



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**Systemy TAST a Multipass pro vícevrstvé
robotizované svařování**

TAST and Multipass systems for multilayer robotic
welding

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR:

Author

Jiří Resl

VEDOUCÍ PRÁCE:

Supervisor

Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE

STUDIJNÍ PROGRAM:

Study programme

B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR:

strojírenství

Field of study

2303R014 Technologie, materiály a ekonomika

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Resl** Jméno: **Jiří** Osobní číslo: **482689**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Systémy TAST a Multipass pro vícevrstvé robotizovaném svařování

Název bakalářské práce anglicky:

TAST and Multipass systems for multilayer robotic welding

Pokyny pro vypracování:

1. Roboty Fanuc používané v oblasti automatizace svařování.
2. Senzory a systémy umožňující korekci dráhy robota při obloukovém svařování (principy, popis).
3. Popis systému TAST a Multipass pro svařování metodou MAG.
4. Experimentální svařování vícevrstevných koutových svarů metodou MAG.
5. Technologická doporučení pro svařování vícevrstevných koutových svarů.
6. Závěrečné zhodnocení.

Seznam doporučené literatury:

- O. Skařupa: Průmyslové roboty a manipulátory, Ostrava 2007
- Podklady výrobců a dodavatelů robotizovaných pracovišť: Fanuc, Yaskawa - Motoman, ABB, Valk Welding, Cloos.
- Factoryautomation.
- Fronius wire sense

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Kovanda, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Aleš Marszal, Fanuc Czech s.r.o.

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

Ing. Karel Kovanda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Kovandy, Ph.D., IWE, a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Sobotce dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Rád bych vyjádřil poděkování vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Karlovi Kovandovi, Ph.D., IWE za odborné vedení, věcné připomínky a vstřícnost. Děkuji také panu Alešovi Marszalovi ze společnosti FANUC Czech s.r.o. za pomoc při řešení problémů technického rázu a cenné rady. V neposlední řadě děkuji mé rodině a přítelkyni za podporu během celého studia.

Anotace

Název diplomové práce: Systémy TAST a Multipass pro vícevrstvé robotizované svařování

Autor práce: Jiří Resl

Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE

Konzultant: Aleš Marszal, FANUC Czech s.r.o.

Akademický rok: 2020/2021

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 77 stránek, 12 tabulek, 80 obrázků

Klíčová slova: Robotizované svařování, senzor, TAST, Multipass, vícevrstvý svar, FANUC.

Bakalářská práce v první části mapuje současný výrobní program společnosti FANUC v oblasti svařovacích robotů. V krátkosti jsou shrnuty obecné poznatky o senzorech používaných v robotizovaném svařování. Práce se podrobně věnuje systémům pro vícevrstvé robotizované svařování SuperTAST a Multipass. V experimentální části jsou prakticky porovnávány dva přístupy k robotizovanému vytváření vícevrstvých svarů - TAST a Multipass.

Annotation

Title of the final thesis:	TAST and Multipass systems for multilayer robotic welding
Author:	Jiri Resl
Supervisor:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
Consultant:	Ales Marszal, FANUC Czech s.r.o.
Academic year:	2020/2021
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolarik, Ph.D., IWE
Extent:	77 pages, 12 tables, 80 pictures
Keywords:	Robotic welding, sensor, TAST, Multipass, multilayer weld, FANUC.

This bachelor's thesis maps welding robots currently produced by FANUC. I shortly summarize basic information about sensors used in robotic welding. I emphasize on describing systems for robotic multilayer welding SuperTAST and Multipass. The experimental part concerns about two approaches to the robotic multilayer welding – TAST and Multipass.

Obsah

1	Úvod a cíl práce	10
2	Roboty FANUC používané v oblasti automatizace svařování.....	11
2.1	O společnosti FANUC.....	11
2.2	Svařovací roboty FANUC	14
2.2.1	Systém značení robotů řady ARC Mate	15
2.2.2	Současný výrobní program	15
2.2.3	Shrnutí.....	18
3	Senzory a systémy umožňující korekci dráhy robota při obloukovém svařování.....	19
3.1	Důvody používání senzorů	19
3.2	Kontaktní snímače	21
3.3	Bezkontaktní snímače	21
4	Popis systému TAST a Multipass pro svařování metodou MAG.....	23
4.1	TAST	24
4.1.1	Laterální trasování.....	24
4.1.2	Vertikální trasování.....	26
4.1.3	Vlastnosti systému.....	27
4.2	SuperTAST.....	28
4.2.1	Provozní módy.....	28
4.2.2	Nastavení systémových proměnných.....	28
4.2.3	Advise Mode	29
4.2.4	Diagnosis Mode	36
4.2.5	Run Mode.....	37
4.3	Systémy Root Pass Memorization a Multipass.....	37
4.3.1	Root Pass Memorization	37
4.3.2	Multipass	38
4.3.3	Příklady použití.....	40
4.4	Řešení konkurenčních výrobců	41
4.4.1	ABB	41
4.4.2	KUKA	43
4.4.3	Yaskawa – Motoman	44

4.4.4	Shrnutí.....	44
5	Experimentální část	45
5.1	Popis experimentu	45
5.2	Popis pracoviště	46
5.3	Popis vzorků a jejich upnutí.....	48
5.4	Průběh experimentu	48
5.4.1	Požadavky na svar.....	48
5.4.2	Volba svařovacího proudu kořenové housenky	50
5.4.3	Volba postupové rychlosti kořenové housenky	50
5.4.4	Volba parametrů rozkyvu kořenové housenky	51
5.5	Svařování vícevrstvých svarů za použití systému TAST	52
5.5.1	Popis programu.....	52
5.5.2	Úprava pozice krycích housenek.....	53
5.5.3	Test s výchylkou	55
5.6	Svařování vícevrstvých koutových svarů metodou Multipass.....	61
5.6.1	Popis programu.....	61
5.6.2	Definování pozice housenek.....	63
6	Závěrečné zhodnocení.....	70
	Bibliografie	72
	Seznam tabulek	75
	Seznam rovnic	75
	Seznam obrázků	76
	Přílohy	77

Seznam zkratek

TCP	Tool Center Point
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
TAST	Through Arc Seam Tracking
TIG	Tungsten Inert Gas Welding
MIG	Metal Inert Gas Welding
MAG	Metal Active Gas Welding
MMA	Manual Metal Arc Welding
WAW	Wrist Axis Weaving
I/O	Input/Output
RPM	Root Pass Memorization
PR	Position Register
MP	Multipass
NC	Numeric Control
CNC	Computer Numeric Control
AVC	Arc Voltage Control
PA	poloha svařování vodorovná shora
PB	poloha svařování vodorovná šikmo shora
CMT	Cold Metal Transfer
PLC	Programmable Logic Controller
FWD	Forward
ZM	Základní materiál
CO ₂	Oxid uhličitý

1 Úvod a cíl práce

Tak jako ve většině oblastí technické praxe se automatizace výrobních procesů v obloukovém svařování začala prosazovat v 70. letech 20. století za účelem snížení výrobních nákladů v sériové a hromadné výrobě a minimalizace fyzicky náročné práce. Vlivem dynamičnosti trhu a čím dál tvrdší konkurence jsou firmy motivovány zavádět prostředky průmyslové automatizace v co největší míře. V případě automatizace obloukového svařování to přináší i další výhody, jako zvýšení produktivity, flexibility, bezpečnosti práce a kvality. Dochází rovněž k redukci potřebného pracovního prostoru [1] [2].

Cílem této bakalářské práce je v teoretické části zmapovat výrobní program robotů pro obloukové svařování společnosti FANUC, popsat senzory a systémy umožňující korekci dráhy robota při obloukovém svařování s důrazem na systémy TAST a Multipass společnosti FANUC. Součástí bude i zmapování řešení konkurenčních výrobců.

V experimentální části se nejprve seznámím s ovládáním a programováním robotů FANUC. Hlavním cílem bude srovnání dvou přístupů k svařování vícevrstvých svarů. Prvním ověřovaným způsobem bude vytvoření vícevrstvého svaru pouze za použití systému TAST. Druhou metodou bude vytvoření stejného svaru systémem Multipass. Z poznatků získaných při tomto experimentu budou vyvozena technologická doporučení.

2 Roboty FANUC používané v oblasti automatizace svařování

2.1 O společnosti FANUC

FANUC Corporation (Fuji Automatic Numerical Control) je japonská společnost působící v oblasti průmyslové automatizace. Sídlo firmy se nachází na úpatí hory Fuji v obci Oshino-mura. Skupina je jedním z největších světových hráčů ve svém oboru.



obr. 1 – logo FANUC

Za vznikem společnosti stál tehdy třicetiletý Seiueemon Inaba, zaměstnanec společnosti Fujitsu Ltd. Inaba byl roku 1955 ve firmě pověřen vedením nově vzniklé divize číslicového řízení. Již o rok později se jeho týmu podařilo vyvinout první číslicově řízený stroj. V roce 1972 byla Inabou vedená divize číslicově řízených strojů osamostatněna a tím byl odstartován rychlý vývoj společnosti. Na začátku 70. let 20. století se v ekonomicky rozvinutých zemích



obr. 2 – Seiueemon Inaba [44]

začaly rychle zvyšovat mzdové náklady průmyslových podniků, což je motivovalo nasazovat prvky automatizace do svých výrobních procesů ve velké míře. Roku 1975 společnost uzavřela partnerství s americkou společností Pratt & Whitney a německou firmou Siemens. Tím se společnosti FANUC otevřely dveře na americký a evropský trh. K roku 1982 firma ovládala polovinu světového trhu s NC stroji [3] [4].

Prodej prvních průmyslových robotů firma odstartovala roku 1975. Lídry trhu s robotikou v Japonsku byly ale konkurenční společnosti Hitachi a Kawasaki, podíl firmy FANUC byl velmi malý. Společnost se tedy rozhodla zviditelnit otevřením předváděcí automatizované továrny (1981), ve které byly za pomoci robotů a NC strojů vlastní výroby produkovány díly pro nové roboty. Společnost na tomto příkladu názorně ukázala velkou výhodu automatizace ve výrobě.

Továrna, která by bez automatizace vyžadovala 500 pracovníků, si takto vystačila se 100 zaměstnanci. Ty tvořili převážně programátoři, údržbáři a montážní dělníci. Automatizace montážních procesů byla tehdy stále obtížná. Inaba se myšlenky automatizovat i tuto část výrobního procesu nevzdal a v polovině 80. let představil FANUC montážní roboty, které v továrně kompletovaly servomotory [5] [4].

Realizace tzv. „lights-out factory“, tedy „továrny, ve které se nemusí svítit“ vyvolal velké ohlasy v médiích, ale i u konkurentů. Firma pokračovala v dobývání dalších trhů prostřednictvím smluv s lokálními partnery. Nejdůležitější bylo založení společného podniku s americkou společností General Motors (GMFanuc Robotics) roku 1982. Toto spojení bylo pro obě společnosti velmi výhodné. Podnik General Motors, jakožto jeden z průkopníků zavádění automatizace ve výrobě, získal možnost přímo ovlivňovat vývoj nových technologií. FANUC mohl čerpat výhod ze spojení se svým největším potenciálním zákazníkem v USA a posílit svůj vliv na americkém trhu. Společnost GMFanuc Robotics se během šesti let stala největším světovým dodavatelem průmyslových robotů [3] [6] [4].

V polovině 80. let se začaly překotné investice amerických podniků do automatizace projevovat na zhoršení jejich finanční situace, proto začaly další zavádění automatizace omezovat. To se v součtu s oslabováním japonského jenu vůči americkému dolaru projevilo na ekonomických výsledcích GMFanuc. Díky dlouhodobě zdravé finanční situaci, se společnosti podařilo toto období přestát. Roku 1987 společnost posílila svou pozici na americkém trhu založením společného podniku s dalším významným hráčem, tentokrát General Electric (GE Fanuc Automation). Předmětem tohoto partnerství byly zejména CNC stroje [3] [4].

Počátkem 90. let se FANUC potýkal se sníženou poptávkou po obráběcích strojích a průmyslových robotech v Japonsku. Z toho důvodu se firma rozhodla posílit svůj podíl na zahraničních trzích nákupem zbývajících podílu ve společnosti GMFanuc Robotics. Stala se tak jediným vlastníkem této společnosti. I přes rostoucí poptávku v USA se FANUC na rozdíl od japonských konkurentů nerozhodl přesunout výrobu do Spojených států. I díky vysoce

automatizovaným výrobním procesům dokázal udržet výrobní náklady nízké oproti konkurenčním producentům [3] [4].

Dr. Inaba byl ve své podstatě vizionářem v oblasti průmyslové automatizace. Jeho snaha posunout FANUC na místo světového lídra ve svém oboru nebyla jen záležitostí byznysu, ale hlavně jeho osobním zájmem. Byl znám jako tvrdý, autoritářský manažer, kdy jeho podřízení „nesmí mluvit, pokud on nemluví s nimi“. Nedostatek pracovní síly a její fluktuaci vyřešil zavedením řady do té doby neobvyklých benefitů. V původně zemědělské oblasti prefektury Yamanashi, ve které firma sídlí dodnes, pro zaměstnance a jejich rodiny nechal vystavět gymnázium, zdravotnické zařízení, vyhřívaný bazén, kulturní centrum nebo obytné čtvrti. Tento krok motivoval i další společnosti v Japonsku, které byly pro udržení pracovní síly nuceny rovněž zlepšovat pracovní podmínky pro své zaměstnance. Seiemon Inaba odešel z pozice prezidenta společnosti roku 1995 a dále ve firmě působil. Zemřel roku 2020 ve věku 95 let. [3] [7] [4].

V roce 2019 společnost zaměstnávala přes 8 tisíc lidí. Produkce kompletního výrobního programu firmy dnes probíhá ve čtyřech továrnách v Japonsku [8].

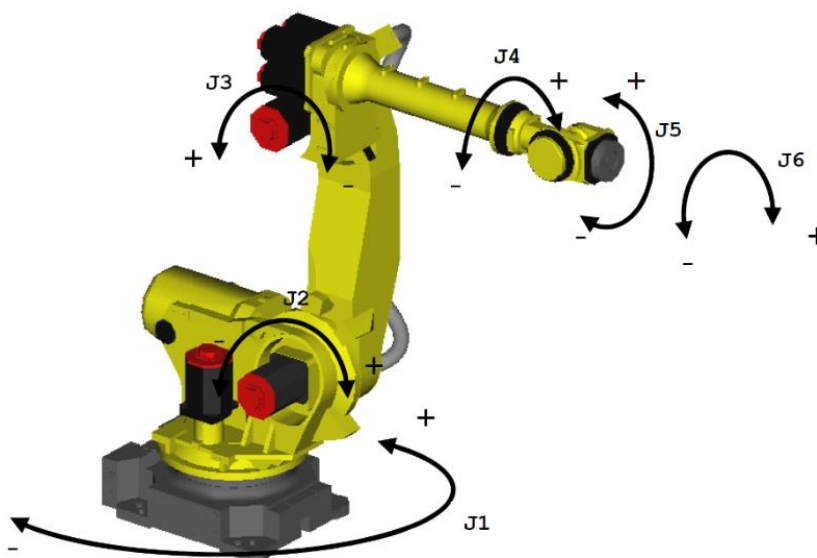
Současný výrobní program lze rozdělit do několika základních kategorií:

- Průmyslová automatizace – CNC řídicí systémy, servopohony, laserové technologie,
- robotika – svařovací roboty, manipulační roboty, kolaborativní roboty,
- výrobní technologie – frézovací centra (ROBODRILL), elektronické vstřikovací stroje (ROBOSHOT), elektroerozivní drátové řezačky (ROBOCUT), stroje pro velmi přesné frézování, soustružení a gravírování (ROBONANO),
- IoT – pokročilé systémy řízení výroby na bázi Internet of Things (FILED) [9].

2.2 Svařovací roboty FANUC

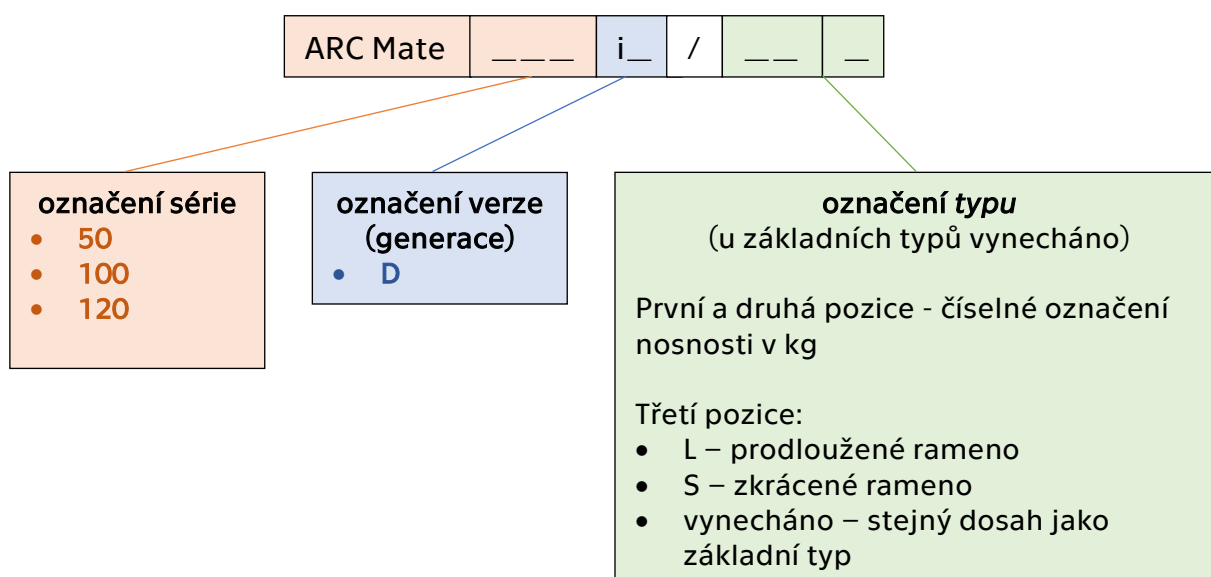
Pro aplikace v oblasti robotizovaného obloukového svařování vyvinula společnost FANUC modelovou řadu nazvanou FANUC ARC Mate. Roboty je možné využít i pro laserové svařování, lepení a pájení. Modelová řada v současnosti obsahuje roboty s maximální nosností na zápěstí (užitečné zatížení) od 7 kg do 35 kg a maximálním dosahem od 717 mm do 3123 mm. Všechny modely jsou vybaveny šesti osami poháněnými servomotory. V případě nedostatku místa pro instalaci robota je možné jej ustavit pod úhlem nebo na strop. Roku 2019 vstoupila firma FANUC do progresivní oblasti kolaborativních svařovacích robotů [11].

Speciální modelovou řadu robotů pro bodové svařování společnost FANUC nenabízí. Využívají se některé vhodné víceúčelové roboty, zejména pak série R-1000, R-2000 a M-700. Typický je vysoký dosah (až 3,7 m) a vysoká nosnost (až 700 kg) [12].



obr. 3 – značení a smysl os robotů FANUC [13]

2.2.1 Systém značení robotů řady ARC Mate (současný výrobní program)



Příklady:

- ARC Mate 50iD – série ARC Mate 50, generace iD, základní typ
- ARC Mate 120iD/12L – série ARC Mate 120, generace iD, nosnost 12 kg, prodloužené rameno
- ARC Mate 100iB/16S – série ARC Mate 100, generace iD, nosnost 16 kg, zkrácené rameno

Obecně platí, že typy s prodlouženým ramenem mají oproti základnímu typu zvýšený dosah a sníženou nosnost, typy se zkráceným ramenem mají snížený dosah a zvýšenou nosnost.

2.2.2 Současný výrobní program

ARC Mate 120iD

Jedná se o univerzální model s užitečným zatížením max. 25 kg a maximálním dosahem 1831 mm. Jako největší přednosti výrobce zmiňuje vysokou tuhost a tím i vysokou opakovatelnost polohování $\pm 0,02$ mm. Díky své konstrukci má velký pracovní rozsah, schopnost dosáhnout do blízkosti základny a úzkých prostorů. Vedení svazku hadic pro svařovací plyny

a elektrických vodičů je kompletně realizováno uvnitř ramene a zápěstí. Ochrana zápěstí splňuje stupeň krytí IP67, proto je robot vhodný do znečištěného prostředí [14].

Nejvyšším dosahem z modelové řady ARC Mate disponuje typ **ARC Mate 120iD/12L** s dosahem 2272 mm a nosností 12 kg [15].

Nejvyšší nosností (35 kg) ze všech robotů pro obloukové svařování firmy FANUC se vyznačuje typ **ARC Mate 120iD/35** s dosahem 1831 mm.



obr. 4 – FANUC Arc Mate 120iD [14]

ARC Mate 50iD

Tento model je vhodný pro nenáročné aplikace. Má nižší užitečné zatížení (max. 7 kg), menší dosah (717 mm), nízkou hmotnost a kompaktní rozměry. Díky robustní konstrukci lze dosáhnout opakovatelnosti polohování až $\pm 0,018$ mm. Stupeň krytí zápěstí až IP69 umožňuje aplikaci ve vlhkém nebo mokřém prostředí [16].

Speciálním typem tohoto modelu je **ARC Mate 50iD/7L**. Tento robot se od základního modelu liší maximálním dosahem 911 mm a štíhlejší konstrukcí umožňující svařování v obtížně přístupných místech [17].



obr. 5 – ARC Mate 50iD [16]

ARC Mate 100iD

Roku 2017 byl představen první model z nové generace robotů modelové řady ARC Mate. Robot ARC Mate 100iD je navržen pro práci v kompaktních svařovacích buňkách, čemuž napomáhá integrované vedení hadic a vodičů, duté zápěstí, horní rameno a prohnutý design. Disponuje užitečným zatížením 12 kg, opakovatelností polohování $\pm 0,02$ mm a dosahem 1441 mm včetně možnosti zpětného vychýlení [18].

V případě požadavku na větší dosah je možné využít typů **ARC Mate 100iD/10L** nebo **ARC Mate 100iD/8L**. Prvně jmenovaný má vyšší dosah 1636 mm vykompenzovaný nižší nosností (10 kg). Druhý jmenovaný má díky nejdelšímu ramenu mezi roboty 100iD dosah až 2032 mm s nosností 8 kg [19] [20].

Typ **ARC Mate 100iD/16S** disponuje zkráceným ramenem a tím i dosahem (1103 mm), nosnost je ale zvýšena na 16 kg.

M-710iC

Tato řada svařovacích robotů FANUC, která není přímo vyvinutá pro obloukové svařování, se vyznačuje štíhlým horním ramenem a zápěstím a velkým dosahem. Využití nachází při práci v těžko přístupných prostorech, například uvnitř automobilových karoserií. Typ **M-710iC/12L** má dosah 3123 mm a užitečné zatížení 12 kg. Dosah typu **M-710iC/20L** je srovnatelný (3110 mm), maximální nosnost je však díky masivnějšímu spodnímu ramenu 20 kg. Opakovatelnost je u první zmiňované varianty $\pm 0,06$ mm, u druhé $\pm 0,09$ mm [21] [22].



obr. 6 – ARC Mate 100iD [18]



obr. 7 – M-710iC/20L [22]

2.2.3 Shrnutí

tab. 1 – shrnutí robotů pro obloukové svařování

Model		dosah (mm)	nosnost (kg)	opakovatelnost (mm)	hmotnost (kg)	stupeň krytí tělo/zápěstí	duté zápěstí	duté rameno	dutá základna
ARC Mate	50iD	717	7	±0,018	25	IP69/IP69	ne	ne	ne
	50iD/7L	911	7	±0,018	27	IP69/IP69	ne	ne	ne
	100iD	1441	12	±0,02	145	IP54/IP67	ano	ano	ano
	100iD/8L	2032	8	±0,03	180	IP54/IP67	ano	ano	ano
	100iD/10L	1636	10	±0,03	150	IP54/IP67	ano	ano	ano
	100iD/16S	1103	16	±0,02	140	IP54/IP67	ano	ano	ne
	120iD	1831	25	±0,02	250	IP54/IP67	ano	ano	ano
	120iD/12L	2272	12	±0,03	250	IP54/IP67	ano	ano	ano
	120iD/35	1831	35	±0,03	250	IP54/IP67	ano	ano	ano
M-710iC/12L		3123	12	±0,09	540	IP67/IP67	ano	ano	ne
M-710iC/20L		3110	20	±0,06	540	IP67/IP67	ne	ne	ne

Výběr vhodného modelu samozřejmě závisí na konkrétních požadavcích, zejména na dosah a nosnost.

V aplikacích, kde se disponuje malým pracovním prostorem a vystačí malý dosah a nosnost, se jako vhodný jeví typ ARC Mate 50iD. Ten se vyznačuje nejvyšší opakovatelností a nejvyšším dostupným stupněm krytím těla i zápěstí, díky čemuž jej lze instalovat ve velmi náročném prostředí (prach, voda). V případě požadavku na zvýšený dosah nebo nosnost lze zvolit některý ze speciálních typů.

Nejvyšší možné užitečné zatížení nabízí robot ARC Mate 120iD/35 (35 kg). Konstrukce robota se vzhledem k dobré opakovatelnosti $\pm 0,03$ mm a vysoké nosnosti jeví jako velmi tuhá.

Dobrou kombinací parametrů se chlubí robot M-710iC/20L, který při užitečném zatížení 20 kg nabízí dosah více jak 3,1 m. Konstrukce horního ramene a zápěstí je štíhlá, proto se využívá pro práci v těžko dostupných

prostředích. Lze jej vzhledem k vysokému stupni krytí využít v náročných prostředích.

Všechny svařovací roboty společnosti FANUC jsou vhodné pro montáž na podlahu, strop i v poloze pod úhlem. Kromě série ARC Mate 50iD jsou napájeny třífázovým napětím.

3 Senzory a systémy umožňující korekci dráhy robota při obloukovém svařování

3.1 Důvody používání senzorů

Automatizace a robotizace posunula možnosti automatického řízení svařovacích parametrů i detekce a korekce poruch jako např. nevhodný průtok plynu a přísun přídavného materiálu nebo výpadek elektrického oblouku. Schopnost systémů reagovat na tyto situace v reálném čase je v určité míře stále omezená a vyžaduje zásah člověka. Sensorické systémy přinášejí výhody i v situaci, kdy jsou svařované polotovary vyrobeny s odchylkami nebo jsou nepřesně upnuty [1] [2].

Senzory v robotickém svařování by měly být schopné vyhodnotit geometrii svaru, nalézt polohu svaru a na základě zpětné vazby řídit svařovací proces v reálném čase. Senzory mohou dokonce detekovat vady ve svarovém spoji a vyhodnocovat jeho kvalitu [1].

Důležitou vlastností senzorů je schopnost snímat tzv. Tool Center Point (TCP). Jde o nejdůležitější referenční bod pro programování dráhy robota. Naprogramovaná dráha robota odpovídá dráze TCP. U robotů pro obloukové svařování je jeho nevhodnější umístění na špičku elektrody [23]. Důležitá je i schopnost detekovat začátek svaru, rozeznat rohy a předcházet kolizím. Senzory by měly mít co nejmenší rozměry, aby nedocházelo ke zhoršení přístupnosti hořáku k místu svařování [1].

Senzor, který splňuje všechny výše zmíněné požadavky, neexistuje. Z toho důvodu je třeba vhodný senzor volit na základě požadavků konkrétní aplikace. Samozřejmě je nutné přihlížet i k ekonomické stránce věci [1].

Jako primární funkce senzorů pro robotizované svařování jsou uváděny následující [1].

- **Vyhledání svaru**

Správná detekce počátečního místa svařování má na výslednou kvalitu svarového spoje významný vliv. V případě ideální situace by počáteční bod svaru stanovený programem odpovídal bodu skutečnému. V sériové výrobě by však kvůli odchylkám geometrie polotovaru nebo jeho nepřesnému upnutí bylo nutné počáteční bod znovu ručně nastavovat pro každý nový kus, což je časově velmi náročné a neproduktivní. Použití těchto systémů je výhodné zejména v aplikacích, kde se vytváří krátké opakované svary, např. v oblasti automotive [1].

- **Sledování svaru**

Systémy sledování svaru umožňují automatickou vertikální a horizontální korekci dráhy hořáku tak, aby se přizpůsobila skutečné poloze svaru. Je tak možné potlačit vliv nepřesné geometrie svařovaného dílu, nekonstantní velikosti mezery, nepřesného upnutí nebo nerovnoměrného přenosu tepla v materiálu. V reálném čase může docházet i k úpravě procesních parametrů, jako svařovací napětí, proud nebo rychlost podávání drátu. Díky tomu dochází ke zvýšení kvality svarového spoje, snížení zmetkovitosti, snížení času potřebného k programování, menší závislosti na geometrické přesnosti polotovarů a přesnosti upnutí [1].

- **Kontrola kvality**

Senzorické systémy v oblasti obloukového svařování umožňují kromě snížení nákladů na výrobu polotovarů, přípravu svarových ploch, upnutí, programování nebo obsluhu zařízení také náklady na kontrolu kvality. Většina těchto systémů dokáže detekovat pórovitost, rozstřík, neprůvar, nadměrné převýšení nebo zápal. Většina těchto systémů k detekci vad využívá princip měření svařovacího napětí, proudu a dalších procesních parametrů. Naměřené hodnoty poté

porovná s referenčními hodnotami parametrů stanovenými experimentálně nebo pomocí výpočtů. Ve chvíli, kdy velikost odchylky překročí přípustnou hodnotu, systém upozorní na podezření na vadu ve svarovém spoji [1].

3.2 Kontaktní snímače

Dotykové snímače obecně fungují na principu uzavření elektrického obvodu při kontaktu se svařovaným materiálem. Funkci sondy může mít hubice hořáku, drátová elektroda nebo samostatná externí sonda. Výhodou je nenáročnost a univerzálnost, jelikož většina běžně používaných svařovacích zdrojů tuto funkci umožňuje. Vyhledávání pomocí hubice a drátu navíc nevyžaduje žádné další příslušenství. V případě externích snímačů se používají sondy zakončené kuličkou, jehlou nebo pojezdovým kolečkem, které jsou upevněny v blízkosti hořáku a pohybují se zároveň s ním. Používané napětí se liší dle místních norem v oblasti bezpečnosti práce s elektrickými zařízeními. Obecně se používá napětí co nejvyšší, protože zajišťuje nejvyšší míru spolehlivosti. Snímání je možné v jedné, dvou nebo třech dimenzích. Nevýhodou může být prodloužení svařovacího cyklu, zpravidla o 3 až 5 sekund na jedno měření. V případě snímání ve 3D je tedy třeba počítat s prodloužením času až o 15 sekund.

Před samotným snímáním je robot ve výchozí pozici pro vyhledávání. Na sondu je přivedeno elektrické napětí. Robot se začne pohybovat směrem k předpokládané poloze svaru dané programem. Jakmile dojde ke kontaktu sondy a materiálu, systém pozici zaznamená a porovná s referenčními souřadnicemi. Na základě získaných dat systém upraví dráhu pohybu robota a provede samotný svar [24] [25] [26].

3.3 Bezkontaktní snímače

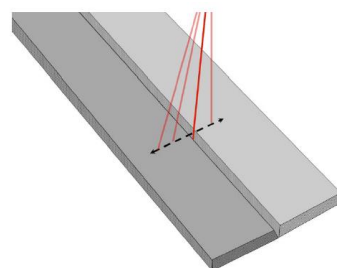
Tyto snímače fungují většinou na principu snímání laserovým paprskem a/nebo kamerou. Speciální variantou bezkontaktního snímání jsou systémy snímání elektrického oblouku (*Through The Arc*), které jsou hlavním tématem této práce, a proto jim bude věnována speciální kapitola. Oproti kontaktním

snímačům se obecně vyznačují větší rychlostí snímání, vyšší přesností a možnostmi snímání téměř v jakékoliv poloze hořáku. Nevhodné může být jejich použití na lesklé materiály (např. slitiny hliníku nebo povrchy s nízkou drsností), kdy často dochází k nežádoucím odrazům paprsků. Tento jev však lze softwarově odstranit do určité míry. Při zvažování nasazení těchto senzorů je třeba pečlivě uvážit ekonomickou stránku věci, jelikož jsou v porovnání s dotykovými snímači nákladnější [24] [25] [26].

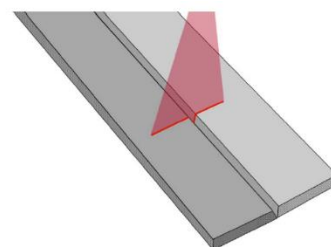
Nejjednodušší variantou bezkontaktního snímání je dvoudimenzionální snímací systém realizovaný CCD nebo CMOS kamerou. Kamera vytvoří referenční snímek tzv. kusu 0, tedy dílu, pro který se vytvářel program robota. Při založení dalšího kusu systém vytvoří nový snímek, porovná jej s referenčním a provede vyhodnocení. Touto metodou tedy nelze zjišťovat vzdálenost mezi hořákem a materiálem (souřadnici Z), proto se nehodí pro trasování svaru. Využití nachází například při identifikaci dílů. Kamera ve většině případů snímá černobíle a je citlivá na vhodné osvětlení [27] [28] [25] [29].

Trasování svaru je možné provádět pomocí bodového laserového paprsku (obr. 8). Paprsek dopadá na povrch součásti v oblasti předpokládaného svaru a kamera snímá odražený paprsek. Systém pomocí triangulačního algoritmu dopočítává vzdálenost mezi senzorem a materiálem. Ve chvíli, kdy paprsek snímá svarovou mezeru, dojde k výrazné změně vyhodnocené vzdálenosti a systém detekuje pozici svaru [28].

Princip snímání bodového paprsku je nahrazován sofistikovanějším řešením v podobě snímání čárového paprsku (obr. 9). Výhodou této varianty je vyšší přesnost a spolehlivost [28].

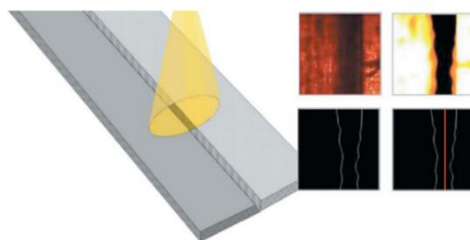


obr. 8 – snímání bodovým laserovým paprskem



obr. 9 – snímání čárovým laserovým paprskem

Poslední možností, která bude zmíněna, je tzv. gray-scale image processing (obr. 10). Metoda místo laserového paprsku využívá homogenní osvětlení rozptýleným světlem. Polotovar je znovu snímán 2D kamerou. Pozice svaru je detekována na základě změny odrazivosti materiálu v určitých oblastech. V tomto případě není nutná triangulace, proto jsou senzory kompaktnější [28].



obr. 10 – snímání rozptýleným světlem

4 Popis systému TAST a Multipass pro svařování metodou MAG

Hlavním tématem mé bakalářské práce jsou systémy pro korekci dráhy robota při obloukovém svařování založené na principu sledování elektrického oblouku použitelné pro vytváření vícevrstevných svarů.

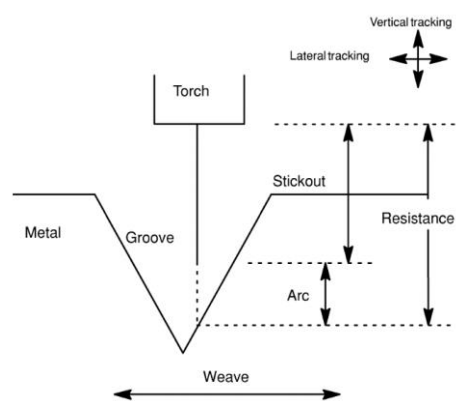
Existují dvě základní metody. V případě obloukového svařování odtavující se elektrodou (MIG/MAG) se používá systém TAST (Through-Arc Seam Tracking). Obdoba pro obloukové svařování neodtavující se elektrodou (TIG) se označuje jako AVC (Arc Voltage Control) [30]. Zmíněná označení systémů jsou používána společností FANUC, ostatní výrobci mohou mít tyto systémy označeny odlišně.

Výhodou obou metod je jejich finanční nenáročnost, jelikož nepotřebují rozsáhlé příslušenství. Dle [24] může být investice do systému sledování elektrického oblouku desetinová oproti jiným bezkontaktním metodám. Na druhou stranu, správné nastavení systému vyžaduje zkušenosti a dobrou znalost svařovacího procesu [27]. Metody se často kombinují s dotykovým snímačem, který nejprve vyhledá počáteční místo svaru. Systémem TAST nebo AVC se následně koriguje dráha robota při samotném svařování.

4.1 TAST

Jak již bylo zmíněno, systém TAST (Through Arc Seam Tracking) se používá pro korekci dráhy robota při svařování metodami MIG a MAG. Jako snímač se zde využívá přímo elektrický oblouk. Vlivem změny jeho délky dojde ke změně svařovacího proudu a tím i elektrického odporu. Změna elektrického odporu je veličinou, která se zaznamenává a na jejím základě dochází ke korekci dráhy robota. Vztah mezi délkou oblouku a proudem je nepřímo úměrný [30] [25] [31].

Trasování svaru je realizováno ve dvou směrech: výškovým (vertikálním) a stranovým (laterálním). Při vertikálním trasování se koriguje vzdálenost mezi špičkou drátu a základním materiálem (souřadnice Z), při laterálním poloha napříč svarem (souřadnice X a Y) [32]. Princip je patrný z obr. 11.

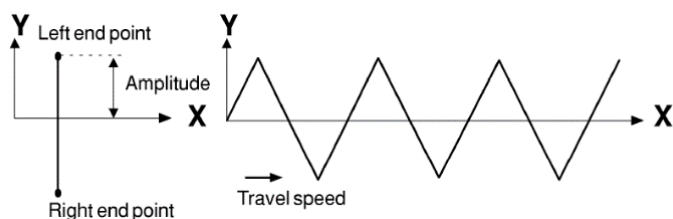


obr. 11 – princip funkce systému TAST

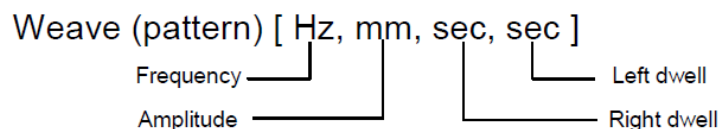
4.1.1 Laterální trasování

Při využití systému TAST během svařovacího procesu je nezbytné použít funkci rozkyvu. Rozkyv (*weaving*) je definován jako periodické kývání svařovacího hořáku doprava a doleva od střední pozice během svařování. Používá se za účelem zvětšení šířky svaru. Rozkyv je definován v programu pomocí frekvence, amplitudy, popřípadě výdrže na pravé a levé straně a dalšími doplňkovými parametry. Ukázkou zápisu funkce lze vidět na obr. 13.

V praxi se používá několik typů rozkyvu. Nejpoužívanější je tzv. sinový rozkyv, který se využívá i pro aplikace s použitým systémem TAST [32].



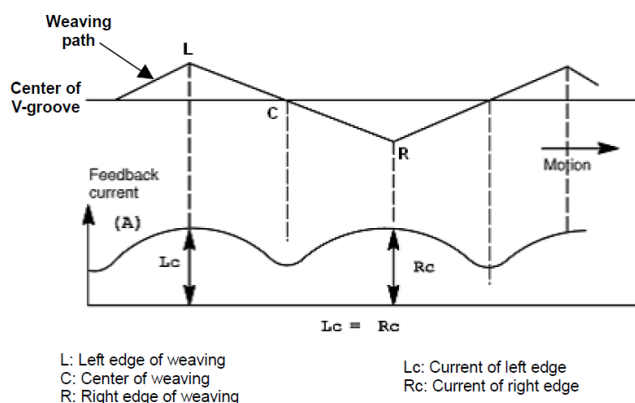
obr. 12 – princip laterálního trasování



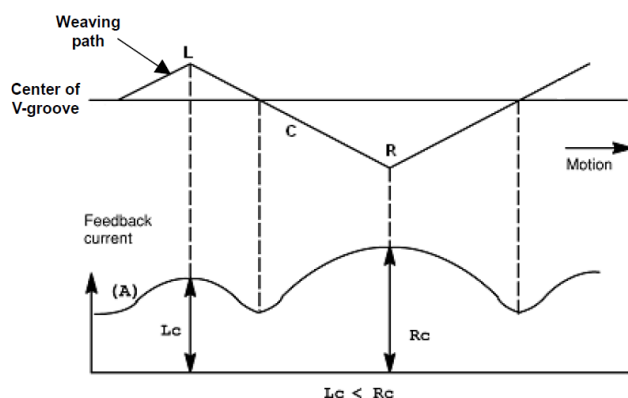
obr. 13 – zápis funkce rozkyvu

Princip laterálního trasování systémem TAST bude podrobněji popsán na příkladu svařování tupého V-svaru.

Vlivem sinového rozkyvu, který musí být pro laterální trasování použit vždy spolu se systémem TAST, se mění svařovací proud dle toho, jak se hořák přibližuje a oddaluje okrajům svarové mezery. Jak je patrné z obr. 14, v případě, že je svarová mezera správně vycentrovaná (osa svaru odpovídá ose rozkyvu), svařovací proud je nejnižší ve střední pozici vlivem nejdelšího oblouku (ve středu je největší hloubka svarové mezery). Tím, jak se hořák přibližuje k pravému nebo levému okraji, svařovací proud narůstá vlivem zkrácení oblouku. Systém ze získané křivky průběhu svařovacího proudu pomocí algoritmu vypočítá obsah plochy pod křivkou na pravé a levé straně rozkyvu. Pokud jsou obě plochy stejně velké, jde o právě popisovaný případ vycentrovaného svaru a nedochází k žádné korekci. V opačném případě (obr. 15) se jedná o nevystředěný svar a je provedena korekce dráhy robota. Tento výpočet se provádí pro každou periodu rozkyvu [32].



obr. 14 – příklad laterálního trasování vystředěného svaru



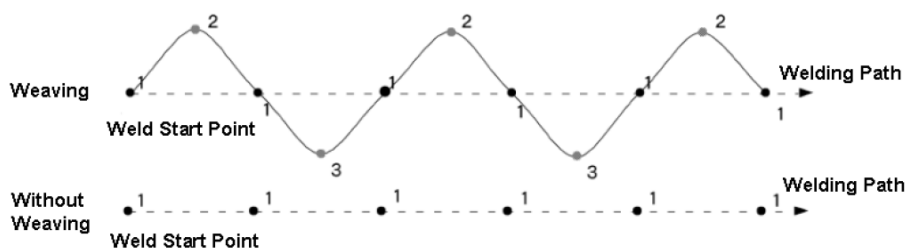
obr. 15 – příklad laterálního trasování nevystředěného svaru

4.1.2 Vertikální trasování

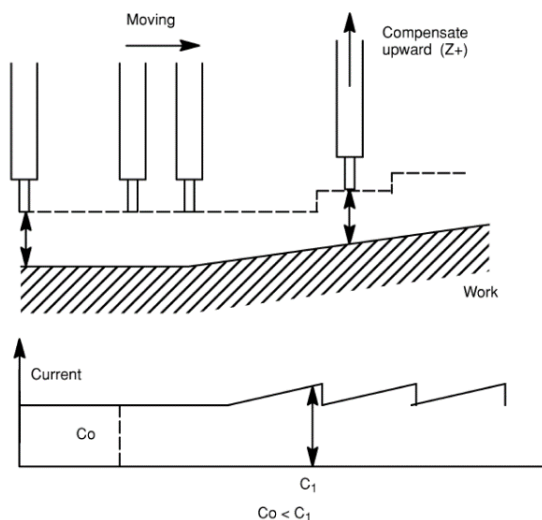
Vertikální trasování funguje na principu zaznamenávání velikosti svařovacího proudu v konkrétních bodech. Proud je měřen vždy ve středu svaru (osa rozkyvu), jak je patrné z obr. 16. Místa zaznamenávání velikosti proudu jsou označena jako „1“.

Korekce dráhy probíhá na základě porovnání velikosti svařovacího proudu v daném bodě s referenční hodnotou. Ta může být nastavena jako konstanta v programu. Další možností je automaticky provést změření velikosti svařovacího proudu po určitém počtu cyklů rozkyvu od začátku svaru a tuto hodnotu použít jako referenční [32].

Princip vertikálního trasování je obdobný principu trasování laterálního. Pokud se vzdálenost mezi špičkou drátu a materiálem zvětšuje (dno svarové mezery je zakřiveno „dolu“), výlet svařovacího drátu (stickout) se zvětšuje. Svařovací proud v takovém případě klesá a elektrický odpor roste. Systém nárůst elektrického odporu vyhodnotí a upraví dráhu robota tak, aby se hořák přiblížil k materiálu. Situace, kdy se vzdálenost mezi špičkou drátu a materiálem snižuje, je opačná [32].



obr. 16 – schéma zaznamenávaných bodů při vertikálním trasování



obr. 17 – princip vertikálního trasování

4.1.3 Vlastnosti systému

Vzhledem k podstatě elektrického oblouku obsahuje měřený signál výrazný šum. Aby se zajistilo správné vyhodnocení, je nutné šum vyfiltrovat. Systém pracuje s velkým množstvím proměnných. Jejich správné nastavení s přihlédnutím ke konkrétní aplikaci je pro vytvoření kvalitního svaru klíčové a vyžaduje dobrou znalost práce se systémem i znalost samotného procesu. Na druhou stranu, implementace například laserového snímání si žádá ještě komplexnější znalost problematiky [30].

Systém není z důvodu vysoké elektrické vodivosti vhodný pro svařování hliníku a jeho slitin. Minimální tloušťka materiálu pro vytvoření kvalitního svaru byla v minulosti 6,25 mm. Postupným vývojem se však otevřela možnost bezpečně svařovat i plechy o tloušťce cca 3 mm [30] [25].

4.2 SuperTAST

SuperTAST je nadstavba systému pro sledování svaru pomocí elektrického oblouku TAST od společnosti FANUC Robotics. Využití nachází při svařování tupých svarů, koutových svarů, vnějších rohových svarů a přeplátovaných svarů [33].

Pro dosažení maximální rychlosti svařování cca $140 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ a maximální frekvence rozkyvu až 10 Hz (standartně max. 5 Hz) se v kombinaci se SuperTAST používá speciální funkce rozkyvu *Wrist Axis Weaving* (rozkyv osy zápěstí, WAW). V případě, že provedeme vhodnou výchozí konfiguraci robota, je možné pohyb realizovat pouze pomocí dvou os. V jiném případě se musí do pohybu zapojit další osa navíc. Při programování je vhodné použít funkci rozkyvu označovanou jako *Sine2* [33].

Výrobce uvádí jako nutné vybavení vhodnou kartou vstupů a výstupů (I/O board) a proudovým snímačem. Řídicí software musí obsahovat funkci pro TAST, SuperTAST a WAW [33].

4.2.1 Provozní módy

Systém může být provozován ve třech módech [33].

- **Advise mode** – umožňuje analyzovat a automaticky nastavit některé řídicí parametry.
- **Diagnosis mode** – umožňuje sledovat provozní parametry a určovat příčiny problémů.
- **Run mode** – běžný provoz.

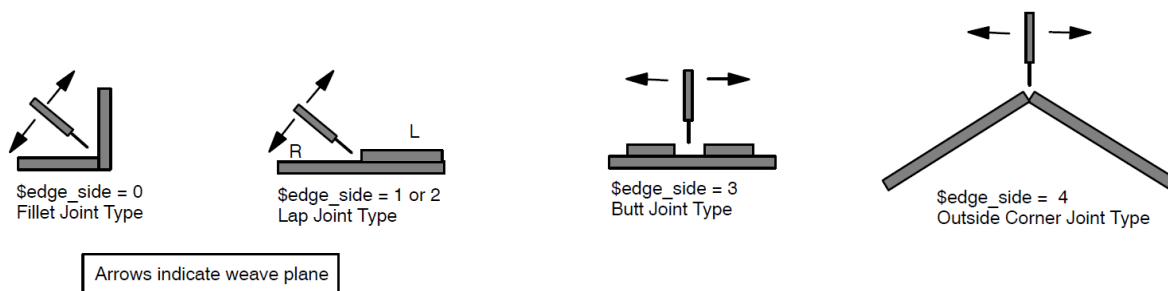
4.2.2 Nastavení systémových proměnných

Před provozem je třeba nastavit některé systémové proměnné. Výpis nejčastěji používaných parametrů následuje v tab. 2. Cesta přístupu do menu umožňující změnu parametrů je následující.

MENUS - SYSTEM - F1 - Variables - \$TASTHS.

tab. 2 – výpis nejčastěji používaných systémových proměnných [33]

proměnná			popis funkce
výchozí hodnota	minimální hodnota	maximální hodnota	
\$TASTHS.\$hstast_enb			Aktivuje SuperTAST.
0	0	1	0 - zakázáno 1 - povoleno
\$TASTHS.\$advise			Definuje, v jakém módu má systém běžet.
0	0	999	0 - Run mode 1 - Advise mode 2 - Diagnosis mode
\$TASTHS.\$edge_side			Definuje, na jaké straně vzhledem k rozkvyvu má materiál větší tloušťku (viz obr. 18). Nutné pro správné vyhodnocování odchylek.
0	0	10	0 - není ovlivněno (koutové svary) 1 - na levé straně (přeplátované svary) 2 - na pravé straně (přeplátované svary) 3 - na obou stranách (tupé svary) 4 - uprostřed (vnější rohové svary)
\$TASTHS.\$delay_time			Definuje časové zpoždění svaru v sekundách při svařování s použitým SuperTAST a WAW. Pokud nejsou tyto funkce použity, je použito časové zpoždění definované v Track Schedule.
0,1	0	9,999	
\$TASTHS.\$bias_adj			Určuje míru posunutí svaru od nejvyššího bodu svaru. Hodnota se udává v procentech.
5	-999	999	



obr. 18 – nastavení parametru \$TASTHS.\$edge_side [33]

4.2.3 Advise Mode

Advise Mode je jednou ze speciálních funkcí systému SuperTAST. Implementovaný program TASTMAST dokáže analyzovat svařovací proces a navrhnout uživateli vhodné zvolení parametrů funkce SuperTAST. Prvotní analýza se provádí na referenčním svaru (Master Weld). Svařovaný kus je upnut do ideální pozice, pro kterou byla naprogramována dráha robota. Poté se

provede svar s použitím pro konkrétní svar předem určených procesních parametrů v tzv. *Welding Schedule* a parametrů rozkyvu v tzv. *Weave Schedule*. Samotná korekce dráhy se v tomto případě neprovádí. Systém zaznamenává hodnoty svařovacího proudu během svařování a na jejich základě provede analýzu a doporučí vhodné nastavení parametrů trasování. Tyto parametry se mohou změnit, jestliže dojde ke změně některých z procesních parametrů (např. natočení hořáku, svařovací napětí, proud nebo postupová rychlost). V takovém případě je vhodné provést analýzu referenčního svaru znovu [33].

Program TASTMAST je schopen zaznamenat maximálně 250 cyklů rozkyvu nebo 3000 vzorků. Pokud je analyzovaný svar delší, zaznamenáno bude pouze prvních 3000 vzorků [33].

Aktivace Advise módu se provádí v nastavení \$TASTHS pod proměnnou \$ADVISE. Pro tuto proměnnou je třeba nastavit hodnotu 1. Nutný je následný restart celého systému. Informace z analýzy procesu lze zobrazit ve dvou režimech - *Advise Brief mode* a *Advise Detailed mode* [33].

TASTMAST Advise Brief Mode

Tento režim poskytuje základní informace získané analýzou svařování referenčního svaru [33]. Příklad výsledku analýzy ukazuje obr. 19.

Systém poskytuje informace o stabilitě svařovacího procesu na základě porovnání všech získaných vzorků svařovacího proudu s průměrnou hodnotou svařovacího proudu. Rozhodnutí o stabilitě nebo nestabilitě je ovlivněno systémovými proměnnými \$c_lim_rate a \$c_lim_tol, které se v běžných případech ponechávají ve výchozích hodnotách. Pokud je proces stabilní, systém vypíše informaci „Stable Welding Process“ [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
Stable Welding Process
Have enough tracking signal
Lateral bias = -12.40% is OK
Delay_time = .080 Sec is OK
+-----+
|TAST CAN TRACK WELL|
+-----+
Press ENTER to continue:
```

obr. 19 – výsledek analýzy [33]

Vyhodnocení kvality trasovacího signálu je založeno na porovnání vzorků získaných na pravé a levé straně s vzorkem získaným ve střední pozici.

Vyhodnocení závisí na systémových proměnných `$c_thres` a `$c_thres_tol`. Systém určí, zda má dostatek (hláška „Have enough tracking signal“) nebo nedostatek signálu pro spolehlivé trasování [33].

Laternal bias je hodnota vypočtená na základě porovnání průměrného svařovacího proudu získaného ze vzorků na levé a pravé straně rozkvyvu s průměrným svařovacím proudem ve střední pozici. Tyto hodnoty se počítají ze všech vzorků po celé délce svaru. Uvádí se v procentech a může nabývat kladných i záporných hodnot. Kladná hodnota vyjadřuje vyšší průměrný svařovací proud na pravé straně oproti levé straně rozkmitu a pro zápornou hodnotu naopak. Zjištěná hodnota se přepíše do parametru `L_bias_rate` v *TAST Schedule*. V případě, že je hodnota vyšší než $\pm 20\%$, ukazuje to, že je proudová zpětná vazba velmi nevyvážená. Je třeba zvážit změnu pracovního úhlu hořáku [33].

Posledním parametrem je informace o celkovém zpoždění (**delay time**) mezi proudovou zpětnou vazbou a pozicí hořáku při rozkvyvu. To je způsobeno dobou šíření signálu z proudového senzoru do I/O karty robota a zpožděním vyvolaným řízením pohonů robota. Pokud nebude zvolena správná hodnota zpoždění, trasování nebude pracovat správně [33].

TASTMAST Advise Detailed Mode

Tento režim umožňuje získat detailní informace o posledním provedeném svaru. Na obr. 20 jsou zobrazeny kategorie informací, které *Advise Detailed Mode* poskytuje [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
1: General Information
2: Difference of feedback data
3: Values of feedback data
4: Compensation data
5: Raw feedback data
6: Delay time
7: Quit
0: Save & Exit
Enter number to display:
```

obr. 20 – kategorie informací [33]

Následuje podrobný popis jednotlivých kategorií.

1) General information (obecné informace)

obr. 21 a obr. 22 zobrazují výpis parametrů, které jsou zobrazeny v této kategorii. tab. 3 obsahuje souhrn všech parametrů včetně popisu [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
1: GENERAL INFORMATION
Track Sched =      2
Weave cycle number = 41
Samples per Weave cycle 20
Samples on dwell_left  0
Samples on dwell_right  0
Samples rate  8 ms
Weave type: Wrist axes weave
Delay time =   .080 Sec.
Lateral bias = -12.40%
Press ENTER to continue:
```

obr. 21 – obecné informace 1/2 [33]

```
TAST ADVISORY SCREEN
1: GENERAL INFORMATION
Avg. Diff(L-C) = 45.703 A
Avg. Diff(R-C) = 18.147 A
Avg. Left  = 253.339 A
Avg. Right = 225.783 A
Avg. Center = 207.636 A
Avg. Current = 230.384 A
Deviation =   .732
Out bound number =    0
Press ENTER to return MENU:
```

obr. 22 – obecné informace 2/2 [33]

tab. 3 – shrnutí parametrů v kategorii obecných informací [33]

Track Sched	Informuje, který <i>Track Schedule</i> byl použit pro vytvoření analyzovaného svaru v programu.
Weave cycle number	Informace o celkovém počtu cyklů rozkyvu, ve kterém byla zaznamenána data.
Samples per Weave cycle	Informace o počtu zaznamenaných vzorků proudu v jednom cyklu rozkyvu.
Samples on dwell_left	Informace o počtu zaznamenaných vzorků proudu během prodlevy na levé straně.
Samples on dwell_right	Informace o počtu zaznamenaných vzorků proudu během prodlevy na pravé straně.
Samples rate	Informace o časovém intervalu mezi jednotlivými zaznamenanými vzorky proudu.
Weave type	Informace o použitém typu rozkyvu.
Delay time	viz stranu 31
Lateral bias	viz stranu 31
Avg. Diff (L-C)	Průměrný rozdíl změřeného proudu na levé straně a ve středu svaru.
Avg. Diff (R-C)	Průměrný rozdíl změřeného proudu na pravé straně a ve středu svaru.
Avg. Left	Průměrný změřený proud na levé straně svaru.
Avg. Right	Průměrný změřený proud na pravé straně svaru.
Avg. Center	Průměrný změřený proud ve středu svaru.

Avg. Current	Průměrný změřený proud ze všech vzorků.
Deviation	Směrodatná odchylka všech změřených vzorků proudu.
Out bound number	Počet vzorků, které překročily limit definovaný v proměnné $\$c_lim_rate$.

2) Difference of Feedback

Obrazovka zachycená na obr. 24 poskytuje informaci o celkovém počtu cyklů rozkyvu, ve kterém byly zaznamenány vzorky proudu (stejně jako hodnota

```
TAST ADVISORY SCREEN
2: DIFFERENCE OF FEEDBACK DATA
Total number of data = 1 .. 41
```

obr. 24 – celkový počet cyklů rozkyvu [33]

Weave Cycle number v kategorii *General information*). Po zadání konkrétního rozsahu cyklů se zobrazí podrobné informace pro požadovaný rozsah (obr. 23). Sloupce Left-Center a Right-Center zobrazují hodnoty rozdílu mezi proudem na levé, respektive pravé straně a ve středu pro dané číslo cyklu rozkyvu ze zadaného rozsahu. Systém dokáže automaticky vyhodnotit spolehlivost trasování na základě proměnné $\$c_thres$. Pokud jsou obě hodnoty Left-Center a Right-Center větší než hodnota nastavená v proměnné $\$c_thres$, je zobrazeno „OK“. V opačném případě je zobrazeno "--" [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
2: DIFFERENCE OF FEEDBACK DATA
                Left-Center  Right-Center
1  OK      24.324 A      8.035 A
2  OK      17.940 A     42.595 A
3  OK      53.188 A     14.336 A
4  OK       5.558 A     25.975 A
5  OK      36.018 A     13.565 A
6  OK      28.727 A     24.214 A
7  OK      39.623 A      8.255 A
8  OK      36.046 A     11.171 A
9  OK      38.522 A     16.620 A
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 23 – vyhodnocení spolehlivosti trasování [33]

Obecně platí, že pro spolehlivé trasování by hodnoty Left-Center a Right-Center měly být vyšší než 5 A [33].

3) Values of Feedback Data Screen

Prvním krokem k získání informací je podobně jako na obr. 24 zadání intervalu cyklů rozkyvu, pro které chceme hodnoty zobrazit. Hodnoty Left edge a Right edge na obr. 25 reprezentují změřené a vypočtené průměrné velikosti proudu pro pravou, resp. levou stranu rozkyvu [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
3: FEEDBACK DATA
      Left edge      Right edge
1 237.205 A        220.916 A
2 230.932 A        255.586 A
3 258.778 A        219.925 A
4 231.592 A        252.009 A
5 252.064 A        229.611 A
6 224.438 A        229.611 A
7 255.806 A        224.438 A
8 252.064 A        227.190 A
9 260.429 A        238.526 A
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 25 – výpis parametrů pro zvolený interval [33]

4) Compensation Data Screen

Kategorie zobrazuje hodnoty laterální a vertikální korekce pro každý cyklus rozkyvu. Jsou to vzdálenosti mezi ideální naprogramovanou dráhou hořáku a skutečnou dráhou korigovanou na základě trasování systémem SuperTAST. V *Advise Mode* nejsou tyto korekce skutečně vykonány, ale pouze zaznamenány. V případě aktivovaného *Diagnosis Mode* korekce vykonány budou [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
4: COMPENSATION DATA
      Lateral      Vertical
1  .361 mm      -.357 mm
2  -.548 mm     -.360 mm
3  .861 mm      -.155 mm
4  -.452 mm     -.721 mm
5  .498 mm      -.445 mm
6  .100 mm      .118 mm
7  .695 mm      -.448 mm
8  .551 mm      -.444 mm
9  .485 mm      -.607 mm
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 26 – výpis velikostí korekcí [33]

5) Raw Feedback Data Screen

První obrazovka zobrazuje celkový počet zaznamenaných vzorků proudu. Po zadání požadovaného rozsahu se vypíší konkrétní hodnoty (obr. 27). Hodnoty ve sloupci ROS_timer reprezentují čas změřený systémovým časovačem. Interval mezi snímanými vzorky definuje systémová proměnná

```
TAST ADVISORY SCREEN
5: RAW FEEDBACK DATA
      ROS_timer  Feedback current
1 cyc start    304.8943 A
2 243024       281.4507 A
3 243026       248.5418 A
4 243028       234.0134 A
5 243030       235.3342 A
6 243032       239.0764 A
7 243034       220.3656 A
8 243036       227.4097 A
9 243038       221.2461 A
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 27 – vyhodnocení vzorků [33]

\$samp_inter. Sloupec Feedback current zobrazuje změřenou velikost proudu v daném čase. Pokud je vzorek sejmut v čase začátku cyklu rozkyvu, zobrazí se označení „cyc start“ namísto konkrétní časové hodnoty [33].

6) Delay Time Screen

Tato kategorie umožňuje získat detailní informace o časovém zpoždění procesu. První obrazovka (obr. 28) poskytuje některé základní informace, jako změřená hodnota zpoždění (viz stranu 31) nebo počet vzorků sejmutých za jeden cyklus rozkyvu. Důležitá data lze získat z druhé obrazovky (obr. 29). První sloupec (Samples) ukazuje pořadí vzorkovacích intervalů, kdy interval označený nulou reprezentuje naprogramovaný počátek svařovacího cyklu. Sloupec Avg Current přiřazuje ke každému intervalu jeho průměrný svařovací proud. Systém dokáže na základě časové analýzy vypočítat vhodný počátek svařovacího cyklu kompenzující změřené zpoždění a jeho hodnotu doporučit uživateli. Na obrazovce je označen jako „correct cycle start“ [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
6: DELAY TIME
  Original delay_time =   .080 Sec.
  Current delay_time =   .080 Sec.
  Wrist Axis Weave
  Samples per Weave cycle  20
  Samples on dwell_left    0
  Samples on dwell_right   0
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 28 – souhrn vyhodnocených parametrů [33]

```
TAST ADVISORY SCREEN
6: DELAY TIME
Samples Avg Current      Status
-6 223.2723
-5 229.0182
-4 230.1838
-3 229.8423
-2 228.3409      correct cycle start
-1 234.3634
 0 239.4433      program cycle start
 1 248.1862
 2 255.7863
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 29 – vyhodnocení vhodného začátku cyklu [33]

Jak lze vidět z konkrétního příkladu na obr. 29, vypočtený počátek cyklu je o dva vzorkovací intervaly dříve než naprogramovaný počátek. Velikost vzorkovacího intervalu lze určit na základě hodnoty nastavené v proměnné \$samp_inter. Výchozí hodnota této proměnné je „2“, což znamená velikost jednoho vzorkovacího intervalu 8 ms. Pro tento konkrétní příklad by tedy mělo být nastavené zpoždění o 16 ms menší. Další obrazovka (obr. 31) umožňuje zpoždění automaticky upravit na základě doporučené hodnoty korekce,

následuje potvrzení (obr. 30). Při volbě `select` lze novou hodnotu zpoždění zadat ručně v rozsahu ± 100 ms (obr. 32) [33].

```
TAST ADVISORY SCREEN
Delay time adjustment = -16ms
Adjust delay time?
Enter 0: NO, 1: Yes, 2: select
```

obr. 31 – automatická úprava zpoždění [33]

```
TAST ADVISORY SCREEN
Delay_time = 0.064 Sec
Feedback time is recalculated
Press ENTER to CONTINUE:
```

obr. 30 – potvrzení automatické úpravy zpoždění [33]

```
TAST ADVISORY SCREEN
ENTER adjust delay time in ms[-100,100]
```

obr. 32 – volba vlastní hodnoty zpoždění [33]

Dle manuálu společnosti FANUC je pro většinu aplikací postačující výchozí hodnota časového zpoždění změřená v *Advise Mode* (kapitola 0). Provádění detailní analýzy zpoždění popsaný v této kapitole se používá pro kalibraci systému. Na přesnost výpočtu má navíc velký vliv kvalita dat zpětné vazby [33].

7) Quit

V kartě `Quit` je možné ukončit práci s *Advise Mode* nebo rychle přejít do *Run Mode* nebo *Diagnosis Mode* [33].

4.2.4 Diagnosis Mode

Aktivace tohoto módu se provádí nastavením systémové proměnné `$ADVISE` na hodnotu „2“ nebo přímo z karty `Quit` v *Advise Mode*. Jak již bylo zmíněno, *Advise Mode* provádí pouze zaznamenávání dat bez skutečně provedené korekce dráhy robota. *Diagnosis Mode* je odlišný tím, že korekci dráhy robota provádí. Zaznamenávají se stejné parametry jako v případě *Advise Mode*. Funkce se obecně využívá jako nástroj pro sběr dat z reálných svařovacích procesů [33].

4.2.5 Run Mode

Run Mode se aktivuje nastavením systémové proměnné `$ADVISE` na hodnotu „2“ nebo přímo z karty `Quit` v *Advise Mode*. Mód se využívá při běžném provozu [33].

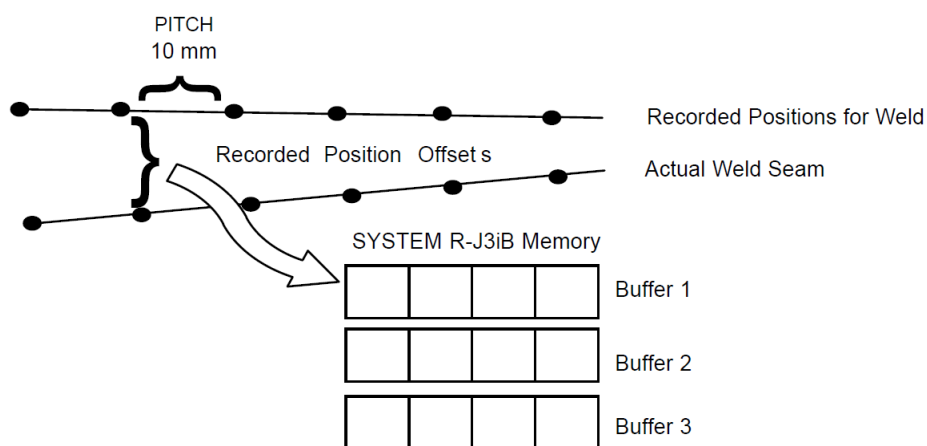
4.3 Systémy Root Pass Memorization a Multipass

4.3.1 Root Pass Memorization

Root Pass Memorization (RPM) je speciální funkce řídicího software pro robotizované svařování ArcTool společnosti FANUC. Systém zaznamenává hodnoty korekce dráhy robota vyhodnocené na základě sledování elektrického oblouku (systém TAST, viz kapitolu 4.1). Využití nachází při vytváření vícevrstevných svarů. Hodnoty korekce jsou zaznamenávány při svařování kořenové housenky (*root*). RPM nachází využití v kombinaci s funkcí *Multipass*, které bude věnována speciální kapitola [34].

Vyrovnávací paměti

Pro uložení informací využívá systém vyrovnávacích pamětí (*buffer*), pro které je vyhrazeno 32 bloků hlavní paměti systému. V základní verzi je obsaženo deset samostatných vyrovnávacích pamětí, což tedy umožňuje zaznamenávat odchylky až pro deset svarů. V případě dostatku volné paměti v hlavní paměti systému je možné pro data RPM alokovat více paměti a tím zvýšit možný počet zaznamenaných svarů [34].



obr. 33 – princip RPM [34]

Systémové proměnné

Obecně platí, že pro většinu aplikací není nutné měnit základní nastavení systémových proměnných funkce RPM. Pro úplnost budou proměnné, které je možné měnit, uvedeny [34].

`$RPM_PG.$pitch`

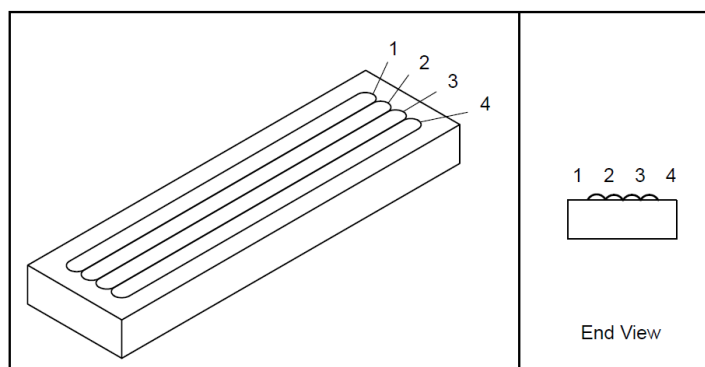
Proměnná definuje vzdálenost mezi zaznamenanými vzorky (viz obr. 33). Hodnotu je možné zadávat pomocí času v milisekundách nebo vzdálenosti v milimetrech. Časová hodnota nesmí být nižší než 100 ms. Totéž platí i v případě zadání hodnoty pomocí vzdálenosti v milimetrech, kdy je ekvivalent v milisekundách určen na základě postupové rychlosti. Výchozí hodnota je nastavena na 10 mm [34].

`$RPM_PG.$pitch_mode`

Proměnná definuje, jaký způsob měření rozestupu mezi vzorky je využit. Hodnota „0“ značí vzdálenost v mm, hodnota „1“ čas v sekundách. V základním nastavení je hodnota „0“ [34].

4.3.2 Multipass

Funkce *Multipass* poskytuje nejjednodušší způsob pro samotné svařování vícevrstevných svarů. Rozumí se tím opakované vytváření stejných svarových housenek. Toho se využívá v aplikacích, kde je třeba zvýšit velikost svaru nebo při navařování. Systém umožňuje použít různé svařovací parametry (*Welding Schedule*) a parametry rozkyvu (*Weave Schedule*). Rozkyv může a nemusí být použit. Příklad jednoduchého vícevrstevného svaru (v tomto případě lze hovořit o navařování) je na obr. 34 [34].



obr. 34 – schéma navařování [34]

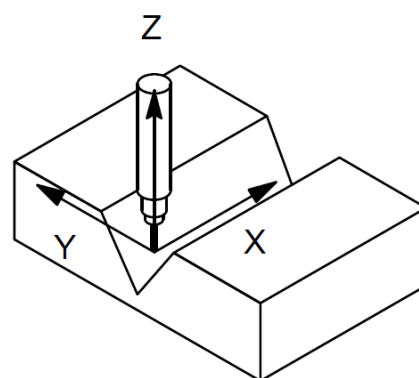
Programové instrukce

Pro nastavení funkce *Multipass* v programu se využívají dvě instrukce, které lze najít v menu v kategorii TRACK/OFFSET [34].

```
MP OFFSET PR[...] RPM[...]  
MP OFFSET END
```

Pro vytvoření vícevrstvého svaru využívá systém princip posunutí (*offset*) výplňových a krycích svarových housenek vůči kořenové housence v určitém směru, navíc případně změnu orientace svařovacího hořáku. Hodnoty posunutí a změny orientace hořáku se pro každou housenku nastavují do polohového registru (PR) v části příkazu PR[...]. Jako proměnná se do hranatých závorek zadává číslo polohového registru. Hodnoty v PR lze upravovat také přímo v programu [34].

Polohový registr obsahuje 6 parametrů, které lze měnit (3 pro posunutí a 3 pro rotaci). Z obr. 35 **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** jsou patrné smysly jednotlivých os [34]. Souřadný systém pro volbu offsetů bude podrobněji popsán v experimentální části (kapitola 5.6).



obr. 35 – orientace souřadných os [34]

tab. 4 – popis parametrů v polohovém registru [34]

parametr	popis
X	Definuje prodloužení nebo zkrácení svarové housenky.
Y	Definuje posunutí svarové housenky v laterálním směru.
Z	Definuje posunutí svarové housenky ve vertikálním směru.
W	Definuje natočení hořáku kolem osy X.
P	Definuje natočení hořáku kolem osy Y.
R	Na provedení svaru nemá efekt.

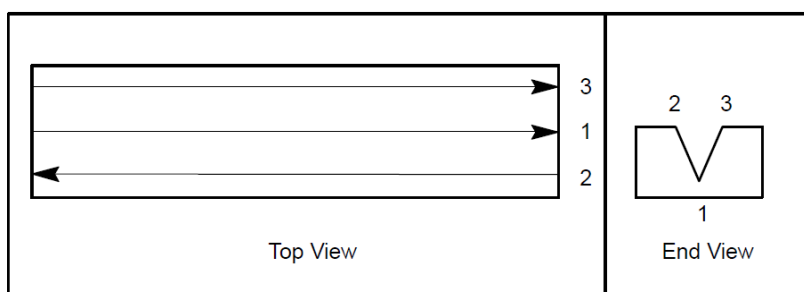
Pomocí části příkazu RPM[...] lze využít hodnoty korekce dráhy získané při provádění první svarové housenky, jak bylo podrobněji popsáno v kapitole 4.1. Systém provede stejnou korekci i pro další svarové housenky. Jako

proměnná se do příkazu zadává číslo vyrovnávací paměti, ze které chceme získat hodnoty korekce. Pokud není korekce vyžadována, je třeba nastavit číslo paměti na „99“. Příkazem `MP OFFSET END` se funkce `MP OFFSET` ukončí [34].

4.3.3 Příklady použití

Vertikální a laterální posun housenky

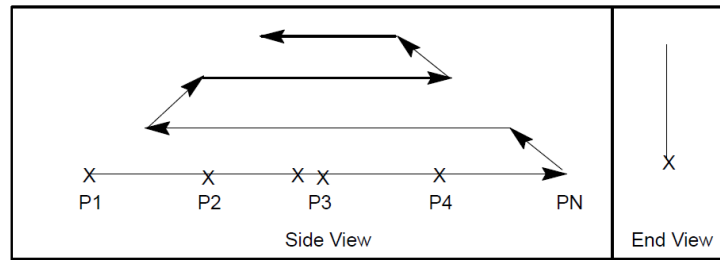
Princip je patrný z obr. 36. Kořenová housenka je označena číslem 1. Krycí housenky 2 a 3 jsou posunuty vertikálně (parametr Z) i laterálně (parametr Y) [34].



obr. 36 – umístění housenek na navařovaném vzorku [34]

Změna místa začátku a konce housenky

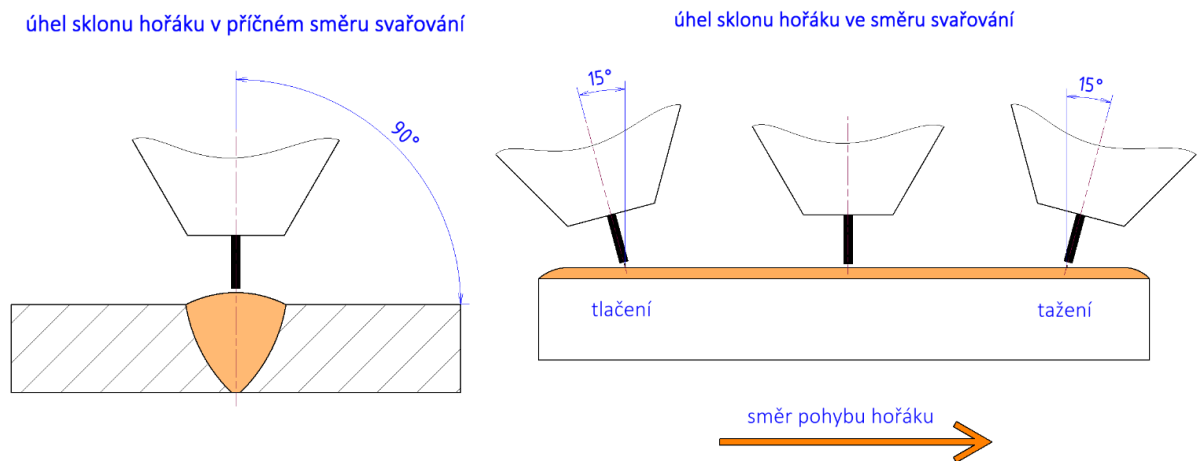
Změna parametru X v polohovém registru se využívá pro zkrácení nebo prodloužení svaru. Kladná hodnota parametru X určuje prodloužení housenky, záporná hodnota určuje zkrácení housenky, v obou případech vždy symetricky na obou stranách. Pro zkrácení housenky na jedné straně a prodloužení či zkrácení na straně druhé (odstranění symetrie) lze do programu zařadit další příkaz `MP OFFSET` vykonaný během svařování. Je třeba použít nový polohový registr se změněným parametrem X . Ostatní parametry by měly zůstat stejné. Příklad užití je na obr. 37 [34].



obr. 37 – schéma svaru po úpravě parametru X [34]

Změna úhlů sklonu hořáku

Úhel sklonu hořáku lze měnit dvěma způsoby. Změna úhlu sklonu hořáku v příčném směru svařování, tedy rotace kolem osy X, je vyvolána změnou parametru W v polohovém registru. Parametr P ovlivňuje úhel sklonu hořáku ve směru svařování, což je rotace kolem osy Y [34].



obr. 38 – úhly sklonu hořáku při svařování

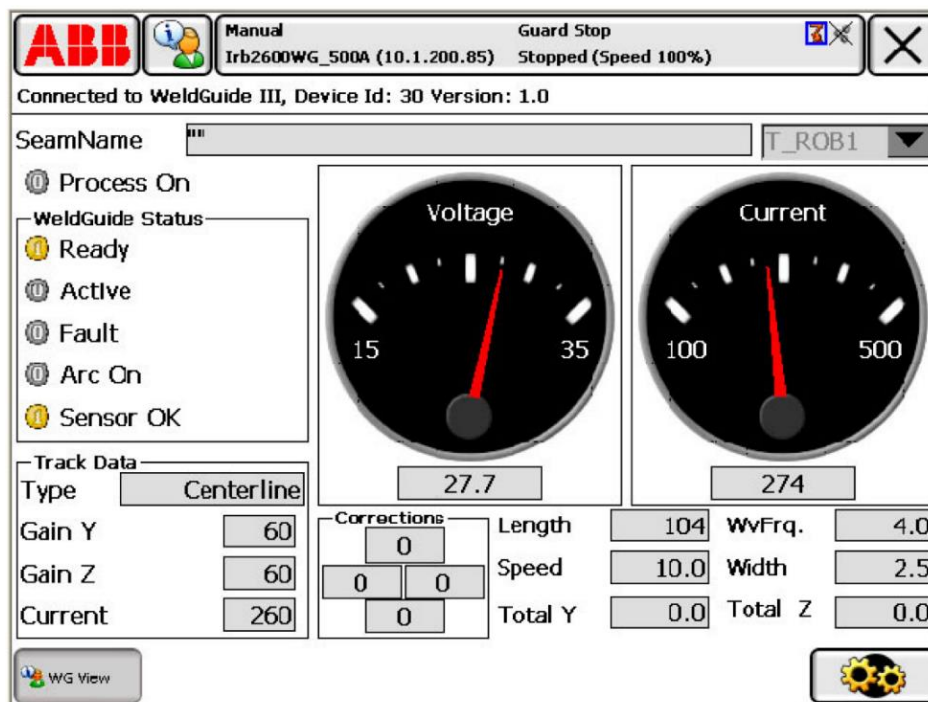
4.4 Řešení konkurenčních výrobců

4.4.1 ABB

Švédsko-švýcarská společnost ABB představila svůj první systém trasování na základě sledování elektrického oblouku již roku 1994. Systém byl označován zkratkou AWC (Advance Weld Controller). Roku 2010 byl představen nový systém WeldGuide III speciálně vyvinutý pro použití s řídicí jednotkou ABB IRC5. Dle tehdejšího vyjádření výrobce byl systém v porovnání s předchůdcem o polovinu levnější a jednodušší na implementaci a programování [35].

V současné době je k dispozici nejnovější generace systému WeldGuide IV. Systém pracuje na stejném principu jako TAST od společnosti FANUC. Die výrobce je zaznamenáváno 25 000 vzorků za sekundu. Měřicí systém je instalován přímo v řídicí jednotce robota. K jedné jednotce lze připojit až dvě měřicí zařízení. Zajímavou funkcí je možnost přehledného sledování vykonaných korekcí, aktuálních hodnot napětí a proudu v reálném čase a dalších parametrů přímo na teach pendantu FlexPendant (obr. 39). Systém je zpětně kompatibilní s generací WeldGuide III. Společnost ABB deklaruje funkčnost trasování při zkratovém i sprchovém a pulzním přenosu kovu. Stejně jako u dříve popisovaného systému společnosti FANUC jsou zde zvláštní nastavení pro svařování koutových, tupých, rohových i přeplátovaných spojů a pro adaptivní trasování. Minimální amplituda rozkyvu je 1,5 násobek průměr drátu. I v tomto případě lze nastavovat citlivosti a bias pro vertikální a laterální trasování [36] [37].

Systém rovněž nabízí funkci pro vytváření vícevrstevných svarů Multipass pracující na shodném principu a nabízející stejné možnosti jako funkce od společnosti FANUC [36].



obr. 39 – prostředí WGView [36].

4.4.2 KUKA

Německá společnost KUKA označuje svůj systém pro trasování na základě sledování elektrického oblouku jako KUKA Arc.Sense. Nejnovější dostupná je verze Arc.Sense 3.4. Výrobce v manuálu konkrétně nepopisuje princip funkce systému, vzhledem k množství společných vlastností se ale dá předpokládat obdobný princip jako u dříve popisovaných systémů. Na počátku svařování během prvních 5 až 15 cyklů rozkyvu provádí systém kalibraci. Informace o aktuálních hodnotách svařovacích parametrů je možné získávat v analogové formě z měřicího zařízení ArcSense Shunt Box nebo v digitální formě přímo ze svařovacího zdroje [38].

Jako podmínky spolehlivého trasování uvádí společnost KUKA následující [38]:

- minimální tloušťka materiálu jsou 3 mm
- použití pouze trojúhelníkového rozkyvu (Triangle)
- minimální amplituda rozkyvu je 1,5 násobek průměru drátu
- na počátku svařování musí být špička drátu v blízkosti středu svaru
- odchylka od nominální trajektorie musí být nejvýše 10°
- úhel otevření tupého V-svaru by měl být konstantní a v rozmezí (60-90)°
- stojna a pásnice koutového spoje by měly svírat úhel 90°
- stehovací svary nesmí být v oblasti kalibrace
- svařování musí být prováděno v polohách PA a PB
- základní materiály musí být slitiny železa nebo mít vyšší elektrický odpor než ocel
- podíl CO₂ v ochranném plynu se doporučuje menší než 20% (se vzrůstajícím podílem dochází k výraznému a nepravidelnému zkratovému přenosu, což může mít negativní vliv na trasování)
- vhodnost použití systému při svařování plněným drátem musí být ověřena
- úhly natočení hořáku musí být během svařování konstantní
- doporučuje se svařování vpřed (tlačení)
- na základním materiálu by neměly být výrazné odlišnosti kvality povrchu
- trasování je nespolehlivé na slitinách hliníku

Rovněž společnost KUKA nabízí systém pro adaptivní trasování ArcTech AdaptiveWelding a pro vícevrstvé svařování ArcTech Multilayer. I v tomto případě lze zaznamenat odchylky první housenky od nominální trajektorie a další housenky posunout vůči skutečné pozici kořene ve vertikálním nebo laterálním směru, popř. změnit úhly natočení hořáku [39].

4.4.3 Yaskawa – Motoman

I tento japonský výrobce robotů nabízí vlastní systém pro trasování na základě sledování oblouku, tentokrát pod názvem ComArc. Systém funguje na stejném principu, jaký byl již dříve popsán. Výrobce doporučuje použití systému pro svařování materiálu o minimální tloušťce 3,2 mm při maximální svařovací rychlosti 100 cm/min. Systém je vhodný pro vytváření koutových a přeplátovaných spojů. Systém dokáže zaznamenat až 1000 vzorků za sekundu. Nastavení hodnot citlivostí a bias systém neumožňuje [40].

Pro svařování vícevrstevných spojů lze použít funkci Multi-Layer Welding nabízející stejné možnosti jako systémy ostatních výrobců [41].

4.4.4 Shrnutí

Na základě provedené rešerše systémů pro korekci dráhy robota pomocí sledování elektrického oblouku (TAST) od třech největších konkurentů společnosti FANUC [42] lze konstatovat, že řešení všech výrobců jsou obdobná. Fyzikální princip je shodný. Odlišné mohou být algoritmy vyhodnocování. Tyto informace si ale výrobci přísně střeží, srovnání tedy není možné provést.

Rozdíly lze tedy najít zejména v možnostech nastavení parametrů, množství speciálních funkcí, složitosti programování a uživatelském prostředí. Tyto vlastnosti, zejména pak složitost programování a přívětivost uživatelského prostředí je samozřejmě obtížné hodnotit bez praktických zkušeností, stejně jako vliv jednotlivých nastavitelných proměnných. Za zajímavý doplněk považuji možnost sledování parametrů v reálném čase v případě systému společnosti ABB. Zároveň toto uživatelské prostředí se jeví jako nejpřehlednější s jednoduchým nastavováním parametrů. Systém ABB rovněž disponuje výrazně nejvyšší vzorkovací frekvencí 25 kHz.

V případě systémů pro vytváření vícevrstevných svarů jsou systémy všech zkoumaných výrobců velmi srovnatelné.

Rozdíly lze najít v provedení dostupných manuálů a množství informací. Manuál firmy ABB obsahuje nejpodrobnější popis s množstvím příkladů. Dokument společnosti KUKA podrobně popisuje podmínky funkce systému. Vzhledem k shodnému principu funkce jednotlivých systémů mohou být tyto informace do určité míry považovány za obecné a nabízí se jejich využití pro získání základního přehledu i při použití systémů konkurenčních výrobců.

5 Experimentální část

5.1 Popis experimentu

Experiment navazuje na diplomovou práci Ing. Jaroslava Kuse z roku 2019 zabývající se systémem TAST při svařování jednovrstevných koutových svarů a bakalářskou práci Bc. Jana Kroupy z roku 2020 ověřující systém TAST při vytváření vícevrstevných tupých svarů. Do řídicího systému robota v laboratoři byla instalována softwarová rozšíření pro funkce SuperTAST a MultiPass, čímž se nabídla možnost funkci těchto systémů ověřit.

Cílem experimentu bude porovnání přístupů k vytváření vícevrstevných koutových svarů.

Postup:

- 1) příprava vzorků
 - dělení materiálu, stehování, tryskání
- 2) příprava pracoviště
 - sestavení upínacího systému
- 3) experimentální volba svařovacích parametrů
 - vytvoření programu
 - volba svařovacího proudu, rychlosti, parametrů rozkyvu
 - ověření geometrie
- 4) svařování vzorků za použití TAST

- vytvoření programu
 - svaření referenčního vzorku bez výchyly, ověření geometrie
 - vychýlení o 5° vlevo ve směru svařování, svaření, zhodnocení geometrie
 - úprava parametrů trasování (docílení spolehlivého navádění) a parametrů housenek (docílení vhodné geometrie svaru)
 - zhodnocení výsledků
- 5) svařování vzorků za použití Multipass
- vytvoření programu
 - svaření referenčního vzorku bez výchyly, ověření geometrie
 - vychýlení o 5° vlevo ve směru svařování, svaření, zhodnocení geometrie
 - úprava parametrů trasování (docílení spolehlivého navádění) a parametrů housenek (docílení vhodné geometrie svaru)
 - zhodnocení výsledků
- 6) vyhodnocení experimentu
- porovnání přístupů na základě předem definovaných kritérií
 - stanovení technologických doporučení

5.2 Popis pracoviště

Experimenty byly provedeny v Laboratoři výuky svářečských technologií Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojní ČVUT.

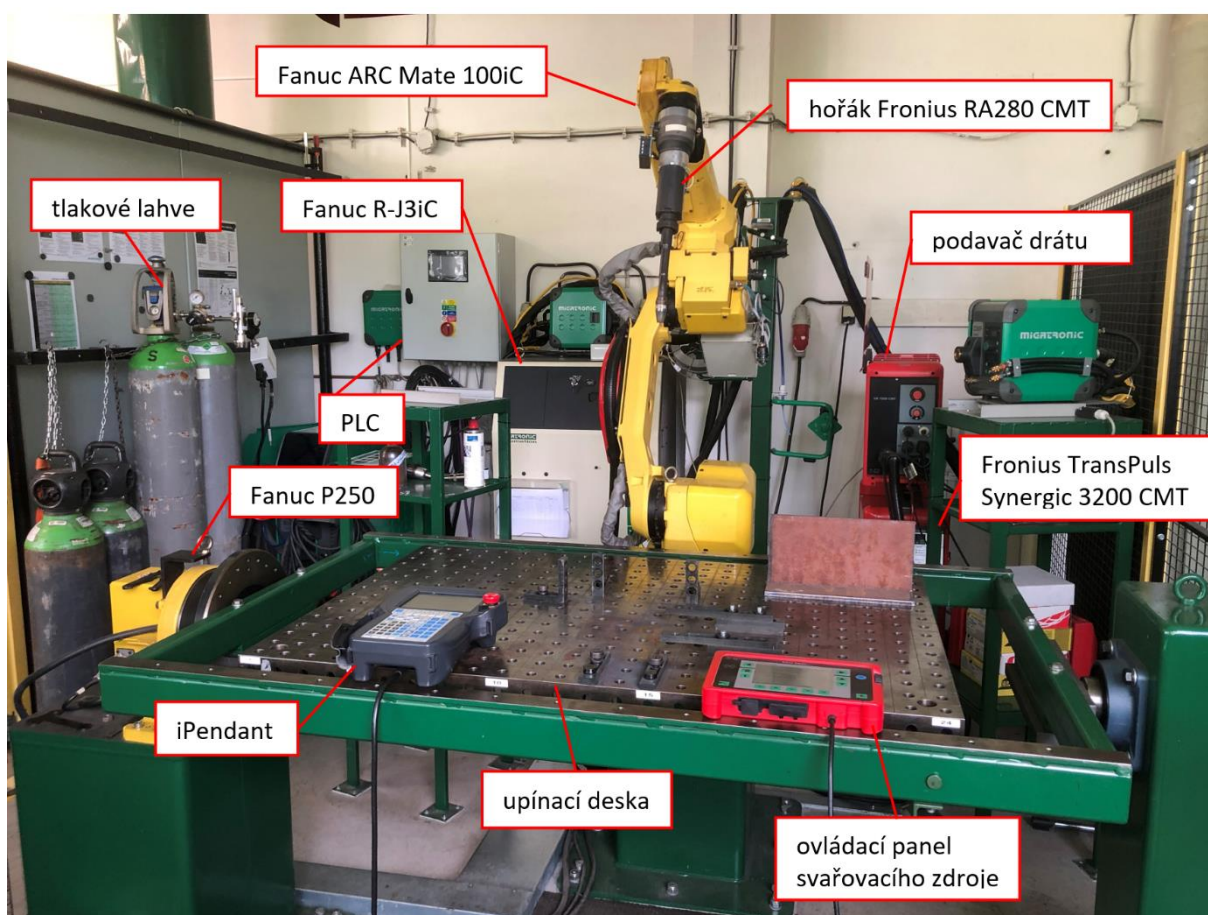
Laboratoř je vybavena následujícími technologiemi:

- **FANUC ARC Mate 100iC**
Šestiosý robot pro obloukové svařování s užitečným zatížením 10 kg a maximálním dosahem 1420 mm. Výrobce deklarovaná opakovatelnost je $\pm 0,08$ mm.
- **FANUC R-J3iC**
Řídící jednotka ovládající chod technologie v provedení B-Cabinet. Jednotka umožňuje využití 2D a 3D sledovacích systémů, ovládání až 40 přídatných os, připojení přes Ethernet, detekci kolizí a monitorování servopohonů.

- iPendant
- FANUC P250

Jednoosé polohovadlo s upínací deskou pro otáčení o 360° na každou stranu vůči základní poloze. Laboratoř je vybavena stavebnicovým upínacím systémem (dorazy, upínky, úhelníky, čepy, svěrky...).
- PLC
- svařovací zdroje

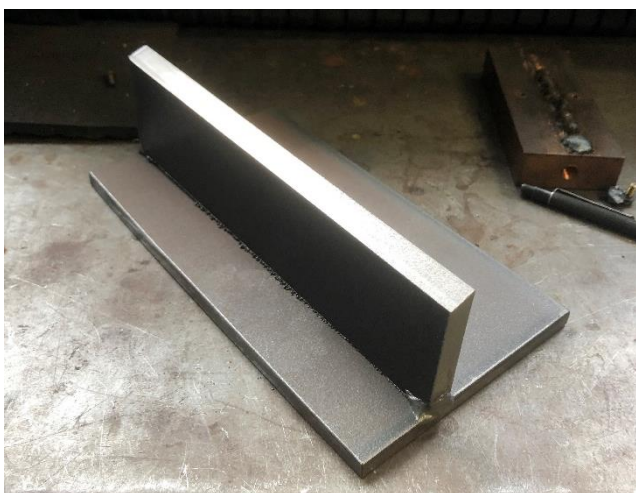
Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT, Migatronc Sigma Galaxy 400
- podavače drátu
- tlakové lahve s plyny, příslušenství
- bezpečnostní prvky
- odsávací zařízení



obr. 40 – rozmístění pracoviště

5.3 Popis vzorků a jejich upnutí

Testovací vzorky jsou vyrobeny z plechu o tloušťce 10 mm a šířce 200 mm. Ostatní rozměry plechů jsou různé, záleželo na aktuální dostupnosti polotovaru. Materiál je konstrukční ocel S235JR. Stojna a pásnice byly stehovány. Způsob upnutí vzorku je patrný z obr. 42 – upnutí vzorku.



obr. 41 – ukázka vzorku pro svařování

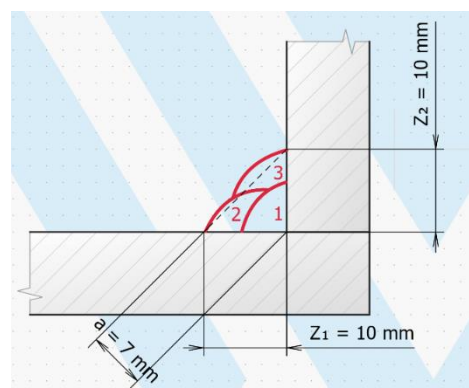


obr. 42 – upnutí vzorku

5.4 Průběh experimentu

5.4.1 Požadavky na svar

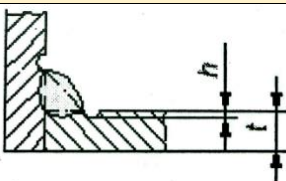
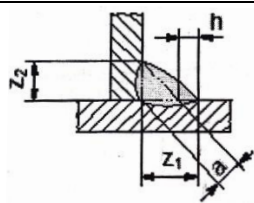
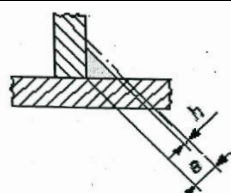
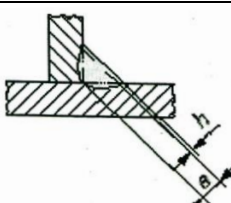
Před samotným svařováním vzorků jsem stanovil požadavky na svarový spoj. Cílem bylo vytvořit třívrstvý koutový svar skládající se z jedné kořenové housenky a dvou krycích o rozměrech základen $Z_1 = Z_2 = 10$ mm a jmenovité velikosti svaru $a = 7$ mm.



obr. 43 – náčrt spoje

Kvalita svaru byla hodnocena dle normy ČSN EN ISO 5817, stupeň kvality B. Všechny zkoušky byly prováděny vizuálně.

tab. 5 – vyhodnocované vady dle ČSN EN ISO 5817 [43]

číslo dle ISO 6520-1	název vady	náčrt	mezní hodnoty pro $t = 10 \text{ mm}$
5012	nesouvislé zápaly		$h \leq 0,5 \text{ mm}$
512	nadměrná asymetrie koutového spoje		$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 a$ $h \leq 2,55 \text{ mm}$
5213	podkročení velikosti koutového svaru		nepřípustné
5214	překročení velikosti koutového svaru		$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$ $h \leq 2,05 \text{ mm}$

Rozměry svarů byly vyhodnocovány pomocí měrky na koutové svary se třemi stupnicemi (obr. 44).



obr. 44 – měrka na koutové svary

5.4.2 Volba svařovacího proudu kořenové housenky

Na vzorku 01 byly vytvořeny krátké svarové housenky při konstantní svařovací rychlosti 30 cm/min za použití různých svařovacích proudů viz tab. 6. Svařování probíhalo bez rozkyvu.

tab. 6 – svařovací proudy vzorku 01

01.1	01.2	01.3	01.4	01.5	01.6
162 A	172 A	183 A	193 A	220 A	240 A



obr. 45 – vzorek 01

Po svaření vzorků byly jednotlivé svary podrobeny vizuálnímu zhodnocení. Při svařování proudem 220 A se svařovací proces nacházel v přechodné oblasti mezi zkratovým a sprchovým přenosem a při 240 A již probíhal úplný sprchový přenos. Jako optimální jsem kvůli nejlepší geometrii a kresbě zvolil svařovací proud 172 A.

5.4.3 Volba postupové rychlosti kořenové housenky

Podobně byl vytvořen vzorek 02, na kterém byl testován parametr svařovací rychlosti. Z předchozího experimentu byl převzat svařovací proud 172 A, za jehož použití byly svařeny 4 krátké housenky při svařovací rychlosti dle následující tabulky.

tab. 7 – svařovací rychlosti vzorku 02

02.1	02.2	02.3	0.4
20 cm/min	25 cm/min	30 cm/min	35 cm/min



obr. 46 – vzorek 02

Jednotlivé housenky byly znovu vizuálně zhodnoceny, na základě čehož jsem zvolil postupovou rychlost 25 cm/min. Jsem si vědom faktu, že robotizované svařování nabízí možnost svařovat výrazně větší rychlostí, avšak pro účely tohoto experimentu není třeba dbát na co nejvyšší efektivitu, jako by tomu bylo v reálném výrobním procesu.

5.4.4 Volba parametrů rozkyvu kořenové housenky

Na závěr bylo třeba zvolit vhodnou kombinaci parametrů rozkyvu. Za použití svařovacího proudu 172 A a postupové rychlosti 25 cm/min jsem na vzorku 03 vytvořil krátké housenky s kombinacemi parametrů, viz tab. 8.

tab. 8 – parametry rozkyvu vzorku 03

označení vzorku	amplituda rozkyvu	frekvence rozkyvu	prodleva vlevo	prodleva vpravo
03.1	4 mm	3 Hz	0,1 s	0,1 s
03.2	3 mm	3 Hz	0,1 s	0,1 s
03.3	2 mm	2,5 Hz	0,1 s	0,1 s
03.4	2 mm	2 Hz	0,1 s	0,1 s
03.5	3 mm	2 Hz	0,1 s	0,1 s
03.6	3 mm	2 Hz	0,1 s	0,3 s



obr. 47 – vzorek 03

Z obr. 47 je patrný vliv amplitudy rozkyvu na velikost svaru (vzorky 03.1–03.3). Vzorky 03.1–03.3 byly vyřazeny z důvodu vyskytujícího se zápalu. U vzorků 03.5 a 03.6 nevyhovovala kresba. Jako nejlepší se z hlediska geometrie, kvality a kresby jeví housenka s označením 03.4 (amplituda 2 mm, frekvence 2 Hz, výdrž vpravo i vlevo 0,1 s).

Dosavadní poznatky:

- na kvalitu a geometrii svaru mají vliv všechny ověřované parametry
- ideální kombinace parametrů viz tab. 9

tab. 9 – zvolené svařovací parametry kořenové housenky

svařovací proud	172 A
svařovací napětí	17,7 V
rychlost podávání drátu	6,7 m/min
svařovací rychlost	25 cm/min
amplituda rozkyvu	2 mm
frekvence rozkyvu	2 Hz
výdrž vlevo a vpravo	0,1 s
úhel nastavení hořáku v příčném směru	45°
úhel nastavení hořáku ve směru svařování (mezi osou elektrody a směrem svařování)	75° (vzad)

Tyto parametry budou použity pro svařování kořenových housenek během celého experimentu. Na kvalitu provedení a geometrii kořenové housenky jsem kladl velký důraz. U krycích housenek jsem navrhl snížení svařovacího proudu na 155 A.

5.5 Svařování vícevrstevných svarů za použití systému TAST

5.5.1 Popis programu

Program jsem vytvořil pomocí iPendant. Robot program začíná v domovské pozici definované pomocí polohového registru PR[90]. Po nájezdu do počáteční pozice svařování je aktivováno svařování, rozkyv a trasování TAST. V konečné pozici svařování jsou tyto procesy deaktivovány. Následuje prodleva a odjzd hořáku do bezpečné vzdálenosti od svařence. Příkazem PAUSE je v tomto momentě program pozastaven. Tím je možné svar před vytvořením další housenky bezpečně zkontrolovat a změřit. Po provedení těchto úkonů se program stiskem klávesy FWD znovu spustí. Přes pomocné pozice robot přejede do počátečního bodu svařování druhé housenky a vytvoří ji. Toto je následně opakováno i pro třetí housenku. Kromě některých pozic jsou dílčí části programu pro jednotlivé housenky shodné, proto pro přehlednost uvádím jen část programu pro první vrstvu.

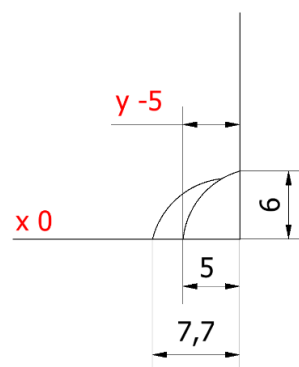
tab. 10 – program TAST

číslo řádku	druh pohybu	instrukce	popis
1	J	PR[90] 100% FINE	domovská pozice robota
2		UFRAME_NUM=2	definice souřadného systému
3		UTOOL_NUM[GP1,2]=6	definice nástroje
4	J	P[1] 100% CNT70	
5	J	P[2] 100% CNT70	pomocné (nájezdové) pozice
6	J	P[3] 100% CNT100	
7	L	P[4] 100mm/sec FINE	počáteční pozice svařování
		Arc Start E1[1]	aktivace svařování
8		Weave Sine[2]	aktivace rozkyvu
9		Track TAST[10]	aktivace trasování TAST
10	L	P[5] WELD_SPEED FINE	konečná pozice svařování
		Arc End E1[1]	deaktivace svařování
11		Track End	deaktivace trasování TAST
12		Weave End	deaktivace rozkyvu
13		WAIT 2.00(sec)	prodleva
14	J	P[6] 100% CNT20	pomocná (odjezdová) pozice
15		PAUSE	pauza
		.	
		.	
38	J	PR[90] 100% FINE	domovská pozice robota

5.5.2 Úprava pozice krycích housenek

Vzorek 04

Po svaření kořenové housenky byly změřeny její rozměry. Rozměr základny na pásnici je 5,1 mm, proto jsem pozici špičky drátu pro svařování druhé housenky posunul o 5 mm vpravo ve směru svařování. Celkový rozměr základny na pásnici výsledného svaru byl 7,7 mm, proto bylo třeba zvolit větší posun.



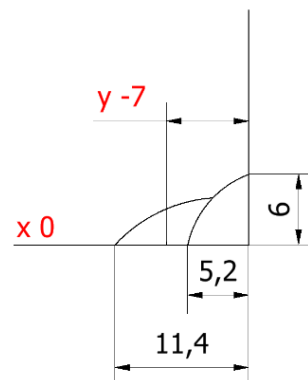
obr. 48 – rozměry svaru 04



obr. 49 – vzorek 04

Vzorek 05

Druhá housenka byla posunuta o 7 mm. Celkový rozměr základny na pásnici byl 11,4 mm, proto bylo pro vytvoření svaru s co nejlepšími rozměry zvolit menší posun.



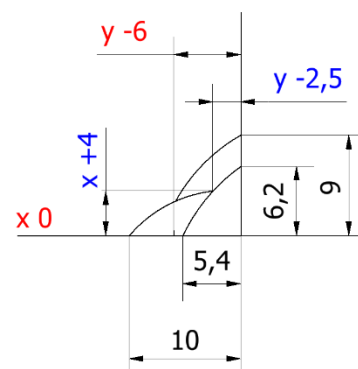
obr. 50 – rozměry svaru 05



obr. 51 – vzorek 05

Vzorek 06

Posunutí druhé housenky o 6 mm. Rozměr základny na pásnici je 10 mm, což je vyhovující. Po svaření druhé housenky jsem změřil pozici přechodu první a druhé housenky $[y ; z] = [-2,5 ; 4]$ mm a špičku drátu pro svařování třetí housenky umístil do tohoto bodu. Celkový rozměr Z na stojně je 9 mm, je tedy podkročena požadovaná velikost svaru. Přechod mezi krycími housenkami není plynulý. Pozici třetí housenky bylo třeba ještě upravit.



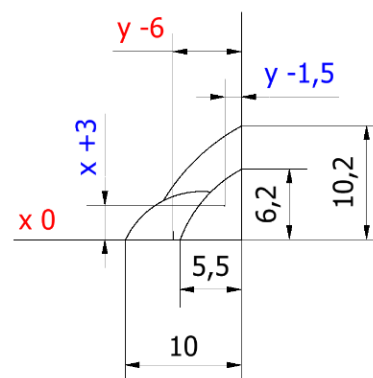
obr. 52 – rozměry svaru 06



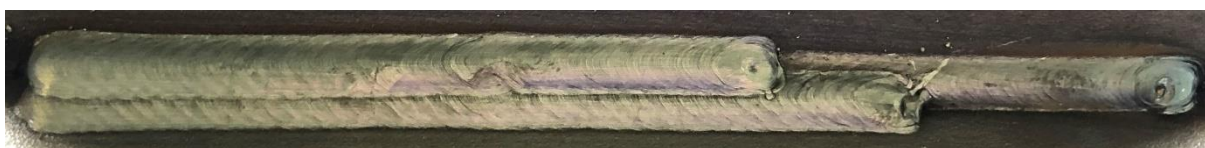
obr. 53 – vzorek 06

Vzorek 07

Pozice třetí housenky byla posunuta do pozice $[y ; z] = [-1,5 ; 3]$ mm. Rozměry základen jsou 10 mm a 10,2 mm, což odpovídá požadavku. Přechod mezi krycími housenkami je plynulý.



obr. 54 – rozměry svaru 07



obr. 55 – vzorek 07

Vhodné pozice jednotlivých housenek byly v této části experimentu úspěšně stanoveny.

5.5.3 Test s výchylnou

V dosavadním průběhu experimentu jsem zvolil vhodné svařovací parametry a pozice housenek. Zbývající část se bude zaměřovat na ověření funkce systému TAST při svařování vícevrstevných svarů. Vzorky budou vychýleny o 5° vlevo ve směru svařování. V průběhu bude zjišťován vliv parametrů, zejména trasování.

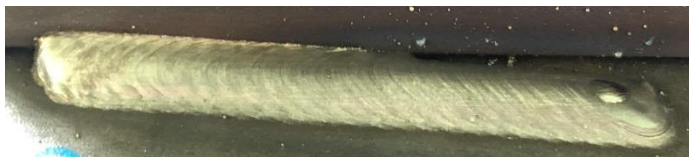
Některé vzorky mají vytvořenou i druhou, popř. třetí housenku, jelikož byly svařovány v několika fázích experimentu. Vyhodnocování ale bylo uskutečněno na kořenové housence.

Vliv parametru L_gain

L_Gain 10 %

Citlivost trasování je nedostatečná, housenka se výrazně oddaluje od stojny. Svařování bylo předčasně ukončeno, jelikož došlo ke kolizi hubice s pásnicí. V tomto případě byla kolize způsobena nízkou hodnotou vertikální citlivosti

trasování $V_Gain = 10$. Při svařování dalších vzorků jsem parametr V_Gain nastavoval vždy shodný s parametrem L_Gain .



obr. 56 – vzorek 08

L_Gain 20 %

Citlivost laterálního trasování je stále nedostatečná, vliv jejího zvýšení je zde ale patrný.



obr. 57 – vzorek 09

L_Gain 30 %

Housenka je již ve správné pozici, avšak výrazně asymetrická (chyba asymetrie 4,6 mm).



obr. 58 – vzorek 10

L_Gain 40 %

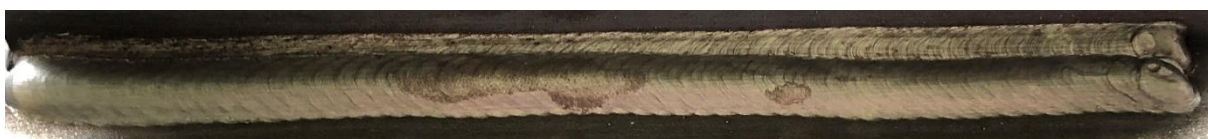
Trasování funguje, chyba asymetrie kořene je 4,1 mm.



obr. 59 – vzorek 11

L_Gain 50 %

Trasování funguje, chyba asymetrie kořene je 4 mm.



obr. 60 – vzorek 12

L_Gain 60 %

Trasování funguje, chyba asymetrie je 4,4 mm.



obr. 61 – vzorek 13

Dosavadní poznatky:

- Vliv laterální citlivosti je významný, při příliš malých hodnotách nedochází ke správnému navádění. V případě vychýlení vzorku vpravo ve směru svařování by patrně došlo ke kolizi.
- Z hlediska provedení a vzhledu svaru se jako vhodná velikost laterální citlivosti trasování jeví 40 %.
- I v úlohách s žádnou nebo velmi malou odchylkou ve vertikálním směru (vzorky byly vychylovány jen v horizontálním směru, odchylka tloušťky plechu se předpokládá velmi malá) je třeba dbát na vhodné nastavení vertikální citlivosti trasování. Při příliš malé hodnotě tohoto parametru může dojít ke kolizi.
- Problémem je opakující se nadměrná asymetrie kořene, na kterou parametr L_Gain nemá vliv (všechny svary byly vytvořeny za stejných podmínek jako vzorek 07, který byl v úloze bez výchytky z hlediska asymetrie vyhovující).
- V další části experimentu je třeba se zaměřit na možnost zlepšení nepříznivé asymetrie svaru.

Vliv parametru L_tracking limit per cycle na kořenovou housenku

Systémová proměnná L_tracking limit per cycle určuje maximální velikost korekce za jeden cyklus. Hodnota byla snížena z aktuálně nastavené 1mm na 0,4 mm, což je výchozí hodnota daná manuálem. Na trasování změna nemá vliv, asymetrie housenky je stále vysoká (4 mm). Jediným pozorovatelným rozdílem je periodicky opakované zvlnění svaru způsobené rozkmitem systému trasování při příliš vysoké hodnotě této proměnné. Lze konstatovat, že hodnota 0,4 mm je vyhovující.



obr. 62 – vzorek 14

Vliv parametru L_bias na kořenovou housenku

Za účelem snížení asymetrie kořenové housenky jsem vyzkoušel změnu parametru L_bias. Bylo třeba housenku posunout směrem na stojnu (vlevo ve směru svařování), proto jsem nastavil hodnotu -2 %. Asymetrii kořenové housenky se podařilo mírně snížit na 3,5 mm.



obr. 63 – vzorek 15

Vliv sklonu hořáku v příčném směru na kořenovou housenku

V dosavadním průběhu experimentu byly vzorky svařovány pod úhlem sklonu hořáku v příčném směru 45° (vždy měřeno od pásnice). V této části experimentu jsem ověřil možnost snížit asymetrii kořene změnou tohoto úhlu.

Úhel sklonu hořáku 35°

Svařovací hořák byl „položen“ pod úhlem 35°. Vliv na asymetrii kořene je patrný, došlo ke snížení na vyhovující hodnotu 1 mm.



obr. 64 – vzorek 16

Úhel sklonu hořáku 55°

Svařovací hořák byl „postaven“ pod úhlem 55°. Během svařování došlo k oddálení housenky od stojny a ke ztrátě schopnosti trasování. Nastavená laterální citlivost trasování L_gain = 40.



obr. 65 – vzorek 17

Dosavadní poznatky

- Systémová proměnná $L_tracking$ limit per cycle nemá vliv na funkci trasování, ale na vizuální stránku svaru. Při příliš vysokých hodnotách může docházet k rozkmitu systému trasování.
- Asymetrii svarové housenky lze ovlivnit sklonem hořáku v příčném směru.
- Úhel hořáku má vliv i na funkci trasování. Nadměrné „postavení“ hořáku může vést ke ztrátě schopnosti trasování.
- Rozsah možných nastavení úhlu je při svařování koutových svarů omezen. Je třeba dbát, aby nedocházelo během rozkyvu ke kolizi hubice se ZM. Možností je zvýšení výletu drátu.
- V další části experimentu budu využívat změnu úhlu hořáku na 55° pro snížení asymetrie kořene.
- Podrobnější prozkoumání vlivu parametru L_bias bude předmětem další části experimentu.

Kořenové housenky byly svařeny pod úhlem 35° za použití parametrů zvolených v průběhu experimentu (172 A, 17,7 V, L_gain 40). U druhých housenek byly voleny různé kombinace parametrů.

Změna úhlu svařování pro druhou housenku

Při svařování prvních testovacích vzorků se ukázalo jako problematické trasování druhé housenky, která se od stojny oddalovala výrazněji než ostatní housenky. Proto jsem ověřil možnost změnu úhlu hořáku na 55° (hořák „postaven“), kdy jsem předpokládal lepší funkci navádění.

Po ustálení trasovacího procesu druhá housenka celkem zdařile kopíruje první. Celkový rozměr základny na pásnici je 13,4 mm.



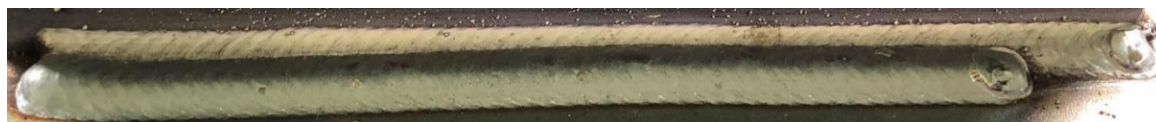
obr. 66 – vzorek 18

Vliv parametru L_bias na pozici druhé housenky

Pro zmenšení rozměru 13,4 mm byla ověřena možnost posunutí druhé housenky pomocí změny parametru L_bias . Posunutí bylo vyžadováno na levou stranu ve směru svařování, proto byly použity záporné hodnoty.

$L_bias = -3 \%$

Celkový rozměr Z po ustálení 13,3 mm.



obr. 67 – vzorek 19

$L_bias = -6 \%$

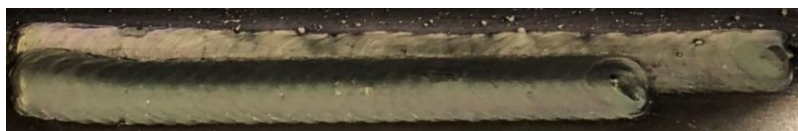
Celkový rozměr Z po ustálení 12,7 mm.



obr. 68 – vzorek 20

$L_bias = -12 \%$

Celkový rozměr Z po ustálení 13,4 mm



obr. 69 – vzorek 21

Dosavadní poznatky:

- Vliv sklonu hořáku na kvalitu trasování je zřejmý. Pro trasování druhé housenky je vhodné snížení úhlu mezi hořákem a stojnou na hodnotu menší než 45° .
- Posunutí housenky blíže ke stojně se změnou parametru L_bias nezdařilo.

Test třetí housenky

Na závěr tohoto experimentu jsem vytvořil kompletní třívrstvý svar. Třetí housenka byla svařena za použití stejných parametrů jako housenka kořenová.

Trasování je v tomto případě spolehlivé. Rozměry základen jsou 12,9 mm a 9,4 mm. Asymetrie spoje tedy stále přetrvává.



obr. 70 – vzorek 22

Uvedené řešení lze z hlediska trasování považovat za vhodné. Snížení asymetrie je možné docílit další vhodnou úpravou parametrů svařování, zejména svařovacího proudu, napětí, rychlosti a parametrů rozkyvu (amplituda, frekvence).

5.6 Svařování vícevrstevných koutových svarů metodou Multipass

Při svařování vícevrstevných koutových svarů za použití systému Multipass dochází k trasování pouze první (kořenové) housenky. Další housenky jsou poté posunuty o hodnoty korekcí zjištěných pro první housenku, a navíc o konstantní hodnotu posunutí (offset) definovaný v pozičním registru. Vzhledem k tomu lze výplňové a krycí vrstvy svařovat bez rozkyvu.

5.6.1 Popis programu

Robot přejíždí z domovské pozice do počátečního bodu svařování. Po aktivaci svařování, rozkyvu a trasování TAST vytvoří kořenovou housenku. Během toho ukládá korekce dráhy do bufferu (příkaz `RPM[1]`). Z koncové pozice svařování se hořák oddálí a zastaví. Po kontrole a změření rozměrů housenky je možné stiskem klávesy FWD v programu pokračovat. Následují operace s polohovými registry. Do `PR[24]` je nejprve uložena aktuální pozice hořáku. Při operaci `PR[24] = PR[24] - PR[24]` se registr odečte „sám od sebe“, čímž dojde k jeho vynulování. Následně se nulové pozice z `PR[24]` zkopírují do dále používaného `PR[25]`. Nakonec se do `PR[25]` přímo vloží požadované hodnoty posunutí a natočení hořáku (viz tab. 4). Následuje dvakrát opakovaná smyčka. Nejprve se uzamknou poziční registry, čímž je zamezeno jejich případnému

přepsání během procesu. Robot přijede do počátečního bodu svařování (shodný s první housenkou). Na základě příkazu `MP Offset PR[25] RPM[1]` systém načte hodnoty korekcí uložené v bufferu 1 během svařování první housenky a hodnoty posunutí a natočení zapsané v `PR[25]`. Na základě toho systém upraví dráhu hořáku. Dojde ke svaření druhé housenky bez použití rozkyvu. Robot se oddálí do bezpečné vzdálenosti a do již odemčeného pozičního registru se vloží hodnoty posunutí a natočení pro třetí housenku. Během druhého opakování smyčky se vytvoří třetí housenka. Na závěr se robot vrátí do domovské pozice.

tab. 11 – program *Multipass*

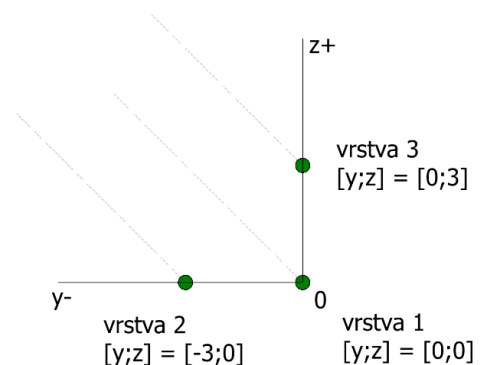
číslo řádku	druh pohybu	instrukce	popis
1:	J	<code>PR[90] 100% FINE;</code>	domovská pozice robota
2:		<code>UFRAME_NUM=2;</code>	definování souřadného systému
3:		<code>UTOOL_NUM[GP1,2]=6;</code>	definování nástroje
4:	J	<code>P[6] 100% CNT70;</code>	pomocné (příjezdové) pozice
5:	J	<code>P[1] 100% CNT70;</code>	
6:	L	<code>P[3] 100mm/sec FINE;</code>	počáteční bod svařování
:		<code>Arc Start E1[1];</code>	aktivace svařování
7:		<code>Weave Sine[2];</code>	aktivace rozkyvu
8:		<code>Track TAST[3] RPM[1];</code>	aktivace TAST a RPM
9:	L	<code>P[8] WELD_SPEED FINE;</code>	koncový bod svařování
:		<code>Arc End E1[1];</code>	deaktivace svařování
10:		<code>Track End;</code>	deaktivace TAST a RPM
11:		<code>Weave End;</code>	deaktivace rozkyvu
12:		<code>WAIT 1.00(sec);</code>	prodleva
13:	L	<code>P[8] 100mm/sec FINE;</code> <code>Tool_Offset,PR[26]</code>	pomocný (odjezdový) bod
14:		<code>PAUSE;</code>	pauza
15:		<code>PR[24]=LPOS;</code>	načtení aktuální pozice do PR
16:		<code>PR[24]=PR[24]-PR[24];</code>	vynulování PR
17:		<code>PR[25]=PR[24];</code>	operace s PR
18:		<code>PR[GP1:25,2]=(-2.8);</code>	offset ve směru Y
19:		<code>PR[GP1:25,3]=2.8;</code>	offset ve směru Z
20:		<code>PR[GP1:25,5]=30;</code>	natočení hořáku
21:		<code>FOR R[3]=1 TO 2;</code>	smyčka - počet opakování
22:		<code>LOCK PREG;</code>	uzamčení PR
23:	L	<code>P[3] 100mm/sec FINE</code> <code>Tool_Offset,PR[26];</code>	pomocný (příjezdový) bod
24:		<code>MP Offset PR[25] RPM[1];</code>	aplikace RPM a offsetů z PR
25:	L	<code>P[3] 250cm/min FINE;</code>	počáteční bod svařování

:		Arc Start E1[2];	aktivace svařování
26:	L	P[8] WELD_SPEED FINE;	koncový bod svařování
:		Arc End E1[2];	deaktivace svařování
27:		WAIT 1.00(sec);	prodleva
28:		MP Offset End;	ukončení RPM a offsetů
29:		UNLOCK PREG;	odemčení PR
30:	L	P[8] 100cm/min FINE Tool_Offset,PR[26] BREAK;	pomocný (odjezdový) bod
31:		PR[GP1:25,2]=4.2;	offset ve směru Y
32:		PR[GP1:25,3]=4.2;	offset ve směru Z
33:		PR[GP1:25,5]=30;	natočení hořáku
34:		ENDFOR;	konec smyčky
35:	J	PR[90] 50% FINE;	domovská pozice robota

5.6.2 Definování pozice housenek

Vzorek 23 byl svařen za použití offsetů viz obr. 71 – pozice housenek, svar 23. Princip volby offsetů se ukázal jako nevhodný.

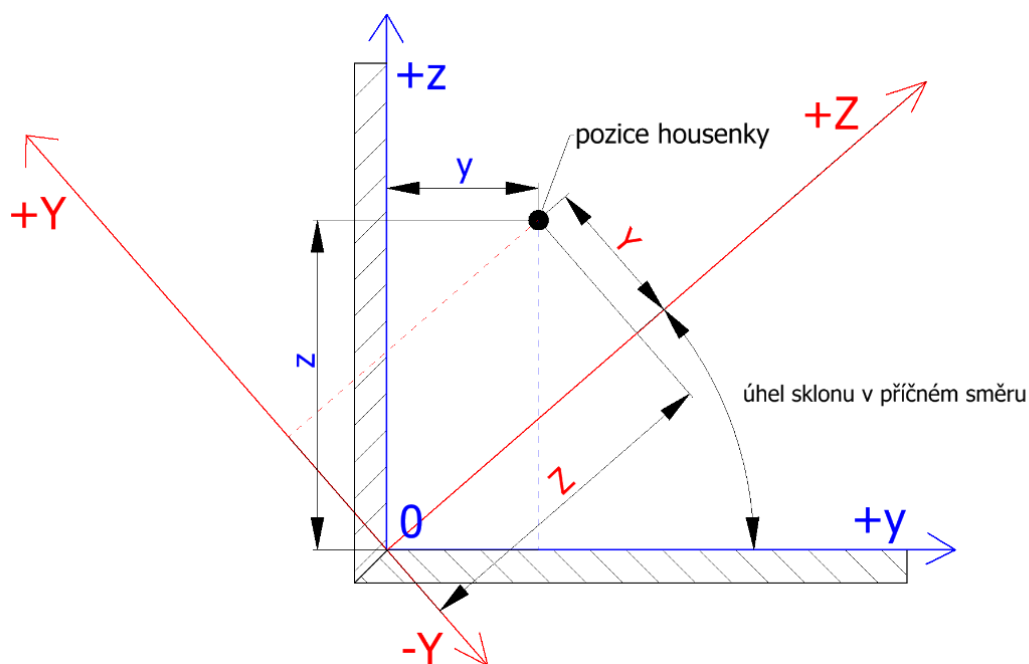
Hodnoty parametrů posunutí je nutno transformovat do zvláštního souřadného systému, jehož orientace závisí na sklonu hořáku v příčném směru a směru svařování. Princip transformace souřadnic je patrný z obr. 73. Znázorněný smysl os platí v případě, že svařovací pohyb probíhá od pozorovatele pryč. Pokud by probíhal směrem k pozorovateli, znaménka osy Y budou opačná.



obr. 71 – pozice housenek, svar 23



obr. 72 – vzorek 23

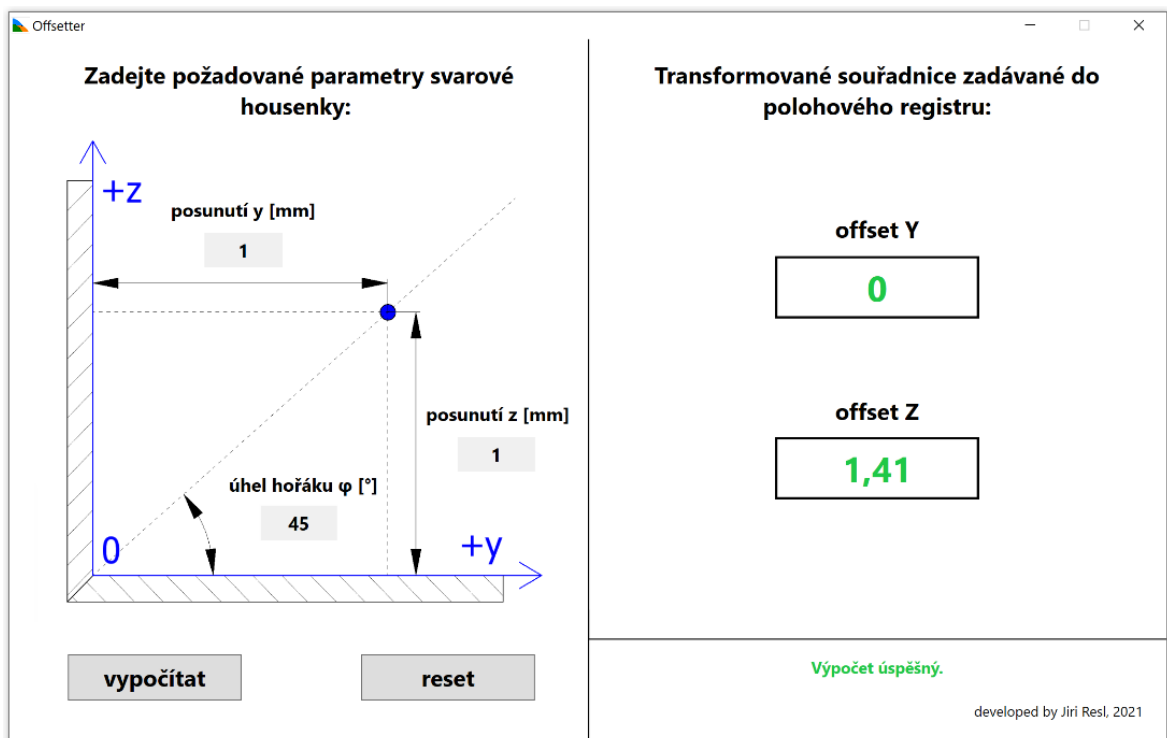


obr. 73 – souřadný systém pro offsety

Pro transformaci souřadnic jsem vytvořil jednoduchou aplikaci pro Windows nazvanou **Offsetter**. Je vytvořená na platformě .NET, za použití knihovny tříd Windows Presentation Foundation (WPF).

Okno aplikace je rozděleno do dvou částí. V levé části uživatel zadává požadované posunutí a používaný úhel sklonu hořáku v příčném směru. Tlačítko „vypočítej“ spouští program, tlačítko „reset“ vrátí všechny hodnoty na výchozí. Pravé okno obsahuje dva ukazatele přepočítaných offsetů, ve výchozím stavu obsahující text „N/A“ (Not Available).

Po zadání požadovaných hodnot a stisku tlačítka „vypočítej“ program transformuje souřadnice. Program vypíše hlášku o úspěšném výpočtu. Hodnoty „offset Y“ a „offset Z“ je možno přímo zadat jako parametry do polohového registru v svařovacím programu.



obr. 74 – provedený výpočet

Pro přepočet využívá program princip grafické transformace souřadnic pomocí transformačních matic. V tomto případě dochází pouze k rotaci souřadného systému, proto se využívá jedna transformační matice.

Upravený vztah pro transformaci souřadnic v maticovém tvaru:

$$\begin{bmatrix} Z \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y \\ z \end{bmatrix} \quad (\text{rovnice 1})$$

Po rozepsání do rovnic:

$$Z = y \cdot \cos(\varphi) + z \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{rovnice 2})$$

$$Y = -y \cdot \sin(\varphi) + z \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{rovnice 3})$$

Pole pro zadávání parametrů jsou ošetřena proti možnosti zadání záporných hodnot a jiných než číselných znaků. V případě posunutí y a z není maximální možná hodnota omezena. Úhel hořáku lze zadávat pouze

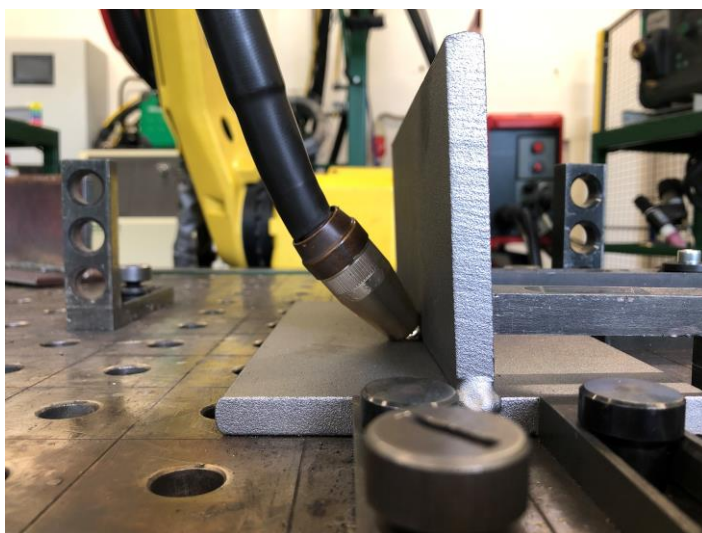
v rozsahu (0;90). Při zadání hodnoty mimo tento rozsah program upozorní na chybu a výpočet neprovede. Čísla je nutno zadávat ve tvaru s desetinnou čárkou.

Zdrojový kód je k dispozici v příloze 2. Pro ověření správnosti výpočetních vztahů jsem provedl geometrickou analýzu v programu Autodesk Inventor. Výsledky jsou k dispozici v příloze 3. Samotnou aplikaci lze najít v příloze č. 4.

Offsety u **vzorku 24** byly tedy vhodně upraveny. Již během svařování kořenové housenky bylo svařování zastaveno, jelikož došlo ke kolizi (hořák se začal přibližovat k materiálu v ose Z nástroje).



obr. 75 – vzorek 24



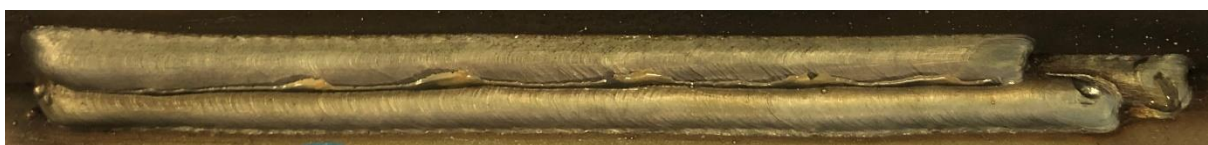
obr. 76 – kolize u vzorku 24

Vzhledem k dříve získaným poznatkům se nabízela úprava citlivostí trasování. Hodnoty $L_gain = 50 \%$ a $V_gain = 25 \%$ byly postupně upravovány. Při nastavení $L_gain = 30 \%$, $V_gain = 30 \%$ kolize nebyla odstraněna, navíc nastala dříve. Nepomohlo ani nastavení $L_gain = 50 \%$, $V_gain = 50 \%$.

Problém jsem konzultoval s odborným konzultantem p. Marszałem ze společnosti FANUC, který jej přisoudil velmi vzácně se objevující chybě systému. Ta nastává v případě nepřímého adresování pozičních registrů. Program byl tedy upraven na přímé adresování.

U **vzorku 25** byla svařena kořenová housenka o rozměrech základen 5 a 5,6 mm. Pozice krycích housenek jsem stanovil dle rozměrů housenky kořenové. Hodnoty posunutí v souřadném systému nástroje, které jsou zadávány do programu, jsem přepočítal pomocí vytvořené kalkulačky. Kořen je svařován vzad (úhel mezi osou elektrody a směrem svařování 75°), krycí housenky vpřed (úhel mezi osou elektrody a směrem svařování 105°).

Kvalita trasování (L_gain 40, V_gain 40) je po ustálení procesu vyhovující. Rozměry základen celého spoje jsou 12 mm a 9,2 mm. Přechod mezi krycími housenkami není plynulý. Z toho důvodu jsem přistoupil k úpravě parametrů.



obr. 77 – vzorek 25

Kořenová housenka byla u **vzorku 26** provedena stejně jako v předchozím případě. Pro zmenšení základny na pásnici jsem posunutí druhé housenky vůči první nastavil na 4 mm, což je souřadném systému nástroje offset $[y; z] = [-2,8; 2,8]$ mm. Třetí housenku bylo třeba zvětšit, proto jsem u ní zvýšil svařovací proud na 185 A.

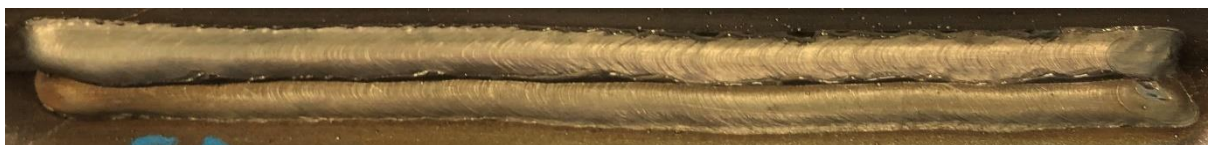
Rozměr základny na pásnici se podařilo snížit na 10,7 mm, rozměr základny na stojně zvýšit na 10,2 mm. Asymetrie 0,5 mm je vyhovující. Přechod mezi housenkami je plynulý.



obr. 78 – vzorek 26

Na **vzorku 27** byl ověřen vliv směru svařování (vpřed nebo vzad). Jak již bylo zmíněno, doposud byly všechny kořenové housenky svařovány vzad, krycí vpřed (viz vzorek 25). U dalšího vzorku byly všechny housenky svařeny vzad.

Vliv na geometrii svaru není pozorovatelný (základny 10,4 a 10,1 mm). U tohoto vzorku se ale projevil již několikrát zmiňovaný problém se špatnou opakovatelností geometrie kořenové housenky. Vrstva se ve vzdálenosti zhruba 70 mm od počátku svaru začala výrazněji odchylovat od stojny, po cca 110 mm se její pozice ustálila. V souladu s předpokládanou funkcí systému Multipass (posunutí dalších vrstev o korekce zjištěné při svařování první vrstvy) krycí housenky kořenovou zdařile kopírovaly.



obr. 79 – vzorek 27

Posledním provedeným experimentem bylo otestování vlivu typu přenosu kovu na **vzorku 28**. Doposud používaný zkratový přenos byl změněn na pulzní (155 A, 35 cm/min). Asymetrie svaru je vyhovující (0,8 mm). Trasování je po ustálení procesu spolehlivé.



obr. 80 – vzorek 28

Zjištěné poznatky:

- Při volbě offsetů je třeba dbát na správně použitý souřadný systém.
- Nedoporučuji používat nepřímé adresování polohových registrů. Systém se může chovat nepředvídatelně.
- Parametry trasování použité při experimentu se systémem TAST jsou použitelné i při svařování za použití systému Multipass.
- Úprava pozice housenek je v systému Multipass velmi snadná a rychlá.
- V případě, že jsou vyžadovány odlišné svařovací parametry (proud, napětí, rychlost podávání drátu) pro jednotlivé krycí housenky, je

vhodnější vložit instrukce do programu pro každou tuto vrstvu zvlášť namísto použití smyčky. V mém případě jsem svařovací parametry nastavoval v průběhu svařování na ovládacím panelu svařovacího zdroje.

- Na provedení první housenky silně závisí provedení ostatních housenek.
- Vyhovující kvalita trasování byla potvrzena i pro pulzní přenos kovu.

6 Závěrečné zhodnocení

V teoretické části bakalářské práce jsem nejprve zpracoval náhled do historie a současnosti společnosti FANUC a zmapoval její roboty pro obloukové svařování nabízené v současné době. Následuje obecné seznámení se senzory používanými v oblasti obloukového svařování. Nejdůležitější část se týká systému pro korekci dráhy robota na základě sledování elektrického oblouku TAST. Vzhledem k tomu, že detailně se tomuto systému věnoval Ing. Jaroslav Kus ve své diplomové práci z roku 2019, zaměřil jsem se na podrobné popsání systému SuperTAST, což je nadstavba systému TAST. Čtenář byl seznámen i s funkcí systému Multipass, používaným v experimentální části. Práce obsahuje i stručnou rešerši řešení některých konkurenčních výrobců.

Ne ve všech případech se mi zdařilo vytvořit svar splňující všechny požadavky na geometrii. Cílem práce však bylo představit jednotlivé přístupy, nikoli v každém případě vytvořit dokonalý svar. K dosažení vyhovující geometrie svaru však postačují další úpravy pozice vrstev, popř. svařovacích parametrů.

V obou testovaných přístupech ke svařování vícevrstevných koutových svarů se jako nejnáročnější úkol ukázalo vytvoření kořenové vrstvy s vyhovující geometrií. Problémem byla nízká opakovatelnost, kdy se i za použití shodných parametrů nepodařilo udržet provedení vrstvy konzistentní mezi vzorky. Změnou některých parametrů (L_bias , sklon hořáku) se zdánlivě podařilo asymetrii snížit, ale zvýšení opakovatelnosti se nedosáhlo. Důvodem mohou být odlišné fyzikální vlastnosti při přítomnosti a nepřítomnosti svaru na druhé straně stojny, např. tepelné podmínky nebo elektrický odpor. Vliv těchto parametrů je možné prozkoumat v další závěrečné práci.

Shrnutí nejdůležitějších technologických doporučení pro svařování vícevrstevných svarů vyplývající z experimentální činnosti:

- dbát na co nejkvalitnější provedení kořenové vrstvy
- nejdůležitějším parametrem trasování je L_gain
- ve všech případech dbát na vhodné nastavení parametru V_gain
- „položení“ hořáku může zlepšit kvalitu trasování

- nadměrné „postavení“ hořáku může vést ke ztrátě schopnosti trasování
- při volbě offsetů pro systém Multipass je nutno používat správný souřadný systém (lze využít aplikaci Ofsetter)

Závěrem lze konstatovat, že oba přístupy k vytváření vícevrstevných svarů jsou v praxi použitelné. Jako efektivnější se jeví přístup za použití Multipass. Náročnost programování je v tomto případě vyšší. Během přípravy však postačuje kromě pomocných pozic do programu vložit pouze počáteční a koncovou pozici svařování kořenové vrstvy. Pozice dalších vrstev lze snadno a rychle upravovat pomocí offsetů přímo v programu bez nutnosti přepisování pozic. Výhodné je i rychlé nastavení natočení hořáku. Za použití Multipass navíc není kromě první vrstvy nutné používat rozkvy. V aplikacích, kdy není rozkvy např. pro zvětšení housenky vyžadován, je možné dosáhnout kratšího času svařování.

tab. 12 – srovnání přístupů

	TAST	SuperTAST	TAST + Multipass	SuperTAST + Multipass
použití pro vícevrstvé svary	ano	ano	ano	ano
náročnost programování	malá	malá	vyšší	vyšší
náročnost nastavení pozice housenky	vyšší	vyšší	nízká	nízká
nutnost použití rozkvy	pro všechny housenky	pro všechny housenky	jen pro kořenovou housenku	jen pro kořenovou housenku
možnost získat data o procesu trasování	ne	ano	ne	ano

Cíle bakalářské práce byly splněny v plném rozsahu.

Bibliografie

- [1] SHRESTHA, HILTUNEN a MARTIKAINEN. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering* [online]. 2015, 10(1), 16 [cit. 2021-02-02]. ISSN 1823-0334. Dostupné z: <https://ijmme.springeropen.com/articles/10.1186/s40712-015-0042-y>
- [2] SCHWAB, Gunther, Tyrone L. VINCENT a John P. H. STEELE. Contaminant Classification in Robotic Gas Metal Arc Welding via Image Based Spatter Tracking. In: *17th IEEE International Conference on Control Applications* [online]. San Antonio, 2008 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://ijmme.springeropen.com/articles/10.1186/s40712-015-0042-y>
- [3] Fanuc Ltd. - Company Profile, Information, Business Description, History, Background Information on Fanuc Ltd. *Reference for Business* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.referenceforbusiness.com/history2/32/Fanuc-Ltd.html>
- [4] FANUC's History. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.fanuc.co.jp/en/profile/history/index.html>
- [5] Fanuc Corp. *CNN Business* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://money.cnn.com/quote/forecast/forecast.html?symb=FANUY>
- [6] LINDER, Natan. Are We Inching Toward The Lights Out Factory?. *Forbes* [online]. 2020 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/natanlinder/2020/06/17/are-we-inching-toward-the-lights-out-factory/?sh=6887d36e59af>
- [7] Fanuc founder Inaba, king of industrial robots, dead at 95. *Nikkei Asia* [online]. 2020 [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://asia.nikkei.com/Life-Arts/Obituaries/Fanuc-founder-Inaba-king-of-industrial-robots-dead-at-95>
- [8] Introduction to Fanuc. *Fanuc* [online]. 2021 [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.co.jp/ja/profile/booklet/pdf/corporateprofile202103.pdf>
- [9] About Fanuc. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-06-30]. Dostupné z: <https://www.fanuc.co.jp/en/profile/index.html>
- [10] Spotlight: Where Fanuc's Robots Go, the Rest of Industry Follows. *Knowledge Leaders Capital* [online]. [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: <https://www.knowledgeleaderscapital.com/2018/08/16/spotlight-where-fanucs-robots-go-the-rest-of-industry-follows/>
- [11] Svařování elektrickým obloukem. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem>
- [12] Spot welding robots. *FANUC America* [online]. [cit. 2021-07-22]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/solutions/applications/welding-robots/spot-welding-robots>
- [13] *R-30iB Mate Controller: Maintenance Manual*. 2013. Interní manuál. FANUC.
- [14] ARC Mate 120iD. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-120id>
- [15] ARC Mate 120iD/12L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate->

[120id-12l](#)

- [16] ARC Mate 50iD. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-50id>
- [17] ARC Mate 50iD/7L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-50id-7l>
- [18] ARC Mate 100iD. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-100id>
- [19] ARC Mate 100iD/10L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-100id-10l>
- [20] ARC Mate 100iD/8L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/sva%5%99ov%3%a1n%3%ad-elektrick%3%bdm-obloukem/arcmate-100id-8l>
- [21] M-710iC/12L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/%c5%99ada-m-710/m-710ic-12l>
- [22] M-710iC/20L. *Fanuc* [online]. [cit. 2021-07-01]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%3%a1nka-filtru-robot%5%af/%c5%99ada-m-710/m-710ic-20l>
- [23] *Automa – časopis pro automatizační techniku: FlexArc – robotizované buňky pro obloukové svařování* [online]. 2014, [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/52819.pdf
- [24] ABB. *Sensor Based Adaptive Arc Welding* [online]. In: . Interní manuál. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://library.e.abb.com/public/8ca2d32ae35d123cc125799f00592be4/Sensor%20Based%20Adaptive%20Arc%20Welding%20White%20Paper.pdf>
- [25] KAH, Paul, Esa HILTUNEN a Jukka MARTIKAINEN. Sensing in Aluminum Alloy Welding. *Advanced Materials Research* [online]. 2013, **849**, 291-297 [cit. 2021-02-05]. ISSN 1662-8985. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/266672407_Sensing_in_Aluminum_Alloy_Welding
- [26] VAVREČKA, Jakub. Fakta a mýty o dotykovém vyhledávání při robotickém svařování. In: *MM Spektrum* [online]. 2009 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/fakta-a-myty-o-dotykovem-vyhledavani-pri-robotickem-svarovani.html>
- [27] HUBER, Scott. How Seam Tracking Solutions Compare. In: *Abicor Binzel Blog* [online]. 2020 [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://blog.binzel-abicor.com/how-seam-tracking-solutions-compare>

- [28] REGAARD, Boris, Stefan KAIERLE a Reinhart POPRAWE. Seam-tracking for high precision laser welding applications—Methods, restrictions and enhanced concepts. *Journal of Laser Applications* [online]. 2009, 21(4), 183-195 [cit. 2021-02-06]. ISSN 1042-346X. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/43808269_Seam-tracking_for_high_precision_laser_welding_applications-Methods_restrictions_and_enhanced_concepts
- [29] LEATH, Josh. Knowing When Welding Sensors Make Sense. In: Yaskawa [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/about/blog/knowning-when-welding-sensors-make-sense>
- [30] SCHERLER, Mark. Survey of Robotic Seam Tracking Systems for Arc Welding. In: *Robotics.org* [online]. [cit. 2021-02-05]. Dostupné z: <https://www.robotics.org/userAssets/riaUploads/Scherler.PDF>
- [31] Robotics: Joint Sensing Technologies. In: *Lincoln Electric* [online]. [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/intelligent-robotic-detail.aspx>
- [32] FANUC ROBOTICS. *Arc Welding Function: Operators Manual B-83284EN-3/04*. Interní dokument. FANUC.
- [33] *ArcTool Operator Manual MAROCARC708051E REV A: SuperTAST*. Interní dokument. FANUC.
- [34] *R-30iA ArcTool Operator Manual MAROC77AR01101E REV B: Multipass*. Interní dokument. FANUC.
- [35] ABB Introduces WeldGuide® III. *Association For Advancing Automation* [online]. 2010 [cit. 2021-07-05]. Dostupné z: <https://www.automate.org/news/abb-introduces-weldguide-iii-a-through-the-arc-seam-tracking-system-especially-for-abb-robotic-welding-systems>
- [36] *ABB Operating manual: Seam tracking with WeldGuide and MultiPass*. Interní dokument. ABB. 2012.
- [37] Weldguide IV. Interní dokument. ABB. 2019.
- [38] *KUKA.ArcSense 3.4*. Interní dokument. KUKA. 2021.
- [39] *KUKA.ArcTech Multilayer 3.4*. Interní dokument. KUKA. 2020.
- [40] *YASKAWA - YRC1000 OPTIONS: Instructions For Arc Sensor ComArc Function*. Interní dokument. Yaskawa-Motoman. 2020.
- [41] *Motoman NX100 Controller: Multi-Layer Welding Function Manual*. Interní dokument. Motoman. 2006.
- [42] World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers. *Market Research Reports* [online]. [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers>
- [43] ČSN EN ISO 5817: Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování): Určování stupňů kvality. Praha, 2014.
- [44] Dr. Seiueemon Inaba, the founder of FANUC, passed away at age 95. *SEISANZAI Japan* [online]. [cit. 2021-07-06]. Dostupné z: <https://seisanzai-japan.com/article/p2061/>

Seznam tabulek

tab. 1 – shrnutí robotů pro obloukové svařování.....	18
tab. 2 – výpis nejčastěji používaných systémových proměnných [33]	29
tab. 3 – shrnutí parametrů v kategorii obecných informací [33]	32
tab. 4 – popis parametrů v polohovém registru [34]	39
tab. 5 – vyhodnocované vady dle ČSN EN ISO 5817 [43].....	49
tab. 6 – svařovací proudy vzorku 01	50
tab. 7 – svařovací rychlosti vzorku 02	50
tab. 8 – parametry rozkyvu vzorku 03	51
tab. 9 – zvolené svařovací parametry kořenové housenky	52
tab. 10 – program TAST.....	53
tab. 11 – program Multipass	62
tab. 12 – srovnání přístupů.....	71

Seznam rovnic

rovnice 1.....	65
rovnice 2	65
rovnice 3	65

Seznam obrázků

obr. 1 – logo FANUC	11
obr. 2 – Seiueemon Inaba [44]	11
obr. 3 – značení a smysl os robotů FANUC [13]	14
obr. 4 – FANUC Arc Mate 120iD [14]	16
obr. 5 – ARC Mate 50iD [16]	16
obr. 6 – ARC Mate 100iD [18]	17
obr. 7 – M-710iC/20L [22]	17
obr. 8 – snímání bodovým laserovým paprskem	22
obr. 9 – snímání čárovým laserovým paprskem	22
obr. 10 – snímání rozptýleným světlem	23
obr. 11 – princip funkce systému TAST	24
obr. 12 – princip laterálního trasování	24
obr. 13 – zápis funkce rozkyvu	25
obr. 14 – příklad laterálního trasování vystředěného svaru	25
obr. 15 – příklad laterálního trasování nevystředěného svaru	26
obr. 16 – schéma zaznamenávaných bodů při vertikálním trasování	27
obr. 17 – princip vertikálního trasování	27
obr. 18 – nastavení parametru \$TASTHS.\$edge_side [33]	29
obr. 19 – výsledek analýzy [33]	30
obr. 20 – kategorie informací [33]	31
obr. 21 – obecné informace 1/2 [33]	32
obr. 22 – obecné informace 2/2 [33]	32
obr. 23 – celkový počet cyklů rozkyvu [33]	33
obr. 24 – vyhodnocení spolehlivosti trasování [33]	33
obr. 25 – výpis parametrů pro zvolený interval [33]	34
obr. 26 – výpis velikostí korekcí [33]	34
obr. 27 – vyhodnocení vzorků [33]	34
obr. 28 – souhrn vyhodnocených parametrů [33]	35
obr. 29 – vyhodnocení vhodného začátku cyklu [33]	35
obr. 30 – potvrzení automatické úpravy zpoždění [33]	36
obr. 31 – automatická úprava zpoždění [33]	36
obr. 32 – volba vlastní hodnoty zpoždění [33]	36
obr. 33 – princip RPM [34]	37
obr. 34 – schéma navařování [34]	38
obr. 35 – orientace souřadných os [34]	39
obr. 36 – umístění housenek na navařovaném vzorku [34]	40
obr. 37 – schéma svaru po úpravě parametru X [34]	41
obr. 38 – úhly sklonu hořáku při svařování	41
obr. 39 – prostředí WGView [36]	42
obr. 40 – rozmístění pracoviště	47
obr. 41 – ukázka vzorku pro svařování	48
obr. 42 – upnutí vzorku	48
obr. 43 – náčrt spoje	48
obr. 44 – měrka na koutové svary	49
obr. 45 – vzorek 01	50
obr. 46 – vzorek 02	50
obr. 47 – vzorek 03	51
obr. 48 – rozměry svaru 04	53

obr. 49 – vzorek 04.....	53
obr. 50 – rozměry svaru 05.....	54
obr. 51 – vzorek 05.....	54
obr. 52 – rozměry svaru 06.....	54
obr. 53 – vzorek 06.....	54
obr. 54 – rozměry svaru 07.....	55
obr. 55 – vzorek 07.....	55
obr. 56 – vzorek 08.....	56
obr. 57 – vzorek 09.....	56
obr. 58 – vzorek 10.....	56
obr. 59 – vzorek 11.....	56
obr. 60 – vzorek 12.....	56
obr. 61 – vzorek 13.....	57
obr. 62 – vzorek 14.....	58
obr. 63 – vzorek 15.....	58
obr. 64 – vzorek 16.....	58
obr. 65 – vzorek 17.....	58
obr. 66 – vzorek 18.....	59
obr. 67 – vzorek 19.....	60
obr. 68 – vzorek 20.....	60
obr. 69 – vzorek 21.....	60
obr. 70 – vzorek 22.....	61
obr. 71 – pozice housenek, svar 23.....	63
obr. 72 – vzorek 23.....	63
obr. 73 – souřadný systém pro offsety.....	64
obr. 74 – provedený výpočet.....	65
obr. 75 – vzorek 24.....	66
obr. 76 – kolize u vzorku 24.....	66
obr. 77 – vzorek 25.....	67
obr. 78 – vzorek 26.....	67
obr. 79 – vzorek 27.....	68
obr. 80 – vzorek 28.....	68

Přílohy

Příloha č. 1:	Souhrn nastavení podmínek svařování jednotlivých vzorků
Příloha č. 2:	Zdrojový kód aplikace Offsetter
Příloha č. 3:	Podklady pro ověření správnosti funkce aplikace Offsetter
Příloha č. 4:	Aplikace Offsetter