následně využity ve složitějších strukturách dílců, kde je již třeba řešit tvarovou náročnost dílce a kombinaci různých dříve odladěných a připravených procesních parametrů.

5.1 Upřesněné zadání pro konstrukci

Parametry, které ovlivňují typ konstrukce zkušební stanice jsou:

- svařovací technika,
- výběr stroje,
- software,
- umístění v laboratořích,
- co chceme zkoumat?

5.1.1 Svářecí technika

V této kapitole je představena svářecí technika od firmy Fronius, která tvoří základní součást zkušební stanice. Volba byla provedena na základě zkušeností z předcházejícího výzkumu s využitím svařovací techniky z původní testovací stanice pro tříosé navařování metodou WAAM.

Svařovací zdroj

Modulární svařovací zdroj TPS 320i pro svařování technologií MIG / MAG je plně digitalizovaný invertorový zdroj řízený mikroprocesorem. Možnost připojení, modulární konstrukce a potenciál systémových doplňků zajišťují vysoký stupeň flexibility tzn. přizpůsobení konkrétní situaci. [29]

Proces svařování řídí centrální řídicí a regulační jednotka spolu se signálový procesorem. Jedná se o řízení se zpětnou vazbou, kde jsou během řezného procesu průběžně sbírána

aktuální data (veškerá zařízení komunikují s napájecím zdrojem). Řídicí algoritmy vyhodnocují získaná data a na základě výsledků okamžitě upravují stav zařízení dle cílových požadavků. Tím je docíleno přesného svařovacího procesu. [29]



Obr. 37: Svařovací zdroj TPS 320i od firmy Fronius [30]

Chladicí jednotka

Přídavná chladicí jednotka FK 5000 určená pro chlazení hořáku se využívá pro aplikace v robotickém svařování, kde je nutné z důvodu délky časové operace chladit hořák. [29]



Obr. 38: Chladicí jednotka FK5000 od firmy Fronius [31]

Podavač drátu

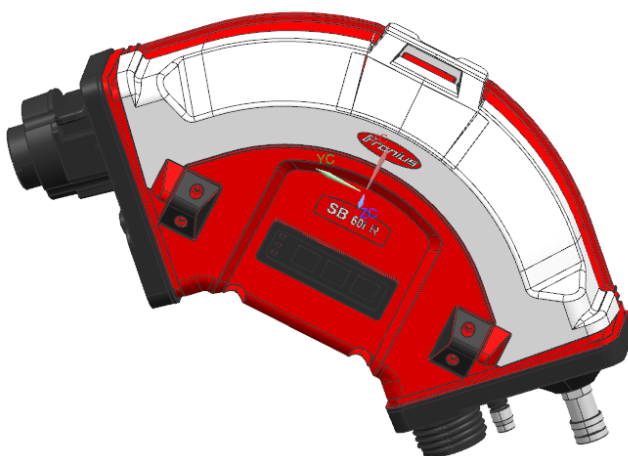
Podavač drátu WF 25i R je vybavený dynamickými bezkartáčovými třífázovými krokovými motory zajišťující přesné podávání drátu. [29]



Obr. 39: Podavač drátu WF 25i R od firmy Fronius [30]

SplitBox

Zařízení nazvané SplitBox SB 60i R slouží pro sdružování svařovacích médií v automatickém svařování MIG / MAG a je speciálně navrženo pro montáž na roboty. [31]



Obr. 40: Model – Splitbox SB 60i R

Svařovací hořák

Robotový modulární svařovací hořák PushPull – Robacta Drive TPS/i je nejmenší svařovací hořák na světě. Byl navržen k maximálnímu přístupu ke svařovaným dílům a zvýšení přesnosti TCP svařovacího hořáku. Modulární konstrukce zjednodušuje manipulaci v případě servisního zásahu. Hořák může být chlazen plynem nebo vodou. Pohyb drátu zajišťuje třífázový krokový

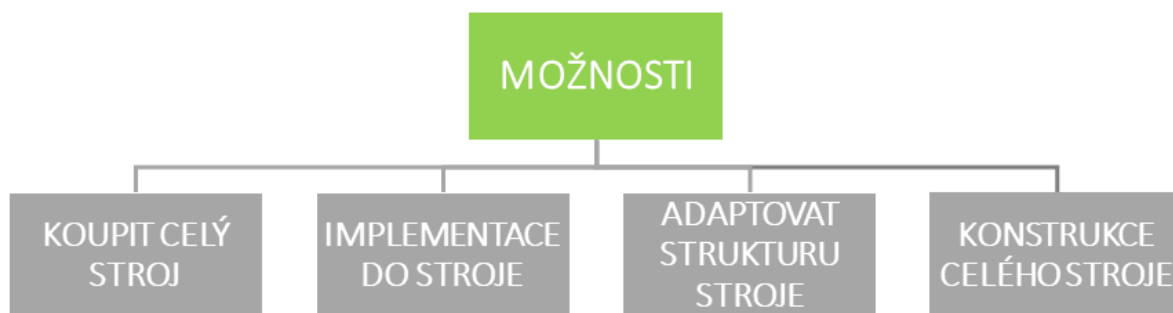
motor pro plynulý posuv rychlostí až 25 m/min prostřednictvím dvou podávacích kladek. Integrovaný přesný otočný snímač polohy snímá pohyby drátu a na základě výstupních dat upravuje otáčky třífázového krokového motoru pro konstantní posuv. [32]



Obr. 41: Model svařovacího hořáku Robacta Drive

5.1.2 Výběr stroje

Pro pohyb hořáku se používají dva typy mechanických pohybů. První jsou stroje využívající kartézský souřadný systém (CNC frézky) nebo stroje se sférickým souřadným systémem. V následujícím **Obr. 42** jsou znázorněny možnosti volby stroje.



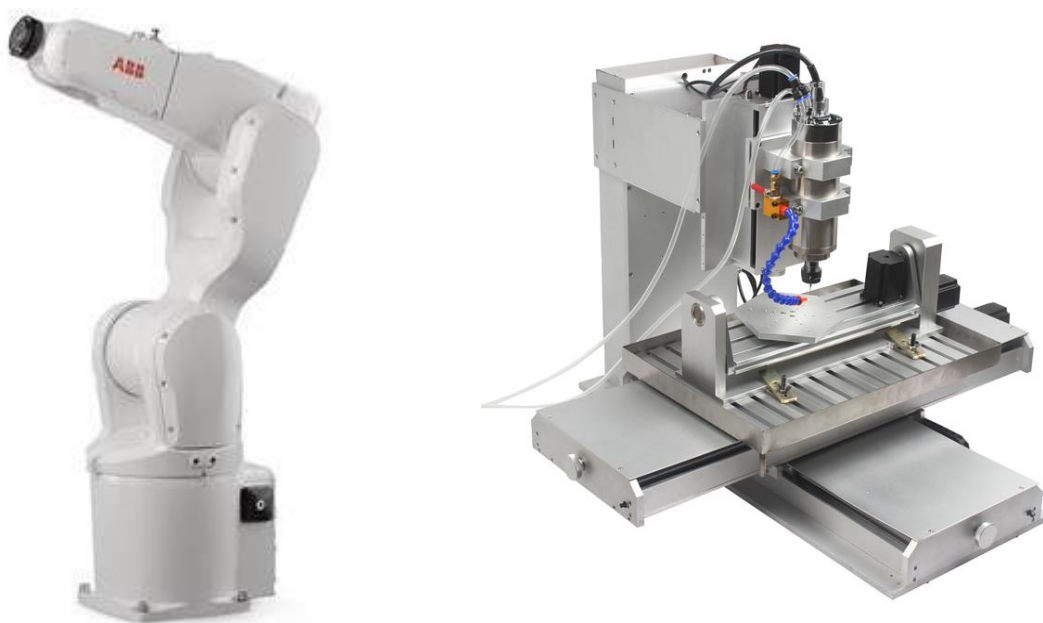
Obr. 42: Schéma možností volby stroje

Každá možnost má svoje pozitiva i negativa. Tyto možnosti jsou porovnány v **Tab. 4**.

Tab. 4: Porovnání možností volby stroje

	cena stroje	náročnost	cena konstrukce	výsledek
koupit celý stroj	●	● ● ● ● ●	● ● ● ● ●	9
implementace do stroje	● ● ●	● ● ●	● ● ●	9
adaptovat konstrukci stroje	● ● ● ●	● ●	● ●	8
konstrukce celého stroje	● ●	●	●	4

Z výsledné tabulky plyne, že nejvýhodnějším řešením je koupit celý stroj nebo implementovat metodu WAAM do stroje. Koupě celého stroje je zcela zbytečná pro výzkum (cena stroje pracující s metou WAAM je příliš vysoká). Tato možnost se tedy vylučuje. Jelikož pro tento výzkum není volný žádný stroj, možnost implementace do stroje se rovněž vylučuje. Poslední možností je tedy koupit cenově výhodnější stroj jako je například stolní frézka nebo angulární robot malých rozměrů a adaptovat jeho strukturu pro metodu WAAM.



Obr. 43: Porovnání angulárního robota a stolní 5ti osé gravírovací frézky [33], [34]

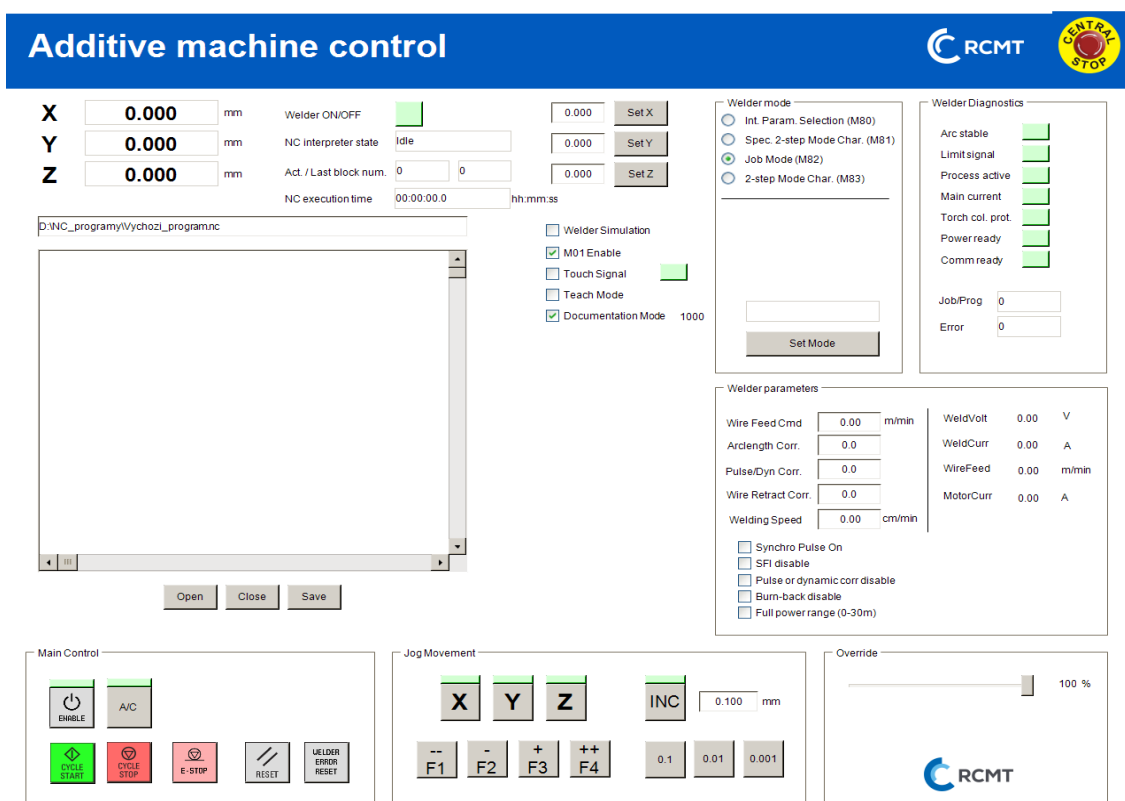
Na základě zkušeností z výzkumu je nakonec zvolena možnost koupě levné varianty stolní gravírovací frézky, která je uvedena vlevo na **Obr. 43**.. Z důvodu bezpečnosti na pracovišti

je zkonstruováno i krytování stroje se zabudovaným řídicím systémem a prvky pro rozhraní člověk-stroj. Konstrukce 5ti osé zkušební stanice je popsána v další kapitole.

5.1.3 Software

V oblasti řídicích systémů pro CNC stroje působí firmy SIEMENS, HEINDENHAIN, MAPPS, MITSUBISHI a FANUC. Jedná se o velmi finančně nákladné systémy. Z hlediska využití ve výzkumu se tato varianta jeví jako nevýhodná a zcela zbytečná pro zkušební stanici s metodou WAAM. Proto bylo zvoleno levnější řešení od firmy Beckhoff. Řídicí systém TwinCAT třetí generace od jmenované firmy je nástroj pro tvorbu automatizačních systémů na bázi počítače, který řeší komplexní úlohy v oboru průmyslové automatizace.

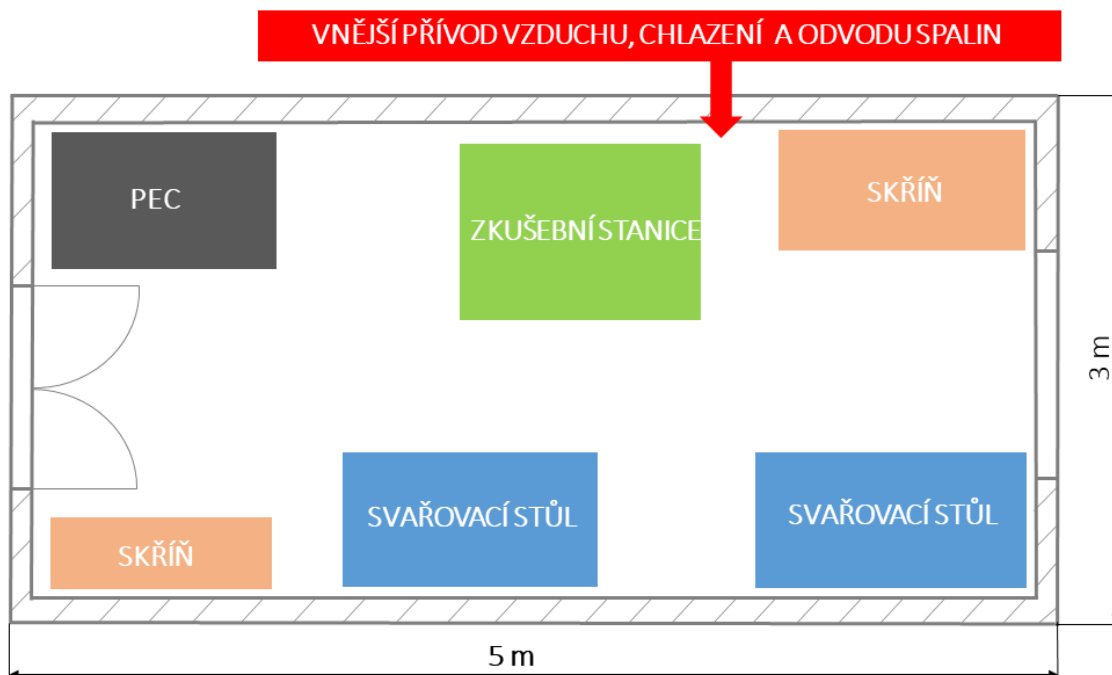
Program pro řízení zkušební stanice s názvem RCMT Additive machine control je vyvíjen firmou RCMT speciálně pro metodu WAAM a je postaven na poslední generaci softwaru TwinCAT od firmy Beckhoff. Komunikace mezi programem a obsluhou je zprostředkována za pomoci řídicího systému s integrovaným dotykovým panelem CP2219-0020 zabudovaným v konstrukci krytování.



Obr. 44: Ukázka programu RCMT Additive machine control

5.1.4 Umístění v laboratořích

Zkušební stanice je umístěna v laboratoři na místě původní zkušební stanice. Nachází se zde vnější přívod chlazení, vzduchu a odsávání spalin. Znamená to, že u zkušební stanice byla řešena pouze příruba pro odsávání průměru 80 mm a napojení chlazení, popřípadě napojení stlačeného vzduchu. Na zjednodušeném plánu viz. **Obr. 45** je vidět umístění zkušební stanice.



Obr. 45: Poloha umístění zkušební stanice v laboratoři svařování

5.1.5 Co chceme zkoumat

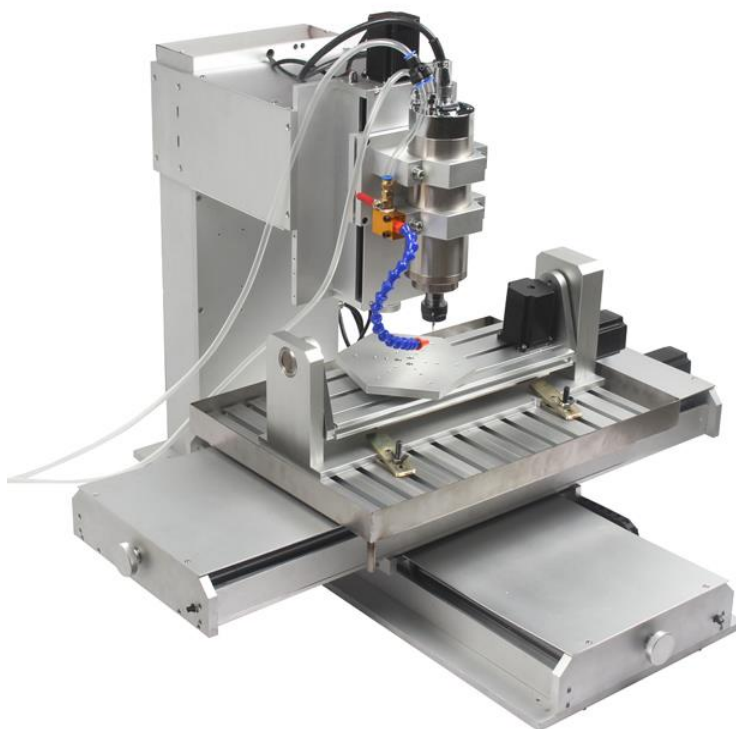
Na zkušební stanici se budou provádět zkoušky parametrů ovlivňující tvar a kvalitu kořene návaru se základnou. Jedná se o úhly navařování LEAD a TILT, které byli popsány v úvodu kapitoly. Pro tento účel bude sloužit 5ti osá zkušební stanice, kde se budou provádět tyto testy v pěti osách.

6 VLASTNÍ KONSTRUKCE

Tato část práce se zabývá konstrukčním řešením testovací stanice pro 5ti osé navařování metodou WAAM. Konstrukční řešení spočívalo v adaptaci 5ti osého stolního gravírovacího stroje CNC 6040, konstrukci krytování, výběru hardwaru, softwaru a dalších použitých komponent na základě předchozích zkušeností s vývojem metody WAAM ve firmě RCMT. V následujících podkapitolách jsou uvedeny jednotlivé kroky koncepčních návrhu tak, aby zohledňovaly požadovaná kritéria (přizpůsobení pro metodu WAAM). Po optimalizaci koncepčních variant byl vytvořen konečný návrh, který zahrnuje vytvoření 3D modelu a výkresovou dokumentaci. Veškerý návrh je prováděn v CAD programu NX 10 od firmy SIEMENS. Výstupem je konstrukce a oživení 5ti osé testovací stanice pro metodu WAAM.

6.1 Adaptace 5ti osé stolní gravírovací frézky CNC 6040

Za účelem konstrukce testovací stanice byla vybrána 5ti osá stolová gravírovací frézka CNC 6040 od firmy ChinaCNCzone. Frézka je určená pro gravírování kovu, dřeva a plastu. Přímočarý pohyb v osách X, Y, Z a rotační pohyb v osách A, B je pomocí krokových motorů. V zadní části stojanu je zakomponována veškerá elektronika pro řízení pohybů stroje.



Obr. 46: 5-ti osá stolová gravírovací frézky CNC 6040 [34]

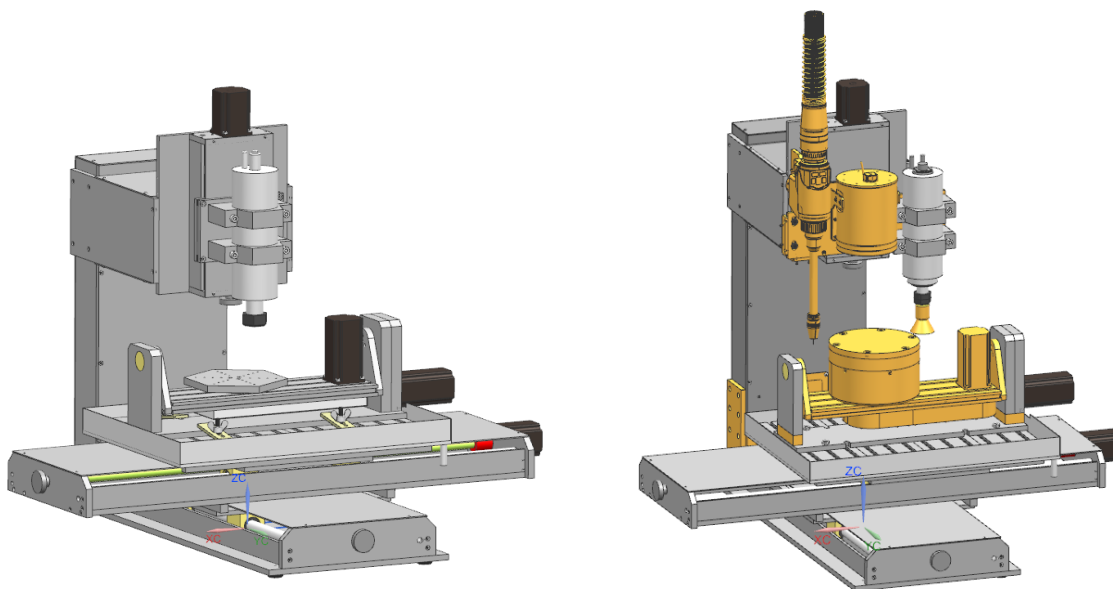
Přizpůsobení konstrukce frézky

Prvním krokem bylo vytvoření modelu frézky, který se následně upravoval. Na **Obr. 47** je vidět původní konstrukce frézky a současná konstrukce frézky. Změny jsou zobrazeny oranžovou barvou.

Upravené nebo dohotovené části konstrukce:

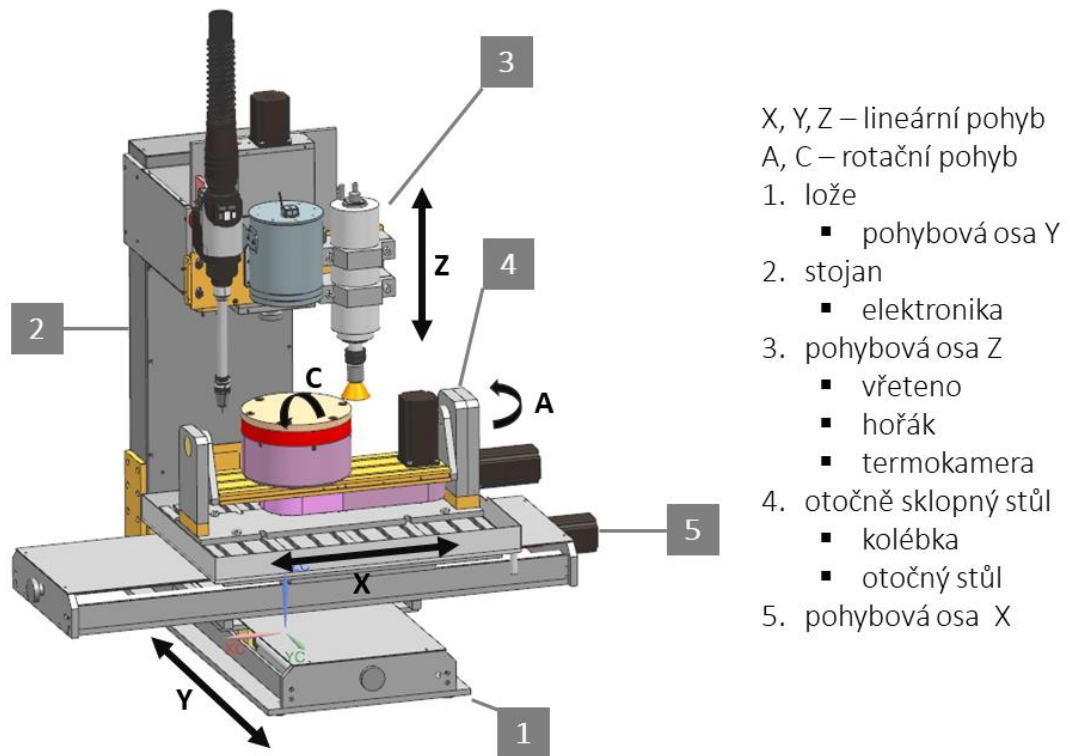
- Osa Z musela být upravená z důvodu zakomponování hořáku a termokamery.
- Celkové zvýšení stojanu.
- Nová konstrukce otočného stolu pro požadavky metody WAAM.
- Zvýšení kolébky.
- Výměna původního řídicího systému za nový – Beckhoff.

V následujících podkapitolách jsou popsány konstrukční úkony, které vedli k adaptaci 5ti osé gravírovací frézky do podoby polohovacího zařízení.



Obr. 47: Porovnání původní konstrukce frézky se současnou konstrukcí

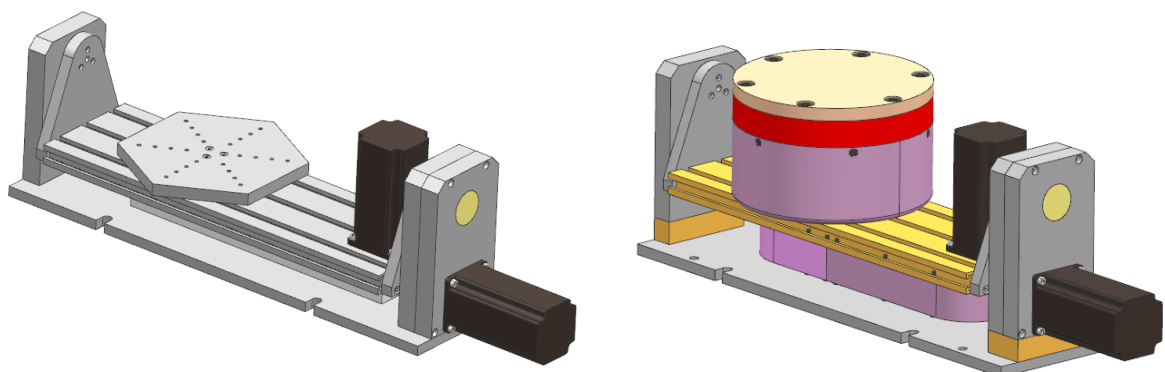
Na Obr. 48 jsou popsány jednotlivé části stroje a pohyby v osách X, Y, Z, A a C.



Obr. 48: Popis částí frézky

6.1.1 Výběr varianty otočného stolu a její konstrukce

Původní konstrukce otočného stolu byla nahrazena zcela novou konstrukcí přizpůsobenou pro metodu WAAM. Rotační stůl musí obsahovat rotační přívod chlazení a rotační zemnicí kontakt. Konstrukce je omezena maximálními rozměry stolu. Jedná se o válcovitý tvar průměru 180 mm a výšky 112 mm. Tyto parametry musela splňovat konstrukce.



Obr. 49: Porovnání původní konstrukce s novou konstrukcí otočně sklopného stolu

Varianty otočného stolu

První variantou bylo najít hotový výrobek, který by splňoval rozměrové a konstrukční požadavky. Krokem číslo jedna bylo nalezení výrobce vhodného rotačního zemnicího kontaktu. Jedinou možnou variantu nabídla firma MERIDIAN LABORATORY. Jednalo se výrobek s označením MC-500, který je vhodný pro přenos proudu do 500A viz. **Obr. 50**. Cena nabídky se pohybovala kolem 35 000 Kč.



Obr. 50: Rotační zemnicí kontakt od MERIDIAN LABORATORY [35]

Druhým krokem bylo nalezení průchozího rotačního chlazení. Jedinou firmou na trhu, zabývající se touto variantou, je firma HENNLICH HYDRO-TECH. Po několika konzultacích a přednesení požadavků byl vypracován návrh průchozího rotačního přívodu kapaliny, do kterého měl být vložen rotační zemnicí kontakt od firmy MERIDIAN LABORATORY. Nabídka nesplňovala požadavky na maximální rozměry konstrukce otočného stolu. Jelikož se jednalo o výrobu na zakázku, odpovídalo tomu i pořizovací cena, která se pohybovala kolem 150 000 Kč.

Tyto varianty byly zamítnuty z důvodu:

- nesplnění požadavků zástavbových rozměrů rotačního kontaktu a rotačního přívodu chlazení;
- vysoké ceny;
- nevyhovujícího konstrukčního řešení;
- doby dodání rotačního přívodu chlazení (přibližně rok od objednání).

Výchozí variantou byl návrh a konstrukce těchto variant. Inspirací pro návrh rotačního zemnicího kontaktu byl zemnicí magnet rotační 600 A **Obr. 51**. Rotační zemnicí kontakt pracuje

na principu kluzného spoje, kde je kluzný kontakt je přitlačován kuželovou pružinou. Konstrukční návrh je vidět ve výkresové dokumentaci **ASM_000004535**.



Obr. 51: Zemní magnet rotační 600A [36]

Při návrhu rotačního kontaktu se vycházelo ze zasláné dokumentace firmy HENNLICH HYDRO-TECH. Konstrukční návrh je znázorněn ve výkresové dokumentaci **ASM_000004535**. Celkové shrnutí parametrů konstrukce je uvedeno v **Tab. 5**.

Tab. 5: Parametry konstrukce

Co navrhnout?	Co koupit?	Co ponechat?
Zemní kontakt	Pojistnou matici	Řemenice
Chladicí deska průměru 80 mm	Ložiska	Řemen
Hřídel (přiz. původní řemenici)	Vlnovou pružinu	Napínací mechanismus
Uložení ložisek	Rotační těsnění	Základna otočného stolu
Rotační přívod chlazení		Válcovou pružinu ze zem. kont.
Krytování otoč. stolu		
Vedení vnější části rot. přívodu		
Krytování kolébky		

Konstrukce vybrané varianty

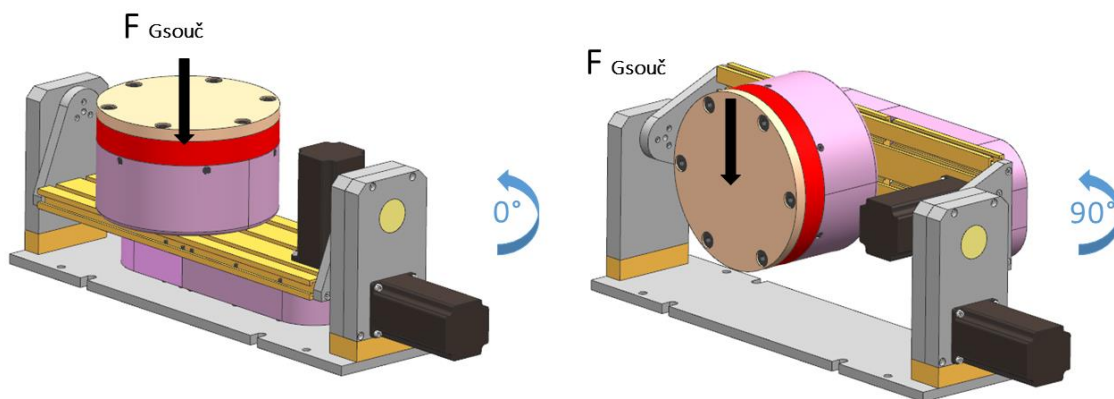
V této části jsou uvedeny výpočty (zatížení otočného stolu, ložiska, rotační těsnění), zvolené komponenty pro konstrukci otočného stolu a dílce konstrukce. Komponenty, u kterých nejsou uvedeny výpočty, jsou voleny dle doporučení výrobce. Výsledný návrh konstrukce otočného stolu je na výkrese **ASM_000004535**. Vyrobené dílce kromě chladicí desky, návarné destičky a tištěných dílců jsou vyrobeny firmou Aviko Praha.

Výpočet zatížení

Zatížení, které působí na otočný stůl je vyvíjeno vlastní vahou stolu a maximální hmotnosti navařeného materiálu, který byl stanoven na 10 kg. Hmotnosti dílců otočného stolu jsou zjištěny z modelů součástí vytvořených v programu Siemens NX10. Výpočet zatížení je podle vzorce $F_{G_{\text{souč}}} = m_{\text{souč}} \cdot g$ [N]. Tíhové zatížení $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ a $m_{\text{souč}}$ jsou hmotnosti součásti odečtené z modelu [kg]. Síly jsou zobrazen v **Tabulka 1**.

Tabulka 1: Tabulka přehledu dílů a jejich zatížení

Součást	Zkratka hmotnosti	Hmotnost dílu [kg]	Zkratka tíhové síly	Tíhová síla [N]
Navařený dílec	m_{dil}	10	$F_{G_{\text{dil}}}$	98,1
Návarná deska	m_{des}	2,3	$F_{G_{\text{des}}}$	22,6
Chladicí deska	m_{ch}	4,7	$F_{G_{\text{ch}}}$	46,1
Hřídel	m_{h}	0,4	$F_{G_{\text{h}}}$	3,9
Příruba	$m_{\text{při}}$	0,2	$F_{G_{\text{při}}}$	2
Rotační část – přívodu kapaliny	m_{rot}	0,7	$F_{G_{\text{rot}}}$	6,9
Svěrné pouzdro	m_{sp}	0,15	$F_{G_{\text{sp}}}$	1,5
Velká řemenice	$m_{\text{vř}}$	0,3	$F_{G_{\text{vř}}}$	2,9



Obr. 52: Natočení kolébky o 0° a 90°

Výpočet celkového zatížení působící na otočný stůl

Výpočet celkového zatížení působícího na otočný stůl je proveden ve dvou základních polohách. Při natočení kolébky v 0° a 90° ve směru osy A. Na **Obr. 52** jsou tyto směry zakresleny.

Tíhové zatížení od součástí působící na uložení otočného stolu

$$F_{G_{souč}} = F_{G_{dil}} + F_{G_{des}} + F_{G_{ch}} + F_{G_h} + F_{G_{při}} + F_{G_{rot}} + F_{G_{sp}} + F_{G_{vř}} \quad (6.1)$$

$$F_{G_{souč}} = 98,1 + 22,6 + 45,1 + 3,9 + 2 + 6,9 + 1,5 + 2,9 \\ = 183 \text{ N}$$

0° naklonění kolébky – silové zatížení v axiálním směru osy C

Vypočtené zatížení určuje volbu ložiska pro osy C – axiální směr.

$$F_{a0} = F_{G_{souč}} = 183 \text{ N} \quad (6.2)$$

0° naklonění kolébky – silové zatížení v radiální směru osy C

Jelikož při výrobním procesu nepůsobí vnější síly jako u třískového obrábění, proto silové zatížení v radiálním směru je rovno nule.

$$F_{r0} = 0 \text{ N} \quad (6.3)$$

90° naklonění kolébky – silové zatížení v axiálním směru osy C

Jelikož při výrobním procesu nepůsobí vnější síly jako u třískového obrábění, proto silové zatížení v axiálním směru při naklonění kolébky o 90° rovno nule.

$$F_{a90} = 0 \text{ N} \quad (6.4)$$

90° naklonění kolébky – silové zatížení v radiální směru osy C

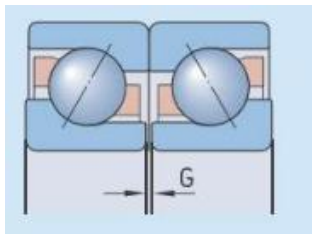
Jelikož při výrobním procesu nepůsobí vnější síly jako u třískového obrábění, proto silové zatížení v radiálním směru je rovno nule.

$$F_{r90} = F_{G_{souč}} = 183 \text{ N} \quad (6.5)$$

Volba ložisek

Firma SKF nabízí párovaná ložiska s kosoúhlým stykem s lehkým GA, středním GB a těžkým přepětím GB. První variantou byla párovaná ložiska se středním předpětím **7205 BECBP** s uložení do „O“. Dle výpočtů byla ložiska velice předimenzovaná a na základě komunikace

s firmou SKF byla vybrána univerzálně párovaná nerozebíratelná jednořadá ložiska s kosoúhlým stykem s označením **7205 BEGAP**. Jedná se o ložiska s lehkým předpětím s uložením do „O“, která budou zachytávat axiální a radiální síly.



Obr. 53: Předepjetí párovaných ložisek uložených do "O" [37]

Tab. 6: Hodnoty lehkého předepjetí párovaného ložiska 7205 BEGAP [37]

Parametr	Zkratka	Hodnota	Jednotka
Rozměry vnitřního průměru ložiska	d	18 - 30	mm
Min. a max. rozměry předpětí	-	+4 a -4	μm
Maximální síla předpětí	$F_{\text{MAX_před}}$	120	N

Výběr byl proveden v závislosti na komunikaci s firmou SKF, typu uložení a jeho požadované přesnosti a tuhosti. Jelikož se jedná o proces navařování není požadována velká přesnost.

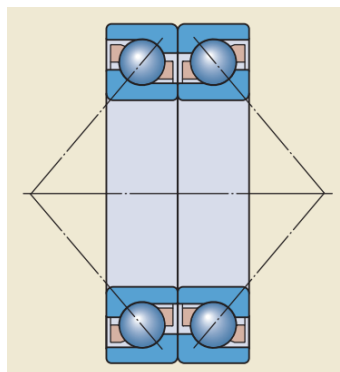
S ohledem na velmi malé zatížení ložisek v poměru k jejich dynamické únosnosti ($C / P = 148,6$) se zvolila ložiska s lehkým předpětím GA. Hodnota případného předpětí se pak jako vnitřní síla přidává do výpočtu teoretické trvanlivosti ložisek a s ohledem na tuto trvalou vnitřní sílu budou mít předepjatá ložiska nižší životnost než ložiska nepředepnutá.

Tab. 7: Základní parametry ložiska 7205 BECBP [37]

Parametr	Zkratka	Hodnota	Jednotka
Základní dynamická únosnost	C	14 800	N
Základní statická únosnost	C_0	9 300	N
Mezní únavové zatížení	P_u	400	N
Vnitřní průměr ložiska	d	25	mm
Vnější průměr ložiska	D	52	mm
Výška ložiska	B	15	mm



Obr. 54: Ložisko kuličkové jednořadé s kosoúhlým stykem [38]



Obr. 55: Uložení ložisek do "O" [39]

Únosnost ložisek montovaných ve dvojicích

Pro ložiska montovaná v kontaktu vedle sebe platí následující hodnoty dynamická únosnost pro standardní ložiska v libovolném uspořádání a ložiska SKF Explorer montovaná záda k sobě (do „O“).

$$C = 1,62 \cdot C_{\text{jednotlivého ložiska}} = 1,62 \cdot 14\,800 = 23\,976 \text{ N} \quad (6.6)$$

- statická únosnost

$$C_0 = 2 \cdot C_{\text{jednotlivého ložiska}} = 2 \cdot 14\,800 = 29\,600 \text{ N} \quad (6.7)$$

- mezní únavové zatížení

$$P_u = 2 \cdot P_{u \text{ jednotlivého ložiska}} = 2 \cdot 400 = 800 \text{ N} \quad (6.8)$$

Minimální zatížení

Na ložiska s bodovým stykem nebo čárovým stykem musí působit určité minimální zatížení, aby byl zajištěn jejich uspokojivý provoz.

Požadované minimální zatížení působící na jednotlivá ložiska nebo dvojice ložisek montovaná zády (do „O“) lze odhadnout podle vztahu

$$\begin{aligned} F_{rm} &= k_r \left(\frac{v n}{1\,000} \right)^{2/3} \left(\frac{d_m}{100} \right)^2 = 0,095 \left(\frac{12 \cdot 60}{1\,000} \right)^{2/3} \left(\frac{38,5}{100} \right)^2 \\ &= 0,011 \text{ N} \end{aligned} \quad (6.9)$$

Volba vstupních parametrů:

- Mazivo je voleno LGMT 3, dle tabulek firmy SKF. Jedná se o víceúčelové mazivo pro strojírenství a vozidla. Viskozitu oleje volíme při provozní teplotě 100 °C, kde je rovna $\nu = 12 \text{ mm}^2/\text{s}$.
- Střední průměr ložiska $d_m = 0,5 (d + D) = 0,5 (25 + 52) = 38,5 \text{ mm}$
- Otáčky jsou voleny $n = 60 \text{ ot}/\text{min}$
- Součinitel maximální zátěžení je uveden v **Tab. 8**.

Tab. 8: Součinitel maximálního zátěžení [37]

Ložisková řada	k_a	k_r
72 BE	1,4	0,095

Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska s nakloněním při 0°

$$P = 0,57 F_{r_0} + 0,55 F_{a_0} = 0,57 \cdot 0 + 0,93 \cdot 183 = 170,19 \text{ N} \quad (6.10)$$

Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska s nakloněním při 90°

$$P = 0,57 F_{r_{90}} + 0,55 F_{a_{90}} = 0,57 \cdot 183 + 0,93 \cdot 0 = 104,31 \text{ N} \quad (6.11)$$

Ekvivalentní statické zatížení ložiska s nakloněním při 0°

$$P_0 = F_{r_0} + 0,52 F_{a_0} = 0 + 0,52 \cdot 183 = 95,16 \text{ N} \quad (6.12)$$

Ekvivalentní statické zatížení ložiska s nakloněním při 90°

$$P_0 = F_{r_{90}} + 0,52 F_{a_{90}} = 183 + 0,52 \cdot 0 = 183 \text{ N} \quad (6.13)$$

Základní trvanlivost

Pokud se važete pouze zátěžení a otáčky, můžete použít základní trvanlivost L10. Základní trvanlivost ložiska podle ISO 281 je:

Pro natočení 0°

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P + F_{MAX_před}} \right)^p [\text{min}^{-1}] \quad (6.14)$$

$$L_{10} = \left(\frac{23\,976}{170,19 + 120} \right)^3 = 564\,005 [\text{min}^{-1}]$$



Pokud jsou otáčky konstantní, je často vhodnější vypočítat trvanlivost v provozních hodinách podle vztahu

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10} [h] \quad (6.15)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 60} 564\,005 = 156\,668\,056 \text{ milion hodin vyhovují}$$

Pro natočení 90°

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P + F_{MAX_před}} \right)^p [min^{-1}] \quad (6.16)$$

$$L_{10} = \left(\frac{23\,976}{104,31 + 120} \right)^3 = 1\,221\,193 [min^{-1}]$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 n} L_{10} [h] \quad (6.17)$$

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 60} 1\,221\,193 = 339\,220\,277 \text{ milion hodin vyhovují}$$

- L_{10} základní trvanlivost (při spolehlivosti 90 %) [miliony otáček]
- L_{10h} základní trvanlivost (při spolehlivosti 90 %) [provozní hodiny]
- C základní dynamická únosnost [N]
- P ekvivalentní dynamické zatížení ložiska [N]
- n otáčky (rychlost otáčení) [1/min]
- p exponent rovnice trvanlivosti
= 3 pro kuličková ložiska

Směrné hodnoty trvanlivosti valivých ložisek

Trvanlivost [h]	Typ stroje
20000 - 30000	Stroje pro 8 hodinový provoz, plně vytižené: obráběcí stroje, dřevoobráběcí stroje, stroje pro strojírenský průmysl, jeřáby, ventilátory, pásové dopravníky, tiskařské stroje, odstředivky

Bezpečnost ložisek při statickém zatížení pro natočení 0°

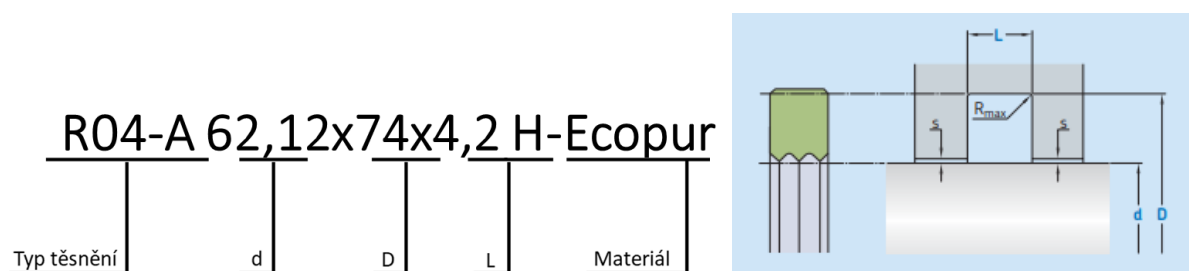
$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{31\,200}{95,16} = 328 > 1 \text{ vyhovují} \quad (6.18)$$

Bezpečnost ložisek při statickém zatížení pro natočení 90°

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0} = \frac{31\,200}{183} = 171 > 1 \text{ vyhovují} \quad (6.19)$$

Výběr rotačního těsnění

Na základě průzkumu trhu a požadovaných konstrukčních rozměrů bylo vybráno rotační těsnění R04-A od firmy SKF. Jedná se o těsnění soustružené na zakázku dle požadovaných rozměrů. Tabulkové rozměry z hlediska zástavbové výšky L nevyhovovalo. Přesný popis těsnění je uveden na Obr. 56.



Obr. 56: Popis rotačního těsnění [40]

Materiál doporučený výrobcem dle vstupních hodnot (teplota do 100 °C, otáčky $n_{\max} = 60$ ot/min a vnitřní průměr $d = 63$ mm) je uveden v Tab. 9.

Tab. 9: Parametry materiálu rotačního těsnění [40]

Parametr	Hodnota	Jednotka
Materiál	H-ECOPUR	-
Teplota (od – do)	-20 až +110	°C
Rychlost (maximální)	0,2	m/s
Tlak (maximální)	160 (16)	bar (MPa)
Cena za kus		Kč

Ověření max. rychlosti povolené výrobcem dle tabulky Tab. 9.

$$v = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 62,12 \cdot 10^{-3} \cdot 60}{60} = 0,195 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (6.20)$$

$< 0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ **vyhovuje**

Rotační těsnění splňuje požadavky na maximální teplotu a maximální otáčky. Chladící kapalina je přiváděna z vnějšího zdroje, kterým je původní zahradní čerpadlo využívané u 3osé zkušební stanice. Čerpadlo nevyvozuje velké tlaky, proto není třeba kontrolovat rotační těsnění na tlak.

Výběr pojistné matice

Pro zajištění ložisek na hřídeli je použita přesná pojistná matice **ZMA20** od firmy INA. Matice byla vybrána z důvodu malých zástavbových rozměrů a spolehlivému zajištění.



Obr. 57: Přesná pojistná matice ZMA20 od firmy INA [41]

Výběr vlnové pružné podložky

Vlnová podložka **W61580** slouží místo distančního kroužku u uložení ložisek viz výkres **ASM_000004535**. Výhodou této varianty je, že vlnová podložka částečně eliminuje chyby vzniklé v konstrukci. Její použití bylo schváleno výrobcem na základě dodaných parametrů.



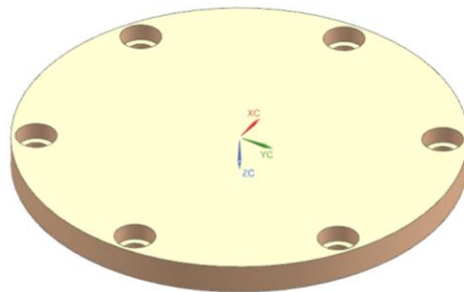
Obr. 58: Vlnová pružná podložka W61580 [42]

Navržené dílce otočného stolu

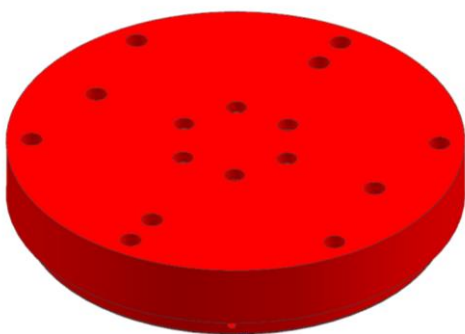
Modely navržených dílců jsou vidět na následujících obrázcích.



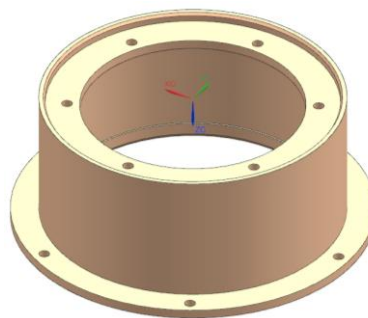
Obr. 59: Hřídel



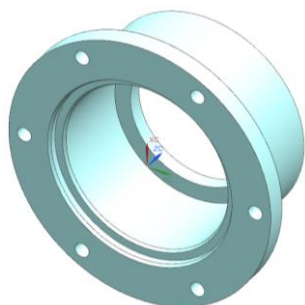
Obr. 60: Návarná destička průměru 180 mm



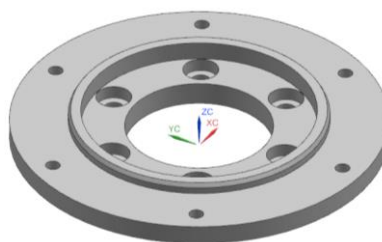
Obr. 61: Chladicí deska



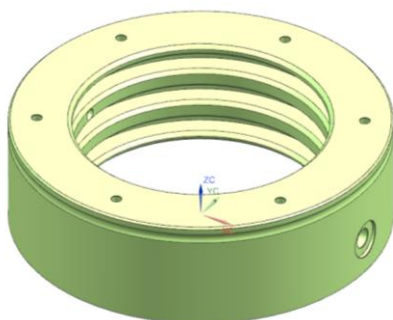
Obr. 62: Příruba – rotační přívod chlaz. část 2



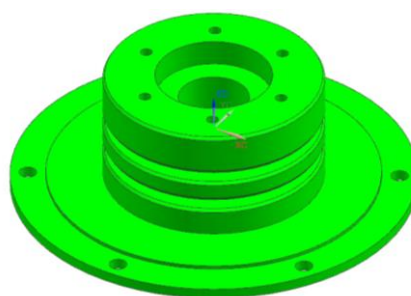
Obr. 63: Distanční pouzdro



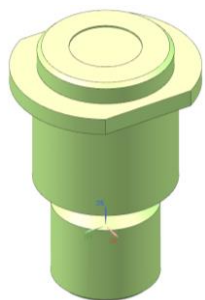
Obr. 64: Příruba – rotační přívod chlaz. část 1



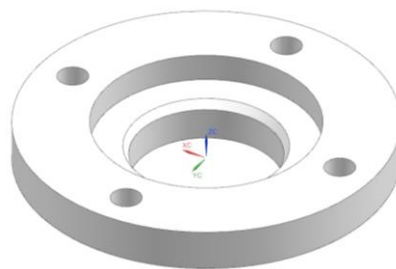
Obr. 65: Rotační přívod chlazení část 2



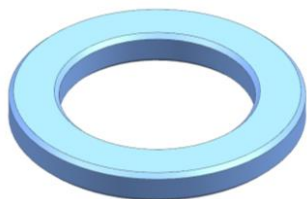
Obr. 66: Rotační přívod chlazení část 1



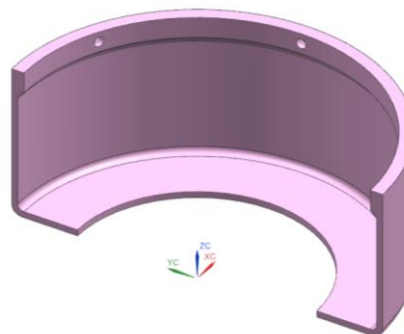
Obr. 67: Zemní kontakt



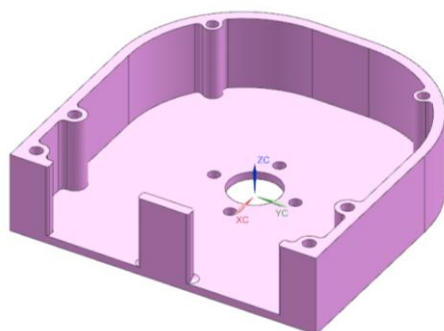
Obr. 68: Příruba – zemní kontakt



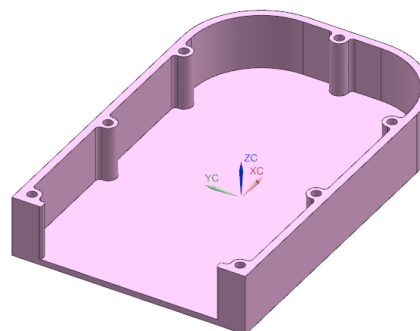
Obr. 69: Distanční kroužek



Obr. 70: Kryt otočného stolu

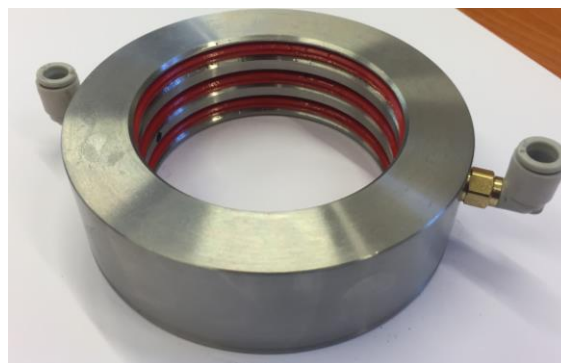
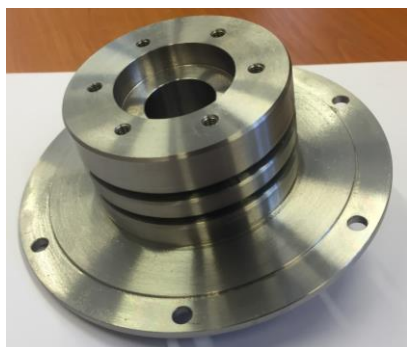


Obr. 71: Kryt kolébky část 1



Obr. 72: Kryt kolébky část 2

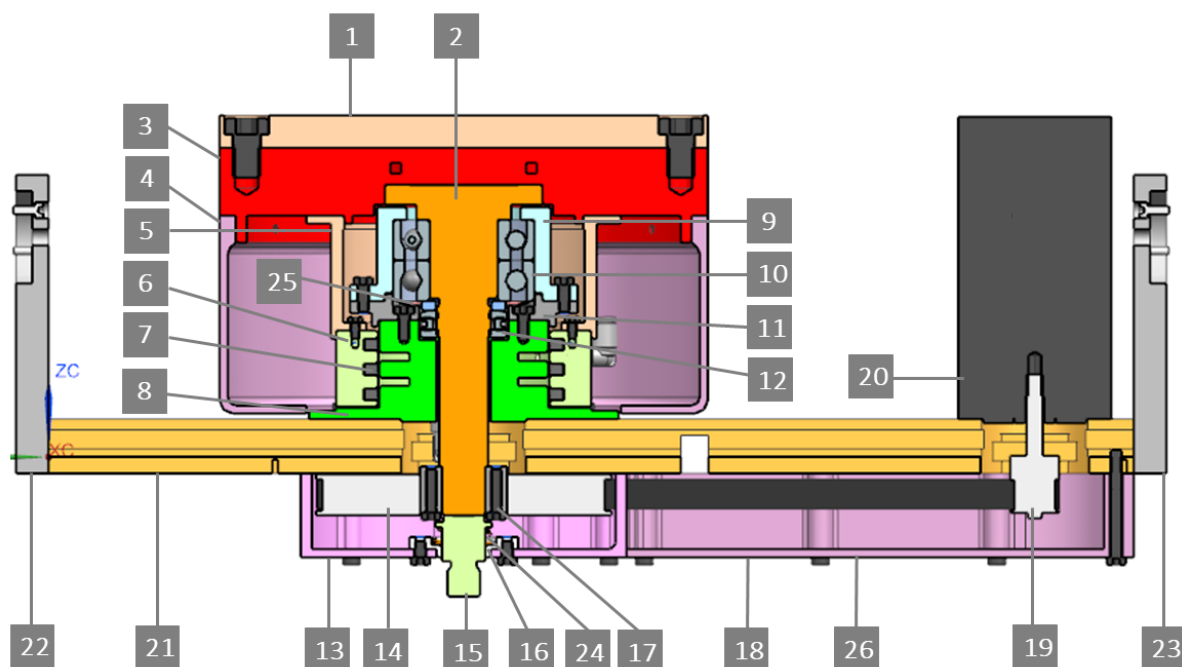
Příklad vyrobených dílců rotačního přívodu chlazení část 1 a 2 jsou vidět na Obr. 73.



Obr. 73: Vyrobené dílce rotačního přívodu chlazení část 1 a 2

Celkový pohled na konstrukci

Popis umístění jednotlivých částí konstrukce otočného stolu je vidět na **Obr. 74**. Detailnější pohled je na výkrese **ASM_000004535**.

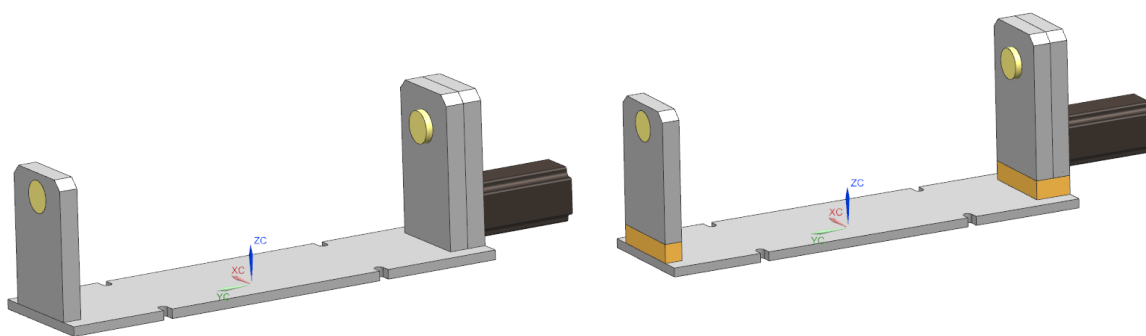


- | | |
|--|------------------------|
| 1. návarná destička průměru 180 mm | 18. spodní kryt část 2 |
| 2. hřídel | 19. malá řemenice |
| 3. chladicí deska | 20. krokový motor |
| 4. krytování otočného stolu | 21. základna |
| 5. příruba – rotační přívod chlaz. část 2 | 22. levá bočnice |
| 6. rotační přívod chlazení část 2 | 23. pravá bočnice |
| 7. rotační těsnění | 24. kuželová pružina |
| 8. rotační přívod chlazení část 1 | 25. vlnová pružina |
| 9. distanční pouzdro | 26. řemen |
| 10. ložiska uložená do „O“ | |
| 11. příruba – rotační přívod chlaz. část 1 | |
| 12. pojistná matice a distanční kroužek | |
| 13. spodní kryt část 1 | |
| 14. velká řemenice | |
| 15. zemnicí kontakt | |
| 16. příruba - zemnicí kontakt | |
| 17. svěrné pouzdro | |

Obr. 74: Zjednodušený popis konstrukce otočného stolu v řezu

6.1.2 Zvýšení konstrukce kolébky

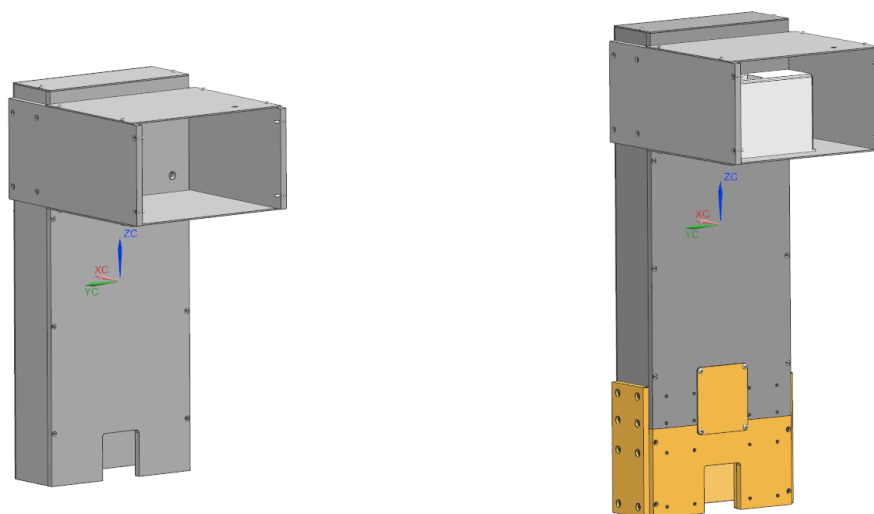
Změnou konstrukce otočného stolu došlo také ke konstrukčním úpravám kolébky. Důvodem bylo zvětšení zástavbového prostoru pod otočným stolem. V původním provedení se zde nacházela dvě řemenová kola, napínací mechanismus řemene a ozubený řemen. Součásti byly chráněny plechovým krytováním. Výška kolébky umožňovala natáčení v rozmezí $\pm 90^\circ$ bez kolize otočného stolu s jinými částmi konstrukce. Z důvodu kolize nové konstrukce otočného stolu s částí konstrukce kolébky musela být zvětšena výška kolébky o 25 mm. Provedla se jednoduchá a levná konstrukční úprava, byly prodlouženy boční hliníkové profily kolébky pomocí ocelových dílců s otvory pro průchod šroubů. Na obrázku **Obr. 75** je tato změna zobrazena a podrobnější informace jsou ve výkresu **ASM_000004545/00**.



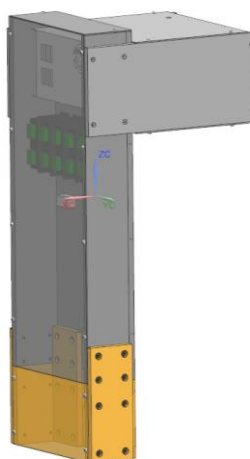
Obr. 75: Porovnání půdní konstrukce kolébky s upravenou konstrukcí

6.1.3 Zvýšení stojanu

Stojan zakoupené gravírovací frézky je sestaven z hliníkových plechů o tloušťce 10 mm a 2 mm. Z důvodu zvýšení rozměrů otočného stolu a maximálního využití výrobního prostoru stroje se provedla úprava konstrukce stojanu. Délka stojanu byla zvýšena z 588 mm na 720 mm. Hlavním kritériem pro úpravu byla cena a minimální zásah do původní konstrukce. Zvolením přestavby pomocí nastavení původní konstrukce ocelovými plechy se docílilo jednoduchého a cenově výhodnějšího řešení. Porovnání změn je znázorněno na **Obr. 76**. Jelikož na zkušební stanici nebudou prováděny žádné řezné operace, které by způsobovali deformaci rámu, tak toto řešení je zcela postačující. Výkres sestavy stojanu je uveden pod číslem **ASM_000004544/00**.



Obr. 76: Porovnání půdní konstrukce stojanu s upravenou konstrukcí

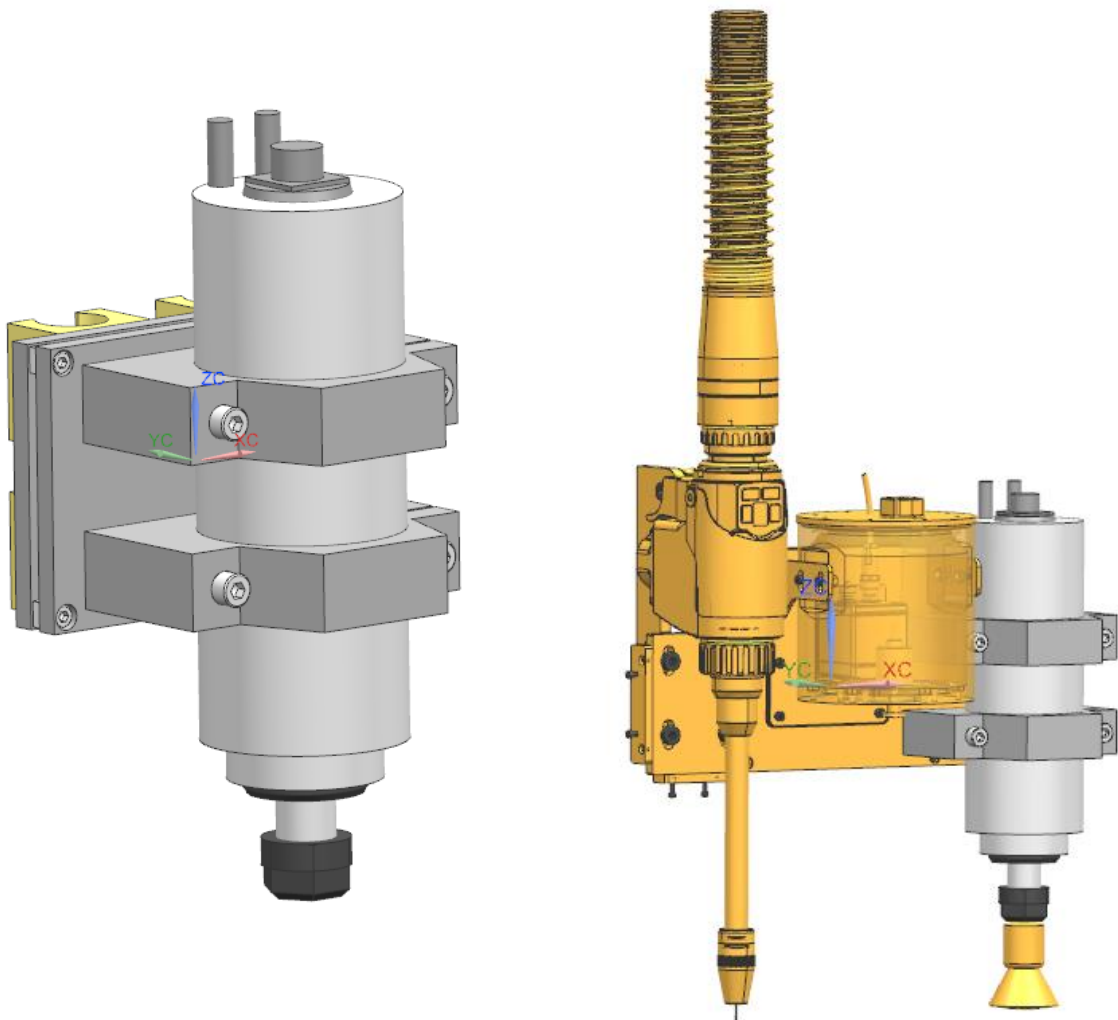


Obr. 77: Izomerický pohled na upravenou konstrukci stojanu.

6.1.4 Konstrukční změna osy Z

Zkušební stanice je konstruována pro metodu navařování WAAM. Součástí této metody je hořák sloužící pro pokládání svarových housenek. Během navařování vzniká na povrchu svaru struska, která musí být odstraněna. Pro tyto požadavky byla upravena konstrukce osy Z. V původním provedení zde zůstalo pouze elektrické vodou chlazené vřeteno s kleštinou pro průměr 6 mm a svěrná pouzdra. Vlevo na **Obr. 78** je vidět model původní konstrukce osy Z.

Pro odlišení změn je na **Obr. 78** upravená konstrukce zvýrazněná oranžovou barvou. Výkres sestavy konstrukce osy Z je uveden pod číslem **ASM_000004543/00**.

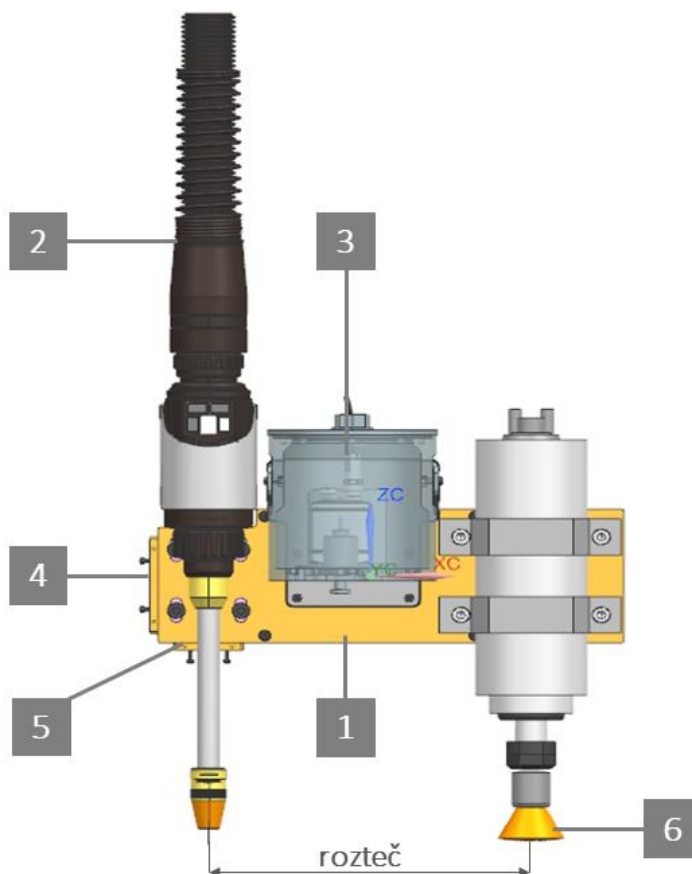


Obr. 78: Porovnání konstrukce osy Z s původním provedením a upravenou konstrukcí

Úprava konstrukce osy Z na **Obr. 79** obsahuje rozšíření základny, hořák, termokameru, kryt termokamery, konstrukci pro držení termokamery, držák hořáku a stabilizační elementy pro hořák označené čísly 4 a 5. Na původní základně bylo uchyceno vodou chlazené elektrovřeteno prostřednictvím svěrných pouzder viz. **Obr. 78**. Tento koncept je zachován a využit jako jednotka pro čištění svarových housenek, kde do kleštiny průměru 6 mm je upnut štětcový ocelový kartáč.

Hořák je uchycen pomocí šroubu a matice k držáku sestaveného ze dvou svařených ocelových plechů viz **Obr. 80**. Druhá část konstrukce je uchycena čtyřmi šrouby na rozšířenou základnu. Přesné ustavení hořáku je umožněno stavitelnými elementy obsahující čtyři stavěcími šrouby. Spodním stavěcími šrouby lze nastavit výšku hořáku v rozmezí ± 6 mm.

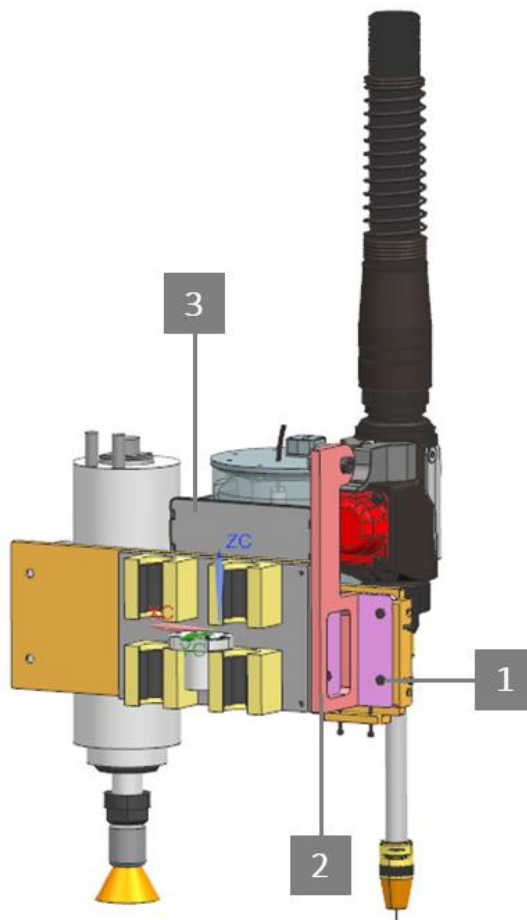
Dále je zvolena rozteč 230 mm, aby se zabránilo kolizi hořáku či vřetena s navařeným materiálem během přejezdů mezi navařováním a čištěním.



1. základní profil osy Z
2. hořák
3. kryt termokamery
4. boční stabilizátor hořáku (podpora 1 – hořák)
5. spodní stabilizátor hořáku (podpora 2 – hořák)
6. ocelový kartáč

Obr. 79: Osa Z - přední pohled

Na obrázku **Obr. 80** je izometrický pohled na konstrukci osy Z. Jsou zde vidět barevně odlišené podpory hořáku označené čísly **1** a **2** a část konstrukce pro držení termokamery z vypálených ocelových plechů tloušťky 3 mm.



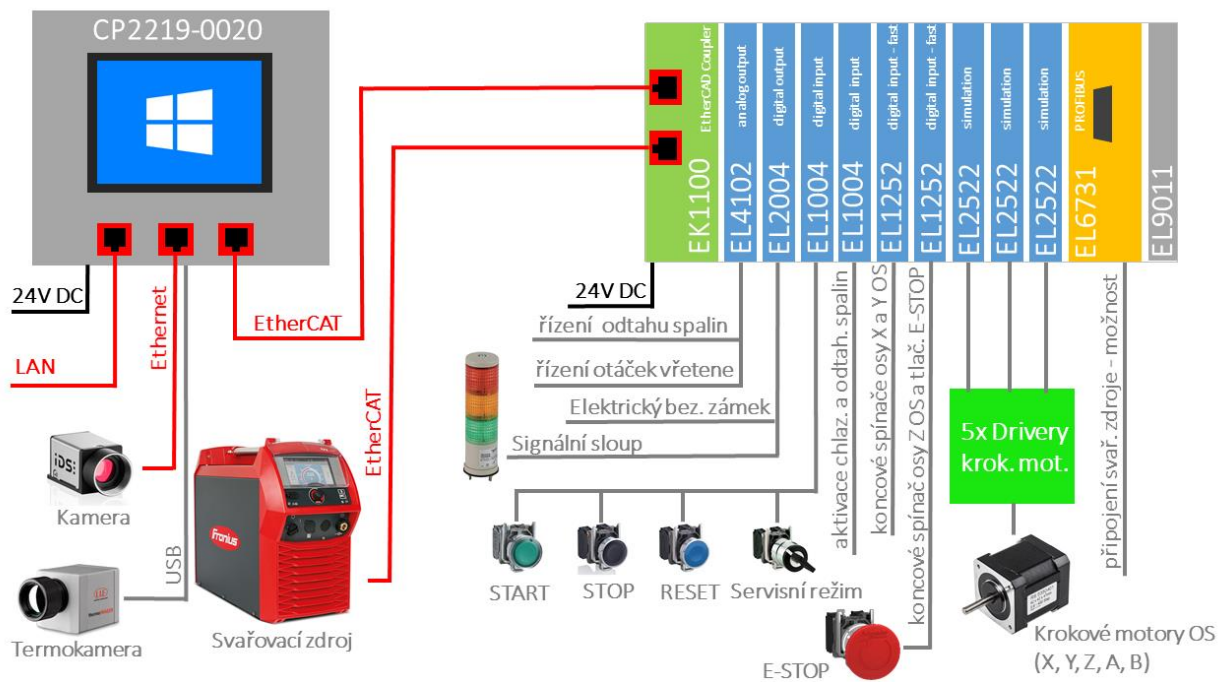
1. držák hořáku – část první
2. držák hořáku – část druhá
3. konstrukce pro držení krytování termokamery

Obr. 80: Osa Z – izometrický pohled

6.2 Elektrická zařízení a komponenty

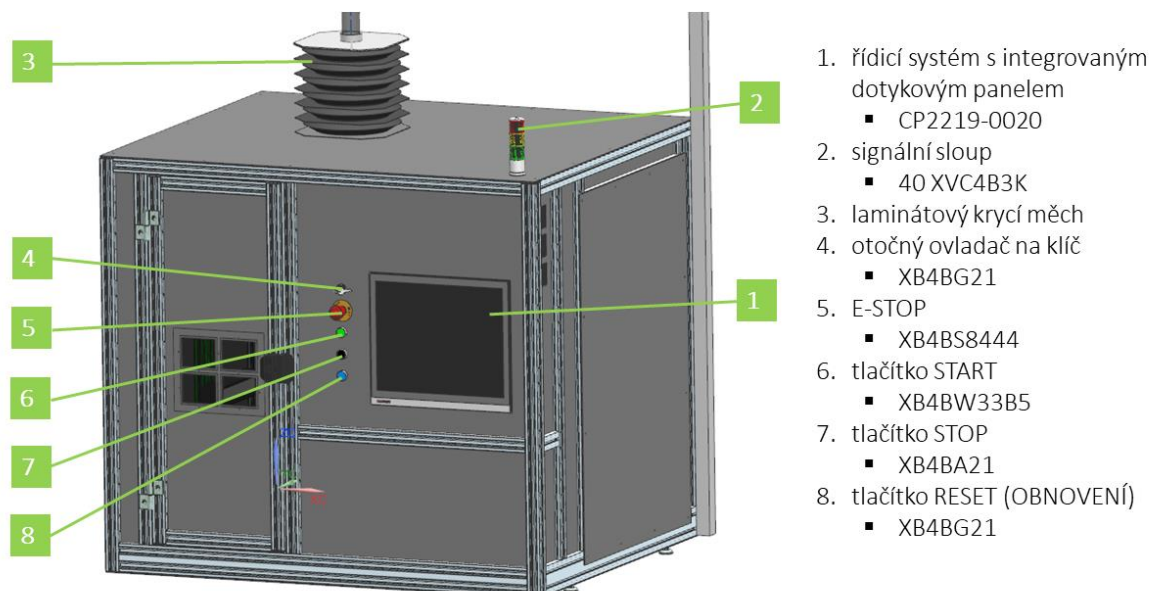
V rámci práce jsou řešena i elektrická zařízení a komponenty důležité pro chod stroje. Elektrická zařízení ve formě průmyslového počítače s dotykovým panelem, tlačítek a další umožňují komunikaci člověk-stroj. Podrobnější popis nakupovaných součástí je uveden v následujících podkapitolách.

Zjednodušené schéma zapojení elektrických zařízení je zobrazeno na **Obr. 81**.

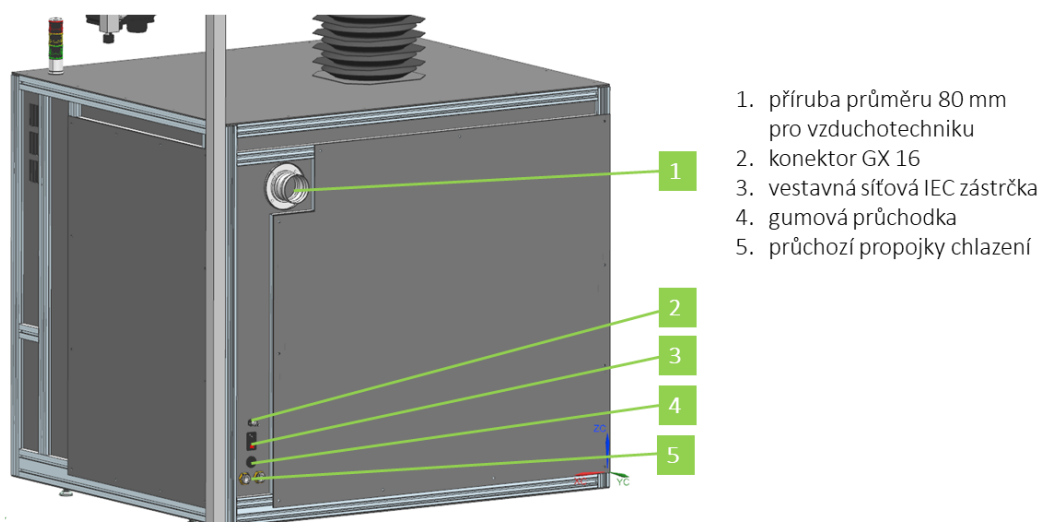


Obr. 81: Zjednodušené schéma zapojení elektrických zařízení

V následujících obrázcích je uvedeno umístění jednotlivých elektrických zařízení a komponent, které jsou na vnější části krytování. Elektrická zařízení a komponenty umístěné vně krytování stroje jsou uvedeny v příslušných podkapitolách.



Obr. 82: Umístění elektrických komponent a zařízení – pohled 1



Obr. 83: Umístění elektrických komponent a zařízení – pohled 2

6.2.1 Řídicí systém s integrovaným dotykovým panelem

Hlavní komunikace člověk-stroj bude probíhat přes 19palcový dotykový display s integrovaným průmyslovým počítačem CP2219-0020 od firmy Beckhoff. Jednotka je určena pro montáž do přední skříně (krytování). Výkonnou platformu pro průmyslové aplikace lze využít ve spojení s automatizačním softwarem TwinCAT pracujícím pod operačním systémem Windows 10 IoT Enterprise pro řízení automatických pracovišť nebo strojů. Informace o řídicím softwaru jsou uvedeny v kapitole číslo 10.

Dotykový panel s integrovaným průmyslovým počítačem je doplněn o 24 V napájecí zdroj ve formě akumulátoru instalovaného na DIN lištu v blízkosti PC.



Obr. 84: 19ti palcový dotykový display [43]

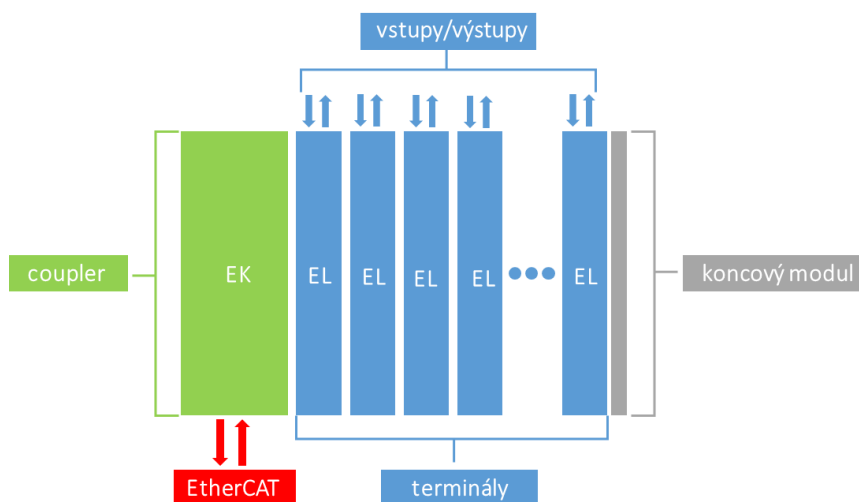


Obr. 85: Integrovaný průmyslový počítač [43]

6.2.2 Moduly od firmy Beckhoff

Výběr modulů provedli pracovníci z ústavu Výrobních strojů a zařízení. Úkolem práce bylo zakomponovat moduly do konstrukce zkušební stanice. V následujícím textu jsou stručně popsány základy modulů a jejich umístění v konstrukci zkušební stanice.

Základní modul od firmy Beckhoff tvoří EtherCAT Coupler EK1100 **Obr. 87**, který propojuje terminály s počátečním označením EL. Vše je uzavřené koncovým modulem. Zjednodušený popis je vidět na **Obr. 86**.

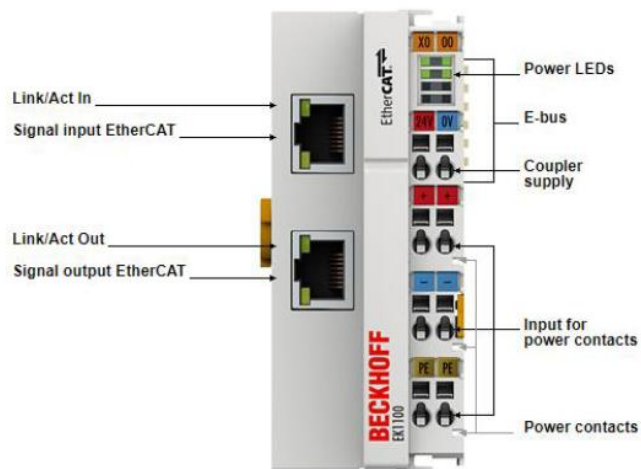


Obr. 86: Popis složení modulů od firmy Beckhoff

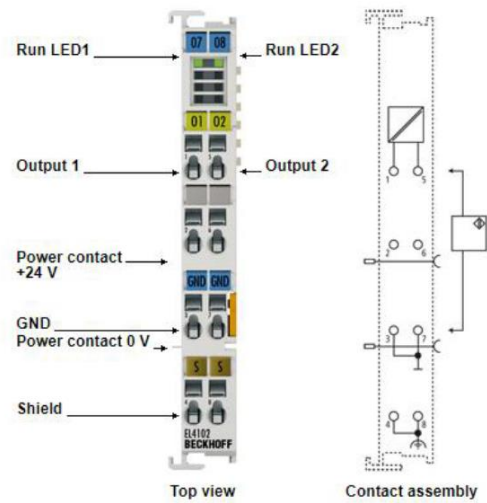
EtherCAT je protokol pro komunikaci typu master-slave. Protokol EtherCAT, také nazvaný EtherCAT Device Protocol -EDP, umožňuje komunikaci mezi řídicím systémem a proměnným počtem zařízení (vzdálené vstupy a výstupy) v reálném čase tzv. „hard real-time“. Synchronizace mezi zařízeními je v rámci nanosekund. Protokol dává volnost při volbě topologie komunikační sítě s možností realizovat sekundární kabelové spoje. Systém je propojen s EtherCATem prostřednictvím průmyslové sběrnice založené na Ethernetu. Krátké doby cyklů (zpracování datagramů za chodu) umožňují velmi přesnou synchronizaci komunikujících zařízení, proto je možné využít pro úlohy vyžadující úroveň integrity bezpečnosti SIL 3. Dalšími výhodami jsou nízké pořizovací náklady na realizaci úloh a otevřená specifikace založená na mezinárodních standardech (ISO a IEC). [44], [45]

Za coupler se vkládají terminály (karty) vyráběné v různých provedení podle jejich použití. Nejčastěji se používají karty typu DI – digitální výstup, DO – digitální vstup, AI – analogový vstup, AO – analogový výstup. Lze také připojit karty na ovládání krokových motorů, či karty

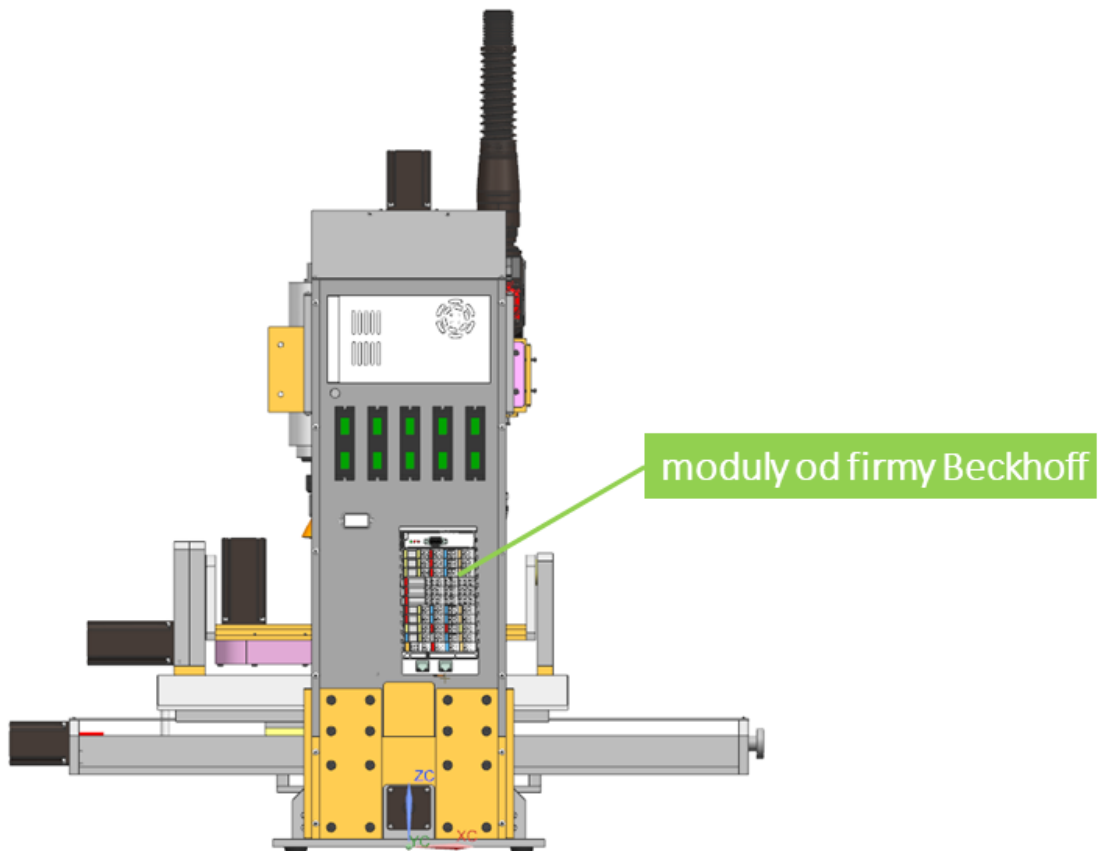
pro komunikaci s nejrůznějšími sběrnici. Příklad dvoukanálového analogového výstupu je na **Obr. 88**. [44], [45]



Obr. 87: EtherCAD Coupler EK1100 od firmy Beckhoff [46]



Obr. 88: Terminál EL4102 [47]



Obr. 89: Umístění modulů od firmy Beckhoff

6.2.3 Rozhraní pro obsluhu

Jedním ze základních prvkem návrhu stroje je rozhraní člověk-stroj. Volba tlačítek a bezpečnostního systému pro co nejlepší kooperaci obsluhy se strojem. Návrh bezpečnostního systému a barevného označení tlačítek vychází z norem ČSN EN 60074 a ČSN EN 60204-1. Normy určují základní a bezpečnostní zásady pro rozhraní člověk-stroj, značení a identifikaci - zásady kódování sdělovačů a ovládačů. Stanovují obecná pravidla pro přidělování určitých významů jednotlivých vizuálních, akustických a taktilních indikací za účelem:

- zvýšení bezpečnosti osob, materiálních hodnot a/nebo životního prostředí na základě spolehlivého sledování a řízení zařízení nebo procesu;
- usnadnění vlastního sledování, řízení a údržby zařízení nebo procesu;
- umožnění rychlého zjištění provozních podmínek a poloh ovládačů. [48]

Tab. 10: Barevné rozlišení tlačítek dle normy ČSN EN 60074 a ČSN EN 60204-1 [49]

Barva	Význam	Typické použití
ČERVENÁ	Nouzová situace (nebezpečný stav)	<ul style="list-style-type: none">▪ nouzové zastavení▪ protipožární zásah
ŽLUTÁ	Abnormální (výjimečný) stav	zásah k potlačení abnormálních (výjimečných) podmínek nebo k zabránění nežádoucím změnám
ZELENÁ	Normální (bezpečný) stav	spuštění z bezpečného stavu
MODRÁ	Požadován zásah	vedení (navrácení) do původního stavu, reset
BÍLÁ	Není přiřazen žádný speciální (určitý) význam	<ul style="list-style-type: none">▪ Start/Zapnout (přednostně)▪ Stop/Vypnout
ŠEDÁ		<ul style="list-style-type: none">▪ Start/Zapnout▪ Stop/Vypnout
ČERNÁ		<ul style="list-style-type: none">▪ Start/Zapnout▪ Stop/Vypnout (přednostně)

Dle výše uvedených norem se zvolila tlačítka STAR a STOP od firmy Schneider Electric. Zelené tlačítko **Obr. 90** pro zapnutí stroje v bezpečného stavu je prosvětlené. Světelná signalizace

uvědomí obsluh o tom, že stroj je ve stavu ZAPNUTO. Pro uvedení stroje do stavu VYPNUTO bylo zvoleno černé **Obr. 91** neprosvětlené tlačítko. Zde není nutnost světelné signalizace.



Obr. 90: Tlačítko START XB4BW33B5 [50]



Obr. 91: Tlačítko STOP XB4BA21 [51]

Klíčovým členem jsou bezpečnostní prvky. U zkušební stanice bylo zvoleno pět typů zabezpečení v podobě elektrického bezpečnostního zámku, otočného ovladače na klíč, tlačítka E-STOP, tlačítka OBNOVENÍ a světelné signalizace od firmy Schneider Electric. Více informací je uvedené v následujících odstavcích:

Elektrický Bezpečnostní zámek 2NC **Obr. 92** byl upevněn na zadní straně dvířek a zamezuje otevření dvířek během výrobního procesu. Odblokování zámku je možné v klidovém stavu stroje nebo v servisním režimu.

Otočný ovladač na klíč XB4BG21 **Obr. 93** je určen pro servisní režim stroje. Ovladač je dvoupolohový, kde vyjmutí klíče je možné v levé poloze z důvodu bezpečnosti.

Tlačítko E-STOP XB4BS8444 **Obr. 94** neboli tzv. nouzové zastavení je povinným prvkem každého stroje umístěné na snadno přístupném místě. V případě nouze zastaví všechny nebezpečné pohyby, ale i bezpečně vyřadí všechny zdroje energie, které mohou být zdrojem nebezpečí. Příkladem může být nahromaděná energie. Reakce na tlačítko E-STOP musí být okamžitá. Více informací viz příslušná norma ČSN EN 60204-1. Nouzové zastavení představuje bezpečnostní opatření, ale nikoliv však ochranné zařízení. Např. doběhy os vlivem setrvačných sil jsou řešeny enkodérem na hřídeli motoru nebo bezpečnostními brzdami. [52]

Tlačítko OBNOVENÍ XB4BA61 **Obr. 95** určuje norma. Pro obnovení režimu stroje z nouzového režimu po stisknutí tlačítka E-STOP muselo být použito modré tlačítko, které obnoví stav zařízení.



Obr. 92: Elektrický bezpečnostní zámek 2NC [53]



Obr. 93: Otočný ovladač XB4BG21 [54]



Obr. 94: Tlačítko E-STOP XB4BS8444 [55]



Obr. 95: Tlačítko OBNOVENÍ XB4BA61 [56]

Důležitým prvkem pro bezpečnost je také signální sloup. Zde byl volen signalizační sloup 40 XVC4B3K od firmy Schneider Electric. Sloup **Obr. 96** se skládá ze tří barevných částí. Zelená část signalizuje zapnutí stroje. Oranžová část signalizuje režim stroje v servisním režimu a červená část signalizuje nouzové zastavení. Jedná se tak o další prvky usnadňující kooperaci člověk-stroj.



Obr. 96: Signální sloup 40 XVC4B3K [57]

6.2.4 Osvětlení stroje

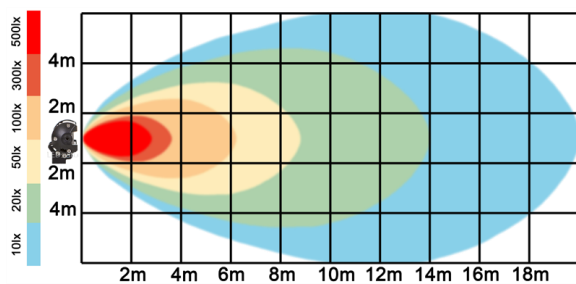
Osvětlení je nedílnou součástí konstrukce výrobního stroje. Osvětlení snižuje únavu obsluhy stroje a tím eliminuje chyby, které by mohl operátor způsobit. Zajištěním potřebného osvětlení pracoviště se také zvýší efektivnost a bezpečnost výroby. Normy zabývající se světlem a osvětlením prostorů jsou: ČSN 36 0020, ČSN 36 0011-3 a ČSN EN 12464-1. Pro osvětlení výrobního procesu se většinou volí průmyslová LED osvětla. LED světla mají malou spotřebu elektrického proudu a teplo vnesené do výrobku od osvětlení je minimální.



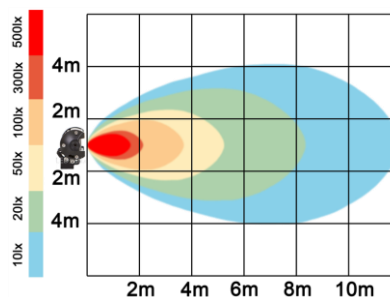
Obr. 97: LED pracovní světlo 54W BAR 10-30V [58]



Obr. 98: LED pracovní světlo 18W BAR 10-30V [59]



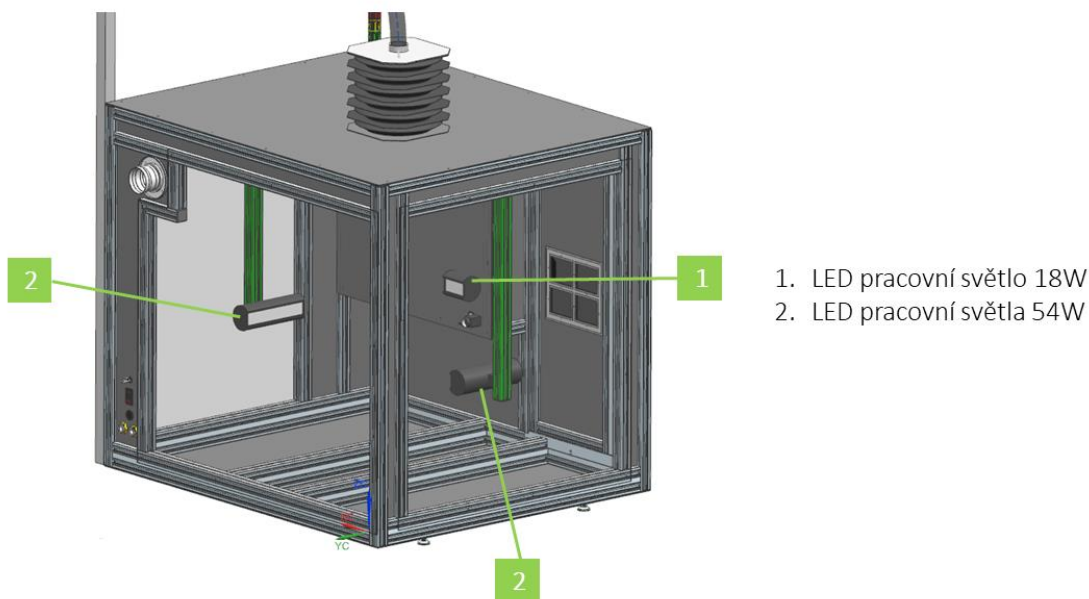
Obr. 99: Graf světelného toku pro světlo 54W [58]



Obr. 100: Graf světelného toku pro světlo 18W [59]

Pro zkušební stanici byla zvolena na základě zkušeností z předchozího projektu dvě LED pracovní světla s označením 54W BAR 10-30 V viz **Obr. 97** a jedno LED pracovní světlo 18W BAR 10-30 V viz **Obr. 98**. Grafy světelného toku příslušných světel lze vidět na obrázcích **Obr. 99** a **Obr. 100**. Touto volbou bylo zajištěno dostatečné kvalitní osvětlení pro sledování výroby průmyslovou kamerou a obsluhu stroje.

LED pracovní světla 54W BAR 10-30 V byla umístěna na hliníkových profilech. Světla byla připevněna pomocí kamenů se závitem M8 pro libovolnou pozici výšky osvětlení viz **Obr. 101**. LED pracovní světlo 18W BAR 10-30 V bylo umístěno v přední části krytování vedle kamery viz **Obr. 101**. Volbou této pozice se docílilo eliminace vrhání stínů bočním osvětlením. Světla jsou napájena z použitého průmyslového zdroje SDR-480-24 na DIN lištu od firmy MEAN WELL. Umístění světel je vidět na **Obr. 101**.



Obr. 101: Umístění světel

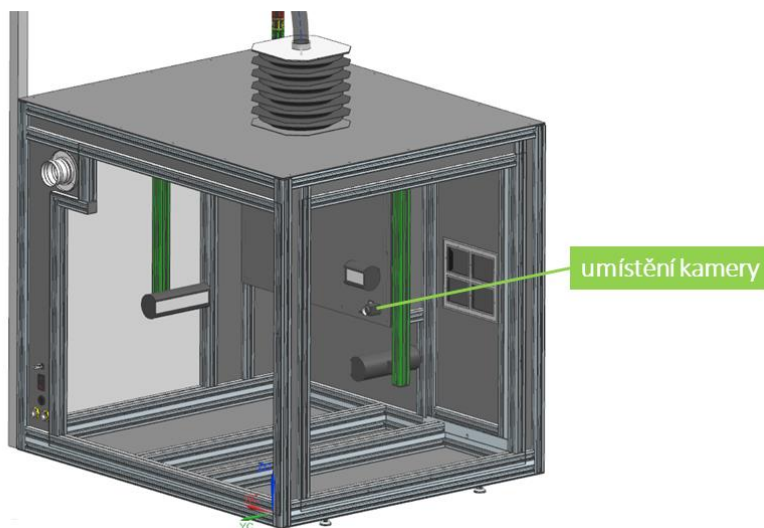
6.2.5 Průmyslová kamera

Pro sledování výrobního procesu byla použita průmyslová kamera IDS UI-5250CP-C-HQ dodávaná firmou ABBAS. Kamera obsahuje hardware, který digitalizuje obraz přímo v kameře, kde zároveň probíhá i konfigurovatelné zpracování obrazu. Obraz je poté ve zvolném formátu přenášen do počítače bez nutnosti použití grabovacích karet.



Obr. 102: Průmyslová kamera IDS UI-5250CP-C-HQ [60]

Umístění kamery viz **Obr. 103** bylo zvoleno s ohledem na co nejlepší sledování výrobního procesu. Minimální ohnisková vzdálenost od výrobku musí být 200 mm. Více informací je uvedeno na stránkách firmy ABBAS.



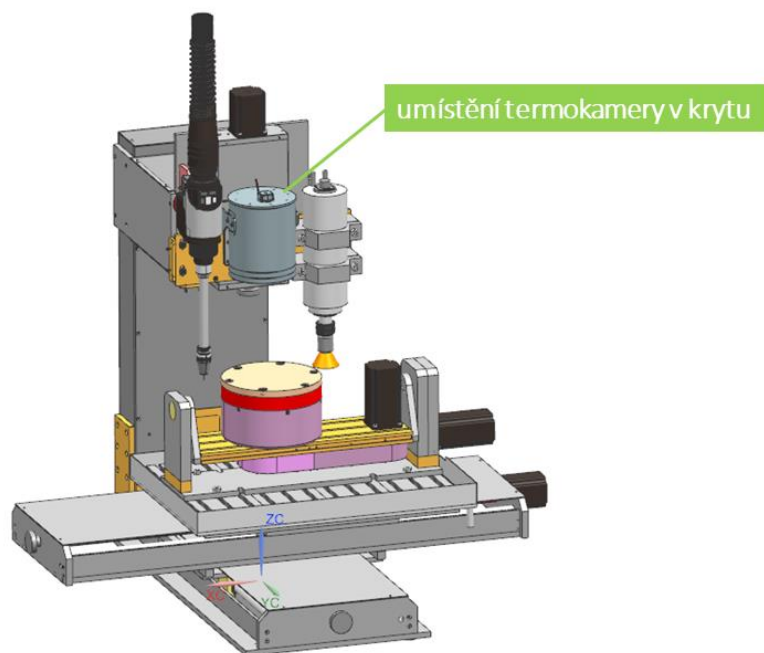
Obr. 103: Umístění kamery

6.2.6 Termokamera

Termokamera TIM160 je určena k bezkontaktnímu měření povrchové teploty před a po procesu svařování. Infračervená termokamera měří v rozpětí $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ a je připojena přes USB rozhraní k průmyslovému počítači. Kvůli ochraně byl použit stejný typ krytování pro kameru jako u starší zkušební stanice. Termokamera musela být umístěna minimálně 200 mm nad návarovou destičkou, z důvodu je ohniskové vzdálenosti použité optiky. Umístění kamery a konstrukci krytování lze vidět na **Obr. 105**.



Obr. 104: Termokamera TIM 160 [61]



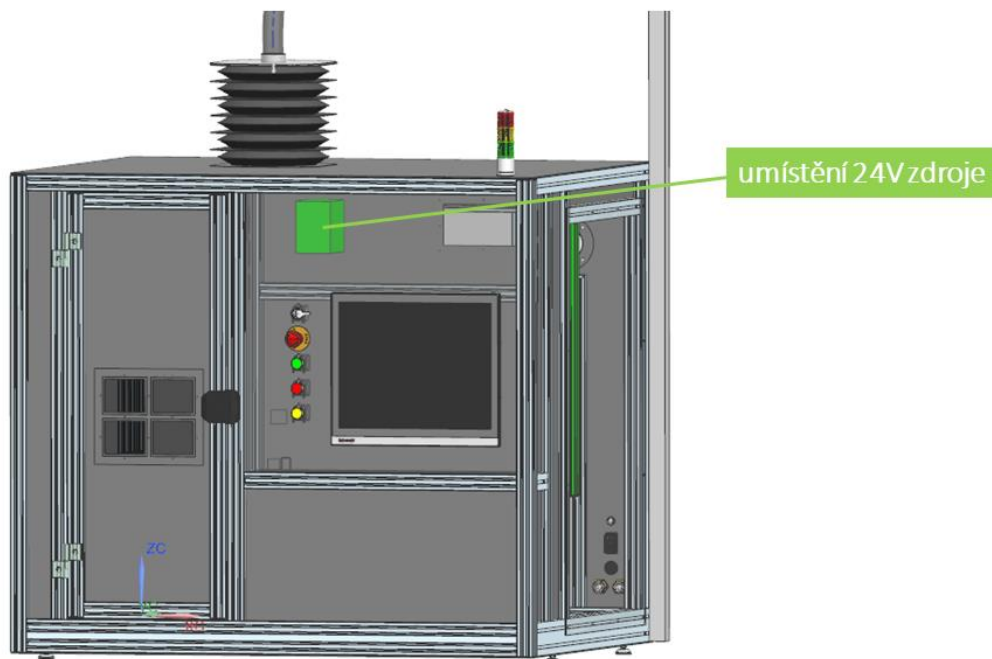
Obr. 105: Umístění termokamery v krytu

6.2.7 Výběr 24 V napájecího zdroje

Na základě požadavků byl firmou Mean Well navržen zdroj na DIN lištu SDR-480-24. Zdroj o výkonu 24 V napájí elektrické zařízení a byl umístěn nad průmyslovým počítačem viz. Obr. 107.



Obr. 106: Zdroj na DIN lištu SDR-480-24 od firmy MEAN WELL [62]



Obr. 107: Umístění zdroje

6.2.8 Další komponenty

V této podkapitole jsou velmi stručně uvedeny další komponenty, které byly začleněny v konstrukci stroje.

Vestavná síťová IEC zástrčka

Přívod elektrické energie byl veden přes vestavná síťová IEC zástrčku C14 s vypínačem K+B, s napětím 250 V a proudem 10 A.



Obr. 108: Vestavná síťová IEC zástrčka C14 [63]

Průchozí propojky chlazení

Chladicí kapalina byla vedena do stroje přes dvě propojky KQ2E16-00A od firmy SMC.



Obr. 109: Propojka od firmy SMC [64]

Konektor pro sepnutí chlazení a vzduchotechniky

Signál pro sepnutí chlazení a vzduchotechniky byl veden pomocí konektoru o průměru 16 mm označeném: GX16 - 4 piny



Obr. 110: Konektor [65]

Nástavec s přírubou

Pro připojení vnějšího zdroje vzduchotechniky byl použit nástavec s přírubou průměr 80 mm.



Obr. 111: Příruba pro odsávání [66]

Krycí laminátový měch

Hořák se musí pohybovat ve směru osy Z. Zároveň nesmí docházet k úniku spalin otvorem v krytování určeným pro hořák. Pro tento účel byl zvolen laminátový krycí měch od firmy Hestego.



Obr. 112: Krycí laminátový měch od firmy Hestego [67]

6.3 Krytování stroje

Krytování stroje se provádí z hlediska dodržení zákonů a předpisů o bezpečnosti práce. Dodává pracovišti zvýšenou ergonomii, zlepšuje vzhled a dojem na celkové pracoviště. Firmy zabývající se výrobou strojů chtějí nabídnout svým zákazníkům produkt, který bude bezpečný, zaujme nejen svými vlastnostmi a cenou, ale i vzhledem.

Při volbě krytování pro zkušební stanici se vycházelo z několika požadavků. Hlavním kritériem byla cena. Navrzení a výroba designového krytování, jako je například vidět u moderních strojů, je po finanční a časové stránce pro tento typ krytování velmi nevýhodný. Alternativní řešení nabízí rakouská firma Haberkorn, jejíž konstrukce krytování z hliníkových profilů **Obr. 113** v sobě vzájemně propojuje vzhled a cenu. Výhodou této varianty je i krátká dodací lhůta od potvrzení objednávky. Díky těmto pozitivům byla zvolena firma Haberkorn jako dodavatel krytování pro zkušební stanici.

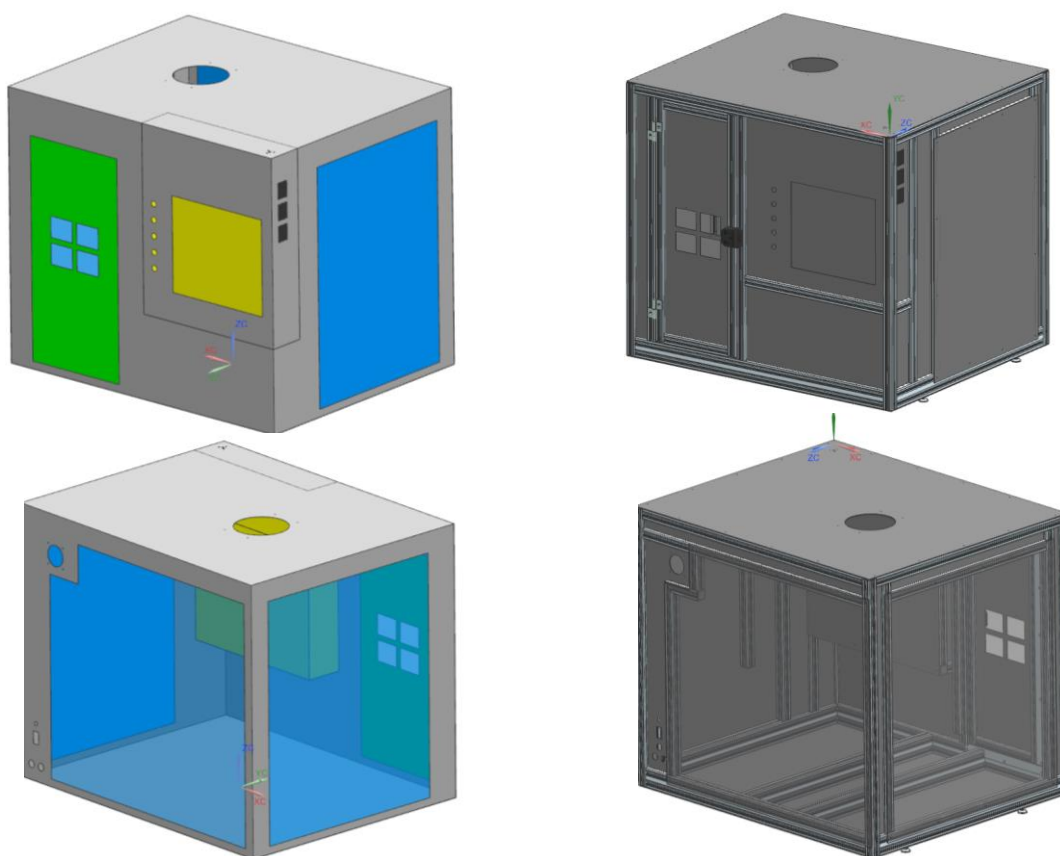


Obr. 113: Ukázka systému hliníkových profilů [68]

6.3.1 Konstrukce krytování

Vstupními parametry pro návrh konstrukce krytování byly zástavbové rozměry frézky, provedení stroje, umístění zkušební stanice v laboratořích RCMT, použité komponenty a samotná metoda WAAM. Zkušební stanice byla navržena ve formě stolního provedení. Návrh stolu není součástí práce.

Firmě Haberkorn byly zaslány požadavky, model a podklady pro vytvoření návrhu krytování stroje. Vstupní model je zobrazen v levé části na **Obr. 114**. V přední části je ve žlutém poli vidět otvor pro obrazovku a tlačítka. Dvířka jsou zvýrazněna zelenou barvou. Na dvířkách jsou čtyři obdélníkové otvory, kde byla namontována svařovací sklíčka pro náhled do stroje během svařování. Části zvýrazněné modrou barvou jsou odnímatelné kryty sloužící pro přístup do stroje z důvodu opravy apod. V levé horní rohu zadní části modelu je otvor průměru 80 mm pro vzduchotechniku. Ve spodním levém rohu jsou montážní otvory ICE zásuvky, přívody chlazení, zemního kabelu, kontaktu na ovládání vzduchotechniky a čerpadla. Na základě tohoto modelu a požadavků bylo firmou Haberkorn vytvořeno krytování stroje.



Obr. 114: Porovnání vstupních parametrů rozměrů krytování s návrhem od firmy Haberkorn

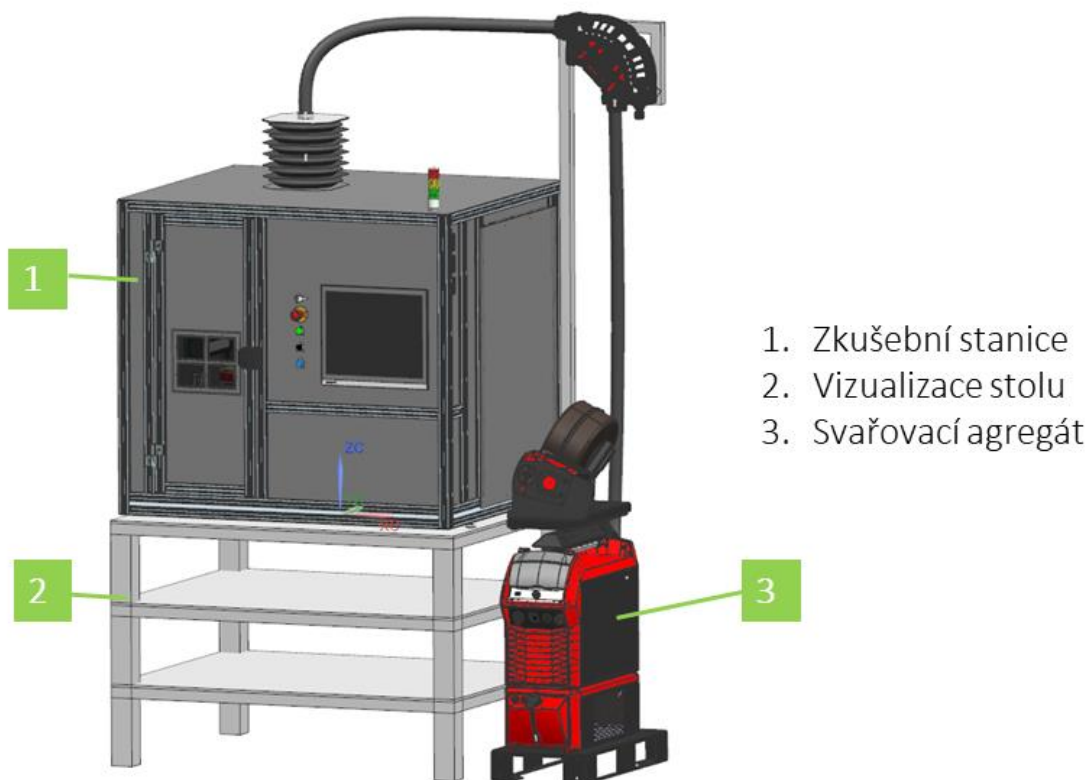
Více informací o parametrech krytování je zobrazeno v následující tabulce.

Tab. 11: Parametry krytování stroje

Parametr	Hodnota	Jednotka
Šířka	1300	mm
Výška	1160	mm
Hloubka	1100	mm
Hmotnost	není uvedena	kg
Cena	112 825,24	Kč

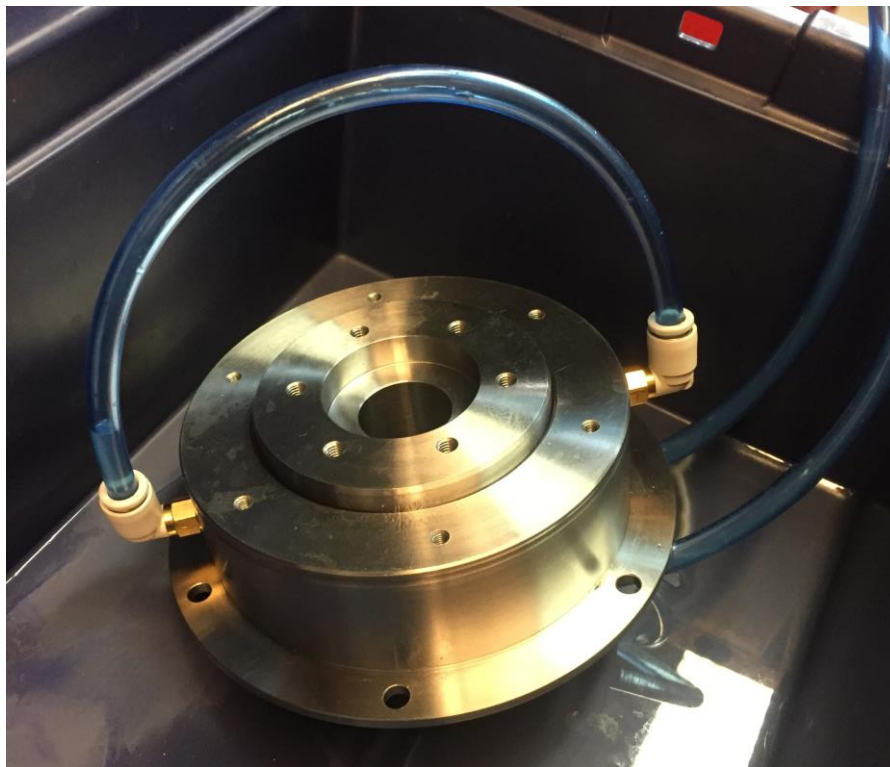
6.4 Celková vizualizace zkušební stanice a montáž

Celková vizualizace zkušební stanice je zobrazena na **Obr. 115**. Krytování se zabudovanými komponenty a polohovacím zařízením (předělaná 5ti osá gravírovací frézka) je umístěno na stole. Zde je zobrazena koncepce stolu (návrh stolu není předmětem práce), která poslouží pro budoucí konstrukční návrh stolu. Na levé straně zkušební stanice je umístěn svařovací agregát s příslušnými částmi uvedené v **kapitole 5.1.1**.

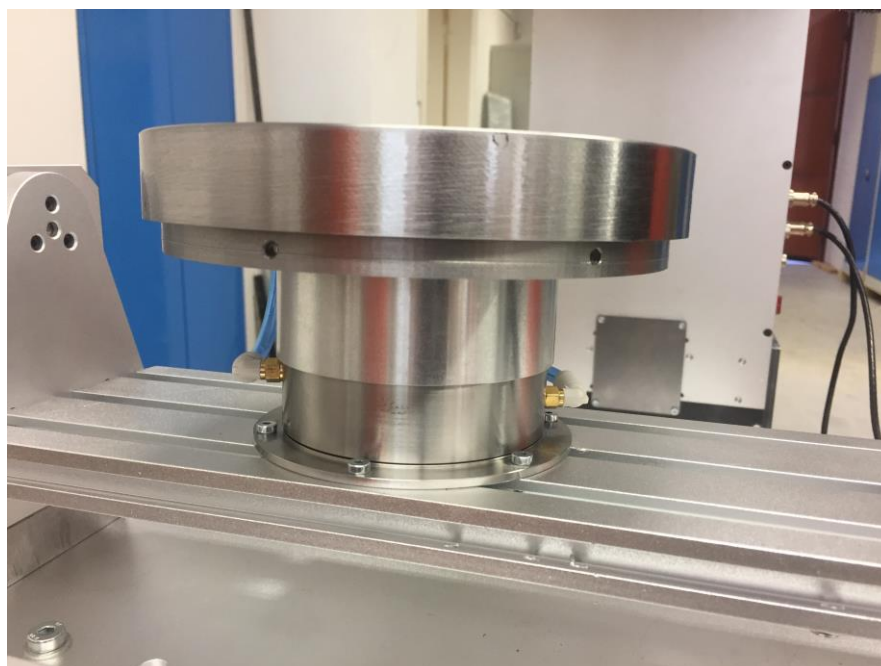


Obr. 115: Celková vizualizace zkušební stanice

Na **Obr. 116** je zobrazen test těsnosti rotačního přívodu chlazení. Při testech docházelo k nepatrným průsakům, které jsou zanedbatelné. Rotační přívod byl následně namontován na základu otočného stolu viz. **Obr. 117**.



Obr. 116: Zkouška těsnosti rotačního přívodu chlazení



Obr. 117: Namontovaný rotační přívod chlazení

Celková konstrukce adaptované 5ti osé gravírovací frézky je zobrazena na **Obr. 118** a **Obr. 119**, kde je konstrukce otočného stolu s kolébkou.



Obr. 118: Adaptovaná konstrukce 5ti osé gravírovací frézky



Obr. 119: Konstrukce otočného stolu s kolébkou

7 ZÁVĚR

V úvodu práce byla představena problematika Additive Manufacturing (AM – v překladu „aditivní výroba“), která je lépe známá pod pojmem 3D tisk. Do AM se také člení i metoda WAAM (Wire nad Arc Additive Manufacturing), která se především využívá ve strojírenství pro tisk středně velkých a velkých dílců. V následující části práce byla rozebrána problematika metody WAAM, kde je uvedeno porovnání metod navařování MIG/MAG a TIG využívané pro metodu WAAM. Současně bylo provedeno také srovnání s alternativními metodami výroby, kde se především vycházelo z výzkumu jedné z předních nezávislých a technologických organizací s názvem TWI.

Metoda WAAM má dle výsledků výzkumu významný potenciál pro efektivní výrobu, která se vyznačuje ve snížení výrobních časů, poměru BTF (Buy-to-fly), ceny a dalších parametrů. Následně byla provedena rešerše metody navařování MIG/MAG a firem zabývajících se metodou WAAM, za účelem průzkumu trhu a seznámením se s touto problematikou z pohledu konkurence. Na základě získaných informací z části rešerše a požadavků na konstrukci byla upřesněna koncepce návrhu 5ti osé zkušební stanice pro navařování metodu WAAM. Výsledkem bylo pořízení a adaptace 5ti osé gravírovací frézky CNC 6040 pro metodu WAAM, dále návrh krytování stroje a jeho umístění v laboratoři, která je určena pro svařování. Umístění bylo zvoleno s ohledem na předem připravený vnější přívod chlazení, stlačeného vzduchu a odtahu spalin, které jsou potřebné pro chod zkušební stanice.

Stěžejní oblastí adaptace stroje CNC 6040 byla zcela nová konstrukce otočného stolu. Na základě vytvořené vlastní výkresové dokumentace, která je součástí této práce, byly dodavatelskou firmou Aviko dodány dílce pro konstrukci otočného stolu. Krytování stroje bylo vyrobeno z hliníkových profilů a výplní ve formě ocelových plechů na základě vlastního modelu a technického návrhu rakouskou firmou Haberkorn. Při návrhu a konstrukci této zkušební stanice bylo dbáno na maximální využití subdodávaných dílů. Součástí práce bylo také navržení elektrických komponent, přičemž byla zohledňována především interakce člověk-stroj a bezpečnost provozu.

Poslední část práce byla věnována montáži a oživení stroje. Při montáži zkušební stanice došlo k několika komplikacím, které se však při prvotním uvedení do provozu mohou



vyskytnout. Nedostatky, které měly vliv na chod zkušební stanice, se podařilo částečně eliminovat. Modifikace zkušební stanice pro účely výzkumu budou předmětem dalšího vývoje na Ústavu výrobních strojů a zařízení. Výsledkem práce je 5ti osá zkušební stanice pro navařování metodou WAAM, která je oživena a umístěna v laboratoři svařování.

SEZNAMY

Seznam literatury

- [1] WILLIAMS, S. W., F. MARTINA, A. C. ADDISON, J. DING, G. PARDAL a P. COLEGROVE. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology [online]. 2. květen 2016 [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://waammat.com/about/waam>
- [2] KOLAŘÍKOVÁ, M., KOLAŘÍK, L., SUCHÁNEK, S. Navařování metodou WAAM. Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/navarovani-metodou-waam.html>
- [3] WAAMMat [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://waammat.com/>
- [4] Chen, J.: Hybrid design based on wire and arc additive manufacturing in the aircraft industry, Thesis, Cranfield university, 2012.
- [5] PAN, Zengxi, Donghong DING, Bintaow WU, Dominic CUIURI, Huijun LI a John NORRISH. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review. In: [online]. 2018 [cit. 2019-07-11], s. 3–24. Dostupné z: [doi:10.1007/978-981-10-5355-9_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-5355-9_1)
- [6] MEHNEN, Jorn, Jialuo DING, Helen LOCKETT a P KAZANAS. Design for Wire and Arc Additive Layer Manufacture [online]. 2010. Dostupné z: [doi:10.1007/978-3-642-15973-2_73](https://doi.org/10.1007/978-3-642-15973-2_73)
- [7] ZENGXI PAN, DONGHONG DING, BINTAO WU, DOMINIC CUIURI, HUIJUN LI a JOHN NORRISH. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://rwlab.sjtu.edu.cn/tiwm/papers/V1N1-1.pdf>
- [8] Co je MIG? Co je MAG? Základní seznámení | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-mig-mag-zakladni-seznameni/t-41/t-116>
- [9] MIG/MAG (CO₂) - svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování | Svářecí technika Schinkmann.cz [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [10] MIG/MAG (CO₂) | Metody | O svařování | Automig - internetový magazín, nejen pro odborníky ve svařování, s nabídkou zajímavostí a potřebných informací o opravách

- automobilových karosérií, zámečnické a průmyslové výrobě a automatizaci a robotizaci Migatroni [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
- [11] TPS/i . Fronius PERFECT WELDING [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyroby/ruční-svařování/migmag/tpsi>
- [12] MIG-MAG svařování. LORCH [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.lorch.eu/cs/znalosti/mig-mag-svarovani/>
- [13] Svařovací technika - Fronius. Fronius PERFECT WELDING [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding>
- [14] Bowden | Kondor.cz [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.kondor.cz/bowden/c-1756/>
- [15] 3Dprint | Böhler Welding [online]. [cit. 2019-02-07]. Dostupné z: <https://www.voestalpine.com/welding/Brands/Boehler-Welding/3Dprint>
- [16] voestalpine Böhler Welding Avesta Er316Lsi MIG Wire (15Kg). PREMIER WELDING [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.premierwelding.com/1-2mm-avesta-er316lsi-mig-wire-15kg-72830>
- [17] Who is GEFERTEC? Gefertec [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.gefertec.de/en/about-us/gefertec/>
- [18] 3DMP machines. GEFERTEC [online]. [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.gefertec.de/en/3dmp-machines-en/>
- [19] WELDPRINT MCV 5X | KOVOSVIT MAS, a. s. [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.kovosvit.cz/weldprint-mcv-5x-p44.html>
- [20] New VARIAXIS j-600AM Grows the Mazak Additive Series. Mazak [online]. 2017 [cit. 2019-02-15]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/news-events/news-releases/new-variaxis-j-600am-grows-the-mazak-additive-series/>
- [21] New VARIAXIS j-600AM Grows the Mazak Additive Series. Mazak [online]. 2017 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.mazakusa.com/news-events/news->
-

- releases/new-variaxis-j-600am-grows-the-mazak-additive-series/
- [22] About - MX3D. MX3D [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://mx3d.com/about/>
- [23] BRIDGE, M X D. MX3D Bridge. MX3D [online]. 2015 [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://mx3d.com/projects/bridge-2/>
- [24] Butterfly Screen - MX3D. MX3D [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://mx3d.com/1721-2/>
- [25] AddilanAddilan - Addilan Machine [online]. [cit. 2019-01-08]. Dostupné z: <https://www.addilan.com/en/addilan-machine/>
- [26] Wire Arc - 3D HYBRID: AM FOR CNC. 3DHYBRID CNC METAL PRINTING TOOLS [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://www.3dhybridsolutions.com/wire-arc.html>
- [27] 3D HYBRID: AM FOR CNC - Home. 3DHYBRID CNC METAL PRINTING TOOLS [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://www.3dhybridsolutions.com/>
- [28] OZTURK, Erdem, L. Taner TUNC a Erhan BUDAK. Investigation of lead and tilt angle effects in 5-axis ball-end milling processes. International Journal of Machine Tools and Manufacture [online]. 2009, **49**(14), 1053–1062 [cit. 2019-07-11]. ISSN 0890-6955. Dostupné z: doi:10.1016/J.IJMACHTOOLS.2009.07.013
- [29] TPS 320i. Fronius PERFECT WELDING [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyroby/ruční-svařování/migmag/tpsi/tpsi/tps-320i>
- [30] TPS/i . Fronius [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://www.tps-i.com/>
- [31] Buy Fronius - Cooling Unit FK 5000 - Welding Supplies from Rapid Welding. Rapid Welding [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.rapidwelding.com/dynamic/DisplayItem.aspx?c=4%2C048%2C001>
- [32] Světový rekord: nejkompaktnější robotový svařovací hořák PushPull - Technika a trh. Technika a trh [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/obrabeni/svetovy-rekord-nejkompaktnejsi-robotovy-svarovaci-horak-pushpull>
- [33] IRB 1200 - Industrial Robots From ABB Robotics. ABB [online]. [cit. 2019-07-11].
-

- Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-1200>
- [34] New Desktop Mini 5 Axis CNC Milling Machine HY 6040 From ChinaCNCzone Factory Manufacturer. ChinaCNCzone [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.chinacnczone.com/en/new-desktop-mini-5-axis-cnc-milling-machine-hy-6040-from-chinacnczone-factory-manufacturer_l292_p213.html
- [35] ROTOCON Rotary Ground Clamp | Rotary Welding Ground | Meridian MC. MERIDINA LABORATORY [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.meridianlab.com/products/rotoconproduct-seriesmc-single-contact-high-current/>
- [36] Zemní magnet 600A rotační - TECHNITOM. TECHNITON [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.technitom.cz/zemnici-magnety/zemnici-magnet-600a-rotacni/>
- [37] Katalog 6000 SC. SKF, 2007. 1130s. [online]. 2005 [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: [https://www.arkov.cz/getattachment/4c979758-64b2-4b17-88d6-afb03ab3a85b/Hlavni-katalog-SKF-\(CZ\)](https://www.arkov.cz/getattachment/4c979758-64b2-4b17-88d6-afb03ab3a85b/Hlavni-katalog-SKF-(CZ))
- [38] SKF 7205 BEGAP ložisko kuličkové jednořadé s kosoúhlým stykem | Arkov.cz. ARKOV [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.arkov.cz/p/7205-begap-lozisko-kulickove-jednorade-s-kosouhlym-stykem-skf-19591?gclid=CjwKCAjwvJvpBRAtEiwAjLuRPSmIBCMDmcSSPjma2mw-TcS6ghPNHRzKZjioAcnN2SEkMd5rIUnExBoCukUQAvD_BwE
- [39] Katalog firmy SKF - Kuličková ložiska s kosoúhlým stykem. nedatováno.
- [40] Profile Rotary seal R04-A. SKF [online]. 2015 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: https://www.skf.com/binary/151-294600/0901d196802a99df-Rotary-seal-data-sheet-R04-A---11872_1-EN.pdf
- [41] Přesná pojistná matice INA ZM08. Mateza [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.mateza.cz/e-shop/presna-matice-zm08>
- [42] W61580 Wave Spring Washer. AMAZON [online]. [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.amazon.co.uk/Spring-Washers-W61580-Wave-Washer/dp/B002SRU85K>
-

- [43] CP22xx. Beckhoff [online]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/CP22xx/>
- [44] Časopis Automa EtherCAT Automation Protocol. AUTOMA [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: http://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/ethercat-automation-protocol-2017_02_0_9811/
- [45] Časopis Automa EtherCAT zůstává nejrychlejší průmyslovou ethernetovou sběrnici. AUTOMA [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/ethercat-zustava-nejrychlejsi-prumyslovou-ethernetovou-sbernici-2008_07_37529_5672/
- [46] EK1100. Beckhoff [online]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/english.asp?ethercat/ek1100.htm>
- [47] EL4102. Beckhoff [online]. Dostupné z: <https://www.beckhoff.com/EL4102/>
- [48] ČSN EN 60073 - Náhled. csnonlinefirmy [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/33/56073/56073_nahled.htm
- [49] Moeller - Elektrická zařízení strojů - Barevné rozlišení ovládacích tlačítek a jeho význam. MOELLER [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://archiv.eatonelektrotechnika.cz/priruckazapojeni/norm028.html>
- [50] Tlačítko Schneider Electric XB4BW33B5, 22,5 mm, 240 V, 3 A, šroubovací, zel. | Conrad.cz. Velkoobchod CONRAD [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://velkoobchod.conrad.cz/tlacitko-schneider-electric-xb4bw33b5-22-5-mm-240-v-3-a-sroubovaci-zel.k446529>
- [51] Schneider Electric XB4BA21 černá ovládač stiskací lícuující ? 22 s návratem 1Z neoznačený - ELEKTROPEN CZ. ELEKTROPEN [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.elektropen.cz/XB4BA21?gclid=CjwKCAjwvJvpBRAtEiwAjLuRPSnNIggM0dold53T687IO0uVPsugfeaQJ-xnP_1jVmr683egQSFVwxoCtnwQAvD_BwE
- [52] Nouzové zastavení stroje. Volba a použití tlačítek E-STOP. Automatizace.HW [online]. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/bezpecnost-stroju-komponenty/nouzove-zastaveni-stroje-volba-a-pouziti-e-stop-tlacitek.html>
- [53] Katalog | item Industrietechnik GmbH. item HABERKORN [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://cz-product.item24.com/cs/katalog/products/door-security->
-

1001012532/

- [54] XB4BG21 - black selector switch Ø22 2-position stay put 1NO 600V | Schneider Ele. Schneider Electric [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.schneider-electric.us/en/product/XB4BG21/black-selector-switch-ø22-2-position-stay-put-1no-600v/>
- [55] XB4BS8444: pushbutton, emergency stop, 2 NC contacts for Ø 22 mm at reichelt elektronik. reichelt [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.reichelt.com/de/en/pushbutton-emergency-stop-2-nc-contacts-for-22-mm-xb4bs8444-p221641.html>
- [56] XB4BA61 - modrá ovládač stiskací líčující Ø22 s návratem 1Z neoznačený | Schneid. Schneider Electric [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product/XB4BA61/modrá-ovládač-stiskací-líčující-ø22-s-návratem-1z-neoznačený>
- [57] Amazon.com: SCHNEIDER ELECTRIC XVC4B3K 40mm Tower ROG Base Mount: Home Improvement. AMAZON [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/SCHNEIDER-ELECTRIC-XVC4B3K-Tower-Mount/dp/B0110MYPFS>
- [58] LED pracovní světlo 54W BAR 10-30V. LEDSVITI [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.ledsviti.cz/led-pracovni-svetlo-54w-bar-10-30v/?gclid=CjwKCAjwvJvpBRAtEiwAjLuRPWURLzYeQJpsuE__DciJqvzyAVbnsvnnvFs3XPV7LQspHGqeYlQB2qBoCNZoQAvD_BwE
- [59] LED pracovní světlo 18W BAR 10-30V. LEDSVITI [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.ledsviti.cz/led-pracovni-svetlo-18w-bar-10-30v/?gclid=CjwKCAjwvJvpBRAtEiwAjLuRPFneXhU1BfWC06wG4v7qQklcGSsoFOiGHSjvPVPtrdSYGYuUbKfJdhoCA2oQAvD_BwE
- [60] Specification Specification. ABBAS [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: www.analyza-obrazu.cz
www.analyza-obrazu.cz
www.analyza-obrazu.cz
www.analyza-obrazu.cz
ABBAS,a.s.·Edisonova5·61200BrnoPhone+420541/240-956·Fax+420541/240-955·E-Mailinfo@analyza-obrazu.cz

- [61] Univerzální infračervené kamery | Micro-Epsilon. MICRO-EPSILON [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.micro-epsilon.cz/temperature-sensors/thermoIMAGER/universal-thermal-imagers/>
- [62] SDR-480-24 » MEAN WELL | AKAM Váš dodavatel značky MEAN WELL. MEAN WELL [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <http://www.mean-well.cz/napajeci-zdroje/zdroje-na-din-listu/sdr/sdr-480/show/sdr-480-24>
- [63] Vestavná síťová IEC zástrčka C14 s vypínačem K+B, 250 V, vertikální, 10A | Conrad.cz. CONRAD [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.conrad.cz/vestavna-sitova-iec-zastrcka-c14-s-vypinacem-k-b-250-v-vertikalni-10a.k501638?gclid=CjwKCAjw04vpBRB3EiwA0lieat399qhVmq_iGWeZwM86wGB5nQglpEZsBsZQeqATminKQD26zMf_ehoC6DAQAvD_BwE
- [64] KQ2E*-00, One-touch Fitting White Color - Bulkhead Union. SMC [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/digital_catalog_2/jsp/view_product_configurator.jsp?dc_product_id=159180
- [65] Konektor 16mm GX16 - 4 piny - 1 pár | arduino-shop.cz. ARDUINO-SHOP [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/1988-letecky-konektor-16mm-gx16-4-piny-1-par.html?gclid=CjwKCAjw04vpBRB3EiwA0lieas0S4v6-UYt7fRiIR0d0DkWY7tbhTSCugWQIe5KZnH-4oiN09OwmjBoC7HkQAvD_BwE
- [66] Nástavec s přírubou Ø 80 mm | INKOMO VZDUCHOTECHNIKA s.r.o. INKOMO [online]. [cit. 2019-07-11]. Dostupné z: <https://www.inkomo-vzduchotechnika.cz/nastavec-s-prirubou-p159-188>
- [67] Krycí laminátové měchy. HESTEGO [online]. [cit. 2019-07-14] Dostupné z: https://www.hestego.cz/fileadmin/user_upload/produkty/kryci_mechy/kryci_mechy_cz.pdf
- [68] Systémy hliníkových profilů. Haberkorn [online]. [cit. 2019-07-14]. Dostupné z: <https://www.haberkorn.cz/systemy-hlinikovych-profilu/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Zjednodušené znázornění principu technologie 3D tisku	10
Obr. 2: Zjednodušené znázornění principu technologie WAAM	11
Obr. 3: 3osý a 5tiosý systém	11
Obr. 4: Grafické zobrazení dílčích součástí metody WAAM	12
Obr. 5: Pracoviště s metodou WAAM Cranfieldské University [3].....	12
Obr. 6: Příklad výrobku Cranfieldské University [3].....	13
Obr. 7: Zjednodušené znázornění procesu navařování.....	14
Obr. 8: Podpurná konstrukce vytvořená metodou WAAM	15
Obr. 9: Parametry výroby dílů z Ti slitiny – obrábění.....	16
Obr. 10: Parametry výroby dílů z Ti slitiny – metoda WAAM.....	16
Obr. 11: Schéma MIG/MAG poloautomatického svařování [8]	17
Obr. 12: Př. poloautomatického svařování technologií MIG/ MAG od firmy Fronius [9].....	18
Obr. 13: MIG/MAG svařování – detail [10]	18
Obr. 14: Příklad automatického pracoviště technologie MIG/MAG od firmy Fronius [11].....	19
Obr. 15: Graf parametrů pro nastavení přenosu [8]	21
Obr. 16: Přídavný materiál ne formě drátu navinutý na cívce od firmy Böhler [14].....	22
Obr. 17: GEFERTEC arc603 [16]	26
Obr. 18: GEFERTEC arc605 [16]	26
Obr. 19: Příklad výroby navařovaného dílce ve stroji GEFERTEC arc605 [16].....	27
Obr. 20: GEFERTEC arc405 [16]	27
Obr. 21: WELDPRINT MCV 5X od firmy Kovošvit MAS [17]	28
Obr. 22: Pracovní prostor stroje [17].....	29
Obr. 23: Ukázka navařování pomocí metody WAAM [17].....	30
Obr. 24: Čištění dílce drátěným kartáčem [17].....	30
Obr. 25: VARIAXIS j-600 AM [19]	31
Obr. 26: Příklad navařování a následného obrábění formy pro pneumatiky [19]	31
Obr. 27: Vytisknutý lodní šroub [20].....	32
Obr. 28: Robot od firmy ABB navařující vrstvy mostu [20].....	32
Obr. 29: Most vytvořený metody WAAM [21]	33
Obr. 30: Socha nazývána Butterfly Screen [22]	33
Obr. 31: Koncept stroje firmy ADDALIAN [23]	34
Obr. 32: WAAM metoda dle firmy ADDALIAN [23].....	34
Obr. 33: Hlavice firmy 3D HYBRID [25].....	35
Obr. 34: Příklad obrobeného a neobrobeného dílce [25]	35
Obr. 35: Zjednodušené zobrazení patentu Wire+Powred [24].....	35
Obr. 36: Znázornění pohybů LEAD a TILT [26]	36
Obr. 37: Svařovací zdroj TPS 320i od firmy Fronius [28]	38
Obr. 38: Chladicí jednotka FK5000 od firmy Fronius [29]	38
Obr. 39: Podavač drátu WF 25i R od firmy Fronius [28].....	39
Obr. 40: Model - Splitbox SB 60i R.....	39
Obr. 41: Model svařovacího hořáku Robacta Drive.....	40
Obr. 42: Schéma možností volby stroje.....	40
Obr. 43: Porovnání angulárního robota a stolní 5ti osé gravírovací frézky [31], [32].....	41
Obr. 44: Ukázka programu RCMT Additeve machine control	42
Obr. 45: Poloha umístění zkušební stanice v laboratoři svařování	43

Obr. 46: 5-ti osá stolová gravírovací frézky CNC 6040 [32]	44
Obr. 47: Porovnání původní konstrukce frézky se současnou konstrukcí	45
Obr. 48: Popis částí frézky	46
Obr. 49: Porovnání původní konstrukce s novou konstrukcí otočně sklopného stolu	46
Obr. 50: Rotační zemnicí kontakt od MERIDIAN LABORATORY [33]	47
Obr. 51: Zemnicí magnet rotační 600A [34]	48
Obr. 52: Natočení kolébky o 0° a 90°	49
Obr. 53: Předepjetí párovaných ložisek uložených do "O" [35]	51
Obr. 54: Ložisko kuličkové jednořadé s kosoúhlým stykem [36]	52
Obr. 55: Uložení ložisek do "O" [37]	52
Obr. 56: Popis rotačního těsnění [38]	55
Obr. 57: Přesná pojistná matice ZMA20 od firmy INA [39]	56
Obr. 58: Vlnová pružná podložka W61580 [40]	56
Obr. 59: Hřídel	57
Obr. 60: Návarná destička průměru 180 mm	57
Obr. 61: Chladicí deska	57
Obr. 62: Příruba - rotační přívod chlaz. část 2	57
Obr. 63: Distanční pouzdro	57
Obr. 64: Příruba - rotační přívod chlaz. část 1	57
Obr. 65: Rotační přívod chlazení část 2	57
Obr. 66: Rotační přívod chlazení část 1	57
Obr. 67: Zemnicí kontakt	58
Obr. 68: Příruba - zemnicí kontakt	58
Obr. 69: Distanční kroužek	58
Obr. 70: Kryt otočného stolu	58
Obr. 71: Kryt kolébky část 1	58
Obr. 72: Kryt kolébky část 2	58
Obr. 73: Vyrobené dílce rotačního přívodu chlazení část 1 a 2	58
Obr. 74: Zjednodušený popis konstrukce otočného stolu v řezu	59
Obr. 75: Porovnání půdní konstrukce kolébky s upravenou konstrukcí	60
Obr. 76: Porovnání půdní konstrukce stojanu s upravenou konstrukcí	61
Obr. 77: Izomerický pohled na upravenou konstrukci stojanu.	61
Obr. 78: Porovnání konstrukce osy Z s původním provedením a upravenou konstrukcí	62
Obr. 79: Osa Z - přední pohled	63
Obr. 80: Osa Z - izometrický pohled	64
Obr. 81: Zjednodušené schéma zapojení elektrických zařízení	65
Obr. 82: Umístění elektrických komponent a zařízení - pohled 1	65
Obr. 83: Umístění elektrických komponent a zařízení - pohled 2	66
Obr. 84: 19ti palcový dotykový display [41]	66
Obr. 85: Integrovaný průmyslový počítač [41]	66
Obr. 86: Popis složení modulů od firmy Beckhoff	67
Obr. 87: EtherCAD Coupler EK1100 od firmy Beckhoff [44]	68
Obr. 88: Terminál EL4102 [45]	68
Obr. 89: Umístění modulů od firmy Beckhoff	68
Obr. 90: Tlačítko START XB4BW33B5 [48]	70
Obr. 91: Tlačítko STOP XB4BA21 [49]	70
Obr. 92: Elektrický bezpečnostní zámek 2NC [51]	71

Obr. 93: Otočný ovladač XB4BG21 [52].....	71
Obr. 94: Tlačítko E-STOP XB4BS8444 [53].....	71
Obr. 95: Tlačítko OBNOVENÍ XB4BA61 [54]	71
Obr. 96: Signální sloup 40 XVC4B3K [55].....	71
Obr. 97: LED pracovní světlo 54W BAR 10-30V [56].....	72
Obr. 98: LED pracovní světlo 18W BAR 10-30V [57].....	72
Obr. 99: Graf světelného toku pro světlo 54W [56]	72
Obr. 100: Graf světelného toku pro světlo 18W [57]	72
Obr. 101: Umístění světel.....	73
Obr. 102: Průmyslová kamera IDS UI-5250CP-C-HQ [58].....	73
Obr. 103: Umístění kamery	74
Obr. 104: Termokamera TIM 160 [59]	74
Obr. 105: Umístění termokamery v krytu	75
Obr. 106: Zdroj na DIN lištu SDR-480-24 od firmy MEAN WELL [60].....	75
Obr. 107: Umístění zdroje	76
Obr. 108: Vestavná síťová IEC zástrčka C14 [61]	76
Obr. 109: Propojka od firmy SMC [62]	77
Obr. 110: Konektor [63]	77
Obr. 111: Příruba pro odsávání [64]	77
Obr. 112: Krycí laminátový měch od firmy Hestego [65]	78
Obr. 113: Ukázka systému hliníkových profilů [66]	78
Obr. 114: Por. vstup. parametrů rozměrů krytovaní s návrhem od firmy Haberkorn	79
Obr. 115: Celková vizualizace zkušební stanice	80
Obr. 116: Zkouška těsnosti rotačního přívodu chlazení	81
Obr. 117: Namontovaná rotační přívod chlazení.....	81
Obr. 118: Adaptovaná konstrukce 5ti osé gravírovací frézky.....	82
Obr. 119: Konstrukce otočného stolu s kolébkou.....	82

Seznam tabulek

Tab. 1: Srovnání výroby pomocí práškových slitin a slitin svařovacích drátů [14]	22
Tab. 2: Metalurgické a procesní výhody drátových elektrod od firmy Böhler [14].....	23
Tab. 3: Tabulky materiálů od firmy Böhler [13]	23
Tab. 4: Porovnání možností volby stroje	41
Tab. 5: Parametry konstrukce	48
Tab. 6: Hodnoty lehkého předepjetí párovaného ložiska 7205 BEGAP [35]	51
Tab. 7: Základní parametry ložiska 7205 BECBP [35].....	51
Tab. 8: Součinitel maximálního zatížení [35].....	53
Tab. 9: Parametry materiálu rotačního těsnění [38]	55
Tab. 10: Barevné rozlišení tlačítko dle normy ČSN EN 60074 a ČSN EN 60204-1 [47]	69
Tab. 11: Parametry krytovaní stroje	80



Seznam použitého softwaru

Siemens NX10

Microsoft Office 365

Seznam příloh

Výkresová dokumentace

- ASM_000004520_00_PDF_1
 - ASM_000004375_00_PDF_1
 - ASM_000004543_00_PDF_1
 - PRT_000018368_00_PDF_1
 - PRT_000018369_00_PDF_1
 - PRT_000018372_00_PDF_1
 - PRT_000018373_00_PDF_1
 - PRT_000018374_00_PDF_1
 - PRT_000018375_00_PDF_1
 - PRT_000022930_00_PDF_1
 - KUSOVNIK_ASM_000004543_00_PDF_1
 - KUSOVNIK_ASM_000004543_00_PDF_2
 - ASM_000004544_00_PDF_1
 - PRT_000018360_00_PDF_1
 - PRT_000018364_00_PDF_1
 - PRT_000018365_00_PDF_1
 - PRT_000018370_00_PDF_1
 - PRT_000018371_00_PDF_1
 - SUP_000004378_00_PDF_1



- SUP_000004380_00_PDF_1
- KUSOVNIK_ASM_000004544_00_PDF_1
- ASM_000004535_01_PDF_1
 - PRT_000018030_00_PDF_1
 - PRT_000018319_00_PDF_1
 - PRT_000018321_00_PDF_1
 - PRT_000018323_00_PDF_1
 - PRT_000018328_00_PDF_1
 - PRT_000018332_00_PDF_1
 - PRT_000018336_00_PDF_1
 - PRT_000018337_00_PDF_1
 - PRT_000018343_00_PDF_1
 - PRT_000018382_00_PDF_1
 - PRT_000022957_00_PDF_1
 - SUP_000004366_00_PDF_1
 - KUSOVNIK_ASM_000004535_01_PDF_1
 - KUSOVNIK_ASM_000004535_01_PDF_2
- ASM_000004545_00_PDF_1
 - PRT_000018468_00_PDF_1
 - PRT_000018469_00_PDF_1
 - SUP_000004382_00_PDF_1
 - KUSOVNIK_ASM_000004545_00_PDF_1
- KUSOVNIK_ASM_000004375_00_PDF_1
- KUSOVNIK_ASM_000004520_00_PDF_1
- KUSOVNIK_ASM_000004520_00_PDF_2



KUSOVNIK_PLECHY_DXF_PDF

PLECHY_FORMAT_DXF/

Elektronické přílohy

CD

- DP_Stepanek_vykresova_dokumentace/
- DP_Stepanek_modely_format_STEP/
- DP_Stepanek.pdf
- DP_Stepanek_zadani.pdf