



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

SIMULACE ROBOTICKÉHO 3D TISKU V PROGRAMU POWERMILL

ROBOTIC 3D PRINTING SIMULATION IN SW POWERMILL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Melich

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------------------|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Student: | Bc. Michal Melich |
| Studijní program: | Výrobní stroje, systémy a roboty |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | Ing. Mikuláš Szabari, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2023/24 |

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

Simulace robotického 3D tisku v programu PowerMill

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student vypracuje model svařovacího pracoviště, nacházející se na ÚST. Simulační model bude obsahovat robot KR5 arc a polohovadlo DKP 400 a okolí. Úkolem bude vytisknout zvolený díl pomocí 3D tisku technologií WAAM. Student vyřeší singulární a kolizní pozice (post-processing) a implementuje technologii do výstupného G-kódu.

Cíle diplomové práce:

Rešerše v oblasti robotického 3D tisku technologií WAAM.
Rozbor řešené problematiky.
Vytvoření simulačního modelu pracoviště v SW PowerMillu
Implementace technologie v G-kódu
Simulace svařovaného dílu
Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB. Springer Handbook of Robotics. 2nd Edition. Cham: Springer International Publishing, 2016, 2259 s. ISBN 9783319325507. ISSN 2522-8692.

Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-32552-1

PIRES, J. Norberto. Industrial Robots Programming. New York, NY: Springer Nature, 2007, 290 s. ISBN 9780387233260. Dostupné z: doi:10.1007/b101252

NOF, Shimon Y. Springer Handbook of Automation. Cham: Springer International Publishing, 2023, 1533 s. ISBN 303096728X.

Robot Grippers. Assembly Automation [online]. Bedford: Emerald Group Publishing Limited, 2009, 29(1), 75-83 [cit. 2023-09-13]. ISSN 0144-5154. Dostupné z: doi:10.1108/aa.2009.03329aae.001

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Táto diplomová práca sa zaoberá problematikou simulácie 3D tlače kovu technológiou WAAM s použitím priemyselného robota. Na začiatku práce sú predstavené prvky a technológie, ktoré sú v súčasnosti implementované na pracoviská robotizovaného zvarovania. V nasledujúcej časti práce je popísaná tvorba simulačného modelu pracoviska robotizovaného zvarovania v softvéri Powermill a následná tvorba trajektórie nástroja na základe vybraného dielu pre výrobu. Posledná časť práce je venovaná simulácii vytvorených dráh a následnej analýze výsledkov simulácie.

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of simulating metal 3D printing using the WAAM technology with the use of an industrial robot. At the beginning of the thesis, elements and technologies currently implemented in robotic welding workplaces are introduced. The following section describes the creation of a simulation model of the robotic welding workplace in Powermill software and subsequent toolpath generation based on the selected part for manufacturing. The final part of the thesis is dedicated to the simulation of the created paths and subsequent analysis of the simulation results.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Priemyselný robot, polohovadlo, robotizované zvarovanie, WAAM, simulácia, Powermill, trajektória nástroja, tool center point

KEYWORDS

Industrial robot, positioner, robotic welding, WAAM, simulation, Powermill, tool path, tool center point

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

MELICH, Michal. Simulace robotického 3D tisku v programu PowerMill. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157949>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Mikuláš Szabari PhD.

POĎAKOVANIE

Touto cestou by som chcel poďakovať Ing. Mikulášovi Szabarimu PhD. za vedenie tejto diplomovej práce, a tak isto Ing. Josefovi Izákovi za cenné rady, ktoré mi pomohli uľahčiť dosiahnutie cieľov tejto diplomovej práce. Ďalej by som chcel poďakovať svojim rodičom a priateľke za všetku podporu ktorú som od nich pri vypracovávaní práce ale aj počas štúdia neustále dostával. Ďakujem.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, vypracoval som ju samostatne pod vedením vedúceho práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry.

Ako autor uvedenej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následku porušenia ustanovenia §11 a nasledujúcich autorského zákona č.121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov.

V Brne dňa 20. 5. 2024

.....

Bc. Michal Melich

OBSAH

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | ÚVOD | 15 |
| 2 | ROBOTIZOVANÉ PRACOVISKÁ OBLÚKOVÉHO ZVÁRANIA | 17 |
| 2.1 | Zváracie roboty | 18 |
| 2.1.1 | KUKA | 18 |
| 2.1.2 | FANUC | 19 |
| 2.1.3 | ABB..... | 19 |
| 2.1.4 | YASKAWA | 20 |
| 2.2 | Polohovadlá | 20 |
| 2.2.1 | Jedno-osé polohovadlá | 20 |
| 2.2.2 | Dvoj-osé polohovadlá | 21 |
| 2.2.3 | Viac-osé polohovadlá..... | 22 |
| 2.3 | Zvárací zdroj..... | 23 |
| 2.3.1 | FRONIUS..... | 23 |
| 2.3.2 | LINCOLN ELECTRIC | 24 |
| 2.3.3 | MILLER ELECTRIC..... | 25 |
| 2.4 | Podávač drôtu | 26 |
| 2.5 | Technologický efektor..... | 28 |
| 2.5.1 | Zváracie horáky | 29 |
| 2.5.2 | Kolízna ochrana..... | 30 |
| 2.6 | Údržba zváracieho horáka | 31 |
| 2.6.1 | Čistiace stanice hubice horáka | 31 |
| 2.6.2 | Stanice automatickej výmeny častí horáka | 32 |
| 2.7 | Dresspack | 33 |
| 2.7.1 | Ochranné hadice..... | 34 |
| 2.7.2 | Pohyblivé klby..... | 34 |
| 2.7.3 | Recirkulačný systém | 35 |
| 2.7.4 | Chrániče proti nárazu | 36 |
| 3 | WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING..... | 37 |
| 3.1 | Metal inert gas (MIG)..... | 39 |
| 3.2 | Cold metal transfer (CMT)..... | 40 |
| 3.3 | Tungsten inert gas (TIG) | 41 |
| 3.4 | Pulsed Arc Plasma (PAP)..... | 42 |
| 4 | CAD/CAM SIMULAČNÉ SOFTVÉRY PRE ROBOTY | 45 |
| 4.1 | Robotmaster..... | 45 |
| 4.2 | RoboDK..... | 46 |
| 4.3 | Autodesk Powermill | 47 |
| 5 | ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY | 49 |
| 5.1 | Popis zadaného problému..... | 49 |
| 5.2 | Určenie cieľov | 49 |
| 5.3 | Postup riešenia..... | 49 |
| 5.4 | Popis reálneho pracoviska | 49 |
| 5.5 | Výber vhodného dielu pre výrobu technológiou WAAM..... | 50 |
| 5.6 | Umiestnenie vyrábaného dielu | 51 |
| 6 | SIMULÁCIA ROBOTICKEJ 3D TLAČE | 53 |
| 6.1 | Tvorba 3D modelu pracoviska | 53 |

| | | |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 6.2 | Predspracovanie 3D modelu pracoviska v softvéri Powershape..... | 54 |
| 6.3 | Tvorba simulačného modelu pre softvér Powermill | 55 |
| 6.3.1 | Úprava súboru mtd..... | 56 |
| 6.3.2 | Tvorba variant mtd súboru pre rôzne konfigurácie miesta výroby dielu..... | 58 |
| 6.3.3 | Úprava konfigurácie robota | 60 |
| 6.4 | Tvorba simulácie dráhy nástroja | 60 |
| 6.4.1 | Analýza stratégií tvorby dráhy nástroja | 61 |
| 6.4.2 | Tvorba dráhy nástroja | 61 |
| 6.5 | Simulácia vytvorenej dráhy vybraného dielu a tvorba G – kódu..... | 64 |
| 6.5.1 | Simulácia výroby dielu na zväzacom stole | 64 |
| 6.5.2 | Simulácia výroby na polohovadle..... | 65 |
| 6.5.3 | Tvorba programu pre robot..... | 65 |
| 6.5.4 | Návrh postprocesingu vygenerovaného programu pre robot..... | 66 |
| 7 | ZHODNOTENIE A DISKUSIA VÝSLEDKOV | 69 |
| 8 | ZÁVER..... | 71 |
| 9 | ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY | 73 |
| 10 | ZOZNAM SKRATIEK, OBRÁZKOV A TABULIEK | 81 |
| 10.1 | Zoznam skratiek | 81 |
| 10.2 | Zoznam obrázkov..... | 81 |
| 10.3 | Zoznam tabuliek..... | 83 |
| 11 | ZOZNAM PRÍLOH | 85 |

1 ÚVOD

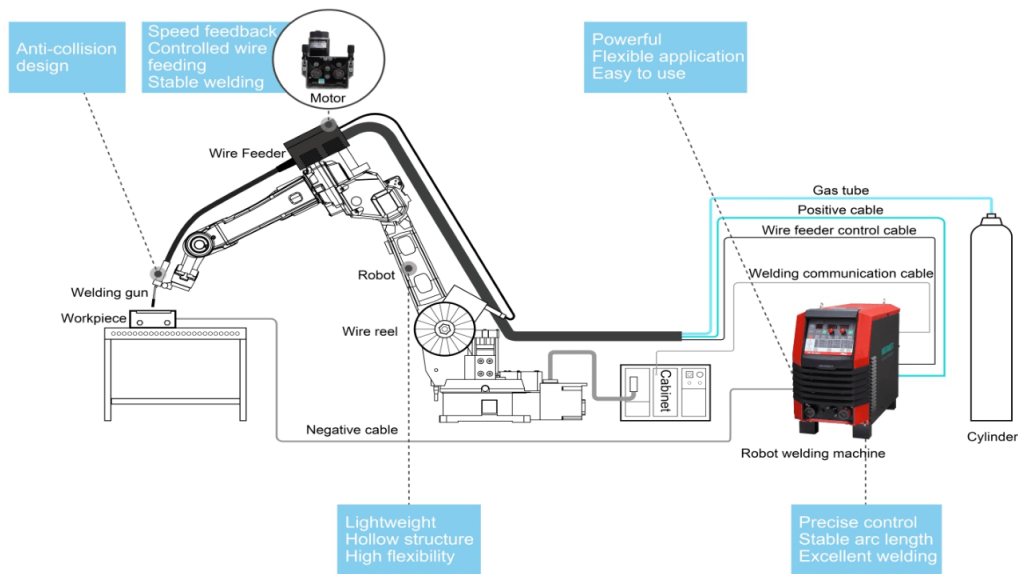
V súčasnosti sa 3D tlač stáva neodmysliteľnou súčasťou mnohých odvetví priemyslu, od automobilového, aerospace až po medicínu a architektúru. S rozvojom tejto technológie vznikajú nové metódy a postupy, ktoré umožňujú presnejšie a efektívnejšie vytváranie komplexných geometrických štruktúr z rôznych materiálov. Jednou z týchto inovatívnych technológií je Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), ktorá kombinuje svet zvárania kovov a 3D tlače. Táto metóda prináša možnosti pre rýchle a nákladovo efektívne vytváranie kovových dielov s vysokou presnosťou a kvalitou. Táto diplomová práca sa zameriava na modelovanie a simuláciu procesu 3D tlače technológiou WAAM s cieľom porozumieť jeho vlastnostiam, ovplyvňujúcim faktorom a stratégiám tvorby trajektórií nástroja. Hlavným zámerom je vytvoriť simulačný model pracoviska v softvéri Autodesk Powermill a následne nastaviť parametre a podmienky, ktoré vedú k získaniu v praxi použiteľného programu pre robot, ako aj skúmať potenciálne obmedzenia tohto softvéru.

Prvá časť práce je venovaná rešerši pracovísk robotizovaného zvárania, pričom sa zameriava na jednotlivé komponenty pracoviska a poskytuje ucelený prehľad v súčasnosti dostupných a používaných komponentov týchto pracovísk. V tejto časti bude pozornosť venovaná aj najpoužívanejším metódam 3D tlače technológiou WAAM a bude poskytnutý stručný prehľad týchto metód. Pozornosť bude venovaná aj simulačným CAD/CAM softvérom pre priemyselné roboty dostupným na trhu a budú priblížené možnosti a vlastnosti týchto softvérov.

Druhá časť práce sa bude zaoberať simuláciou 3D tlače pomocou softvéru PowerMill od spoločnosti Autodesk. V tejto časti bude analyzovaný proces tvorby modelu zvaracieho pracoviska, tvorba trajektórie nástroja, nastavenie procesných parametrov a validácia na základe experimentálnych údajov. V rámci tejto časti sa tiež preskúmajú možnosti optimalizácie trajektórie pomocou simulačných nástrojov v softvéri PowerMill. Výsledky práce by mohli byť prospešné pre inžinierske firmy a podniky, ktoré sa zaoberajú zváraním alebo 3D tlačou kovu, a hľadajú efektívne metódy na tvorbu programov pre výrobu komplexných dielov za účelom zlepšenia produktivity a zníženia nákladov.

2 ROBOTIZOVANÉ PRACOVISKÁ OBLÚKOVÉHO ZVÁRANIA

V súčasnosti sú robotizované pracoviská oblúkového zvárania neoddeliteľnou súčasťou moderného priemyslu. Tieto pracoviská vybavené pokročilými robotickými technológiami, hrajú kľúčovú úlohu v zváracích operáciách, prinášajúc efektívnosť a rýchlosť do výrobných procesov. V tejto kapitole bude rozobraná štruktúra pracovísk robotizovaného zvárania s dôrazom na jednotlivé prvky pracoviska.



Obr. 1 Schéma pracoviska robotizovaného zvárania [54]

Jednoduché pracovisko robotizovaného zvárania na Obr. 1 sa skladá z nasledujúcich častí:

- Robot
- Kontrolér robota
- Kolízna ochrana
- Zvárací zdroj
- Technologický efektor
- Nádoby s inertným plynom
- Prívod médií k zváraciemu horáku
- Podávač drôtu
- Zásobník drôtu
- Komunikačné rozhranie robot – zvárací zdroj

Tieto časti sú základom každého pracoviska robotického zvárania. V prípade potreby môže byť pracovisko rozšírené o ďalšie prvky, ako sú napríklad polohovadlá, lineárne osi robota, zariadenie na čistenie zváracieho horáka, prípadne iný typ podávania drôtu. [1]

2.1 Zváracie roboty

Priemyselné roboty v súčasnosti zohrávajú významnú úlohu v procese optimalizácie a modernizácie procesov v priemysle. Ich schopnosť kombinovať presnosť, rýchlosť a opakovateľnosť operácií z nich robí nenahraditeľnú súčasť výrobného procesu. Tieto vlastnosti sú dôvodom prečo jedna z najčastejšie robotizovaných operácií je oblúkové zváranie. Vysoká miera nasadzovania priemyselných robotov na aplikácie oblúkového zvárania priniesla inovácie zo strany výrobcov priemyselných robotov. V súčasnosti výrobcovia priemyselných robotov ako KUKA, FANUC, YASKAWA a iní, ponúkajú priemyselné roboty špeciálne upravené pre oblúkové zváranie. Tieto špeciálne úpravy robotov zahŕňajú napríklad úpravu ramena pre vedenie káblov a médií stredom šiestej osi, či pripravené miesto na ramene robota pre montáž podávača drôtu. Na nasledujúcich stranách bude poskytnutý stručný prehľad v súčasnosti dostupných zváracích robotov od rôznych výrobcov. [1] [2] [3] [4] [5]

2.1.1 KUKA

Kuka ponúka viacero variant priemyselných robotov vhodných pre oblúkové zváranie, konkrétne rady KR Agilus, KR Iontec, KR Cybertech a KR Quantec. Dosah a nosnosť týchto robotov sa pohybuje od najnižšej rady KR Agilus s dosahom 706 – 1101 mm a nosnosťou do 11 kg, až po najvyššiu radu KR Quantec s dosahom 2671 – 3904 mm a nosnosťou do 300 kg. Špeciálne upravené roboty KUKA na oblúkové zváranie majú označenie ARC, sú to rady KR Cybertech nano ARC s nosnosťou 0 – 8 kg a dosahom do 1843 mm a KR Cybertech ARC s nosnosťou 8 kg a dosahom 2101 mm znázornené na obr. 2. Mimo zváracích robotov Kuka taktiež ponúka aj externé osy vhodné pre aplikácie oblúkového zvárania, ako napríklad polohovadlá alebo lineárne osi. [3]



Obr. 2 Roboty KUKA KR Cybertech ARC a KR Cybertech nano ARC [3]

2.1.2 FANUC

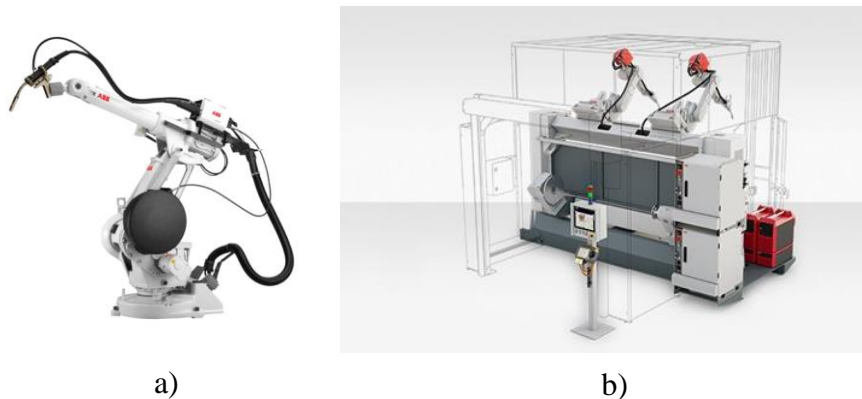
Japonská firma Fanuc ponúka pre aplikácie oblúkového zvarovania radu robotov ARC Mate. Táto rada v súčasnosti zahŕňa 6 robotov. Nosnosti týchto robotov sa pohybujú v rozmedzí 8 – 25 kg s dosahom 1103 – 2272 mm. Každý z robotov rady ARC Mate má integrovaný hose pack a pripravené miesto pre montáž podávača drôtu spolu s dutým ramenom štvrtej osi a dutou šiestou osou pre bezproblémové vedenie kabeláže. Fanuc pri vývoji svojich zvaracích robotov dbal aj na prevádzku robotov v stiesnených a ťažko prístupných priestoroch. Rada ARC Mate (viď obr. 3) má rameno druhej osi prehnuté do oblúka, čo umožňuje aby robot dosiahol aj ťažšie prístupné miesta. [4]



Obr. 3 Zvaracie roboty firmy Fanuc [59] [60]

2.1.3 ABB

ABB patrí k svetovej špičke v oblasti robotiky. V súčasnosti má firma ABB v ponuke tri špecializované rady robotov, a to IRB 1410, IRB 1520 ID a IRB 2600 ID. Dosahy týchto rád robotov sa pohybujú v rozmedzí 1.44 m pri rade IRB 1410 s nosnosťou 5kg až 2 m pri rade IRB 2600 ID s nosnosťou 8.15 kg. Okrem zvaracích robotov firma ABB ponúka aj hotové riešenia zvaracích buniek Omnivance FlexArc rôznych veľkostí a konfigurácií, spolu s príslušenstvom k pracoviskám oblúkového zvarovania (polohovadlá, podávače drôtu). [2]



Obr. 4 a) Robot ABB IBR 1410, b) Zvaracia bunka Omnivance FlexArc [57] [58]

2.1.4 YASKAWA

Japonská firma Yaskawa patrí k svetovej špičke výrobcov robotov. Pre oblúkové zváranie ponúka špecializované rady robotov Motoman AR a Motoman GA znázornené na obr. 5. Dosah robotov rád Motoman AR a Motoman GA sa pohybuje v rozmedzí 700 – 3120 mm s nosnosťami 7 – 50 kg, čo umožňuje použitie týchto robotov na širokú škálu dielov. Zváracie roboty firmy Yaskawa podobne ako zváracie roboty iných firiem majú integrovaný hose pack, dutú šiestu os a pripravené miesto na ramene robota pre montáž podávača drôtu. Okrem zváracích robotov firma Yaskawa ponúka pre aplikácie oblúkového zvárania taktiež polohovadlá, lineárne osi a portály. [5]



Obr. 5 Zváracie roboty firmy Yaskawa [55] [56]

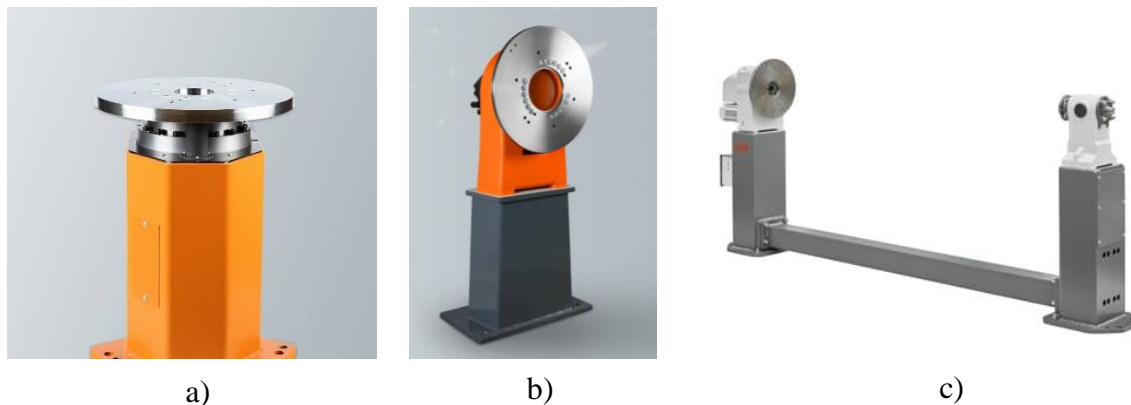
2.2 Polohovadlá

Polohovadlo je programovateľný mechanizmus s jedným alebo viacerými osami, ktorý spolupracuje s priemyselným robotom tak, aby rozšíril pracovný priestor robota. Avšak na rozdiel od lineárnych osí, kde sa na externej osi pohybuje robot, v konfigurácii robot – polohovadlo je obrobok namontovaný na polohovadle, ktoré je nezávisle ovládané od robota, čím sa zvyšuje flexibilita. Existujú polohovadlá rôznych veľkostí, typov, konfigurácií a nosností, od najjednoduchších jednoosých polohovadiel (otočných stolov), až po komplexné viac-osé polohovadlá. [6] [7]

2.2.1 Jedno-osé polohovadlá

Jedno-osé polohovadlá sú najjednoduchším typom polohovadla. Ako naznačuje názov, tieto polohovadlá zabezpečujú otáčanie obrobku okolo jednej osi. Jedno-osé polohovadlá sú dostupné v rôznych konfiguráciách. Najčastejšie používanými jedno-osými polohovadlami sú otočné stoly (obr. 6 a), kde je obrobok otáčaný okolo vertikálnej osi. Dostupné sú však aj iné varianty jedno-osých polohovadiel, ako napríklad jedno-osé polohovadlo s rotáciou

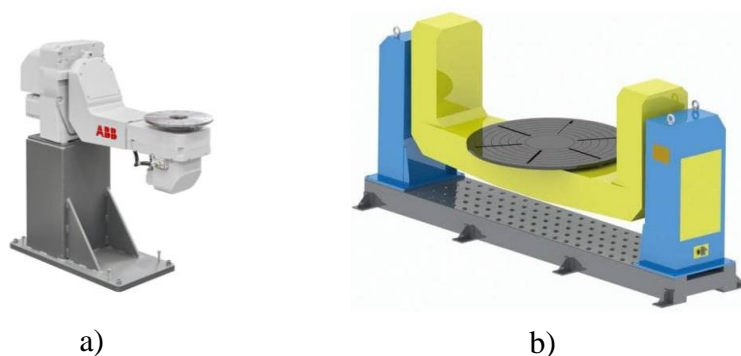
okolo horizontálnej osi KUKA KP1-H znázornené na obr. 6 b). Pre prácu na kusoch značnej dĺžky, sa používajú horizontálne polohovadlá v konfigurácii headstock – tailstock (vreteno - koník), ktoré zabezpečujú obojstrannú podporu a otáčanie obrobku. Príklad polohovadla v konfigurácii headstock – tailstock je znázornený na obr. 6 c). [6] [7]



Obr. 6 a) Otočný stôl KUKA KP1-V, b) Horizontálne polohovadlo KUKA KP1-H, c) Horizontálne polohovadlo ABB IRBP L [61] [62] [63]

2.2.2 Dvoj-osé polohovadlá

Dvoj-osé polohovadlá sú určené pre polohovanie obrobku v dvoch osiach, čím značne rozširujú prístup robota k miestam obrobku ktoré by bez polohovadla pre robot neboli prístupné. Na trhu je dostupných viacero typov dvoj-osých polohovadiel, konkrétne polohovadlá typu L, U, C a typ Platform znázornené na obr.7 a obr.8. Výber konkrétneho typu dvoj-osého polohovadla závisí od aplikácie, dostupného priestoru a veľkosti obrobku. Tieto polohovadlá sa v súčasnosti najčastejšie používajú pre robotizované oblúkové zvaranie a obrábanie. [6] [7]



Obr. 7 a) Dvoj-osé polohovadlo typu L, b) Dvoj-osé polohovadlo typu U [64] [65]



a)



b)

Obr. 8 a) Dvoj-osé polohovadlo typu C, b) Dvoj-osé polohovadlo typu Platform [66] [67]

2.2.3 Viac-osé polohovadlá

Viac-osé polohovadlá sú často konštruované ako dvojpohové riešenia, kde robot pracuje na jednej strane a na druhej strane operátor, prípadne iný robot zakladá a vykladá obrobky. Medzi oboma stanicami je umiestnená prepážka, ktorá zabraňuje vstupu do pracoviska a chráni operátora. Po dokončení robotických operácií sa polohovadlo otočí, robot začne pracovať na novom obrobku a operátor medzi tým vymení hotový obrobok za nový. Výrobcovia robotov ako KUKA, ABB a YASKAWA tieto polohovadlá ponúkajú ako príslušenstvo k svojim zväracím robotom. Na obr. 9 sú znázornené riešenia viac-osých polohovadiel týchto výrobcov. [8] [9] [10] [11]



a)



b)

Obr. 9 a) Troj-osé polohovadlo KUKA KP3-H2H, b) Troj-osé polohovadlo ABB IRBP D [68] [8]

2.3 Zvárací zdroj

Zvárací zdroj je zariadenie, ktoré do procesu oblúkového zvárania dodáva potrebnú energiu pre zapálenie a horenie elektrického oblúka. V automatizovaných procesoch je vyžadovaná vysoká spoľahlivosť zariadení, aby bola zaistená plynulosť prevádzky. Z toho dôvodu sú v automatizovaných procesoch na zváracie zdroje kladené požiadavky ako:

- Stabilita oblúka
- Možnosť plynulej regulácie
- Stály výkon a vysoká účinnosť
- Vysoká spoľahlivosť
- Bezpečnosť
- Nízke náklady na opravu
- Dostupný servis

Zváracie zdroje možno rozdeliť do dvoch kategórií podľa:

1. Spôsobu premeny energie
 - Rotačné zdroje (zváracie dynamá)
 - Statické zdroje
 - Zdroje so sieťovým transformátorom
 - Zdroje striedavého prúdu (transformátory)
 - Zdroje jednosmerného prúdu (usmerňovače)
 - Zváracie invertory (meniče)
2. Dodávaného prúdu
 - Zdroje jednosmerného prúdu
 - Zdroje striedavého prúdu
 - Zdroje usmerného prúdu

Existuje mnoho výrobcov zvárackej techniky, avšak z pohľadu robotizovaného zvárania na trhu dominujú najmä firmy Fronius, Lincoln Electric a Miller Electric. [12] [13]

2.3.1 FRONIUS

Fronius je rakúsky technologický gigant so silným zameraním na oblasť energetickej elektroniky a automatizácie. Spoločnosť bola založená v roku 1945 vo meste Pettenbach v Rakúsku a postupne sa stala jedným z vedúcich svetových dodávateľov inovačných riešení v oblasti energetiky. Firma Fronius má na trhu svoje zastúpenie v podobe rady TPS/i zváracích zdrojov (viď obr. 10). Táto rada zdrojov poskytuje elektrický prúd na výstupe o veľkosti až 600 A, vďaka čomu dokáže splniť aj tie najprísnejšie požiadavky pre zváranie ocelí a hliníka. Zváracie zdroje firmy Fronius patria k špičke na trhu vďaka svojim vlastnostiam, ktoré zahŕňajú :

- Vysoký prúd na výstupe, až 600 A
- Možnosť zvárania širokej škály ocelí a iných materiálov
- Intuitívne užívateľské rozhranie v tridsiatich jazykoch

- Vysoká flexibilita, modularita a množstvo softvérových balíkov umožňuje splniť individuálne požiadavky na zváranie
- Rýchla zmena procesných parametrov

Modulárna štruktúra, smart funkcie a množstvo opcí tejto rady zdrojov poskytujú potrebnú flexibilitu pre rôzne aplikácie oblúkového zvárania. Rada TPS/i je určená nielen pre ručné zváranie. Po rozšírení o komunikačné rozhranie zdroj – robot je možné zdroj použiť pre robotizované zváranie. [14]



Obr. 10 Zváracie zdroje rady TSP/i firmy Fronius [69]

2.3.2 LINCOLN ELECTRIC

Lincoln Electric je americká spoločnosť so sídlom v Clevelande, Ohio, ktorá je jedným z popredných svetových dodávateľov riešení v oblasti zvárania a rezania kovov. Od svojho založenia v roku 1895 sa firma stala známou vďaka svojim inováciám v technológiách oblúkového zvárania. Firma Lincoln Electric je známa výrobou rôznych typov zváracích zariadení, ktoré sú využívané v rôznych odvetviach priemyslu, vrátane automatizácie a robotizácie procesov oblúkového zvárania. Firma na trh priniesla svoju radu zváracích zdrojov Power Wave R450® (viď obr. 11) určených pre aplikácie robotizovaného zvárania. Táto rada zváracích zdrojov patrí k špičke na trhu vďaka svojim vlastnostiam ako napr.:

- Vysoké procesné rýchlosti
- Možnosť zvárania širokej škály materiálov s hrúbkou 0,6 mm a viac
- Možnosť monitorovania procesu pomocou riešenia Lincoln Electric CheckPoint®
- Možnosť nastavenia Favorite mode listu pre uľahčenie nastavovania
- Úsporný mód pre níženie nákladov
- Pripojenie Wifi a Bluetooth

- Technológia Power Connect ® pre vstup 200 – 600 V
- Pripojenie plug and play pre roboty popredných výrobcov vďaka komunikačnému rozhraniu ArcLink® a iné [15] [16]



Obr. 11 Zvárací zdroj Lincoln Electric Power Wave R450 [16]

2.3.3 MILLER ELECTRIC

Miller Electric je americká spoločnosť so sídlom v meste Appleton, Wisconsin, známa svojimi pokrokovými riešeniami v oblasti zvarovania a rezania kovov. Od svojho založenia v roku 1929 si spoločnosť získala renomé vďaka svojej inovatívnej technológii a vysokým štandardom kvality. Miller Electric vyrába širokú škálu zváracích strojov pre rôzne aplikácie, vrátane MIG, TIG, a elektródového zvarovania. V kontexte automatizácie zváracích procesov firma Miller Electric ponúka riešenia pre robotické systémy a CNC stroje. Miller Electric na trhu konkuruje ostatným výrobcom svojou radou zváracích zdrojov Auto-Continuum™ 350 (viď obr. 12), ktorá disponuje vlastnosťami ako napr.:

- Prúd na výstupe maximálne 400 A
- Možnosť pripojenia na napätie 230 – 575V
- Rýchla odozva
- Možnosť rozšírenia o opcie
- Vysoká spoľahlivosť
- Flexibilita zmeny procesných parametrov
- Možnosť monitorovania procesu pomocou funkcie Welding Intelligence™
- Jednoduchá zmena procesu / programu pomocou USB rozhrania

Rada zváracích zdrojov Miller Electric Auto-Continuum™ 350 obsahuje funkcie Versa-Pulse™ a Accu-Pulse®, ktoré okamžite prispôbujú svoje nastavenia tak aby zvládli veľké medzery a nekonzistentné diely. Výsledkom sú zvarované spoje vyššej kvality a menej defektov. [17] [18]



Obr. 12 Zvárací zdroj Auto-Continuum™ 350 firmy Miller Electric [17]

2.4 Podávač drôtu

Podávače drôtu sú potrebné pri robotizovanom zváraní tam, kde sa ako prídavný materiál používa drôt. Podávač drôtu je zariadenie ktoré konštantne podáva materiál do tavného kúpeľa vytvoreného elektrickým oblúkom. Posuv drôtu zabezpečuje elektrický servomotor. Otáčky servomotora sú elektronicky riadené vzhľadom na zvolené napätie elektrického oblúka, typ tavného drôtu a použité zloženie ochranného plynu. Podávač drôtu obsahuje aj mechanizmus pre rovnanie drôtu. Tento mechanizmus obsahuje z pravidla 5 kladiek. Tavný drôt prechádza medzi kladkami a tým je rovnaný. Hlavné požiadavky kladené na podávače drôtu sú:

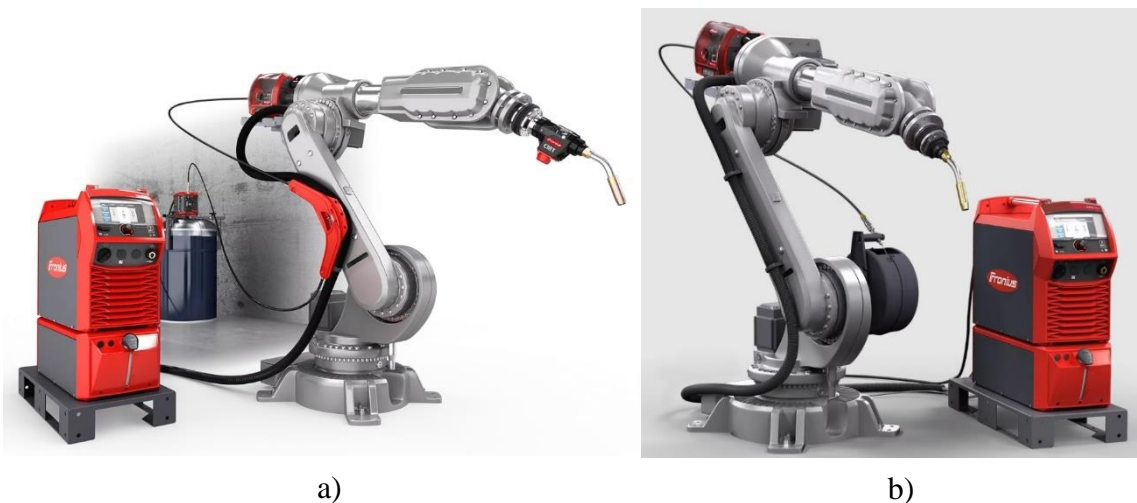
- Dokonalé vyrovnanie a podávanie tavného drôtu
- Stabilita podávacej rýchlosti
- Minimálne rozmery a hmotnosť
- Veľká životnosť a malá poruchovosť
- Minimálne straty trením

Typicky sa podávače drôtu montujú na rameno robota, mimo zváracieho zdroja, čím zvyšuje efektivitu robotického systému. Novšie zváracie roboty môžu mať na ramene robota pripravené miesto pre montáž podávača drôtu ako je znázornené na obr.13. Podávače drôtu možno rozdeliť na dva typy, a to podávače elektródového drôtu a podávače studeného drôtu. Podávače elektródového drôtu sa používajú pre zváranie, pri ktorom sa ako zdroj prídavného materiálu používa tavná elektróda, tj. zváranie typu MIG. Podávače elektródového drôtu umožňujú aby sa podávaný drôt spojil so zváracím obvodom a došlo k jeho roztaveniu. Pre zváranie pri ktorom nedochádza k taveniu elektródy, napr. zváranie typu TIG kde podávaný drôt nie je súčasťou zváracieho obvodu, sa používajú podávače studeného drôtu. [1] [19]



Obr. 13 Robot FANUC ARC Mate 100iC/12 s integrovaným podávačem drôtu od firmy Fronius [71]

Podávanie elektródového drôtu môže byť realizované troma systémami, Push, Push-Pull a Power Drive. Systém Push pozostáva z jedného podávača umiestneného na ramene robota. Tento systém sa najčastejšie používa pre podávanie drôtu na krátke vzdialenosti, kedy je zásobník drôtu umiestnený na robotovi (viď obr. 14 b).



Obr. 14 a) Systém Push-Pull, b) Systém Push [22] [23]

V prípadoch kedy je zásobník drôtu umiestnený mimo robota a je potrebné podávať drôt na väčšiu vzdialenosť sa používa Systém Push-Pull. Systém Push-Pull zobrazený na obr. 14 a) pozostáva z dvoch synchronizovaných podávačov drôtu, kde hlavný podávač umiestnený na zásobníku drôtu konštantne podáva drôt a druhý podávač umiestnený v zvaracom horáku reguluje rýchlosť podávania. Systém Push-Pull je použiteľný pre mäkké aj tvrdé materiály drôtu. Alternatíva k systému Push-Pull je systém Power Drive zobrazený na obr. 15, ktorý pozostáva len z jedného podávača umiestneného v zvaracom horáku na konci ramena robota. Tento systém je však použiteľný len pre mäkké materiály ako je napr. hliník. [20] [21] [22] [23]



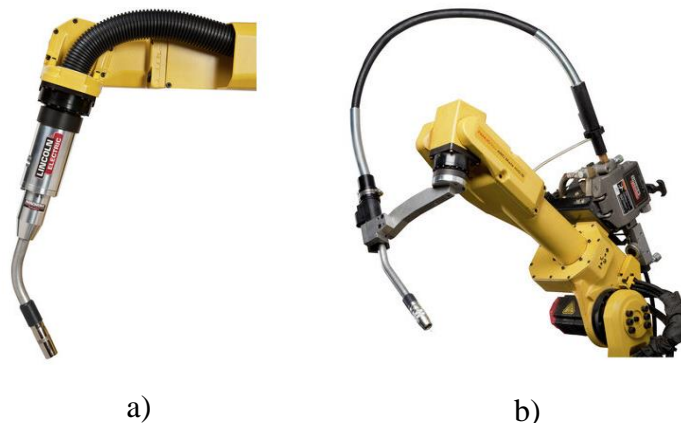
Obr. 15 Systém Power Drive [21]

2.5 Technologický efektor

Každá robotizovaná operácia vyžaduje použitie technologického efektora navrhnutého na mieru pre danú operáciu. Technologické efekторы pre oblúkové zvaranie sú zložené z nasledujúcich častí:

- Zvárací horák
- Držiak, prípadne príruha
- Kolízna ochrana
- Snímací systém pre korekciu dráhy horáka [1]

Technologický efektor môže byť v závislosti od konštrukcie použitého priemyselného robota konštruovaný v prevedení „Thru-Arm“, alebo „External Dress“. Konštrukcia typu „Thru-Arm“ znázornená na obr. 16 a) je aplikovateľná na zvaracie roboty, ktoré majú dutú šiestu os a konštrukciu ramena usporiadanú tak aby bolo možné viesť kabeláž s procesnými médiami ramenom robota (integrovanej hose pack). Technologický efektor typu „Thru-Arm“ sa montuje priamo na prírubu robota bez držiaka. Konštrukcia efektora typu „External Dress“ znázornená na obr. 16 b) zahŕňa držiak, čo umožňuje túto konštrukciu efektora použiť na akéhokoľvek priemyselného robota bez ohľadu na jeho konštrukciu. [24]



Obr. 16 a) Konštrukcia Thru-Arm, b) Konštrukcia External Dress [72] [73]

2.5.1 Zváracie horáky

Zváracie horáky používané pre robotizované oblúkové zváranie predstavujú kľúčovú súčasť automatizovaných zváracích procesov. Tieto zváracie horáky sú navrhnuté pre vytváranie presného a kvalitného zvarového spoja, čo je kritické pre kvalitu a bezpečnosť výsledného výrobku. Preto je nutné venovať ich konštrukcii značnú pozornosť. Aby sa predišlo možným problémom počas zvárania, je nutné dbať na nasledujúce body:

- Jednoznačná poloha špičky zváracieho horáka
- Ochrana horáka pred poškodením pri náraze (kolízna ochrana)
- Automatické čistenie hubice zváracieho horáka
- Rýchla výmena pri aplikácii výmenných efektorov [1]

Horáky pre oblúkové zváranie možno rozdeliť podľa:

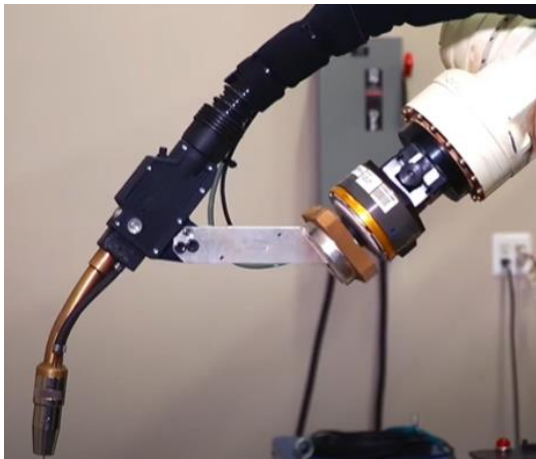
1. Typu zvárania
 - Horáky pre zváranie typu MIG
 - Horáky pre zváranie typu TIG
 - Horáky pre plazmové zváranie
 - Iné
2. Chladenia
 - Chladené vodou
 - Chladené vzduchom
3. Systému podávania drôtu
 - Horáky pre systém podávania drôtu Push (horáky bez podávača)
 - Horáky pre systém podávania drôtu Push-Pull (horáky s podávačom)
4. Možnosti výmeny tela horáku
 - Vymeniteľné
 - Nevymeniteľné [24] [25]



Obr. 17 a) Horák s podávačom WF 60i Robacta Drive CMT firmy Fronius, b) Vodou chladený horák bez podávača Magnum® PRO firmy Lincoln Electric [74] [75]

2.5.2 Kolízna ochrana

Počas činnosti robota môže prísť ku kolízii koncového efektora s okolím robota. Ak ku kolízii dôjde, je nutné zabezpečiť okamžité odpojenie pohonov a zastavenie robota, aby nedošlo k poškodeniu efektora alebo samotného robota. Túto funkciu zabezpečuje kolízna ochrana. Kolízna ochrana zahŕňa senzory a k nim prislúchajúci softvér. Najčastejšími senzormi využívanými pre detekciu kolízie sú dotykové senzory a silové senzory. Kolízna ochrana môže byť buď integrovaná v podobe senzorov rozmiestnených po ramene robota, alebo môže byť umiestnená ako samostatné zariadenie medzi technologický efektor a prírubu robota ako je znázornené na obr. 18 a). Integrovanú kolíznu ochranu využívajú predovšetkým kolaboratívne roboty ako napr. robot FANUC CRX 10 na obr. 18 b), ktoré musia spĺňať prísnejšie požiadavky na bezpečnosť, avšak táto funkcia sa začína zavádzať aj do nových priemyselných robotov. [26] [1]



a)



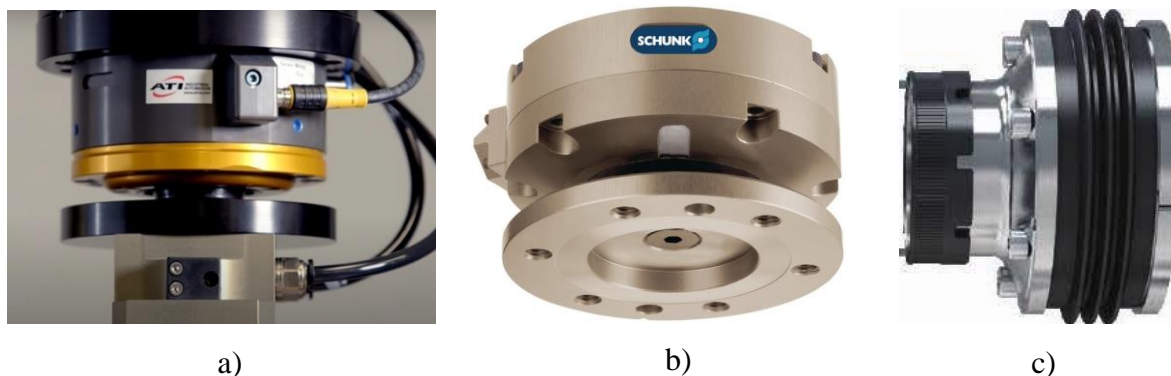
b)

Obr. 18 a) Kolízna ochrana umiestnená medzi efektor a prírubu robota, b) Kolaboratívny robot Fanuc CRX-10iA/L s integrovanou kolíznou ochranou [78] [73]

Senzory detekcie kolízie sú schopné merať sily, ako aj zmeny momentu. V prípade že nastane kontakt robota alebo technologického efektora s okolím, tieto senzory sú schopné vyslať signál, spomaliť chod robota, alebo ho úplne zastaviť. Kolízna ochrana poskytuje nasledujúce výhody:

- Ochrana robota pred poškodením
- Zníženie nákladov na opravu
- Zvýšenie bezpečnosti robotického systému
- Zabezpečuje spoľahlivú prevádzku v obmedzenom priestore
- Možnosť inštalácie viacerých robotov v obmedzenom priestore [26]

Kolízne ochrany sú dostupné v rôznych prevedeniach v závislosti od princípu funkcie. Najčastejšie je možné sa v praxi stretnúť s kolíznymi ochranami ktoré pracujú na pneumatickom, alebo elektrickom princípe. Takéto kolízne ochrany na trhu ponúkajú firmy ako Schunk a ATI Industrial Automation. Kolízne ochrany oboch firiem znázornené na obr. 19 a) a 19 b) snímajú vychýlenie efektora pri náraze. Na trhu sú dostupné aj špeciálne typy kolízných ochrán ako napríklad kolízna ochrana Magnetic Crashbox od firmy Fronius znázornená na obr. 19 c), ktorá pracuje na magnetickom princípe, kde efektor drží na mieste magnet od ktorého sa pri náraze efektor odpojí a dôjde k zastaveniu robota. [1] [25] [27]



Obr. 19 a) Kolízna ochrana firmy ATI Industrial Automation, b) Kolízna ochrana OPS firmy Schunk, c) Kolízna ochrana Magnetic Crashbox [27] [76] [77]

2.6 Údržba zvaracieho horáka

2.6.1 Čistiace stanice hubice horáka

Pri procese oblúkového zvarania často dochádza k rozstreku roztaveného kovu, čo spôsobuje zanášanie a znečistenie hubice zvaracieho horáka. Tento jav môže ovplyvniť proces zvarania a tým pádom aj kvalitu výsledného zvaru. Tomuto javu sa dá zabrániť vhodnou voľbou zloženia inertného plynu, prípadne konštrukciou horáka. Napriek tomu je však potrebné hubicu zvaracieho horáka pravidelne čistiť. K tomuto účelu slúžia stanice automatického čistenia hubice horáka. Na tieto zariadenia sú kladené nasledujúce požiadavky:

- Čistiace zariadenie musí byť ovládateľné z kontroléra robota
- Vysoká účinnosť zariadenia
- Proces čistenia musí prebiehať naraz v krátkom časovom intervale
- Hubica horáka musí byť počas mechanického čistenia pevne upnutá
- Univerzálnosť (použitie pre rôzne druhy hubíc)

Mechanické čistenie hubice spočíva v upnutí horáka v čistiacej stanici, aby sa zabránilo prenosu síl na rameno robota. Následne dôjde k vysunutiu čistiaceho nástroja a vyčisteniu hubice. Príklad čistiacej stanice je znázornený na obr. 20 a). [1]



a)



b)

Obr. 20 a) Stanica automatického čistenia hubice horáka, b) Stanica výmeny hubice horáka Fronius Robacta CTC [79] [80]

2.6.2 Stanice automatickej výmeny častí horáka

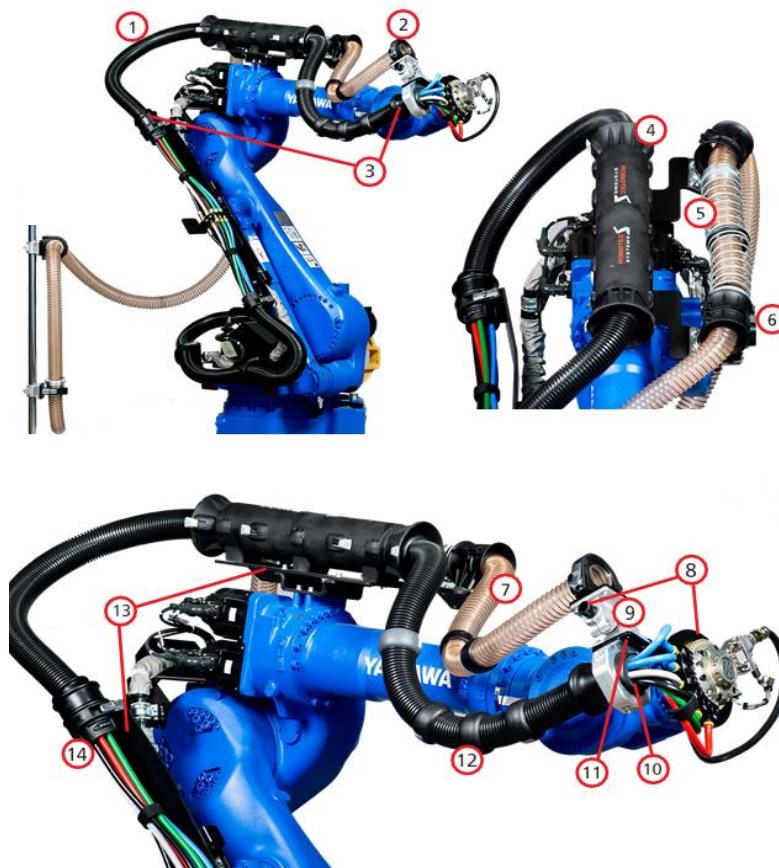
Počas procesu oblúkového zvarovania a čistenia hubice zvaracieho horáka dochádza k jej opotrebovaniu, čo ovplyvňuje TCP robota a negatívne vplyva na kvalitu zvaru. Manuálna výmena hubice horáka je časovo náročná, čo v praxi znamená odstavenie prevádzky po dobu výmeny. Z dôvodu urýchlenia procesu výmeny a udržania chodu prevádzky sa na pracoviská inštalujú stanice automatickej výmeny hubice horáka. Tieto stanice umožňujú až 10 násobné urýchlenie výmeny hubice horáka. Stanica výmeny hubice horáka Robacta CTC firmy Fronius znázornená na obr. 20 b) umožňuje výmenu hubice horáka do 50 sekúnd. Na stanice výmeny sú kladené podobné požiadavky ako na čistiace stanice. V prípade ak je automatická výmena hubice príliš pomalá, alebo proces vyžaduje výmenu horáka za horák s inou geometriou TCP, firma Fronius ponúka riešenie pre výmenu celého tela horáka. Výmenná stanica Fronius Robacta TX/i znázornená na obr. 21 umožňuje výmenu tela horáku v priebehu niekoľkých sekúnd s garanciou 13-krát rýchlejšej automatickej výmeny v porovnaní s manuálnou výmenou. [28]



Obr. 21 Výmenná stanica Fronius Robacta TX/i [28]

2.7 Dresspack

Proces oblúkového zvárania vyžaduje prívod viacerých procesných médií ktoré je nutné priviesť do technologického efektora. Medzi tieto médiá patria tavný drôt, elektrická energia, chladiaca voda, vzduch a inertný plyn. V niektorých prípadoch môže byť robot vybavený ešte dodatočným odsávaním splodín vznikajúcich pri zváraní. Riešením prívodu médií ku koncovému efektoru robota je tzv. dresspack. Dresspacky priemyselných robotov poskytujú ochranu hadíc a káblov procesných médií pred abrazívnymi vplyvmi okolia. Pri každej aplikácii priemyselných robotov vyžadujúcej použitie technologického efektora, ktorý pre svoju funkciu potrebuje prívod procesných médií je nutné vybaviť priemyselný robot dresspackom. Hlavným účelom dresspacku je ochrana, manažment a vedenie káblov a hadíc prívodu médií k technologickému efektoru robota počas miliónov cyklov. Tieto požiadavky vyvíjajú vysoký tlak na každý komponent systému. Jedným z hlavných požiadavkou kladených na dresspacky je vysoká životnosť. Keďže na dresspacky neustále pôsobia abrazívne vplyvy okolia, je otázkou času kedy dôjde k zlyhaniu alebo poškodeniu dresspacku. V 85 percentách prípadov odstávok robotov je príčinou odstávky práve poškodenie dresspacku. Za účelom minimalizovania porúch je dôležité aby bol dresspack navrhnutý pre konkrétnu úlohu robota. Príklad dresspacku je znázornený na obr. 22. [1] [29]



Obr. 22 Dresspack nainštalovaný na robot YASKAWA [30]

Dresspack znázornený na Obr. 22 pozostáva z nasledujúcich častí:

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1. Ochranná hadica | 8. Prstencová svorka s trúbkou |
| 2. Držiak odsávacej hadice | 9. Svorka trubky |
| 3. Pohyblivý kĺb | 10. Vývod káblov a hadíc |
| 4. Recirkulačný systém (uzavretý) | 11. Plocha adaptéra |
| 5. Recirkulačný systém (externý) | 12. Chránič proti nárazu |
| 6. Trubica | 13. Podporná konzola |
| 7. Odsávacia hadica | 14. Zvierač káblov a hadíc [30] |

2.7.1 Ochranné hadice

Ochranné hadice sú tou najzákladnejšou ochranou prívodu médií. Ochranné hadice chránia káble a hadice po väčšinu ich dĺžky od päty robota pod osou 1 až po výstup na osi 6. Najčastejšími materiálmi používanými pre tieto hadice sú polyuretán a polyamid. Pri inštalácii dresspacku je dôležité zabezpečiť dostatočnú dĺžku ochrannej hadice tak aby nedošlo k jej pretrhnutiu ako je znázornené na obr. 23. [29] [30]



Obr. 23 Pretrhnutie ochrannej hadice v dôsledku nedostatočnej dĺžky [29]

2.7.2 Pohyblivé kĺby

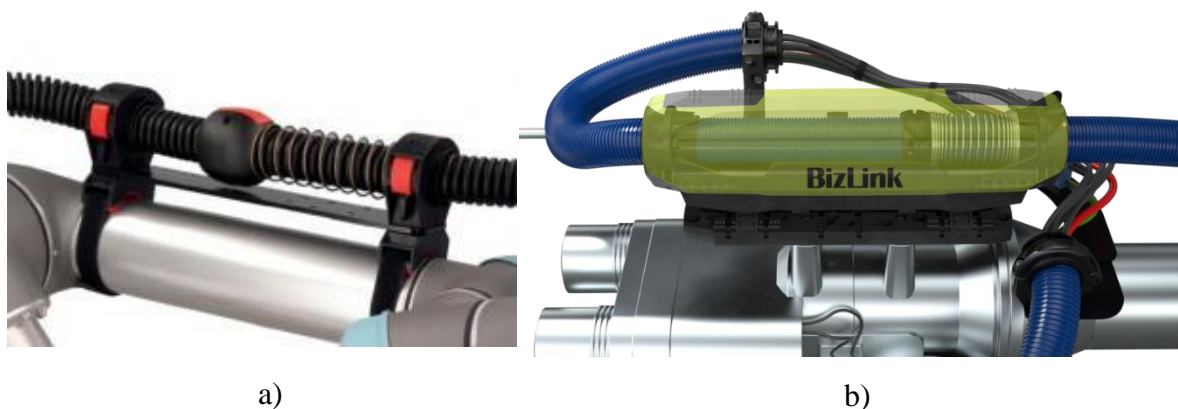
Pohyblivé kĺby sa používajú v prípade že je potrebné zabezpečiť sférický pohyb ochrannej hadice na osi 6 robota. Pohyblivý kĺb musí byť dostatočne pevný na to aby odolal zaťaženiu ktoré na neho pôsobí. Existujú dva typy pohyblivých kĺbov používaných v dresspackoch. Prvý typ A je zobrazený na obr. 24 a). Jedná sa o pohyblivý kĺb zložený z dvoch kusov, ktorý umožňuje rozsah sférického pohybu v rozmedzí $\pm 11^\circ$. Druhý typ B je zobrazený na obr. 24 b). Jedná sa o guľový kĺb ktorý umožňuje sférický pohyb v rozmedzí $\pm 15^\circ$. [29] [30]



Obr. 24 a) Pohyblivý klb typ A, b) Pohyblivý klb typ B [30]

2.7.3 Recirkulačný systém

Recirkulačný systém je systém ktorý zabezpečuje pohyb ochranej hadice medzi osou 3 a 6 robota. Tento systém funguje na princípe pružiny ktorá po odvinutí istej dĺžky hadice vráti hadicu späť do pôvodnej polohy. V prípade potreby je možné umiestniť takýchto systémov na robota viac vedľa seba, ako je znázornené na obr. 22, prípadne na seba v závislosti na dostupnom mieste pre inštaláciu. Tieto systémy sú konštruované tak, aby umožnili rýchlu inštaláciu, prípadne výmenu komponentov dresspacku ako sú hadice, káble alebo ochranné hadice bez akýchkoľvek nástrojov. Recirkulačné systémy sa vyrábajú v dvoch prevedeniach, ako uzavreté a externé. Uzavreté systémy ako systém LSH Delta znázornený na obr. 25 b). sú robustnejšie v porovnaní s externými, z toho dôvodu sa používajú pre vedenie ochranej hadice s prívodom médií. Externé systémy ako je systém FHS firmy Murrplastik na obr. 25 a) sú menej robustné, z toho dôvodu sa používajú pre odsávacie systémy a ľahšie hadice. [29] [30]



Obr. 25 a) Externý recirkulačný systém FHS firmy Murrplastik, b) Uzavretý recirkulačný systém LSH Delta firmy BizLink [81] [82]

2.7.4 Chrániče proti nárazu

Tieto chrániče sa umiestňujú na ochranné hadice v miestach kde dochádza k najčastejšiemu treniu hadice o robota. Hlavným účelom týchto chráničov je minimalizovať opotrebenie ochrannej hadice. Okrem ochrany hadice sa tieto chrániče môžu použiť aj v prípade opravy pretrhutej ochrannej hadice na spojenie dvoch pretrhnutých kusov. Samotný chránič znázornený na obr. 26 a) má okrúhly tvar a skladá sa z dvoch polovic. Prevedenie spojenia oboch polovic môže byť realizované pomocou skrutiek, alebo môže byť realizované bez akéhokoľvek spojovacieho materiálu (systém „Quick clip“). V súčasnosti sa odporúča uprednostniť používanie chráničov v prevedení „Quick clip“ pred chráničmi spájanými skrutkami z dôvodu odierania skrutiek o robota, čo môže spôsobiť zoderanie náteru (viď obr. 26 b). [29] [30]



a)



b)

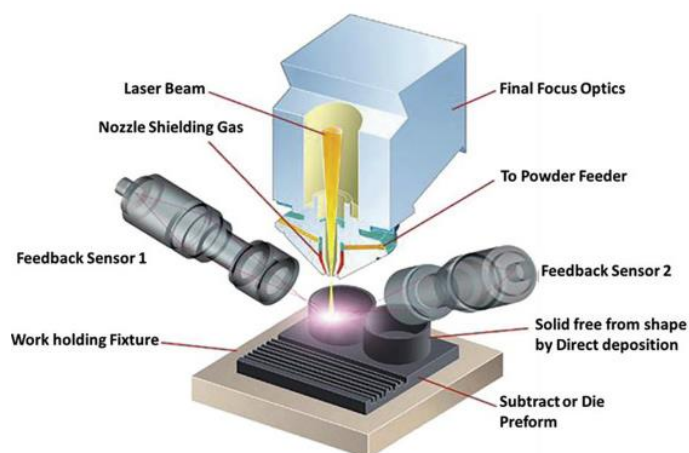
Obr. 26 a) Chránič proti nárazu v prevedení „Quick clip“ od firmy Helukabel,
b) Poškodenie spôsobené chráničom v prevedení so skrutkami [29] [30]

3 WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Technologický pokrok v oblasti robotiky a 3D tlače otvára dvere k inovatívnym možnostiam vo výrobe a konštrukcii. Táto kapitola je venovaná prieskumu technológií 3D tlače WAAM (Wire arc additive manufacturing) ktoré zjednocujú sily automatizácie a presnosti v procese výroby. Nasledujúce sekcie práce budú zamerané na kľúčové aspekty technológií 3D tlače WAAM a budú analyzované ich výhody a využitie v priemysle.

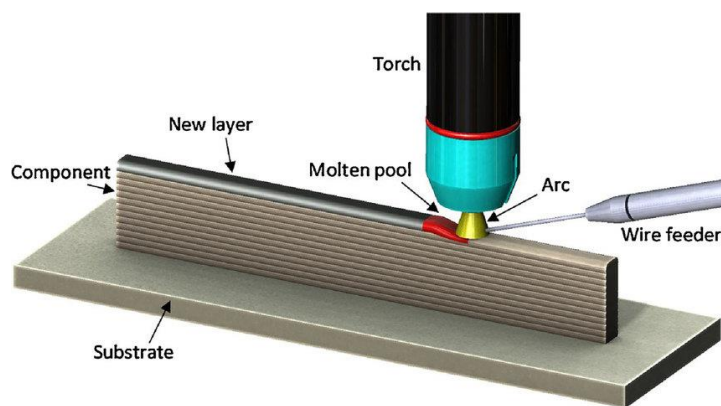
Direct energy deposition (DED)

DED zastrešuje všetky technológie 3D tlače kovu pri ktorých dochádza k priamemu prenosu energie, vrátane technológie WAAM. Technológia DED používa tepelnú energiu na zlučovanie a tavenie nanášaných materiálov. Ako tepelný zdroj sa používa laserový lúč, elektrónový lúč alebo plazmový oblúk. V závislosti od použitia zdroja je DED rozdelené do rôznych typov. Laser metal deposition (LMD), Electron beam additive manufacturing (EBAM), Wire laser additive manufacturing (WLAM) a Wire arc additive manufacturing (WAAM). Pracovný princíp vo všetkých typoch zostáva rovnaký. Pri procese DED sa udržiava inertná atmosféra do ktorej sa následne podáva materiál (drôt alebo prášok) koaxiálne k tepelnému zdroju. Celý proces prebieha v cykle, pri ktorom je tryska s laserom alebo elektrónovým lúčom zameraná na časť povrchu a vytvára tavný kúpeľ. Materiál sa do taveniny dodáva vo forme prášku alebo drôtu cez koaxiálnu trysku (pre laser) alebo ako kovový drôt s bočným podávaním (pre elektrónový lúč). Tryska sa následne pohybuje konštantnou rýchlosťou po určenej dráhe. Roztavený materiál stuhne hneď, ako sa tryska vzdiali od kúpeľa roztaveného materiálu. Ďalšie vrstvy sa vytvárajú v rovnakom cykle a ukladajú na seba, kým nie je súčasť dokončená. Princíp metódy DED je znázornený na obr. 27. [31]

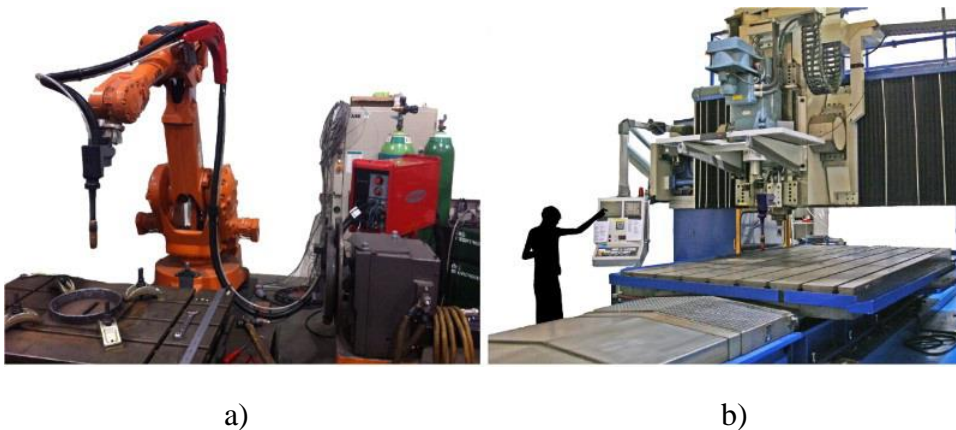


Obr. 27 Znáozornenie metódy DED

Jednou z najpoužívanějších metód DED je metóda WAAM. Princíp tejto metódy spočíva v použití elektrického oblúka ako zdroja tepla pre roztavenie podkladového materiálu, do ktorého je následne podávaný ako vstupný materiál kovový drôt (vid' obr. 28). Technológia WAAM v súčasnosti využíva štandardné, komerčne dostupné zvaracie zariadenia, tj. štandardné zvaracie zdroje, zvaracie horáky a systémy podávania drôtu. Pohyb zvaracieho horáka môže byť zabezpečený buď pomocou robota alebo portálového číslicovo riadeného stroja (obr. 29 a,b). Pomocou tejto metódy je možné relatívne ekonomicky vytvárať kovové komponenty s pomerne veľkými rozmermi, avšak v porovnaní s inými technológiami aditívnej výroby táto metóda zaostáva z hľadiska presnosti a drsnosti povrchu. Okrem tejto nevýhody v dôsledku dodávania veľkého množstva tepla do vytvárajanej súčasti, dochádza k vzniku zvyškového napätia čo má za následok vznik deformácií.



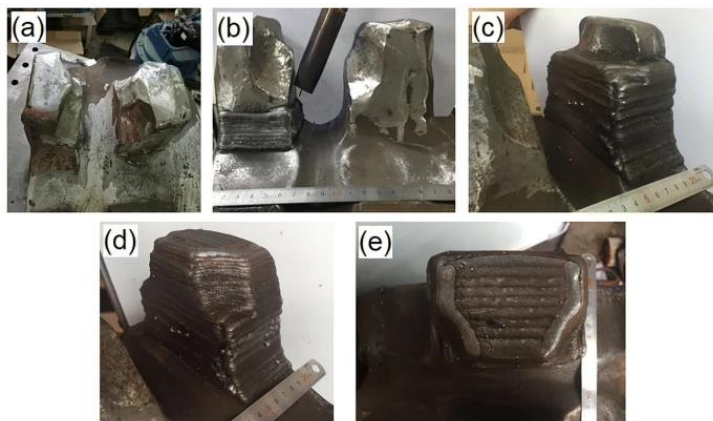
Obr. 28 Princíp metódy WAAM [52]



Obr. 29 a) Zvarací robot, b) Portálové CNC obrábacie centrum s úpravou pre aditívnu výrobu pomocou metódy WAAM [35]

Výhody WAAM voči iným procesom aditívnej výroby spočívajú v skrátení výrobného času, menšieho množstva odpadového materiálu, možnosti výroby súčasti z viacerých materiálov a mechanických vlastnostiach vyrobenej súčasti. WAAM nie je používaná len na výrobu nových dielov, môže byť tiež využitá na opravu, úpravu alebo repurposing existujúcich

dielov. Repurposingu sa venovali autori článku [32], kde popisovali možnosť výroby novej súčasti navarovaním materiálu technológiou WAAM na vyradenú súčast' ktorej životnosť skončila, čím sa zabráni tvorbe odpadu a vyradená súčast' dostane nový účel. Opravu dielov pomocou technológie WAAM popísali autori článku [33], kde za pomoci robota a technológie WAAM vykonali opravu poškodeného ozubeného kolesa znázornenú na obr. 30. Technológia WAAM zahŕňa niekoľko metód navarovania prídavného materiálu. Tie najpoužívanejšie sú metal inert gas (MIG), cold metal transfer (CMT), tungsten inert gas (TIG) a plasma arc welding (PAW). [34], [35]

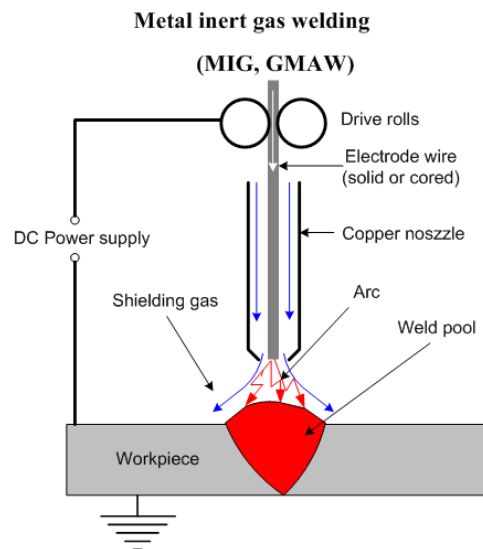


Obr. 30 Oprava ozubeného kolesa pomocou metódy WAAM [33]

3.1 Metal inert gas (MIG)

Najčastejšie používanou technológiou navarovania materiálu je MIG, kvôli priamemu podávaniu drôtu, ktorý je podávaný koaxiálne so zvaracou hlavou. MIG je zvarací proces, pri ktorom vzniká medzi podávaným drôtom a vytváranou súčast'ou elektrický oblúk, ktorý roztaví ako elektródu, tak aj podkladový materiál a vytvorí tavný kúpeľ (vid' obr.31). Podávaný drôt slúži ako zdroj tepla a zároveň ako prídavný kov. Drôt je vedený medenou kontaktnou rúrkou, ktorá vedie elektrický prúd do drôtu. Kúpeľ roztaveného materiálu je chránený pred okolitou atmosférou ochranným plynom ktorý je privádzaný cez dýzu obklopujúcu drôt. Výber ochranného plynu závisí od zváraného materiálu a aplikácie. Najčastejšie sa však používa argón a hélium. Drôt je privádzaný z cievky pomocou podávača. Tento proces ponúka vysokú produktivitu, kvôli nepretržitému podávaniu drôtu. V súčasnosti pokrok vo vývoji riadiacich systémov pre zvaracie elektrické zdroje umožnil vývoj nových procesných variant zvarania, ako controlled short arc a controlled spray arc, ktoré sú určené pre aditívnu výrobu z dôvodu zníženého množstva energie dodanej do zváraného materiálu. Najčastejšie používanou variantou MIG pre aditívne technológie je však v súčasnosti varianta CMT (cold metal transfer) vyvinutá spoločnosťou Fronius. CMT v porovnaní s klasickou variantou MIG vykazuje lepšie výsledky z dôvodu vyššieho prídavaného množstva materiálu pri nižšom množstve odovzdaného tepla do podkladového materiálu. Vďaka vysokému dosiahnuteľnému energetickému príkonu so súčasnými

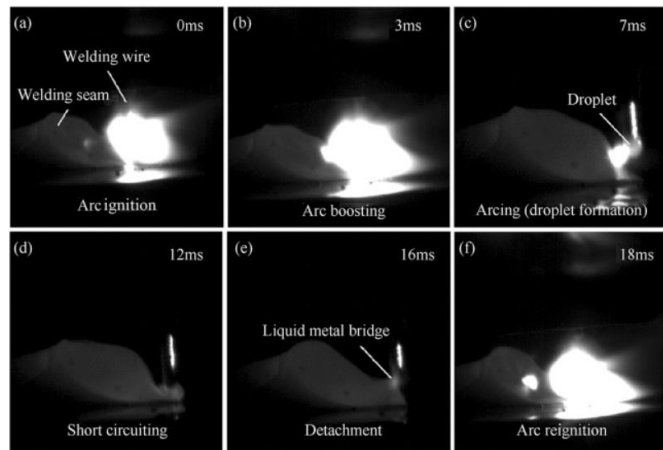
zváracími zariadeniami je možné dosiahnuť vysoko výkonnú aditívnu výrobu. Jedným kritickým bodom pre aditívnu výrobu s procesom navarovania MIG je pohyb hrotu drôtu a výsledná geometrická nepresnosť [36], [37], [34].



Obr. 31 Metóda navarovania MIG [53]

3.2 Cold metal transfer (CMT)

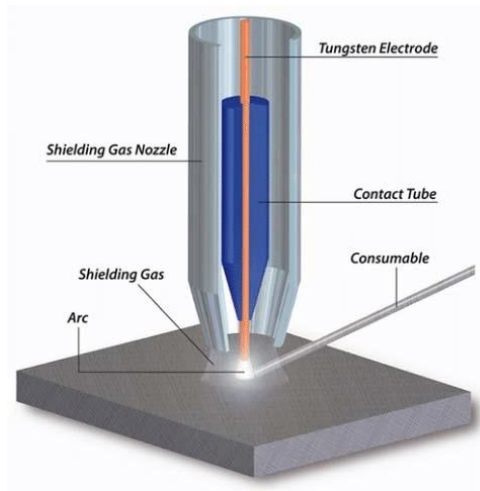
Cold metal transfer je modifikovaný proces zvarovania MIG založený na procese prenosu skratu, ktorý vyvinula spoločnosť Fronius v Rakúsku v roku 2004. Tento proces sa líši od procesu zvarovania MIG iba mechanickou metódou oddelovania kvapiek roztaveného tavného drôtu. Počas zvarovania majú zmeny teploty vo zvaroch a podkladových kovoch významný vplyv na materiálové charakteristiky, zvyškové napätia, ako aj na rozmerovú a tvarovú presnosť zvarovaných výrobkov. CMT poskytuje riadenú metódu nanášania materiálu a menšie množstvo dodávaného tepla pomocou inovatívneho systému podávania drôtu spojeného s vysokorýchlostným digitálnym riadením, čo umožní zníženie zvyškového napätia a tvorby deformácií. Vďaka týmto vlastnostiam je CMT jednou z najpoužívanejších metód WAAM. Rýchlosť podávania drôtu a fáza cyklu oblúka pri CMT sú riadené tak, aby sa vyvinula dostatočná energia na roztavenie základného materiálu, ako aj tavného drôtu. Keď sa v procese CMT navarovania hrot elektródového drôtu dostane do kontaktu s roztaveným materiálom, digitálne riadenie procesu spustí spätný chod servomotora podávača drôtu. To spôsobí retrakciu drôtu, čím príde k oddeleniu kvapky roztaveného drôtu. Počas prenosu kovu klesne prúd takmer k nule a tým sa zabráni akémukoľvek rozstreku iskier. Akonáhle je prenos kovu na podkladový materiál ukončený, oblúk sa znovu zapáli a drôt sa opäť posúva dopredu s nastaveným zváracím prúdom. Proces navarovania metódou CMT je znázornený na obr. 32. [38] [39]



Obr. 32 Proces navarenia materiálu metódou CMT [38]

3.3 Tungsten inert gas (TIG)

Ďalšou často používanou technológiou WAAM je TIG (tungsten inert gas). V procese zvarovania TIG sa oblúk vytvára medzi volfrámovou elektródou a obrobkom v inertnej atmosfére argónu alebo hélia. Malý intenzívny oblúk poskytovaný špicatou elektródou je ideálny pre vysoko kvalitné a presné zvarovanie. Keďže pri zvarovaní nedochádza k nespotrebovaniu elektródy, pri TIG nie je potrebné riadiť prívod tepla z oblúka, pretože kov sa natavuje z tavnej elektródy privádzanej externe (viď obr. 33). Výhodou procesu TIG je oddelený zdroj tepla od tavnej elektródy a možnosť použiť viac ako jeden tavný drôt v rovnakom procese. Oddelené podávanie drôtu však vedie k ťažkostiam pri zmene smeru zvarovania, pretože podávač drôtu musí zmeniť pracovnú polohu. Z toho dôvodu je zložitejšie túto metódu automatizovať.

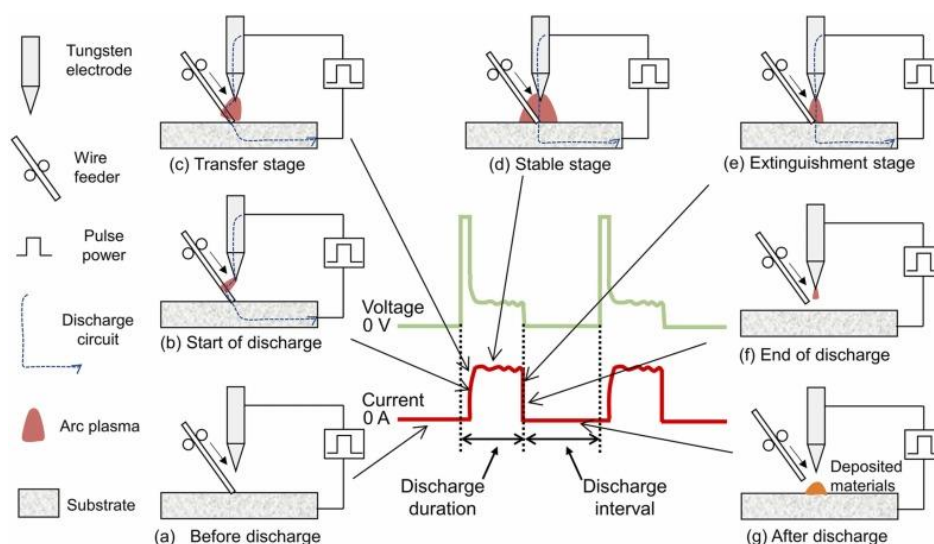


Obr. 33 Princíp navarovania metódou TIG [70]

Pri použití procesu zvarovania TIG môže byť tvar taveniny ovplyvnený rôznymi procesnými hodnotami. V článku [40] autori uvádzajú že najväčší vplyv na výsledok procesu navarovania majú parametre: prúd, napätie, rýchlosť pohybu horáka a rýchlosť podávania drôtu. Proces aditívnej výroby na báze TIG má vysokú rýchlosť navarovania materiálu bez rozstreku iskier a má vysokú tepelnú účinnosť, až 68 %. V porovnaní s metódou MIG je však rýchlosť navarovania materiálu metódou TIG nižšia. [37] [40] [41]

3.4 Pulsed Arc Plasma (PAP)

Pulsed arc plasma je variáciou metódy PAW (plasma arc welding). V metóde PAP je ako zdroj tepla využívaná plazma generovaná pulzným napätím, teda plazma je počas procesu striedavo zapálená a zhasínaná. Plazma je zapálená medzi volfrámovou elektródou a kovovým drôtom. Tento spôsob zabezpečí, že sa významná časť tepla spotrebuje na natavenie kovového drôtu namiesto podkladového materiálu alebo predchádzajúcej nanesej vrstvy. Celkové dodané teplo potrebné pre navarovanie materiálu počas PAP-WAAM môže byť efektívne znížené v porovnaní s konvenčným TIG-WAAM. Okrem toho nedochádza k prenosu tepla na nanášaný materiál v dôsledku zhasínania plazmy počas výbojového intervalu, čo prispieva k efektívnejšiemu odvodu tepla a zlepšuje chladenie nanášaného materiálu. Dodané teplo a rýchlosť chladenia možno upraviť zmenou výbojového intervalu. Pribeh jedného výbojového intervalu je znázornený na Obr. 41. Vo fáze (a) je kovový drôt v kontakte s podkladovým materiálom. V druhom kroku (b) sa elektróda priblíži k tavnému drôtu, zvýši sa napätie a dochádza k zapáleniu plazmy. V kroku (c) sa s nárastom času výboja plazma rozširuje a prenáša do medzery medzi elektródou a podkladový materiál. V kroku (d) sa plazma rozširuje na stabilnú úroveň.



Obr. 34 Znáznornenie metódy PAP v cykle jedného výbojového intervalu [42]

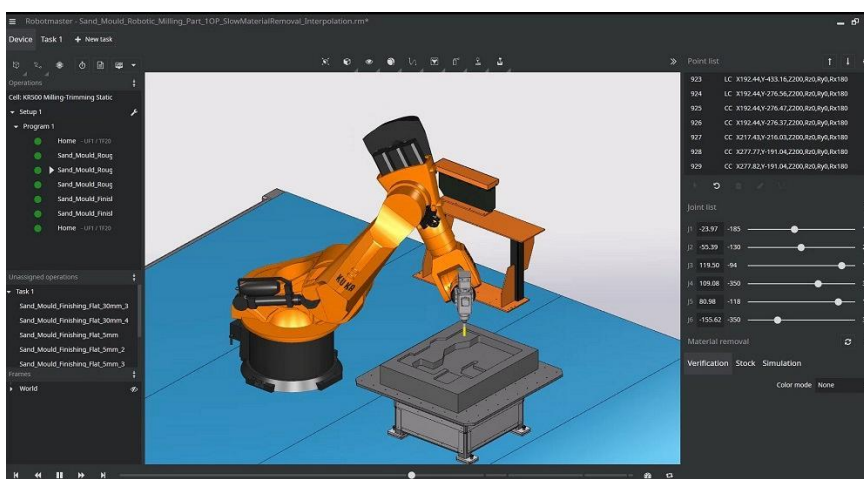
V piatom kroku (e-f) sa napätie zníži na nulu a prichádza k zhasnutiu plazmy a nataveniu tavného drôtu. V poslednom kroku (g) po výboji prichádza k naneseniu nataveného materiálu a rýchlemu chladnutiu. Tavný drôt je kontinuálne podávaný počas celého procesu navarovania a volfrámová elektróda sa nepretržite pohybuje po naplánovanej trase, kým nie je proces navarovania ukončený. [37] [42]

4 CAD/CAM SIMULAČNÉ SOFTVÉRY PRE ROBOTY

V dnešnej dobe je simulácia neoddeliteľnou súčasťou oblasti výskumu a vývoja rôznych odvetví priemyslu. Simuláciu je možné definovať ako proces tvorby modelu skutočného alebo virtuálneho systému, spustenie modelu a následnú analýzu výsledkov. Simulácia má v súčasnosti uplatnenie aj v oblasti robotiky, kde hrá dôležitú úlohu pri návrhu a testovaní robotizovaných pracovísk. Simuláciou namodelovaných robotizovaných pracovísk a následných vyhodnotením výsledkov je možné predísť zraneniam, nežiadúcemu poškodeniu, ako aj nutným zmenám dizajnu zostaveného pracoviska. Pre účel simulácie je na trhu dostupných mnoho simulačných softvérov, avšak softvérov ktoré podporujú CAD/CAM je málo. Na trhu je dostupných niekoľko softvérov podporujúcich CAD/CAM, ako napríklad Autodesk Powermill, RoboDK alebo Robotmaster. Tieto simulačné softvéry poskytujú veľké množstvo modelov robotov rôznych výrobcov, ako aj funkcie detekcie kolízií, singularít, či možnosť nastavenia orientácie robota alebo nástroja. Všetky tieto funkcie umožňujú uľahčenie plánovania trasy robota, tzv. path planning. Výhodou týchto softvérov je možnosť exportovania naplánovanej trasy robota vo forme programu v jazyku kompatibilnom s jazykom použitého robota. [43] [44]

4.1 Robotmaster

Robotmaster je simulačný CAD/CAM softvér určený k off-line programovaniu robotov. Tento softvér umožňuje simulovanie, generovanie kódu, tvorbu presných trajektórií bez učenia bodov a automatické optimalizovanie pohybu robota pre roboty rôznych výrobcov. Interaktívne prostredie softvéru Robotmaster poskytuje potrebné nástroje pre programovanie a optimalizáciu. Softvér automaticky kontroluje kolízie, singularity a limity osí. Ak počas simulácie dôjde k pohybu cez singularitu, softvér poskytuje potrebné nástroje pre odstránenie tohoto problému.

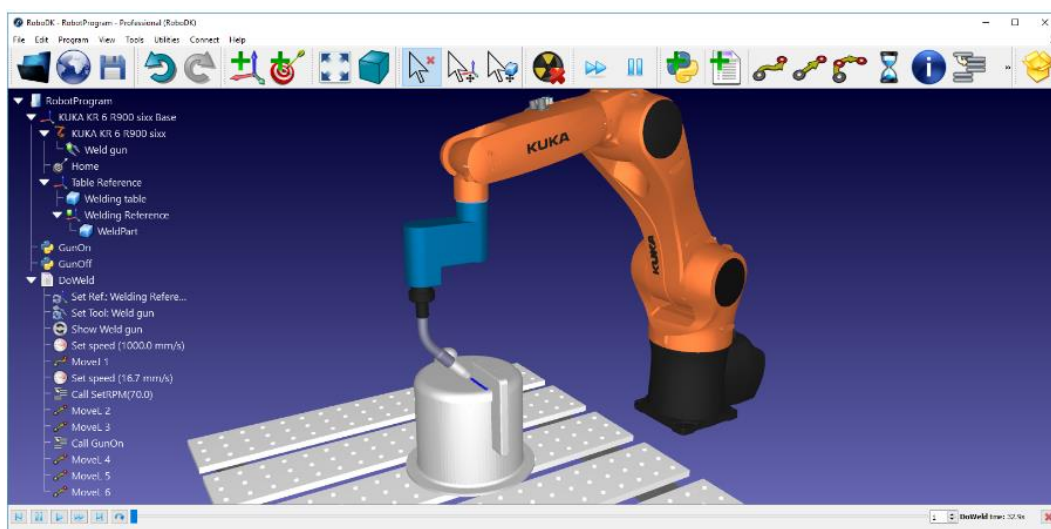


Obr. 35 Náhľad na prostredie softvéru Robotmaster [83]

Robotmaster tak isto umožňuje výber jednej z ôsmich konfigurácií robota v danom bode. Pozície a trajektórie robotov je možné jednoducho optimalizovať ručným pohybom robota, jeho osí, nástroja alebo obrobku pomocou funkcie „click and drag“. Tento softvér je ideálny pre programovanie technologických operácií ako sú obrábanie, deburring, leštenie, brúsenie lakovanie a mnoho ďalších. Softvér Robotmaster ponúka 6 osé kontúrovanie, kde výber kontúry prebieha jedným klikom a je aplikovateľný a ja na súčasti s komplexnými tvarmi. Robotmaster umožňuje spolu s robotom aj koordinované ovládanie externých osí pre optimalizovanie obrábania. [45]

4.2 RoboDK

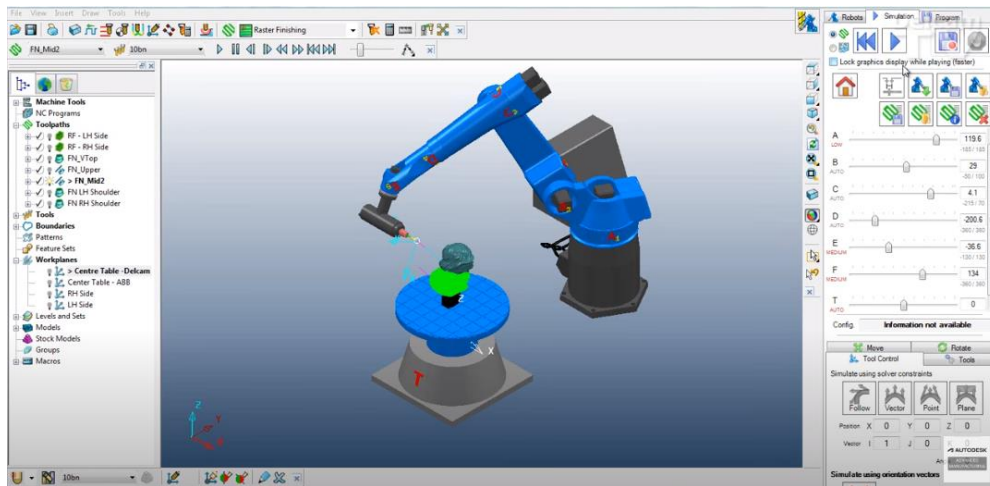
RoboDK je simulačný softvér určený pre simuláciu a off-line programovanie priemyselných robotov. Pre používanie tohoto softvéru nie je vyžadovaná znalosť programovania robotov. Tento softvér má intuitívne prostredie (viď obr. 43) a umožňuje jednoducho naprogramovať akúkoľvek platformu robota ktorú softvér podporuje. RoboDK má k dispozícii širokú knižnicu modelov až 800 robotov od viac ako 50-tich výrobcov. Medzi nich patria najznámejšie značky ako Kuka, Fanuc, ABB, Yaskawa, ale aj menej známe značky ako EPSON, Nachi, Comau a pod. Pomocou RoboDK je možné naprogramovať technologické operácie ako napr. obrábanie, vrtanie, zváranie, nanášanie a lakovanie. Počas tvorby trajektórie robota softvér automaticky optimalizuje trajektóriu robota tak aby sa robot vyhol kolíziám, singularitám a limitom osí. Hotový odsimulovaný program je softvér schopný exportovať ako program pre reálny robot v jazyku kompatibilnom s použitým robotom. Ročné predplatné tohoto softvéru stojí približne 4000 eur. [46]



Obr. 36 Náhľad na prostredie softvéru RoboDK [84]

4.3 Autodesk Powermill

Softvér Autodesk Powermill je určený pre simuláciu CAD/CAM. Primárne je používaný pre programovanie CNC strojov, avšak jeho nastavba Powermill Robot umožňuje aj programovanie robotov. Powermill tak ako aj softvéry RoboDK a Robotmaster ponúka širokú knižnicu modelov robotov rôznych výrobcov, automatickú detekciu kolízií, limitov a singularít. Do modelu je možné zahrnúť aj externé osi ktoré sú riadené koordinovane s robotom. Hotové a odsimulované programy je možné exportovať vo formáte kompatibilnom s použitým robotom. [47]



Obr. 37 Náhľad na prostredie softvéru Autodesk Powermill [85]

5 ROZBOR RIEŠENEJ PROBLEMATIKY

5.1 Popis zadaného problému

Zadanie diplomovej práce určuje ako hlavný cieľ vytvorenie simulácie robotической 3D tlač. Tento problém by mal byť vyriešený vytvorením simulačného modelu v CAD/CAM softvéri Autodesk Powermill, ktorý bude následne použitý pre generovanie robotických programov pre 3D tlač s reálnym robotom. Vyriešením tohoto problému by mal byť získaný účinný nástroj pre generovanie programov pre aditívnu výrobu rôznych dielov technológiou WAAM.

5.2 Určenie cieľov

Stanovené ciele ktoré majú byť v diplomovej práci dosiahnuté:

- Vytvorenie simulačného modelu v softvéri Powermill
- Vyriešenie singulárnych a kolíznych pozícií (Postprocessing)
- Implementácia technológie v G – kóde

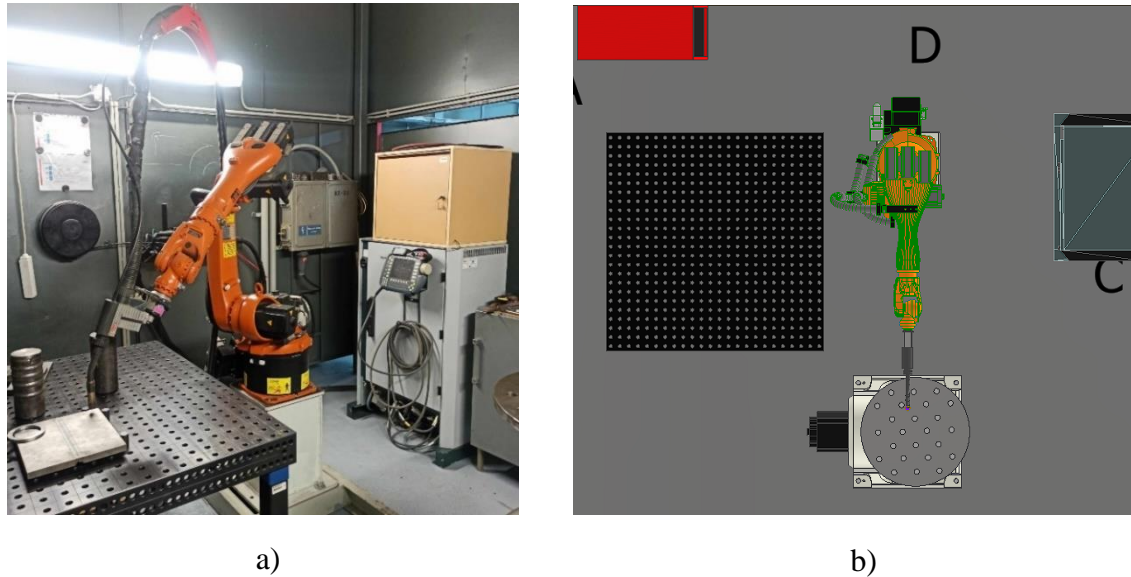
5.3 Postup riešenia

Ako prvé bude nutné vybrať diel ktorý bude v softvéri Powermill simulovaný. Tu bude potrebné prihliadať na to aby bol diel vhodný pre 3D tlač. Následne bude potrebné vytvoriť 3D model reálneho pracoviska a vyexportovať jeho STEP súbor. Ďalej bude nasledovať predspracovanie modelu pre softvér Powermill v softvéri Powershape a následná úprava konfiguračného mtd súboru softvéru Powermill. Po úprave konfiguračného súboru mtd bude do softvéru Powermill vložený model vyrábaného dielu a bude vytvorená dráha a nastavené procesné parametre zvarovania. Finálna dráha bude následne odsimulovaná a bude vytvorený program pre robot.

5.4 Popis reálneho pracoviska

Pre vypracovanie tejto diplomovej práce bolo poskytnuté pracovisko robotizovaného zvarovania Ústavu strojírenských technológií VUT v Brně znázornené na obr. 38 a). Pre účely 3D tlače kovu toto pracovisko využíva technológiu WAAM, konkrétne metódu Cold metal transfer (CMT). Na tomto pracovisku sa nachádza zvarovací robot KUKA KR 5 Arc spolu s kontrolérom KRC 2 a príslušným teach pendantom. Pre väčšiu kinematickú flexibilitu je pracovisko vybavené dvoj-osím polohovadlom KUKA DKP-400. Na robot je namontovaný koncový efektor typu external dress so zvaracím horákom od firmy Fronius popísaný v podkapitole 2.5. Prívod elektrickej energie a inertného plynu k zvaraciemu horáku ako aj riadenie elektrického oblúka zabezpečuje zvarací zdroj CMT taktiež od firmy Fronius. Pre podávanie drôtu je na tomto pracovisku použitý systém Push-Pull popísaný v podkapitole 2.4, kde je ako zásobník tavného drôtu použitá cievka umiestnená na stene pracoviska. Káble

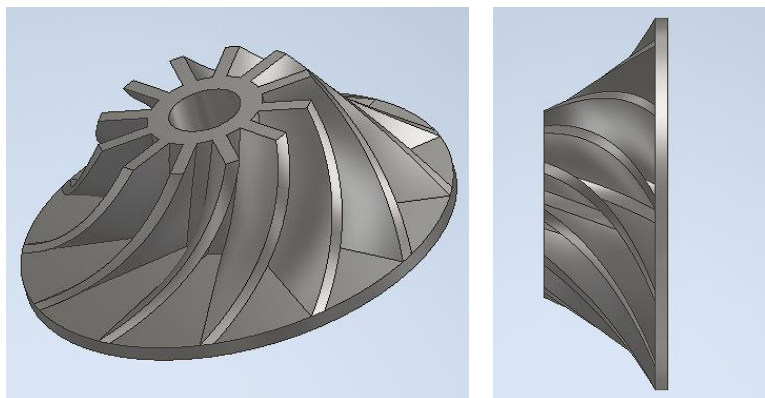
a hadice s procesnými médiami sú sústredené do polyuretánovej hadice ktorá je zo stropu pridržovaná balancérom (viď obr.38). Okrem iného je pracovisko vybavené zvaracím stolom, náhradnými tlakovými nádobami s inertným plynom a odvetrávaním splodín vznikajúcich pri procese zvarovania. Layout pracoviska je znázornený na obr. 38 b).



Obr. 38 a) Pracovisko robotizovaného zvarovania na UST, b) Layout pracoviska

5.5 Výber vhodného dielu pre výrobu technológiou WAAM

Ako bolo písané v kapitole 3, metóda WAAM je použiteľná pre výrobu súčastí komplexných tvarov, ako aj veľkých rozmerov. Nevýhodou tejto metódy je však drsnosť povrchu, preto je po výrobe nutné súčasť obrobit'. Vzhľadom na predpokladanú dlhú dobu 3D tlače dielov veľkých rozmerov bolo pri výbere súčastí prihliadané na to aby súčasť mala relatívne malé rozmery, ale zároveň aby jej tvar bol dostatočne komplexný na to aby sa oplatilo použiť technológiu WAAM na jej výrobu.

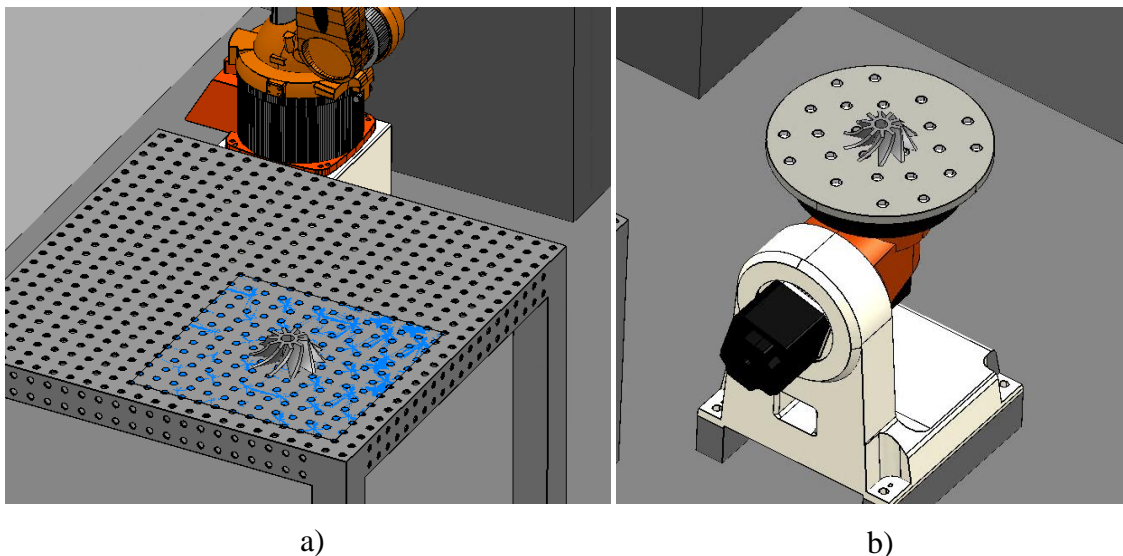


Obr. 39 Model obežného kola čerpadla

V tomto prípade spadali do úvahy komponenty pre aerospace, automotive alebo lodný priemysel, ako sú napríklad lopatky turbín, lodné vrtule, rôzne držiaky a podobne. Na koniec bolo pre 3D tlač metódou WAAM vybrané obežné koleso čerpadla znázornené na obr. 40 o priemere 200 mm a výške 60 mm. Model obežného kolesa čerpadla bol stiahnutý z internetovej stránky GrabCAD [48] a upravený na vhodné rozmery.

5.6 Umiestnenie vyrábaného dielu

Pracovisko popísané v kapitole 5.4 je vybavené dvoma miestami kde je možné 3D tlač kovu realizovať. Jedná sa o zvarací stôl a dvoj – osé polohovadlo DKP – 400. Pracovisko je takto vybavené z toho dôvodu, aby bolo možné technológiou WAAM vyrábať širokú škálu dielov rôznych rozmerov a tvarov. Výroba dielov väčších rozmerov a jednoduchších tvarov môže prebiehať na zvaracom stole, zatiaľ čo výroba dielov zložitejších tvarov a menších rozmerov, pri ktorých je potrebná väčšia kinematická adaptabilita môže prebiehať na dvoj – osom polohovadle. Keďže diel, ktorý bol vybraný pre testovanie 3D tlače má malé rozmery a komplexnejší tvar bude výroba dielu simulovaná ako na zvaracom stole, tak aj na polohovadle a bude porovnaný čas výroby oboch konfigurácií umiestnenia dielu.

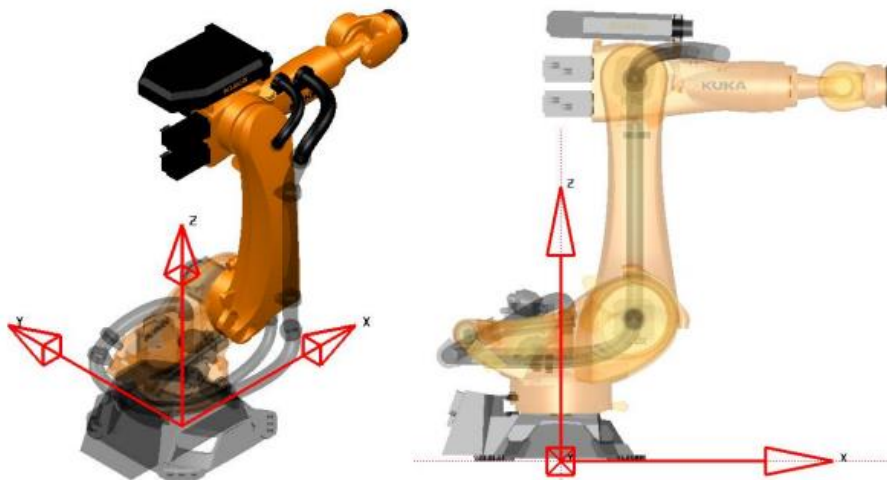


Obr. 40 a) Umiestnenie vyrábaného dielu na zvarací stôl, b) Umiestnenie vyrábaného dielu na polohovadlo

6 SIMULÁCIA ROBOTICKEJ 3D TLAČE

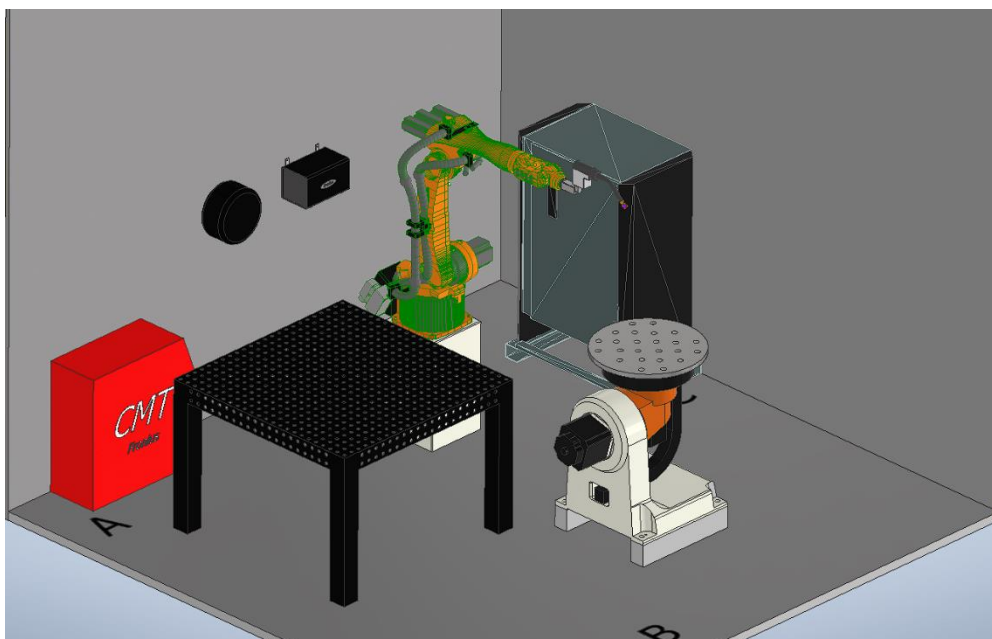
6.1 Tvorba 3D modelu pracoviska

Pre účely simulácie bolo potrebné vytvoriť 3D model reálneho robotizovaného pracoviska. Model pracoviska bude následne spracovaný v softvéroch Powershape a Powermill od firmy Autodesk, preto bol z hľadiska lepšej kompatibility pre tvorbu 3D modelu zvolený CAD softvér Inventor taktiež od firmy Autodesk. 3D modely niektorých komponentov ako robot alebo polohovadlo boli stiahnuté z internetovej stránky výrobcu, ostatné komponenty však bolo potrebné vymodelovať. Modely zvaracieho zdroja a zvaracieho stola boli vytvorené na základe reálnych rozmerov nameraných na pracovisku. Polohy komponentov boli tak isto zmerané aby bola zaistená čo najväčšia presnosť modelu. 3D model koncového efektora nebol dostupný, jeho model bol preto vytvorený na základe súradníc TCP bodu nameraného nástroja získaných zo zobrazenia nástroja na teach pendante robota. Keďže v praxi sa na robotizovaných pracoviskách všetky komponenty pracoviska vzťahujú k súradnicovému systému World priemyselného robota, bolo nutné túto podmienku dodržať aj pri tvorbe 3D modelu pracoviska. Poloha súradnicového systému World priemyselného robota nie je štandardizovaná, roboty od rôznych výrobcov môžu mať počiatok tohoto súradnicového systému uložený v inom mieste robota.



Obr. 41 Orientácia pracovného súradnicového systému robotov KUKA [49]

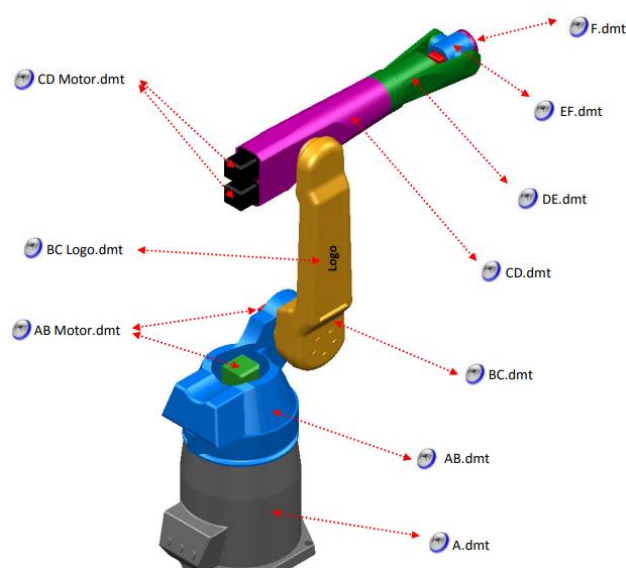
Ako bolo zmienené v kapitole 5.1 týkajúcej sa popisu reálneho robotizovaného pracoviska, toto pracovisko obsahuje priemyselný robot KUKA KR 5 Arc. Polohu pracovného súradnicového systému pre daného robota bolo teda nutné overiť u výrobcu KUKA. Podľa manuálu [49] sa pracovný súradnicový systém robotov KUKA nachádza v päte robota a je orientovaný podľa obr. 41. Do zostavy bol ako prvý vložený robot a počiatok súradnicového systému zostavy bol vložený do päty robota so správnou orientáciou, následne boli všetky komponenty pracoviska zaväzbené. Výsledný model robotizovaného pracoviska znázornený na obr. 42 bol následne vyexportovaný do súboru STEP pre ďalšie spracovanie.



Obr. 42 3D model reálneho robotizovaného pracoviska

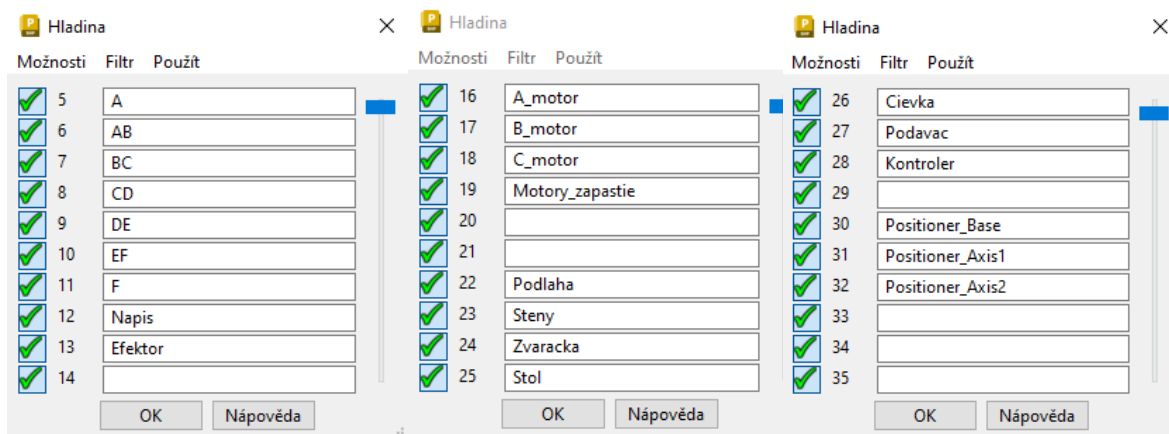
6.2 Predspracovanie 3D modelu pracoviska v softvéri Powershape

Step súbor pracoviska vytvorený v softvéri Inventor bolo nutné predspracovať v softvéri Autodesk Powershape. Toto predspracovanie zahŕňalo importovanie Step súboru pracoviska do softvéru Powershape a rozdelenie solidov do hladín tak, aby každá hladina predstavovala jeden funkčný celok. Ako príklad možno uviesť os 2 priemyselného robota, kde do hladiny pre túto os boli vložené všetky solidy ktoré túto os tvoria. Každá os robota, motor osi, či komponenta pracoviska musí mať vlastnú hladinu. Podľa manuálu [50] je pri tvorbe hladín robota nutné dodržať konvenciu pomenovania podľa obr. 43.



Obr. 43 Konvencia pomenovania osí robota [50]

Pomenovanie hladín komponentov s výnimkou robota nie je obmedzené žiadnou konvenciou, tj. je možné tieto hladiny pomenovať ľubovoľne. Pre vytvorenie novej hladiny je potrebné vybrať z tabuľky hladín prázdnu hladinu a zadať jej názov. Na to aby bolo možné solidy vložiť do danej hladiny je potrebné ich označiť a skopírovať. Vloženie do danej hladiny sa vykoná kliknutím pravým tlačidlom myši na dané číslo hladiny a zvolením možnosti pridať výber. Po rozdelení všetkých solidov do hladín vznikli hladiny zobrazené na obr. 44. Následne bolo potrebné vyexportovať každú hladinu do súboru s príponou dmt. Export samostatnej hladiny sa vykoná skrytím všetkých ostatných hladín, následne kliknutím na Súbor – Export. Po zobrazení okna exportu je nutné zakliknúť softvér do ktorého sa exportuje a zaškrtnúť checkbox „Otvoriť tabuľku nastavenia prekladu dát exportu“. Komponenta vyexportovaná ako súbor s príponou dmt je zložená z trojuholníkov. Z čím viac trojuholníkov je komponenta zložená, tým lepšie bude komponenta v simulácii vyzeráť, avšak simulácia bude pomalšia. Pri exporte hladín do súborov dmt je na základe návodu [50] odporúčané nastaviť hodnotu triangulácie na 0.25, čo je vhodný kompromis medzi rýchlosťou a kvalitou simulácie. Túto hodnotu je potrebné nastaviť v okne exportu kliknutím na Možnosti – Preklad dát – Triangly/Sit'. Po nastavení hodnoty triangulácie je možné pokračovať v exportovaní zadaním názvu súboru, výberom prípony súboru dmt, a na koniec zakliknutím možnosti exportovať len viditeľné. Tento postup je nutné vykonať pre každú vytvorenú hladinu. Vytvorené dmt súbory bolo potrebné uložiť do adresára s ktorým sa bude ďalej pracovať.



Obr. 44 Hladiny vytvorené v softvéri Powershape

6.3 Tvorba simulačného modelu pre softvér Powermill

Pre vytvorenie simulačného modelu pracoviska pre softvér Powermill je potrebné vytvoriť mtd súbor, ktorý obsahuje informácie potrebné pre ovládanie simulácie a je špecifický pre daného robota, pre ktorého je vytvorený. Najjednoduchším spôsobom ako vytvoriť nový mtd. súbor je úprava stávajúceho mtd súboru. Súbor mtd. pre roboty rôznych výrobcov je možné nájsť v záložke „robot library“ softvéru Powermill. Prístup k tejto zložke je možný z prostredia softvéru kliknutím na tlačidlo „Otvoriť knižnicu robotov – Otvoriť východzí adresár knižnice robota“. Tu je potrebné nájsť adresár rovnakého výrobcu robota ako je robot pre ktorý je simulačný model vytváraný a skopírovať jeho mtd súbor

a RobConfig súbor do zložky kde budú tieto súbory upravené a premenované. Pre úpravu týchto súborov bol použitý program Notepad++, avšak je možné použiť akýkoľvek textový editor.

6.3.1 Úprava súboru mtd

Skopírovaný súbor mtd obsahoval informácie a parametre pre robot KUKA KR300 Quantec. Tieto parametre bolo potrebné zmeniť na parametre robota KUKA KR5 Arc. Keďže štruktúra mtd súboru zostáva rovnaká, bolo potrebné meniť len parametre ako napr.:

- Cesty k dmt súborom
- Súradnice TCP
- Minimálne a maximálne hodnoty natočenia jednotlivých osí
- Súradnice stredov rotácií jednotlivých osí
- Úprava farieb komponentov
- A iné

Úprava pohyblivých osí

Ako prvé bolo potrebné nakopírovať adresár s vytvorenými dmt. súborami do zložky odkiaľ boli skopírované pôvodné súbory mtd a RobConfig. Po nakopírovaní adresára s dmt súborami do správnej zložky boli v súbore mtd. upravené cesty k dmt. súborom jednotlivých osí robota. Štruktúra rotačnej osi v súbore mtd je znázornená na obr. 45. Následne boli upravené parametre ako farba osí príkazom <rgb> a súradnice stredu otáčania jednotlivých osí zmenou súradníc X,Y,Z a jednotkových vektorov I,J,K v príkaze <simple_rotary>, kde vektory I,J,K reprezentujú smery osí X,Y,Z. Tieto súradnice boli získané zo softvéru Powershape. Súradnice stredu otáčania osí je možné získať vytvorením trojbodového oblúka v mieste otáčania osi. Dvojklikom na vytvorený oblúk sa zobrazí tabuľka so súradnicami stredu oblúka, ktoré sú zároveň stredom otáčania danej osi. Posledná úprava rotačných osí spočívala v upravení ich limitov a home pozícií. Tieto informácie sú dostupné na stránkach výrobcu KUKA, prípadne v datasheete pre robot KUKA KR5 Arc [51].

```
<machine_part NAME="RobotAxis1">
  <axis>
    <control_info ADDRESS="A" MIN="-185" MAX="185" PRIORITY="AUTO" HOME="0"/>
    <simple_rotary X="0.0" Y="0.0" Z="0.0" I="0" J="0" K="-1" />
  </axis>
  <fixed_point NAME="CylinderAttachPoint" X="-446.956" Y="0.0" Z="605.275"/>
  <model_list>
    <dmt_file>
      <path FILE="KR300-R2500/AB.dmt" />
      <rgb R="255" G="110" B="0" />
    </dmt_file>
    <dmt_file>
      <path FILE="KR300-R2500/ABMotor.dmt" />
      <rgb R="50" G="50" B="50" />
    </dmt_file>
  </model_list>
```

Obr. 45 Štruktúra rotačnej osi v súbore mtd

Pridanie štruktúr pre polohovadlo

Keďže pôvodný mtd súbor neobsahoval predpripravené štruktúry pre polohovadlo, bolo potrebné tieto štruktúry vytvoriť. Polohovadlo DKP – 400 má dve osi, tj. bolo potrebné vytvoriť štruktúru s dvoma osami. Pre tvorbu štruktúry osi polohovadla boli použité rovnaké príkazy ako pre rotačné osi robota, s tým rozdielom že adresy týchto osí boli podľa konvencie zmenené na „R“ a „T“. Limity osí polohovadla boli získané zo stránky výrobcu KUKA [51]. Štruktúra rotačnej osi polohovadla je zobrazená na obr. 46.

```
<!-- The Positioner is controlled by 2 rotary axes -->
<machine_part NAME="Positioner_Axis1">
  <axis>
    <control_info ADDRESS="R" MIN="-90" MAX="90" PRIORITY="AUTO" HOME="0"/>
    <simple_rotary X="1476.77" Y="-169.58" Z="22" I="0" J="1" K="0" />
  </axis>
  <model_list>
    <dmt_file>
      <path FILE="KR5arc_pracoviskoOZ/Positioner_Axis1.dmt" />
      <rgb R="255" G="110" B="0" />
    </dmt_file>
  </model_list>
</machine_part>
```

Obr. 46 Štruktúra rotačnej osi 1 polohovadla

Úprava statických komponentov

Po dokončení úprav pohyblivých osí sa prešlo k úprave štruktúr statických komponentov pracoviska. V týchto štruktúrach boli rovnako zmenené cesty k dmt súborom, či farba komponentu a tak isto boli pridané ďalšie statické komponenty pracoviska, ako steny, podlaha zvärací stôl a podobne. Štruktúra statického komponentu je zobrazená na obr. 47.

```
<!-- The Positioner base is static -->
<machine_part NAME="PositionerBase">
  <model_list>
    <dmt_file>
      <path FILE="KR5arc_pracoviskoOZ/Positioner_Base.dmt" />
      <rgb R="247" G="247" B="230" />
    </dmt_file>
  </model_list>
</machine_part>
```

Obr. 47 Štruktúra staticky definovaného komponentu

Po pridaní statických komponentov bolo potrebné zdefinovať ktoré komponenty majú byť vyradené z detekcie kolízií. Čiastočne upravený mtd súbor bol preto nakopírovaný s novým menom nasať do zložky Powermillu odkiaľ bol pôvodne skopírovaný a následne bolo pracovisko spustené. Spustením pracoviska boli červenou farbou zobrazené komponenty ktoré medzi sebou kolidujú, čo umožnilo určiť komponenty ktoré bolo potrebné z detekcie kolízie vyradiť. Jednalo sa konkrétne o päť robota a podstavu polohovadla. Tieto komponenty boli následne v mtd súbore vložené do štruktúry <collision exclusion list> zobrazenej na obr. 48.


```

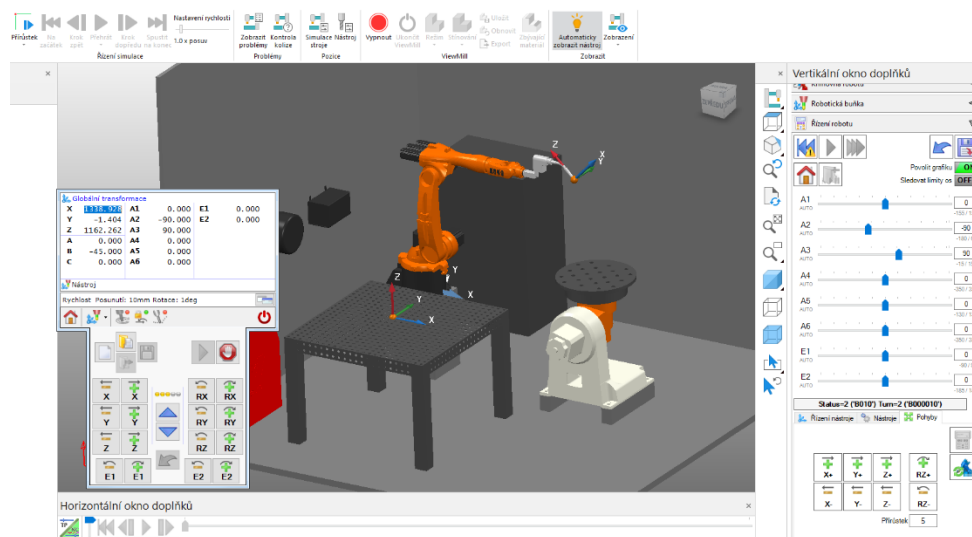
<!-- List containing the groups to exclude from collision checking-->
<collision_exclusion_list>
  <!-- no collision checking between "RobotBase" and "RobotAxis1"
       as this kind of collision is actually impossible -->
  <collision_exclusion_group>
    <collision_exclusion_part NAME="RobotBase" />
    <collision_exclusion_part NAME="RobotAxis1" />
    <collision_exclusion_part NAME="PositionerBase" />
  </collision_exclusion_group>
</collision_exclusion_list>

```

Obr. 48 Štruktúra collision exclusion list

Úprava súradníc a natočenia TCP

Posledné úpravy mtd. súboru zahŕňali zmenu súradníc TCP bodu úpravou hodnôt súradníc X,Y,Z a jednotkových vektorov I,J,K a U,V,W v príkaze <head_attach_point>, ktoré boli získané zo softvéru Powershape. Súradnice X,Y,Z určujú polohu TCP bodu na robotovi, zatiaľ čo jednotkové vektory I,J,K určujú smer osi X vzhľadom k hlavnému súradnicovému systému a jednotkové vektory U,V,W určujú smer osi Z vzhľadom k hlavnému súradnicovému systému. TCP bod bol zadefinovaný na špičku zvaracieho horáka ako je znázornené na obr.49, kde podľa konvencie z návodu [49] musí os Z smerovať do nástroja. Po tejto poslednej úprave boli oba súbory mtd a RobConfig s novým menom vložené do zložky Powermill odkiaľ boli pôvodne skopírované. Po správnej úprave mtd súboru je možné pohybovať jednotlivými osami robota a polohovaďa pomocou virtuálneho teach pendantu. Výsledný model pracoviska v softvéri Powermill je znázornený na obr. 49.



Obr. 49 Výsledný model pracoviska vytvorený pre softvér Powermill

6.3.2 Tvorba variant mtd súboru pre rôzne konfigurácie miesta výroby dielu

Ako bolo spomenuté v kapitole 5.6, výroba dielu môže prebiehať na dvoch miestach, a to na polohovaďe alebo na zvaracom stole. Softvér Powermill má zavedený súradnicový

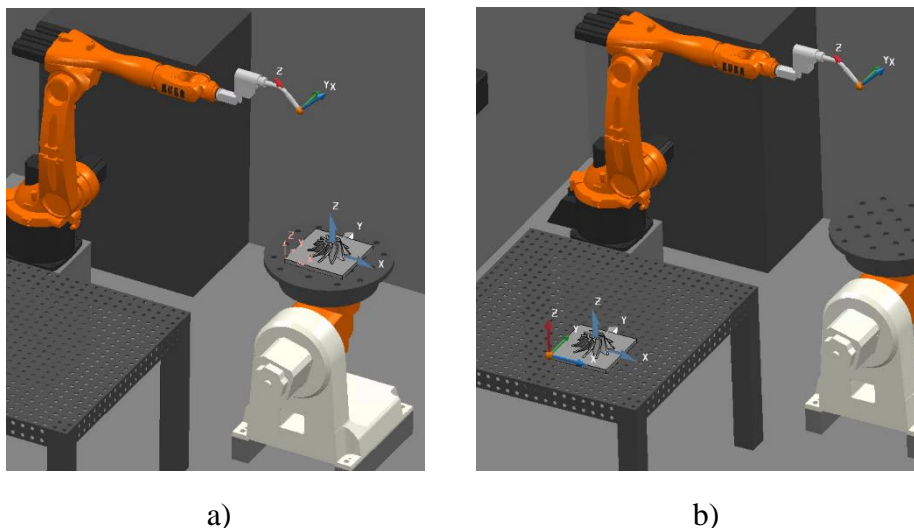
systém „table attach point“, ktorý predstavuje počiatok, do ktorého sa po importovaní dielu umiestni model vyrábaného dielu. Keďže na pracovisku sa nachádzajú dve miesta pre výrobu, je potrebné vytvoriť dve varianty mtd súboru, kde v jednej bude súradnicový systém „table attach point“ umiestnený na zväracom stole a v druhej bude umiestnený v strede polohovadla. Pre umiestnenie súradnicového systému „table attach point“ na prvok pracoviska je nutné tento prvok definovať ako stôl. Toto sa vykoná pridaním príkazu <machine_part NAME="table" /> na koniec štruktúry prvku pracoviska, na ktorom bude model vyrábaného dielu umiestnený. Príklad použitia tohto príkazu je znázornený na obr. 50, kde prvok pracoviska Welding table (zvärací stôl) je definovaný ako stôl. Definovanie prvku ako stôl zabráni tomu, aby pri kontakte modelu vyrábaného dielu s týmto prvkom pracoviska softvér vyhodnotil styk ako kolíziu. Následne je potrebné súradnicový systém table attach point umiestniť do miesta výroby na danom prvku pracoviska zmenou súradníc X,Y,Z a jednotkových vektorov I,J,K ktoré je možné získať zo softvéru Powershape a priradiť tento súradnicový systém prvku ktorý je definovaný ako „table“(stôl). Vytvorením dvoch variant mtd súboru vznikli dve varianty pracoviska s dvoma rôznymi konfiguráciami miesta výroby dielu. Tieto varianty sú znázornené na obr. 51, kde možno vidieť rozdielne polohy súradnicového systému „table attach point“.

```

<!--Table attach point for welding table-->
<table_attach_point PART="table" X="605" Y="-1290"
<!-- The welding table is static -->
<machine_part NAME="Welding_table">
  <model_list>
    <dmf_file>
      <path FILE="KR5arc_pracovisko0Z/Welding_table.dmf" />
      <rgb R="81" G="81" B="81" />
    </dmf_file>
  </model_list>
  <machine_part NAME="table" />
</machine_part>

```

Obr. 50 Definovanie prvku Welding table ako stôl



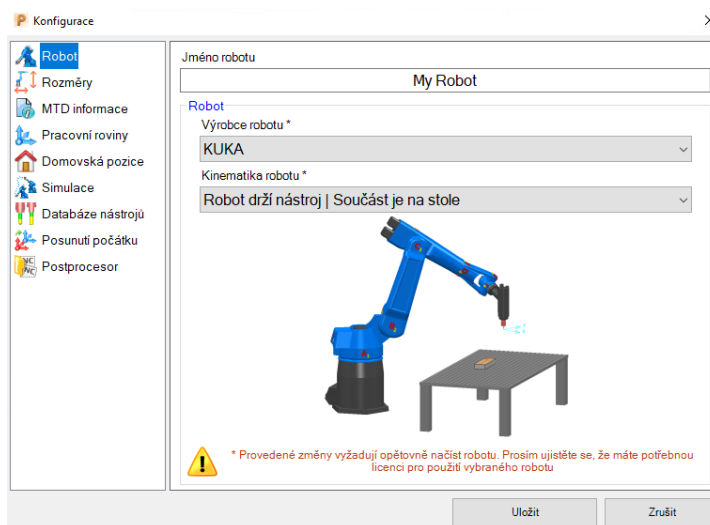
Obr. 51 a) Varianta pracoviska pre výrobu dielu na polohovadle, b) Varianta pracoviska pre výrobu dielu na zväracom stole

6.3.3 Úprava konfigurácie robota

Pred začatím tvorby simulácie bolo potrebné nastaviť konfiguráciu robota. Toto sa vykoná kliknutím na záložku robotická bunka a následne na ikonu konfigurácia robota v okne pluginu Powermill robot, ktoré zobrazí okno konfigurácie znázornené na obr. 52. Tu je potrebné pre správnu funkciu simulácie a export G – kódu nastaviť nasledujúce:

- Robot
- Pracovné roviny
- Databáza nástrojov
- Postprocessor

Ako prvé bolo potrebné nastaviť výrobcu robota a kinematiku robota. V tomto prípade bol ako výrobca nastavený KUKA a zvolená bola kinematika robot drží nástroj a súčasť je na stole. Následne sa prešlo k definovaniu pracovných rovín, kde boli definované súradnicové systémy World a Flange robota KUKA KR5 Arc s východziou orientáciou výrobcu. Po definovaní pracovných rovín bol definovaný nástroj v databáze nástrojov kde ako súradnicový systém nástroja bol použitý aktuálny súradnicový systém „tool attach point“ definovaný v mtd súbore. Ako posledné boli nastavené údaje postprocesora, kde bol zvolený postprocessor KRL (Kuka rapid language).



Obr. 52 Okno nastavenia konfigurácie robota v softvéri Powermill

6.4 Tvorba simulácie dráhy nástroja

Pre tvorbu dráhy nástroja bolo potrebné do softvéru Powermill importovať a umiestniť model vyrábaného dielu. Toto je možné vykonať dvoma spôsobmi. Prvým spôsobom je skopírovanie a vloženie modelu zo softvéru Powershape. Tu je potrebné najprv model dielu importovať do softvéru Powershape, umiestniť do miesta výroby a vytvoriť preň vlastnú hladinu. Následne je možné model skopírovať a vložiť do záložky stromu projektu v softvéri Powermill s názvom modelu. Pri tomto spôsobe je však nutné myslieť na to že diel bude do softvéru Powermill vložený relatívne k súradnicovému systému „table attach point“

predstavujúci súradnicový systém WORLD, ktorý je definovaný v mtd súbore. Druhým spôsobom je importovanie modelu priamo zo STEP súboru do softvéru Powermill. Pri tomto spôsobe bude model vložený priamo do počiatku súradnicového systému „table attach point“. Je preto potrebné aby bol model vyrábaného dielu vytvorený s rovnakou orientáciou súradnicového systému ako je orientácia hlavného súradnicového systému softvéru Powermill, aby bola zabezpečená správna orientácia dielu.

6.4.1 Analýza stratégií tvorby dráhy nástroja

Po importovaní modelu do softvéru Powermill bolo možné prejsť k tvorbe dráhy nástroja. Funkcie tvorby dráhy nástroja pre aditívnu výrobu sú dostupné v záložke Additive softvéru Powermill. Na výber sú dva typy stratégií tvorby dráhy pre aditívnu výrobu:

- Netfabb stratégia
- Konštrukcia prvku

Dráhy vytvorené Netfabb stratégiou sú generované za pomoci analýzy a rozdelenia 3D modelu do dvojrozmerných vrstiev o danej hrúbke. Slicovanie sa pri Netfabb stratégii vykonáva vytvorením obrazu prierezu geometrie 3D modelu pozdĺž kladnej osi Z ktorej orientácia je špecifikovaná pracovnou rovinou. Akákoľvek časť geometrie 3D modelu, ktorá sa nachádza pod pracovnou rovinou je slicerom zanedbávaná. Zatiaľ čo Netfabb stratégia umožňuje vytvárať dráhu len na rovinatej ploche, stratégia Konštrukcia prvku umožňuje vytváranie dráh na nerovinných plochách, ako napr. rotačné plochy. Táto stratégia využíva možnosti viac-osého polohovania softvéru Powermill a môže byť použitá na generovanie dráh pre prvky ako sú čepele, lopatky, kužele atď. Keďže diel vybraný pre výrobu bude vyrábaný na rovinných plochách, bola pre tvorbu dráhy nástroja vybraná Netfabb stratégia.

6.4.2 Tvorba dráhy nástroja

Po otvorení záložky Netfabb stratégia softvéru Powermill sa zobrazí okno znázornené na obr. 53. Tu je potrebné nastaviť nasledujúce:

- Model
- Pracovná rovina
- Stratégia
- Nastavenie dráhy
- Nastavenie vrstvy
- Procesné parametre

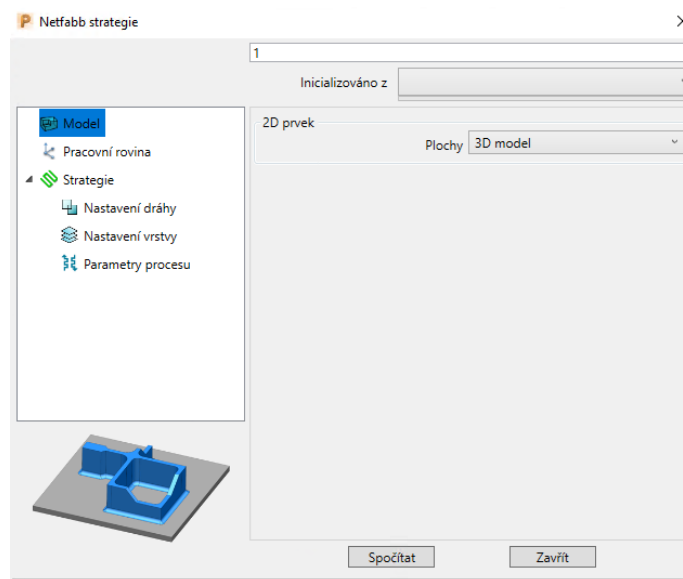
Ako prvé je potrebné nastaviť model pre ktorý má byť dráha vytvorená. Správne importovanie modelu do softvéru Powermill by malo zabezpečiť to, aby sa po rozkliknutí záložky „Plochy“ v nastavení modelu tento model objavil. Po výbere modelu je potrebné nastaviť pracovnú rovinu. Tú je potrebné najprv zadať kliknutím na záložku „Domov“ a následným výberom možnosti „Vytvoriť pracovnú rovinu“. Po výbere pracovnej roviny modelu je možné prejsť na nastavenie stratégie. Tu je potrebné nastaviť parametre: Stratégia, dĺžka elektródy, šírka elektródy, krok a východzí prídavok hladiny, kde parameter krok

predstavuje vzdialenosť medzi paralelnými prechodmi dráhy a východzí prídavok hladiny predstavuje výšku jednej vrstvy. Pri nastavení parametru stratégia sú na výber tri možnosti: centerline offset, oscilation a solid part.

Centerline offset – Vytvorí dráhu nástroja s paralelnými prechodmi nástroja, ktoré sú posunuté od stredovej osi modelu o daný offset. Toto nastavenie sa používa pre tvorbu dráh tenkostenných komponentov

Oscilation – Vytvorí dráhu nástroja s rastrovým prechodom, kde smer rastra sa strieda vrstvu po vrstve

Solid part – Vytvorí dráhu nástroja s rastrovým prechodom a voliteľným počtom obrysových dráh modelu.



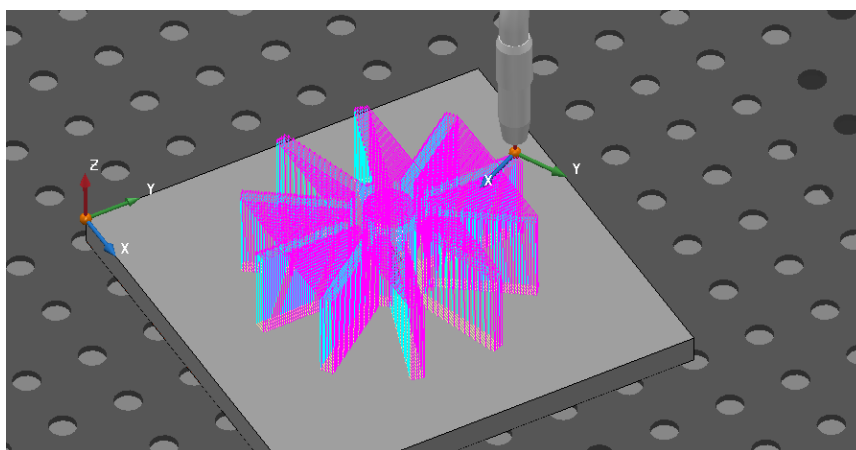
Obr. 53 Okno Netfabb stratégie softvéru Powermill

Po nastavení stratégie sa môže prejsť k nastaveniu dráhy. Tu je potrebné nastaviť parametre: wall offset, number of parallel passes, step over a point reduction. Parameter wall offset predstavuje vzdialenosť od steny ktorá má byť zamietnutá, number of parallel passes predstavuje počet paralelných prechodov nástroja, step over predstavuje krok a step over point reduction je parameter, ktorým sa nastavuje redukcia bodov na úseku dráhy o danej dĺžke. Po nastavení dráhy je možné prejsť k nastaveniu vrstvy. Tu je možné nastaviť parametre ako hrúbka prvej vrstvy, druhej a tretej vrstvy a následne všeobecnú šírku vrstvy. Posledným nastavením ktoré je potrebné vykonať pred výpočtom dráhy je nastavenie procesných parametrov. V tomto nastavení je možné zvoliť typ technológie ktorou bude model vyrábaný. Na výber sú dve možnosti, a to práškové nanášanie a technológia WAAM. Tu bola zvolená technológia WAAM, v ktorej bolo potrebné nastaviť procesné parametre: rýchlosť podávania drôtu, rýchlosť pohybu nástroja, EP/EN Balance, elektrický prúd a čakanie po nanosení vrstvy, kde parameter EP/EN Balance predstavuje pomer času medzi kladným a záporným prúdom pri zváraní čo ovplyvňuje teplo dodané do podkladového materiálu. Tento parameter bol nastavený na základe informácií z článku [52]. Všetky

parametre ktoré boli nastavené pri tvorbe dráhy pre vyrábaný model sú zobrazené v tab.1 a boli nastavené na základe predošlých testov 3D tlače bez použitia softvéru pre tvorbu dráh. Po nastavení všetkých parametrov softvér vypočítal dráhu nástroja pre zvolený diel, ktorej časť je znázornená na obr. 54

Tab. 1 Tabuľka nastavených parametrov pri tvorbe dráhy nástroja

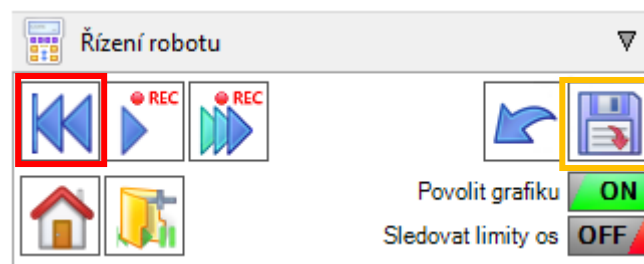
| Parameter | Hodnota parametru |
|---------------------------|-------------------|
| Stratégia | Centerline offset |
| Dĺžka elektródy | 15 mm |
| Šírka elektródy | 1,5 mm |
| Krok | 1,5 mm |
| Východzí prídavok hladiny | 3 mm |
| Wall offset | 5 mm |
| Number of parallel passes | 1 |
| Step over | 1,5 mm |
| Point reduction | True |
| Point reduction tolerance | 0.001 mm |
| First layer thickness | 3 |
| Second layer thickness | 3 |
| Third layer thickness | 3 |
| General layer thickness | 3 |
| Wire feed speed | 0,03333 m/s |
| Travel speed | 0,1 m/s |
| EP/EN Balance | 1 |
| Current | 70 A |
| Layer wait time | 60 s |



Obr. 54 Vygenerovaná dráha nástroja prvej vrstvy vybraného dielu

6.5 Simulácia vytvorenej dráhy vybraného dielu a tvorba G – kódu

Dráha vypočítaná softvérom môže obsahovať kolízne pozície, prípadne singulárne pozície alebo nevhodné konfigurácie robota v bodoch dráhy. Preto je potrebné pred vytvorením programu pre robot túto dráhu odsimulovať. Pred simuláciou je vhodné vygenerovanú dráhu rozdeliť na niekoľko úsekov dráh, kde každý úsek predstavuje jednu vrstvu naneseného materiálu. Rozdelenia dráhy na vrstvy je možné vykonať kliknutím na možnosť „rozdeliť hladiny“ v záložke Additive softvéru Powermill a nastavením počtu hladín v každom rozdelení na 1. Tento úkon je vhodné vykonať za účelom rozdelenia dráhy na kratšie časové úseky ktoré je možné simulovať zvlášť, a v ktorých je jednoduchšie odsledovať nežiadúce javy ako singularity, kolízie a pod. a následne vykonať ich nápravu. Aby softvér vedel ktorú dráhu má simulovať je potrebné ju najskôr aktivovať. Aktivácia dráhy sa vykoná pravým kliknutím myši na danú dráhu a výberom možnosti aktivovať. Aktiváciou dráhy sa TCP robota automaticky presunie do začiatočnej pozície dráhy. Následne je potrebné prejsť do záložky „riadenie robota“ pluginu Powermill robot znázornenej na obr. 55 a kliknutím tlačidla „Priradiť na začiatok a nahráť simuláciu“ (zvýraznenom na obr. 55 červenou farbou) pripraviť simuláciu. Po pripravení simulácie je možné ju spustiť a uložiť do Robsim súboru pomocou tlačidla uložiť (na obr. 55 zvýraznené oranžovou farbou), ktorý je potrebný pre vytvorenie G – kódu.



Obr. 55 Záložka Riadenie robota pluginu Powermill robot

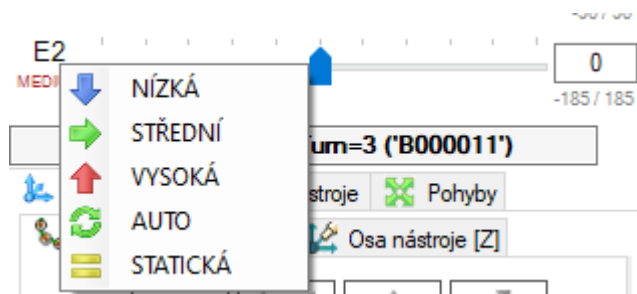
6.5.1 Simulácia výroby dielu na zväracom stole

Ako prvá bola simulovaná dráha vytvorená pre model umiestnený na zväracom stole. Pri simulovaní dráhy sa zistilo že robot počas dráhy často menil konfigurácie natočenia kĺbov v bodoch dráhy a prechádzal cez singulárne pozície. Po bližšom preskúmaní príčiny týchto nežiadúcich javov sa zistilo že vyrábaný diel bol umiestnený príliš blízko robota, tým pádom sa robot musel natáčať nevhodným spôsobom aby dosiahol dané body dráhy. Tento problém bol vyriešený umiestnením vyrábaného dielu do vzdialenejšieho miesta zväracieho stola ktoré je možné vidieť na obr. 51 b). Po úprave dráhy pre novú pozíciu dielu bol dráha znova odsimulovaná s výsledným časom výroby dielu 1 h a 6 min a neboli zaznamenané žiadne singulárne pozície a nevhodné konfigurácie natočenia robota. V simulácii je však bolo možné sledovať že sa nástroj robota pri opisovaní dráhy často rozsvietil na červeno, čo značí kolíziu s iným objektom. Po bližšom preskúmaní príčiny týchto častých kolízií bolo zistené že TCP nástroja koliduje s trajektóriou ktorú už nástroj opísal, z čoho je možné konštatovať že softvér opísanú trajektóriu berie ako nanosený materiál, čo spôsobuje kolíziu z nástrojom.

V reálnej praxi však táto kolízia nemôže spôsobiť žiadne škody pretože TCP nástroja je nastavené v bode kde dochádza k taveniu drôtu. Simuláciu tejto dráhy bolo teda možné považovať za úspešnú a bezpečnú. Video zo simulácie je dostupné v elektronických prílohách.

6.5.2 Simulácia výroby na polohovadle

Po úspešnej simulácii vytvorenej dráhy dielu vyrábaného na zváracom stole bola pre porovnanie vytvorená varianta výroby dielu na polohovadle. Počas simulácie dráhy nástroja vytvorenej pre výrobu dielu umiestneného na polohovadle nedošlo k žiadnym singularitám či nevhodným konfiguráciám natočenia s výnimkou kolízií TCP robota popísaných vyššie. V simulácii však bolo možné pozorovať že polohovadlo sa žiadnym spôsobom nezapájalo do polohovania dielu. Bola preto vykonaná úprava nastavenia aktivity polohovadla. Toto nastavenie bolo vykonané výberom režimu aktivity osi kliknutím pravým tlačidlom myši na os E2 polohovadla v záložke riadenia robota (vid' obr. 56). Pre každú riadenú os je možné zvoliť 5 režimov aktivity, a to: nízka, stredná, vysoká, auto a statická.



Obr. 56 Nastavenie aktivity osi E2

Pôvodne bola aktivita osi E2 polohovadla nastavená ako „auto“, preto bola pre porovnanie aktivita osi nastavená na vysokú. Simuláciou s novým nastavením aktivity osi E2 sa zistilo, že čas výroby dielu sa oproti nastaveniu „auto“ s časom výroby 1 h a 6 min vôbec nezmenil napriek výrazne vyššej aktivite polohovadla. Následne boli odsimulované dráhy aj s ostatnými nastaveniami aktivity polohovadla, avšak čas výroby zostal pri každej simulácii rovnaký. Po porovnaní časov výroby vybraného dielu na zváracom stole a na polohovadle je zrejmé že polohovanie dielu v tomto konkrétnom prípade nemá vplyv na výrobný čas, tým pádom je dostačujúce ak bude diel vyrábaný stacionárne na zváracom stole. Video simulácie výroby dielu na polohovadle je dostupné v elektronických prílohách.

6.5.3 Tvorba programu pre robot

Na to aby bolo možné vytvoriť program pre robot bolo potrebné odsimulovať dráhy všetkých vrstiev dielu a výslednú simuláciu vrstvy uložiť do súboru Robsim. Uloženie simulácie do Robsim súboru sa vykoná kliknutím na tlačidlo uložiť v záložke „riadenie

robota“ pluginu Powermill robot znázornenej na obr. 55. Po uložení všetkých dráh do Robsim súborov bolo potrebné prejsť do záložky program robota zvoliť meno programu a vložiť Robsim súbory do miesta NC program. Vloženie Robsim súborov sa vykoná kliknutím pravým tlačidlom myši na prázdne miesto zvolením možnosti „pridať dráhu“ a zakliknutím dráh ktoré majú byť použité pre tvorbu programu. Po vložení všetkých dráh je možné vytvoriť program pre robot kliknutím na možnosť „Zapísať NC program robota“. Pre to aby bol program vytvorený v správnom jazyku pre používaný robot je potrebné správne nastaviť postprocesor v konfigurácii robota v kapitole 6.3.3.

Po preskúmaní vygenerovaného programu pre robot sa zistilo že tento program neobsahuje príkazy pre zvärací zdroj, aj napriek definovaniu procesných parametrov pri tvorbe dráhy. Túto skutočnosť je možné prisúdiť tomu že softvér Powermill je primárne určený pre simuláciu a tvorbu NC programov pre obrábacie centrá a CNC stroje, avšak možnosť tvorby dráh a programov pre roboty je len opcia tohoto programu. Preto bude pre použitie vygenerovaného programu nutný postprocessing.

6.5.4 Návrh postprocesingu vygenerovaného programu pre robot

Firma Autodesk v súčasnosti neposkytuje pre softvér Powermill žiadnu opciiu pre roboty KUKA s nadstavbou Arc, tým pádom tento softvér nie je schopný vygenerovať program pre robot s príkazmi pre zväranie. Aby bolo možné tento program aplikovať, bude nutné vykonať ručný postprocessing tohoto programu. Vygenerovaný program pre robot ktorého časť je znázornená na obr. 57 obsahuje strategicky vhodne umiestnené komentáre (vyznačené žltou farbou), ktoré ohraničujú začiatok a koniec každej dráhy nanášania materiálu a retrakcie nástroja. Toto vhodné umiestnenie komentárov otvára možnosť jednoduchého nahradenia týchto komentárov príkazmi pre zväranie. Jedná sa konkrétne o náhradu príkazom A20, ktorý umožní to, aby robot komunikoval so zväracím zdrojom. Štruktúra tohto príkazu je nasledujúca:

```
A20=(WELD_MODE[], WELD_SET[], START_SET[], END_SET[], COMMENT[], PRG_NO[])
```

Kde parameter WELD_MODE predstavuje zvärací mód. Sú možné tri nastavenia zväracieho módu, a to:

- ARC_ON – spustenie elektrického oblúka
- ARC_OFF – vypnutie elektrického oblúka
- ARC_SWITCH – rozdelenie zvaru na časti

Ďalšie parametre príkazu A 20 predstavujú:

- WELD_SET – welding dataset
- START_SET – start dataset
- END_SET – end dataset
- COMMENT - komentár
- PRG_NO – číslo programu na zväracom zdroji v ktorom sú nastavené požadované procesné parametre [53]

```
LIN {X -73.402,Y 3.688,Z 29.000,A -67.4868,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.456,Y 2.392,Z 29.000,A -67.5124,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.484,Y 1.247,Z 29.000,A -67.5304,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.485,Y 1.197,Z 29.000,A -67.5304,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
; Cutting Move Ends
SVEL.CP = 0.05
LIN {X -73.485,Y 1.197,Z 77.000,A -67.5304,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.485,Y 1.197,Z 38.000,A -67.5304,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
; Plunge Move Starts
SVEL.CP = 0.0083
LIN {X -73.485,Y 1.197,Z 32.000,A -67.5304,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
; Cutting Move Starts
SVEL.CP = 0.0167
LIN {X -73.495,Y 0.000,Z 32.000,A -67.5485,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.456,Y -2.392,Z 32.000,A -67.5846,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.402,Y -3.688,Z 32.000,A -67.6049,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.243,Y -6.076,Z 32.000,A -67.6358,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -73.145,Y -7.167,Z 32.000,A -67.6485,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
LIN {X -72.873,Y -9.543,Z 32.000,A -67.6719,B 0.0000,C 0.0000,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0,E5 0,E6 0} C_DIS
```

Obr. 57 Část vygenerovaného programu pro robot

7 ZHODNOTENIE A DISKUSIA VÝSLEDKOV

V tejto práci bola skúmaná použiteľnosť softvéru Autodesk Powermill na tvorbu a simuláciu dráhy nástroja pre 3D tlač priemyselným robotom KUKA KR5 Arc a následná schopnosť tohto softvéru generovať robotické programy. Pre simuláciu 3D tlače a tvorbu dráhy nástroja bol vybraný testovací model s vhodnými parametrami. Následne bol v softvéri Inventor od firmy Autodesk vytvorený model reálneho pracoviska, ktorý bol neskôr predspracovaný v softvéri Powershape. Predspracovaný model zo softvéru Powershape bol ďalej použitý pre tvorbu funkčného simulačného modelu pre softvér Powermill. Keďže reálne pracovisko obsahuje polohovadlo a zvárací stôl, na ktorých je možné 3D tlač vykonať, boli vypracované dve varianty mtd súboru pre umiestnenia vyrábaného dielu na zváracom stole, a na polohovadle. Po vytvorení funkčných simulačných modelov pracovísk boli tieto modely správne nakonfigurované pre zaistenie správneho vygenerovania programu. Do oboch variant pracovísk bol importovaný model vyrábaného dielu a následne bola vykonaná analýza stratégií tvorby dráh, na základe ktorej bola pre tvorbu dráh vybraná stratégia Netfab strategies.

Vytvorené dráhy na oboch pracoviskách boli odsimulované a simulačné časy dráh z oboch pracovísk boli porovnané. Z porovnania vyplynulo že výrobný čas dielu je pri oboch konfiguráciách umiestnenia dielu rovnaký aj napriek väčšej kinematickej flexibilitě varianty umiestnenia dielu na polohovadle. Na tvorbu programu pre robot bola použitá odsimulovaná dráha varianty s výrobou dielu na zváracom stole. Po vygenerovaní a analýze programu pre robot bolo zistené, že vygenerovaný program neobsahuje príkazy pre zváranie aj napriek zadaniu procesných parametrov pri tvorbe dráhy. Z dôvodu chýbajúcich príkazov pre zváranie je program vygenerovaný softvérom pre reálnu aplikáciu nepoužiteľný.

V práci bol predstavený návrh riešenia tohto problému, ktorým by mohol byť ručný postprocesing programu. Tento postprocesing by spočíval v náhrade vhodne umiestnených komentárov v programe za príkazy pre zváranie. Toto riešenie by však bolo použiteľné len pre jednoduché diely, ktorých dráhy neobsahujú veľký počet bodov. Pri komplexných dieloch s obrovským počtom bodov v dráhach by bol ručný postprocesing kvôli dĺžke programu príliš časovo náročný a počas ručnej úpravy programu by mohlo veľmi jednoducho prísť ku chybe programátora. V praxi sa 3D tlač metódou WAAM používa práve pre výrobu komplexných dielov väčších rozmerov kvôli jej rýchlosti a ekonomickosti. Z toho dôvodu je možné vyvodit' záver, že softvér Powermill nie je vhodný na tvorbu programov pre robotickú 3D tlač.

8 ZÁVER

Táto diplomová práca bola vypracovaná za cieľom skúmania použiteľnosti softvéru Autodesk Powermill pre simuláciu robotickej 3D tlače technológiou WAAM. Súčasťou cieľov tejto práce bola rešerš pracovísk robotizovaného zvarania, ako aj vytvorenie simulačného modelu reálneho pracoviska, tvorba dráhy nástroja, vyriešenie singulárnych a kolíznych pozícií tejto dráhy a následná implementácia technológie v G – kóde.

Prvá časť práce je úvodom do problematiky pracovísk robotizovaného oblúkového zvarania. V tejto časti je poskytnutý ucelený prehľad v súčasnosti používaných prvkov týchto pracovísk od robotov, polohovadiel, až po prvky oblúkového zvarania. Pozornosť je v tejto časti venovaná aj technológii WAAM. Popísané je použitie tejto technológie v priemysle, či jednotlivé metódy navarovania a ich vlastnosti. V závere tejto časti je predstavený stručný prehľad CAD/CAM simulačných softvérov pre roboty, kde sú popísané vlastnosti a funkcie týchto softvérov.

V druhej časti bol vykonaný rozbor riešenej problematiky, kde boli stanovené ciele, ktoré majú byť dosiahnuté a postup riešenia. Taktiež bolo predstavené a popísané reálne pracovisko na základe ktorého bol simulačný model zostavený. Následne bol vybraný vhodný diel pre 3D tlač a boli zvolené miesta výroby na ktorých bude výroba dielu simulovaná.

Tretia časť práce sa zaoberá samotnou simuláciou. V tejto časti bol popísaný postup tvorby simulácie od vytvorenia 3D modelu pracoviska v softvéri Autodesk Inventor, jeho predspracovania v softvéri Autodesk Powershape, až po vytvorenie finálnych simulačných modelov pre softvér Powermill úpravou konfiguračných mtd súborov. Následne bol popísaný proces tvorby dráh nástroja od analýzy stratégií tvorby dráhy až po výber vhodnej stratégie a nastavenie parametrov vytváraných dráh. Vytvorené dráhy boli následne odsimulované na dvoch variantách pracovísk. Jednalo sa o variantu pracoviska s výrobou dielu na polohovadle a variantu s výrobou dielu na zváracom stole. Výrobný čas dielu z oboch simulácií bol porovnaný, na základe čoho bol vyvodený záver a vybraná dráha na tvorbu programu pre robot. Vytvorený program pre robot bol následne analyzovaný z hľadiska použiteľnosti v praxi, na základe čoho bolo navrhnuté riešenie problému a vyvodený záver pre použitie v praxi.

9 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] ABB. *ABB Priemyselne roboty* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty>
- [3] KUKA AG. *Priemyselne roboty KUKA* [online]. In: . [cit. 2024-01-17]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/sk-sk/produkty-a-slu%c5%beby/robotick%c3%a9-syst%c3%a9my/industrial-robots>
- [4] FANUC. *Zváracie roboty* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af#?t=93ef67fb3f9145f0953fb8ec195c565f,030001b7b73a4d45ac7b6acfd2170c2d>
- [5] YASKAWA. *Zváracie roboty Yaskawa* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.cz.yaskawa.eu.com/produkty/roboty/welding-cutting>
- [6] ROBO DK. *Positioners for robotic applications* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/positioners-for-robotic-applications/>
- [7] EVS ROBOT. *Welding positioners* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: https://www.evsrobot.com/welding-positioner_c8
- [8] ABB. *IRBP D* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/application-equipment-and-accessories/polohovadla/irbp-d>
- [9] ABB. *Polohovadlá* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/application-equipment-and-accessories/polohovadla>
- [10] YASKAWA. *Positioners* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/peripherals/positioners>
- [11] KUKA AG. *Positioners* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/positioners>
- [12] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*. 1. vydání. Praha: Scientia, 1998, 229 stran : ilustrace. ISBN 80-7183-119-0.
- [13] *Power supplies for robotic welding* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/power-supplies-for-robotic-welding.html>
- [14] FRONIUS. *Fronius TPS/i MIG/MAG welding system* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/tpsi-mig-mag-welding-system>
- [15] LINCOLN ELECTRIC. *History* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/About-Us>

- [16] LINCOLN ELECTRIC. *Power Wave R450* [online]. In: . [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/Products/le-na-powerwaver450>
- [17] MILLER ELECTRIC. *Auto-Continuum™ 350* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/equipment/welders/mig-gmaw/auto-continuum-advanced-mig-welder-m30123>
- [18] MILLER ELECTRIC. *Company* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.millerwelds.com/about/our-company>
- [19] ROBOTS DONE RIGHT. *Wire feeders* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/wire-feeders.html>
- [20] SCIENCE DIRECT. *Wire feeder* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/wire-feeder>
- [21] FRONIUS. *PowerDrive System* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-single-wire/powerdrive-system/powerdrive-system>
- [22] FRONIUS. *Push System* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-single-wire/push-systems/push-systems>
- [23] FRONIUS. *PushPull System* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-single-wire/pushpull-systems/pushpull-systems>
- [24] LINCOLN ELECTRIC. *Robotic Welding Torches* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/Products/Equipment/Guns-Torches/Robotic-Welding-Torches>
- [25] FRONIUS. *Robot Welding Torches* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/mig-mag-robot-welding-torches>
- [26] ROBOTS DONE RIGHT. *Collision Detection* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/collision-detection-for-robots.html>
- [27] FRONIUS. *Magnetic Crashbox* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://cdn.thomasnet.com/ccp/30716928/272122.pdf>
- [28] FRONIUS. *Robacta TX/i* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/product-information/mig-mag-robot-welding-torches>
- [29] ROBOTICS TOMORROW. *Robotic Dresspack Component Basics* [online]. In: . [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2021/12/robotic-dress-pack-component-basics/17947>

- [30] HELUKABEL. *Robotic Dresspack Components* [online]. In: . [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.helukabel.us/us-en/Portfolio-Highlights/Robotic-Dress-Packs-Components/Robotic-Dress-Pack-Components.html>
- [31] PAL, Chandrika a Anand KRISHNAMOORTHY. *Polymers for 3D Printing*. 2022, 137-142. ISSN 9780128183113.
- [32] LE, Van Thao a Henri PARIS. On the use of gas-metal-arc-welding additive manufacturing for repurposing of low-carbon steel components: microstructures and mechanical properties. *Welding in the world* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, **65**(1), 157-166 [cit. 2024-02-06]. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-020-01005-y
- [33] LI, Xinlei, Qinglin HAN a Guangjun ZHANG. Large-size sprocket repairing based on robotic GMAW additive manufacturing. *Welding in the world* [online]. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, **65**(5), 793-805 [cit. 2024-02-06]. ISSN 0043-2288. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-021-01080-9
- [34] LI, Johnnie Liew Zhong, Mohd Rizal ALKAHARI, Nor Ana Binti ROSLI, Rafidah HASAN, Mohd Nizam SUDIN a Faiz Redza RAMLI. Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing. *International journal of automation technology* [online]. Tokyo: Fuji Technology Press Co. Ltd, 2019, **13**(3), 346-353 [cit. 2023-11-26]. ISSN 1881-7629. Dostupné z: doi:10.20965/ijat.2019.p0346
- [35] WILLIAMS, S. W., F. MARTINA, A. C. ADDISON, J. DING, G. PARDAL a P. COLEGROVE. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials science and technology* [online]. Taylor & Francis, 2016, **32**(7), 641-647 [cit. 2023-11-26]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1179/1743284715Y.0000000073
- [36] *Metal inert gas welding - process and applications* [online]. In: . [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/mig-welding-004>
- [37] TREUTLER, Kai a Volker WESLING. The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review. *Applied sciences* [online]. Basel: MDPI AG, 2021, **11**(18), 8619 [cit. 2023-11-26]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11188619
- [38] SELVI, S., A. VISHVAKSENAN a E. RAJASEKAR. Cold metal transfer (CMT) technology - An overview. *Defence technology* [online]. AMSTERDAM: Elsevier B.V, 2018, **14**(1), 28-44 [cit. 2024-02-06]. ISSN 2214-9147. Dostupné z: doi:10.1016/j.dt.2017.08.002
- [39] FRONIUS. *CMT Welding process* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/world-of-welding/fronius-welding-processes/cmt>
- [40] GOKHALE, Nitish P., Prateek KALA a Varun SHARMA. Thin-walled metal deposition with GTAW welding-based additive manufacturing process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* [online].

- Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, **41**(12), 1-12 [cit. 2024-02-06]. ISSN 1678-5878. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-019-2078-z
- [41] *TIG Welding* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/tungsten-inert-gas-tig-or-gta-welding-006>
- [42] *Pulsed Arc Plasma* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092401362200317X>
- [43] RESEARCHGATE.NET. *Simulation in robotics* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/261097756_Simulation_in_Robotics
- [44] APPLICATION OF SIMULATION MODELS FOR PROGRAMMING OF ROBOTS. *SOCIETY.INTEGRATION.EDUCATION*. 2018, **2018**. ISSN 1691-5887.
- [45] ROBOTMASTER. *Robotmaster Software* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.robotmaster.com/cs/why-robotmaster>
- [46] ROBODK. *Software* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://robodk.com/>
- [47] AUTODESK. *Powermill* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/powermill/overview>
- [48] GRABCAD. *Impeller* [online]. In: . [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/impeller-86>
- [49] AUTODESK. *Robot-Setup-KUKA* [online]. In: . [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: https://www.autodesk.com/sites/default/files/file_downloads/Robot-Setup-KUKA.pdf
- [50] AUTODESK. *How to build a robotic simulation* [online]. In: . [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: https://help.autodesk.com/sfdcarticles/attachments/How_to_build_a_robot_simulation.pdf
- [51] KUKA AG. *Polohovadlo DKP-400* [online]. In: . [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%25%beby/robotick%23%a9-syst%23%a9my/periferie-robot%25%af/polohova%24%8d/dkp>
- [52] ZHANG, Peilei, Guojin LI, Hua YAN a Yingtao TIAN. Effect of positive/negative electrode ratio on cold metal transfer welding of 6061 aluminum alloy. *International journal of advanced manufacturing technology* [online]. London: Springer London, 2020, **106**(3-4), 1453-1464 [cit. 2024-04-16]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-04705-y
- [53] KUKA AG. *KUKA.ArcTech Basic 1.5* [online]. In: . [cit. 2024-04-27]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/services/downloads?terms=Language:en:1;Language:cs:1;&q=arctech>
- [54] *Princíp metódy WAAM* [online]. In: . [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: https://www.google.com/search?sca_esv=585404198&sxsrf=AM9HkKksIoaf8M1

- hl0I3Y5fWzG50JAy0tQ:1701000839898&q=waam+method+picture&tbm=isch&source=lnms&sa=X&ved=2ahUKEwjpgsz20eGCAxVdhP0HHWwqAbQQ0pQJegQIBhAB&biw=1920&bih=919&dpr=1#imgrc=GN2XDz-un6Qu2M
- [55] *Metóda navarovania MIG* [online]. In: . [cit. 2023-11-26]. Dostupné z: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=metal_inert_gas_welding_mig_gmaw
- [56] *Schéma pracoviska robotického zvarania* [online]. In: . [cit. 2024-01-16]. Dostupné z: <https://en.huazhongcnc.com/industrial-robots/welding-robotic-arm/>
- [57] *YASKAWA Motoman AR* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/produkty/roboty/welding-cutting/seriesdetail/serie/ar-rada_500
- [58] *YASKAWA Motoman GA* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/produkty/roboty/welding-cutting/seriesdetail/serie/ga-rada_503
- [59] *ABB. IRB 1410* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty/irb-1410>
- [60] *ABB. Omnivance FlexArc* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/svarovaci-bunky-omnivance/flexarc>
- [61] *FANUC. ARC Mate 120iD* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-elektrick%C3%BDm-obloukem/arcmate-120id?returnurl=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fcz%2Fcs%2Froboty%2Fstr%25C3%25A1nka-filtru-robot%25C5%25AF>
- [62] *FANUC. ARC Mate 120iD/12L* [online]. In: . [cit. 2024-01-18]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD-elektrick%C3%BDm-obloukem/arcmate-120id-12l?returnurl=https%3A%2F%2Fwww.fanuc.eu%2Fcz%2Fcs%2Froboty%2Fstr%25C3%25A1nka-filtru-robot%25C5%25AF>
- [63] *KUKA AG. KP1-V Single axis positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-us/products/robotics-systems/robot-periphery/positionierer/kp1-v>
- [64] *KUKA AG. KP1-H Single axis positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/positioners/kp1-h>
- [65] *ABB. IRBP L Headstock - tailstock positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/application-equipment-and-accessories/polohovadla/irbp-l>

- [66] ABB. *IRBP A* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/application-equipment-and-accessories/polohovadla/irbp-a>
- [67] EVS ROBOT. *U type two axis welding positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.evrobot.com/u-type-two-aixs-welding-positioner>
- [68] EVS ROBOT. *C type welding positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.evrobot.com/c-type-two-aixs-welding-positioner>
- [69] KUKA AG. *KP2-HV Two axis positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/positioners/kp2-hv500>
- [70] KUKA AG. *KP3-H2H Three axis positioner* [online]. In: . [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/robot-periphery/positioners/kp3-h2h>
- [71] FRONIUS. *Fronius rada TPS/i* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://www.nuovacam.it/en/parco-macchine/fronius-tps-5000-steel-mig-mag-2/>
- [72] *Princíp navarovania metódou TIG* [online]. In: . [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/WAAM-based-processes-1a-Gas-Metal-Arc-Welding-1b-Gas-Tungsten-Arc-Welding_fig1_312496948
- [73] *Robot Fanuc ARC Mate 100iC/12* [online]. In: . [cit. 2024-02-08]. Dostupné z: <https://roboticsandautomationnews.com/2017/07/21/fanuc-launches-extremely-compact-new-arc-welding-robot/13488/>
- [74] LINCOLN ELECTRIC. *Thru Arm Robotic Torch* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: https://www.lincolnelectric.com/en/Products/le-na-fanucic_ac_magnumpro
- [75] LINCOLN ELECTRIC. *External Dress Robotic Torch* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: https://www.lincolnelectric.com/en/Products/le-na-externaldress_magnumpro
- [76] FRONIUS. *WF 60i Robacta Drive CMT Robotic Welding Torch* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/info-centre/press/robotic-welding-assistance-systems>
- [77] LINCOLN ELECTRIC. *Magnum Pro Water Cooled Robotic Welding Torch* [online]. In: . [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: https://www.lincolnelectric.com/en/Products/le-na-fanucic_wc_magnumpro
- [78] SCHUNK. *OPS Collision Detection* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: https://schunk.com/tw/en/automation-technology/anti-collision-unit/ops/c/PGR_1094
- [79] ATI INDUSTRIAL AUTOMATION. *Collision Detecion* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: https://www.atia.com/products/collision_sensor/robot_collision_sensor.aspx

- [80] FANUC. *CRX-10iA/L* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/kolaborativn%C3%AD-roboty/crx-10ial>
- [81] LINCOLN ELECTRIC. *Power Ream 2* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en/Products/k2391-2>
- [82] FRONIUS. *Robacta CTC* [online]. In: . [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: <https://www.facebook.com/froniuswelding/photos/a.1150315971721745/5278884655531502/?type=3>
- [83] MURRPLASTIC. *FHS Recirculation System* [online]. In: . [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.murrplastik.com/products/robotic-dress-packs/fhs-flexible-holder-systems-for-collaborative-robots/fhs-recirculation-system-2129/>
- [84] BIZLINK. *LSH Delta* [online]. In: . [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://factory-automation.bizlinktech.com/products-services/robotics/energy-supply-systems/retract-systems/>
- [85] ROBOTMASTER. *Prostředie softvéru* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://www.canadianmetalworking.com/canadianfabricatingandwelding/product/automationsoftware/hypertherm-associates-updates-robotmaster-offline-programming-software#gallery>
- [86] ROBODK. *Prostředie softvéru* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://robodk.com/doc/de/Robot-Programs.html>
- [87] EUROTEC ONLINE. *Prostředie doftvéru Powermill* [online]. In: . [cit. 2024-02-25]. Dostupné z: <https://eurotec-online.com/powermill-robot-interface-for-machining-with-robots>

10 ZOZNAM SKRATIEK, OBRÁZKOV A TABULIEK

10.1 Zoznam skratiek

WAAM – Wire arc additive manufacturing

TCP – Tool center point

MIG – Metal inert gas

CMT – Cold metal transfer

TIG – Tungsten inert gas

PAP – Pulsed arc plasma

PAW – Plasma arc welding

mm – milimeter

m - meter

A – ampér

V – volt

m/s – meter za sekundu

kg – kilogram

h – hodina

min - minúta

10.2 Zoznam obrázkov

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 1 Schéma pracoviska robotizovaného zvrárania [54]..... | 17 |
| Obr. 2 Roboty KUKA KR Cybertech ARC a KR Cybertech nano ARC [3]..... | 18 |
| Obr. 3 Zváracie roboty firmy Fanuc [59] [60]..... | 19 |
| Obr. 4 a) Robot ABB IBR 1410, b) Zváracia bunka Omnivance FlexArc [57] [58] | 19 |
| Obr. 5 Zváracie roboty firmy Yaskawa [55] [56]..... | 20 |
| Obr. 6 a) Otočný stôl KUKA KP1-V, b) Horizontálne polohovadlo KUKA KP1-H, c) Horizontálne polohovadlo ABB IRBP L [61] [62] [63]..... | 21 |
| Obr. 7 a) Dvoj-osé polohovadlo typu L, b) Dvoj-osé polohovadlo typu U [64] [65] | 21 |
| Obr. 8 a) Dvoj-osé polohovadlo typu C, b) Dvoj-osé polohovadlo typu Platform [66] [67] | 22 |
| Obr. 9 a) Troj-osé polohovadlo KUKA KP3-H2H, b) Troj-osé polohovadlo ABB IRBP D [68] [8]..... | 22 |
| Obr. 10 Zváracie zdroje rady TSP/i firmy Fronius [69]..... | 24 |
| Obr. 11 Zvárací zdroj Lincoln Electric Power Wave R450 [16]..... | 25 |
| Obr. 12 Zvárací zdroj Auto-Continuum™ 350 firmy Miller Electric [17] | 26 |
| Obr. 13 Robot FANUC ARC Mate 100iC/12 s integrovaným podávačom drôtu od firmy Fronius [71] | 27 |
| Obr. 14 a) Systém Push-Pull, b) Systém Push [22] [23] | 27 |
| Obr. 15 Systém Power Drive [21] | 28 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 16 a) Konštrukcia Thru-Arm, b) Konštrukcia External Dress [72] [73]..... | 28 |
| Obr. 17 a) Horák s podávačom WF 60i Robacta Drive CMT firmy Fronius, b) Vodou chladený horák bez podávača Magnum® PRO firmy Lincoln Electric [74] [75] | 29 |
| Obr. 18 a) Kolízna ochrana umiestnená medzi efektor a prírubu robota, b) Kolaboratívny robot Fanuc CRX-10iA/L s integrovanou kolíznou ochranou [78] [73]..... | 30 |
| Obr. 19 a) Kolízna ochrana firmy ATI Industrial Automation, b) Kolízna ochrana OPS firmy Schunk, c) Kolízna ochrana Magnetic Crashbox [27] [76] [77] | 31 |
| Obr. 20 a) Stanica automatického čistenia hubice horáka, b) Stanica výmeny hubice horáka Fronius Robacta CTC [79] [80] | 32 |
| Obr. 21 Výmenná stanica Fronius Robacta TX/i [28] | 32 |
| Obr. 22 Dresspack nainštalovaný na robot YASKAWA [30] | 33 |
| Obr. 23 Pretrhnutie ochrannej hadice v dôsledku nedostatočnej dĺžky [29]..... | 34 |
| Obr. 24 a) Pohyblivý kĺb typ A, b) Pohyblivý kĺb typ B [30]..... | 35 |
| Obr. 25 a) Externý recirkulačný systém FHS firmy Murrplastik, b) Uzavretý recirkulačný systém LSH Delta firmy BizLink [81] [82] | 35 |
| Obr. 26 a) Chránič proti nárazu v prevedení „Quick clip“ od firmy Helukabel, b) Poškodenie spôsobené chráničom v prevedení so skrutkami [29] [30]..... | 36 |
| Obr. 27 Znárodnenie metódy DED | 37 |
| Obr. 28 Princíp metódy WAAM [52] | 38 |
| Obr. 29 a) Zvárací robot, b) Portálové CNC obrábacie centrum s úpravou pre aditívnu výrobu pomocou metódy WAAM [35] | 38 |
| Obr. 30 Oprava ozubeného kolesa pomocou metódy WAAM [33]..... | 39 |
| Obr. 31 Metóda navarovania MIG [53] | 40 |
| Obr. 32 Proces navarenia materiálu metódou CMT [38] | 41 |
| Obr. 33 Princíp navarovania metódou TIG [70] | 41 |
| Obr. 34 Znárodnenie metódy PAP v cykle jedného výbojového intervalu [42] | 42 |
| Obr. 35 Náhl'ad na prostredie softvéru Robotmaster [83]..... | 45 |
| Obr. 36 Náhl'ad na prostredie softvéru RoboDK [84]..... | 46 |
| Obr. 37 Náhl'ad na prostredie softvéru Autodesk Powermill [85] | 47 |
| Obr. 38 a) Pracovisko robotizovaného zvarovania na UST, b) Layout pracoviska | 50 |
| Obr. 39 Model obežného kolesa čerpadla | 50 |
| Obr. 40 a) Umiestnenie vyrábaného dielu na zvárací stôl, b) Umiestnenie vyrábaného dielu na polohovadlo | 51 |
| Obr. 41 Orientácia pracovného súradnicového systému robotov KUKA [49] | 53 |
| Obr. 42 3D model reálneho robotizovaného pracoviska..... | 54 |
| Obr. 43 Konvencia pomenovania osí robota [50] | 54 |
| Obr. 44 Hladiny vytvorené v softvéri Powershape | 55 |
| Obr. 45 Štruktúra rotačnej osi v súbore mtd | 56 |
| Obr. 46 Štruktúra rotačnej osi 1 polohovadla | 57 |
| Obr. 47 Štruktúra staticky definovaného komponentu..... | 57 |
| Obr. 48 Štruktúra collision exclusion list..... | 58 |
| Obr. 49 Výsledný model pracoviska vytvorený pre softvér Powermill..... | 58 |
| Obr. 50 Definovanie prvku Welding table ako stôl | 59 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 51 a) Varianta pracoviska pre výrobu dielu na polohovadle, b) Varianta pracoviska pre výrobu dielu na zváracom stole | 59 |
| Obr. 52 Okno nastavenia konfigurácie robota v softvéri Powermill | 60 |
| Obr. 53 Okno Netfabb stratégie softvéru Powermill | 62 |
| Obr. 54 Vygenerovaná dráha nástroja prvej vrstvy vybraného dielu | 63 |
| Obr. 55 Záložka Riadenie robota pluginu Powermill robot | 64 |
| Obr. 56 Nastavenie aktivity osi E2 | 65 |
| Obr. 57 Časť vygenerovaného programu pre robot | 67 |

10.3 Zoznam tabuliek

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tab 1) Tabuľka nastavených parametrov pri tvorbe dráhy nástroja | 63 |
|-----------------------------------------------------------------------|----|

11 ZOZNAM PRÍLOH

Elektronické prílohy:

Dmt súbory – dmt súbory pre pracovisko

Konfiguračné súbory – Powermill mtd a RobConfig súbory

Vygenerované programy pre robot – Programy vygenerované z powermillu

Video simulácie dráhy – video_simulacia_na_polohovadle.mp4