



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav strojírenské technologie

**SENZORY V ROBOTIZOVANÉM SVAŘOVÁNÍ
SENSORS IN ROBOTIC WELDING**

Diplomová práce

Praha 2019

Autor práce: Bc. Jaroslav Kus

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

Studijní program: VÝROBNÍ A MATERIÁLOVÉ INŽENÝRSTVÍ

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kus** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **437260**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Senzory v robotizovaném svařování

Název diplomové práce anglicky:

Sensors in robotic welding

Pokyny pro vypracování:

1. Rozdělení robotů v průmyslové praxi.
2. Základní principy metod svařování s ohledem na automatizaci.
3. Senzorické systémy používané ve svařování (druhy, princip).
4. Ověření vybraného senzoru pro robotizované MIG/MAG svařování.
5. Závěrečné zhodnocení zjištěných poznatků a doporučení pro praktické využití.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **05.08.2019**

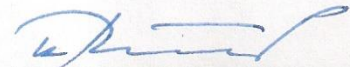
Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2019**



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

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

15. 5. 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D., IWE za cenné rady při zpracování této práce a umožnění práce se svařovacím robotem. Děkuji panu Aleši Marszalovi za ochotu a pomoc při porozumění TAST parametrům. Poděkování dále patří mé rodině za podporu a trpělivost během mého studia.



PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma: "SENZORY V ROBOTIZOVANÉM SVAŘOVÁNÍ" vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu použité literatury.

Ve Slaném, dne 23.07.2019.

Bc. Jaroslav Kus



ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora: Bc. Jaroslav Kus
Název DP: Senzory v robotizovaném svařování
Anglický název DP: Sensors in robotic welding
Vedení DP: Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
Rok: 2019

Anotace:

Hlavním předmětem diplomové práce jsou typy, principy a využití senzorů v robotizovaném svařování. V práci jsou popsány základní pojmy robotiky, ukázky konstrukcí robotů a nové trendy v oboru robotizovaného svařování. Dále se práce zaměřuje na metody svařování používaných pro svařovací roboty. Praktická část je soustředěna na systém TAST, který je testován v situacích lišících se ve velikosti a směru odchylky svařence od naprogramované dráhy.

Klíčová slova: Robotizované svařování, senzory, svařovací metody, TAST.
Rozsah práce: 77
Počet příloh: 2

Abstract:

The main subject of this diploma thesis is research in the field of types, principal and usage of robotic welding sensors. The thesis contains basics concepts of robotics, presentation of robotic kinematics and new trends in the field of robotic construction. There is also a summary of applicable welding methods. The experimental part is focused on testing the TAST sensor system.

Keywords: Robotic welding, sensors, welding methods, TAST.
Number of pages: 77
Attachments: 2



Obsah

Seznam symbolů a zkratk.....	8
1. Úvod.....	9
2. Cíle práce.....	9
3. Průmyslové roboty a manipulátory.....	10
3.1. Historie.....	10
3.2. Základní pojmy.....	10
3.3. Hlavní požadavky na roboty.....	13
3.4. Kinematika robotů a manipulátorů.....	14
3.4.1. Přímočaré roboty.....	14
3.4.2. Roboty SCARA.....	14
3.4.3. Kloubové roboty.....	15
3.4.4. Paralelní roboty.....	15
3.5. Největší výrobci průmyslových robotů.....	16
3.6. Přehled současných svařovacích jednotek.....	17
3.7. Nové trendy v robotizovaném svařování.....	22
3.7.1. Kolaborativní roboty ve svařování.....	22
3.7.2. Roboty se sedmou osou.....	24
3.7.3. Roboty s dutou první osou.....	25
4. Nejčastější metody v robotizovaném svařování.....	26
4.1. MIG, MAG.....	26
4.2. TIG.....	27
4.3. Plazmové svařování.....	29
4.4. Laserový paprsek.....	31
4.5. Odporové svařování.....	34
4.6. Třecí svařování promísením.....	35
5. Senzorické systémy používané v robotickém svařování.....	37
5.1. Primární funkce senzorů.....	37
5.1.1. Nalezení svaru (Seam finding).....	37
5.1.2. Sledování svaru (Seam tracking).....	38
5.1.3. Skenování dílu (Part scanning).....	38
5.2. Dotykové systémy.....	38
5.2.1. Vyhledávání pomocí drátu.....	38



5.2.2.	Vyhledávání pomocí hubice	39
5.2.3.	Taktilní snímače.....	39
5.3.	Bezdotykové systémy.....	40
5.3.1.	Kamery	40
5.3.2.	Laserové systémy	41
5.3.3.	Sledování elektrického oblouku (TAST).....	43
6.	PRAKTICKÁ ČÁST	51
6.1.	Popis experimentu	51
6.1.1.	Postup experimentu.....	51
6.2.	Popis pracoviště	52
6.3.	Příprava vzorků	53
6.4.	Svařovací parametry	54
6.5.	Upnutí.....	55
6.6.	Programování dráhy.....	56
6.7.	Průběh experimentu	57
6.7.1.	EXPERIMENT 1 – JK1.....	57
6.7.2.	EXPERIMENT 2 – JK2.....	57
6.7.3.	EXPERIMENT 3 – JK3.....	58
6.7.4.	EXPERIMENT 4 – JK4.....	59
6.7.5.	EXPERIMENT 5 – JK5, JK6, JK7	59
6.7.6.	EXPERIMENT 6 – JK8, JK8.5	60
6.7.7.	EXPERIMENT 7 – JK10, JK11, JK12	60
6.7.8.	EXPERIMENT 8 – JK13, JK14, JK15	62
6.7.9.	EXPERIMENT 9 – JK17.....	63
6.7.10.	Průběžné hodnocení výsledků	64
6.7.11.	EXPERIMENT 10 – JK13, JK16, JK18, JK19, JK21-26, JK28, JK29.....	65
6.7.12.	EXPERIMENT 11 – JK35, JK37, JK38, JK39, JK40, JK42, JK44.....	67
6.7.13.	EXPERIMENT 12 – JK45, JK46	69
6.7.14.	EXPERIMENT 13 – JK47	70
6.7.15.	EXPERIMENT 14 – JK34	71
7.	Závěrečné zhodnocení	72
8.	Seznam použité literatury	73
9.	Seznam příloh.....	77

Seznam symbolů a zkratk

Zkratka	Význam	Popis	Jednotky
CNC	Computer Numerical Control	Číslicové řízení pomocí počítače	-
MAG	Metal Active Gas	Obloukové svařování v aktivním plynu	-
MIG	Metal Inert Gas	Obloukové svařování v netečném plynu	-
GMAW	Gas Metal Arc Welding	Obloukové svařování v ochranném plynu	-
TIG	Tungsten Inert Gas	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou	-
WIG	Wolfram Inert Gas	= TIG (z německého názvu)	-
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	= TIG (z amerického názvu)	-
AC	Alternating Current	Střídavý proud	-
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud	-
CO ₂	Oxig uhličitý	-	-
Ar	Argon	-	-
He	Helium	-	-
R	Elektrický odpor	-	Ω
PAW	Plasma Arc Welding	Svařování plazmovým obloukem	-
LBW	Laser Beam Welding	Svařování laserovým paprskem	-
I _e	Intenzita ozáření	-	W·m ⁻²
N	Dusík	-	-
RSW	Resistance Spot Welding	Bodové odporové svařování	-
FSW	Friction Stir Welding	Třecí svařování promísením	-
Al	Hliník	-	-
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	-	-
TMAZ	Thermo-Mechanically Affected Zone	Tepelně-mechanicky ovlivněná oblast	-
HAZ	Heat Affected Zone	Tepelně ovlivněná oblast	-
Ra	Drsnost povrchu	-	-
I	Proud	-	A
m	Hmotnost	-	kg
Kobot	Kolaborativní robot	Robot fyzicky spolupracující s člověkem	-
TCP	Tool Center Point	Špička koncového efektoru (hořáku)	-

1. Úvod

V současnosti jsou průmyslové společnosti vystaveny silné mezinárodní konkurenci. Tato skutečnost přirozeně vede k zaváděním nových technologických a výrobních procesů za účelem zvýšení produktivity a kvality výroby. Technologie svařování zaručuje nejefektivnější způsob (z hlediska rychlosti výroby, kvality spojení, ekonomie) vytváření nerozebíratelných spojů.

Během svařování dochází vlivem vneseného tepla ke strukturním změnám materiálu v okolí svaru. Tepelně ovlivněná oblast může značně měnit mechanické vlastnosti, a tím snižovat celkovou kvalitu součásti. Vzhledem k celosvětovému trendu nedostatku kvalifikovaných pracovníků může být splnění technologického postupu problémem, který se projeví řadou vad ve svarech.

Robotickým svařováním, tedy automatizací svařovacího procesu, lze snížit chybovost na minimum, dosáhnout vyšší produktivity a kvality výroby. Robotické svařování je nejčastější aplikací robotů vůbec. Nejvýznamnějším odvětvím je přirozeně automobilový průmysl.

2. Cíle práce

Cílem diplomové práce je zmapování robotických systémů používaných pro automatizované svařování. Seznámit se, se základními pojmy v průmyslové robotizaci, výhodami a účelem celého odvětví. Vytvořit přehled v konstrukci robotů, předních výrobců a poukázat na nové trendy. Dalším důležitým krokem je seznámení s principy svařovacích metod vhodných pro automatizované svařovací prostředí. Hlavním účelem práce je vytvořit přehled v senzorce svařovacích robotů, seznámení se s využívanými druhy a popsat jejich princip.

Smyslem praktické části je seznámení se programováním svařovacího robota Fanuc ARC Mate 100iC a následně ověření funkce kontroly dráhy robota pomocí elektrického oblouku. Tato funkce se nazývá TAST a práce má za úkol prověřit možnosti jeho použití a metody nastavení (viz 6.1. Popis experimentu).

3. Průmyslové roboty a manipulátory

3.1. Historie

Významným krokem k automatizaci bylo založení pásové výroby automobilů Ford. To vedlo k většímu důrazu na normalizaci práce a rozkladu komplexních činností na základní pohyby. Zmíněné principy umožnily vznik sériové výroby. Následně, během druhé světové války, kdy nároky na produktivitu značně narostly, došlo k významnému vývoji v oblasti automatizace. Dalším významným milníkem byl vznik prvního počítače v USA roku 1945. K dalšímu rozvoji automatického řízení a jeho rozšíření dochází v 50. letech. Pánové Georg Devol a Joseph Engelberger zahájili vývoj prvního průmyslového robota v roce 1956. Výsledkem jejich práce byl robot Unimate 1900, který byl již v roce 1961 aplikován ve výrobě firmy General Motors. Vývoj robotů a jejich uplatnění ve výrobě rychle narůstal. V 80. letech dochází k silnému nasazování průmyslových robotů převážně ve výrobních linkách automobilových společností. Údajně bylo asi 25% průmyslových robotů použito pro obsluhu obráběcích strojů, 25% pro robotické svařování, 25% pro montáž a zbylých 25% pro další činnosti, například lakování [1, 2].

3.2. Základní pojmy

Pojem robot je celosvětově známý výraz, jenž byl poprvé použit v R.U.R. od Karla Čapka. Definice slova robot se obvykle liší v konkrétních oborech. Slovo robot je dle Websterova slovníku definováno následovně jako „*antropomorfní mechanická bytost postavená k rutinní manuální práci pro lidské bytosti.*“ Americký robotický institut definuje slovo robot jako „*reprogramovatelný multifunkční manipulátor navržený pro přenášení materiálu, součástí, nástrojů, nebo specializovaných zařízení, pomocí variabilně programovaných pohybů k provádění různých úkolů.*“

Pro výrobní roboty je zavedena norma ČSN ISO 8373 - Roboty a robotická zařízení – Slovník. V té je zaveden pojem průmyslový robot s následující definicí: *Průmyslový robot (PR) je automaticky řízený, reprogramovatelný, víceúčelový manipulační stroj, stacionární nebo umístěný na pojezdu, určený k použití v průmyslové automatizaci.*

Robotika je věda zabývající se roboty, jejich výrobou, využitím, bezpečností a vývojem. Tento obor lze dělit na část:

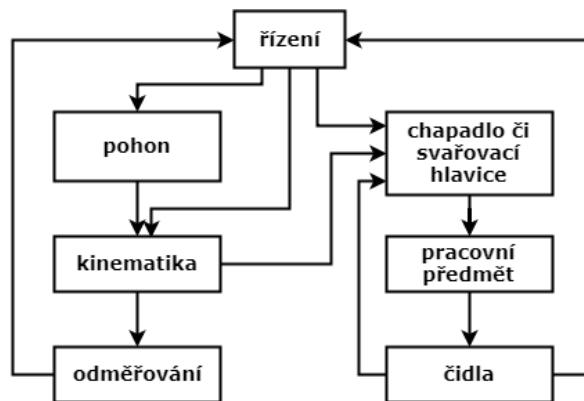
- Teoretickou – vývoj senzorů, navigačních a simulačních systémů, návrh nových koncepcí
- Technickou – vývoj konkrétních subsystémů, konstrukční řešení, provozní problematika
- Aplikační – začlenění robotů do výrobních systémů, projektování automatizovaných výrobních linek, tvorba programů, zkoumá efektivitu výroby [2]

Průmyslové roboty a manipulátory lze popsat jako programovatelná zařízení napodobující pohyby lidské ruky.

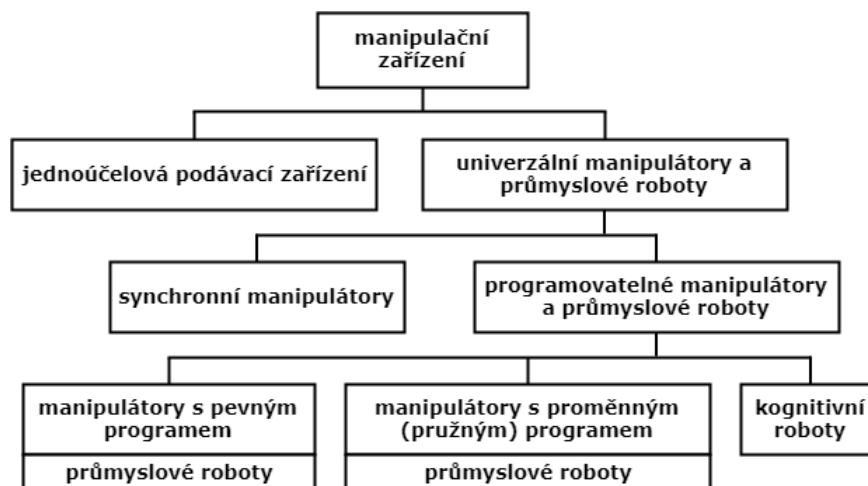
Manipulátor: strojně nebo ručně řízené manipulační zařízení s pevným programem.

Průmyslový robot: volně programovatelné manipulační zařízení s pohonem, řízením, výstupní hlavicí, senzory.

Svařovací robot: zajišťuje pohyb svařovací hlavice po naprogramované dráze za dodržení správné technologie svařování. Svařovací roboty se nacházejí v pružných automatizovaných linkách, nebo jako jednotlivá pracoviště spojená s manipulačním systémem [3].



Obr. 3.1 – Blokové schéma průmyslového robotu [3]



Obr. 3.2 - Rozdělení manipulačních zařízení [3]



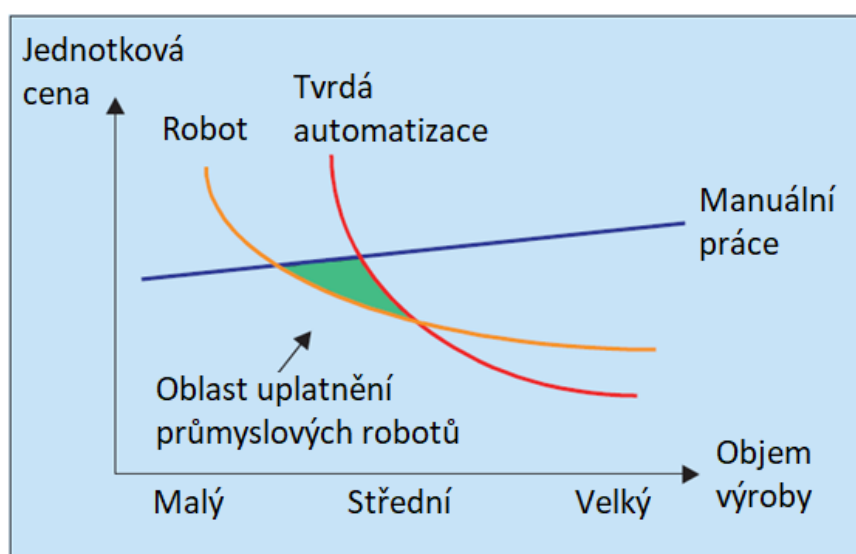
Tabulka 3.1 - Přehled norem pro průmyslová robotická zařízení

Norma	Popis
ČSN ISO 8373	Roboty a robotická zařízení – Slovník
ČSN EN ISO 10218-1	Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 1: Roboty
ČSN EN ISO 10218-2	Roboty a robotická zařízení – Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů – Část 2: Systémy robotů a integrace
ČSN EN ISO 9787	Manipulační průmyslové roboty – Souřadnicové systémy a terminologie pohybů
ČSN EN ISO 9409-1	Manipulační průmyslové roboty – Mechanická rozhraní – Část 1: Lící desky
ČSN EN ISO 9409-2	Manipulační průmyslové roboty – Mechanická rozhraní – Část 2: Hřídele
ČSN EN ISO 9946	Manipulační průmyslové roboty – Uvádění charakteristických vlastností

3.3. Hlavní požadavky na roboty

Automatizované svařování představuje oproti ručnímu nespočet výhod. Hlavními požadavky na průmyslové roboty jsou:

- **Zvýšení produktivity svařování, přesnosti:** Odstraněním lidského faktoru se výrazně sníží chybovost procesu, tedy se sníží čas potřebný pro opravy. Průmyslový robot pracuje velmi rychle, navíc lze uspořádat více jednotek do systému. V případě potřeby mohou pracovat bez přerušení.
- **Zvýšení kvality:** Optimalizací parametrů svařovacího procesu lze dosáhnout úplného odstranění nebo alespoň snížení poruchových veličin (např. kolísání délky oblouku, nerovnoměrná rychlost, špatná poloha hořáku).
- **Variabilita výroby:** Díky programovatelnosti lze robota využít při výrobě různých výrobků.
- **Zvýšení bezpečnosti:** Roboti mohou být použity v nepříznivých podmínkách, zvedat těžké předměty, nedělají nepředvídatelné pohyby. Oproti člověku není potřeba zavádět různá ergonomická řešení.
- **Snížení nákladů:** Obecně jsou robotické systémy cenově dostupné a jejich zavedením do výroby se sníží provozní (režijní) náklady (porovnání viz obr. 3.3). Zároveň je tato technologie ekologická a snižuje energetické nároky. Díky rychlosti výroby lze vyrábět dle objednávek, tudíž snížit náklady na skladování a manipulaci produktů. Snížením chybovosti se sníží náklady na materiál a opravy. Při minimalistické konstrukci robotických pracovišť lze snížit plochu nutnou pro výrobní proces [3, 4].



Obr. 3.3 - Porovnání výrobních metod, závislost cena/objem výroby (přeloženo) [5]

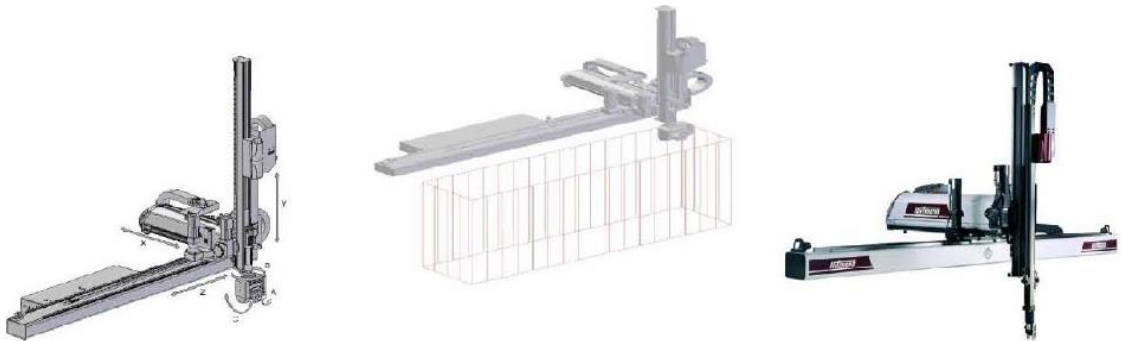
3.4. Kinematika robotů a manipulátorů

Průmyslové roboty jsou charakterizovány svou kinematikou. Kinematika určuje princip, na kterém robot funguje a zároveň udává jeho pracovní možnosti. Kinematické schéma každého robota lze vyjádřit třemi složkami:

- Kinematika základu (stacionární, pohyblivé)
- Kinematika polohovacího ústrojí (mechanická ruka)
- Kinematikou orientačního ústrojí (výstupní hlavice) [3]

3.4.1. Přímočaré roboty

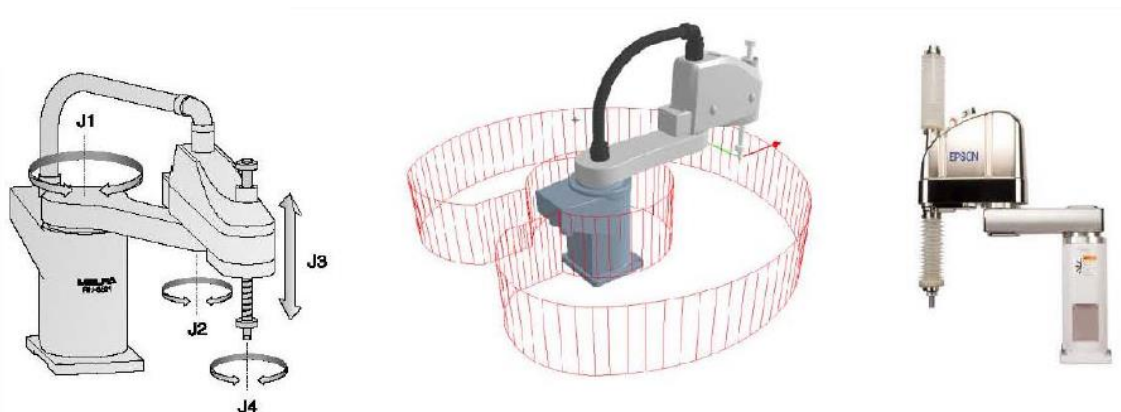
Dále označované jako karteziánské či portálové, se vyznačují třemi prismatickými spoji, jejichž osy využívají kartézský souřadný systém [6].



Obr. 3.4 - Přímočarý robot (kinematika, pracovní prostor, model) [7]

3.4.2. Roboty SCARA

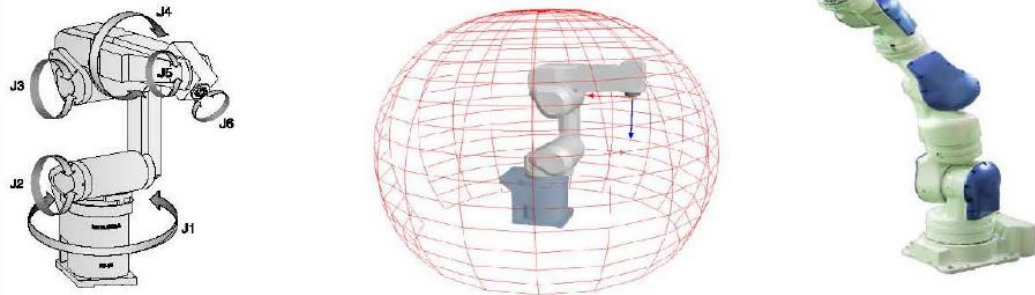
Roboty SCARA se vyznačují dvěma rovnoběžnými klouby fungující v jedné rovině. Využívají se převážně pro montážní práce. Oproti přímočarým robotům jsou obvykle rychlejší a zabírají menší plochu [6].



Obr. 3.5 - Robot SCARA (kinematika, pracovní prostor, model) [7]

3.4.3. Kloubové roboty

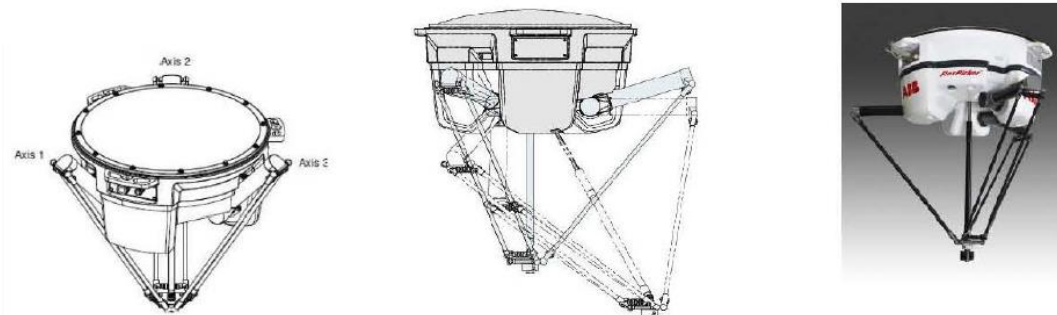
Roboty s rotačními spoji mají běžně čtyři, šest, a nově dokonce i sedm os. Jejich využití je velice univerzální. Dle příslušenství se dají použít pro balení, manipulaci, paletizaci nebo například svařování [6].



Obr. 3.6 - Kloubový robot (kinematika, pracovní prostor, model) [7]

3.4.4. Paralelní roboty

Paralelní neboli roboty DELTA jsou díky spojení paralelogramů schopny vykonávat jemné a přesné pohyby [6].



Obr. 3.7 - Paralelní robot (kinematika, pracovní prostor, model) [7]

3.5. Největší výrobci průmyslových robotů

Fanuc Corporation je japonská společnost založená v roce 1956. Produkty společnosti jsou robotické systémy, CNC systémy a řešení automatizace výroby. Výrobky Fanuc, podobně jako ABB, navyšují efektivitu, spolehlivost a produktivitu. Kapacita výroby je až 5000 robotů měsíčně. S celkovou instalací přes 450 000 robotů se řadí na první místo v žebříčku nejvýznamnějších výrobců průmyslových robotů [8, 10].



Obr. 3.8 - Logo Fanuc [11]

Portfolio Fanuc: Kolaborativní roboty, svařovací roboty, roboty malých i velkých velikostí, paletizační roboty, lakovací roboty, CNC frézky, vstřikovací lisy [8].

ABB Ltd. je vedoucím dodavatelem průmyslových robotů, softwaru a příslušenství pro roboty. Společnost dále nabízí řešení automatizačních projektů. Pyšní se nejrozvinutější servisní sítí a instalací přes 300 000 robotů po celém světě. ABB neustále navyšuje energetickou účinnost, spolehlivost a produktivitu průmyslových robotů.



Obr. 3.9 - Logo ABB [9]

Portfolio ABB: návrh kontrolních místností, pohony, výrobky nízkého, středního a vysokého napětí, měření a analýza, roboty, automatizace výrobních procesů [8].

Yaskawa Electric Corporation je společnost známá především jako výrobce motorů. Nicméně v současnosti značně posiluje trh v oblasti podnikání se servomotory, regulátory, pohony střídavého proudu a průmyslové roboty. Oblast podnikání zaměřená na průmyslové roboty je známá pod značkou Motoman. Celkový počet instalovaných průmyslových robotů se shoduje s firmou ABB, tedy počtem 300 000. Tím se s ABB dělí o druhé místo v celosvětovém žebříčku [8, 10].



Obr. 3.10 - Logo Yaskawa Motoman [12]

Portfolio Yaskawa: AC pohony, servomotory, zařízení pro úsporu energie, navrhování průmyslových řešení, roboty pro svařování, lakování a manipulaci [8].

Kawasaki Robotics je dalším z předních dodavatelů průmyslových robotů a automatizačních systémů. Společnost poskytuje svým zákazníkům zvyšování produkce, kvality a zlepšení pracovních prostředí. S počtem 110 000 instalovaných robotů se řadí za firmy ABB a Yaskawa, tedy na třetí místo největších výrobců průmyslových robotů [8, 10].



Obr. 3.11 - Logo Kawasaki Robotics [13]

Portfolio Kawasaki: roboty zaměřené na lékařské a farmaceutické aplikace, roboty SCARA s dvěma rameny, čistící roboty, roboty pro manipulaci velmi těžkých nákladů, svařovací roboty [8].

Další významní výrobci jsou zobrazeni v tabulce 3.2.

Tabulka 3.2 - Přehled deseti největších výrobců průmyslových robotů (počet instalovaných robotů v tisících ks) [10]

1.	2.		3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Fanuc	ABB	Yaskawa	Kawasaki	Nachi	Denso	Kuka	Mitsubishi	Epson	Staubli
450	300	300	110	100	95	80	70	55	45

3.6. Přehled současných svařovacích jednotek

Z hlediska plnění bezpečnostních norem jsou svařovací roboty umísťovány do pracovních buněk. Výrobci robotů nabízejí svým zákazníkům různá řešení od jednoduchých svařovacích jednotek až po komplexní systémy.

Robotické svařovací buňky se skládají ze samotných svařovacích přístrojů, polohovacích zařízení, bezpečnostních prvků a dalšího nutného příslušenství:

- **Svařovací robot:** Obvykle šestiosý kloubový s pevnou podstavou či s pojezdem nebo přímočarý robot mostové konstrukce.
- **Svařovací jednotka:** Svařovací zdroj zajišťuje energii pro hořák. Liší se velikostí, výkonem a typem svařovací technologie.
- **Hořák:** Hořák přivádí ochranný plyn a plnicí drát do místa svaru. Mezi drátem a základním materiálem vzniká elektrický oblouk. Hořáky pro robotizované svařování bývají nejčastěji chlazené kapalinou.
- **Podavač:** Dodává přídatný materiál do hubice a zajišťuje vysoké rychlosti podávání drátu, které se pohybují v rozmezí dvacet až třicet metrů za minutu.



- **Čistič:** Obsahuje nástroje typu zastříhovač drátu, kartáč, fréza. Slouží k začištění svařovacího zařízení, odstranění rozstříku na hubici atd. Účelem je zvýšit životnost součástek.
- **Pracovní prostor:** V pracovní prostor je vymezen bezpečnostními prvky (závora). Nachází se v něm polohovadlo se svorkami, na které se upevňuje svařenec. Polohovadlo a jeho pohyby jsou přímo koordinovány řídicí jednotkou robotu.
- **Řídicí jednotka:** V řídicí jednotce jsou uchovávány programy a veškeré informace, kterými se robot řídí.
- **Ovládací panel:** Ruční panel s monitorem a ovládacími prvky. Prostřednictvím toho panelu operátor nastavuje svařovací parametry, ručně manipuluje s robotem a učí nové dráhy.
- **Kontrolní panel:** Pevný panel obsahující ovládací prvky jako START, STOP a RESET, ale i tlačítka pro každou funkci robota.
- **Výstražné světlo:** Jasně viditelná světelná kontrolka indikující současný stav robotického pracoviště. Obecně mají barvy význam, že červená značí nouzové zastavení, poruchu, kolizi nebo narušení pracovního prostoru pracovníkem, oranžový signál říká, že je robot naprogramován a připraven k práci, zelená znamená, že robot běží v automatickém režimu.
- **Bezpečnostní prvky:** Zajišťují jednotlivá pracoviště, tak aby vyhovovaly bezpečnostním normám. Účelem je zamezit zranění pracovníků či poškození stroje. U svařovacích buněk se běžně nacházejí prvky jako závory či oplocení, ochrana zraku tedy stínění elektrického oblouku nebo například odsávání výparů [23].

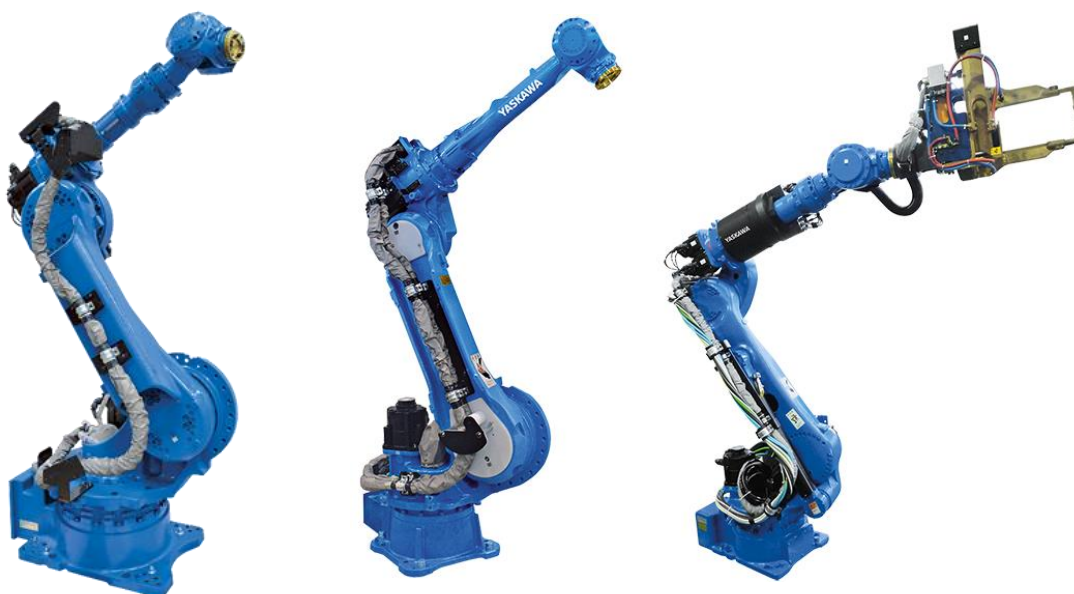
Pro správnou volbu robotu se na prvním místě nabízí pracovní rozsah robotu a jeho užité zatížení. Tyto údaje výrobci také používají při třídění jejich sortimentu. Například společnost Yaskawa nabízí tři řady robotů pro obloukové, bodové a laserové svařování.

Řada MA – určená pro svařování elektrickým obloukem, užité zatížení do 10 kg, rozsah 2010 mm.



Obr. 3.12 - Roboty Yaskawa řady MA (vlevo MA1440, vpravo MA2010) [24]

Řada MC – využívány zejména pro laserové aplikace, užité zatížení 50 kg, rozsah 2038 mm.



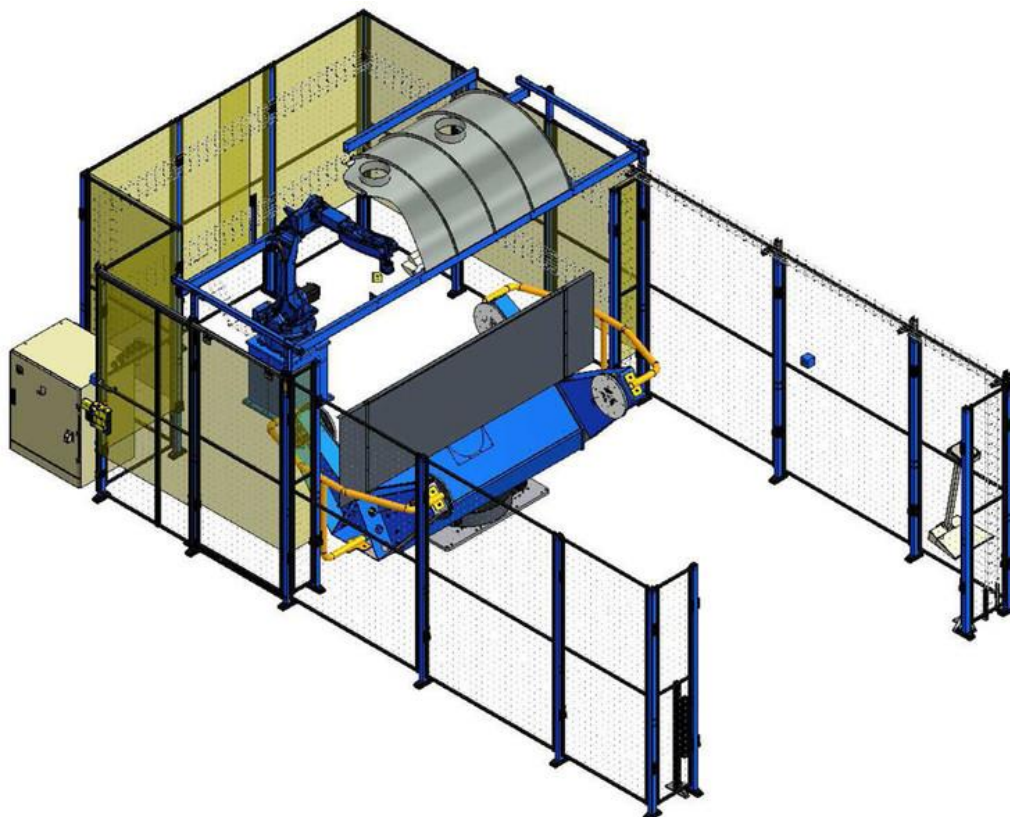
Obr. 3.13 – Zleva Robot Yaskawa MC2000II, MS80WII, MS165 s hlavou pro bodové svařování [24]

Řada MS – roboty využívané díky velké nosnosti převážně pro bodové svařování, užité zatížení 80 až 210 kg, rozsah 2236 až 2702 mm [24].

Níže zmíněné svařovací buňky nabízejí výrobci již jako hotové celky nebo navrhují systémy přímo dle požadavků zákazníka.



Obr. 3.14 - Kompaktní robotická svařovací buňka MOTO-Compact RVE [25]



Obr. 3.15 - Robotická buňka ArcSystem VMH-500CDD určená pro vysoce výkonné obloukové svařování [25]



Obr. 3.16 - Výuková svařovací robotická buňka firmy FANUC se svařovacím zdrojem Lincoln Electric [26]

3.7. Nové trendy v robotizovaném svařování

3.7.1. Kolaborativní roboty ve svařování

Kolaborativní (spolupracující) roboty neboli zkráceně koboty (cobots) jsou průmyslové roboty navrhované pro spolupráci s člověkem v rámci jednoho pracoviště. První kolaborativní robot, označovaný jako zařízení pro přímou interakci mezi člověkem a počítačem ovládaným manipulátorem, se objevil v roce 1996. Jedním z prvních dodavatelů se v roce 2004 stala společnost Kuka [27]. V současnosti nabízejí kolaborativní roboty všichni významnější výrobci, například v roce 2015 uvedla na trh svého prvního kobota firma Fanuc (obr. 3.17).



Obr. 3.17 - První kolaborativní robot FANUC CR-35iA s užitným zatížením až 35 kg [30]

Díky svým bezpečnostním funkcím mohou provádět úkony v přímé blízkosti člověka. Kolaborativní roboty mají v každém kloubu zabudované senzory momentu síly sledující i ty nejmenší síly působící na robota. Zajímavé řešení nabízí firma Fanuc, kdy bezpečnostní senzory jsou v podstavci robota. To způsobí, že v případě kolize a výskytu abnormálních sil se robot ihned zastaví a nezpůsobí žádné zranění či poškození, proto se také označují jako silou omezené roboty (force limited robots). Na rozdíl od běžných průmyslových robotů tedy mohou pracovat v otevřených prostorech bez bezpečnostních prvků jako například oplocení [28]. "Nejmodernější roboty mají ve své výbavě také funkce vidění, včetně snímače 3D strojového vidění, které umožňují robotu sbírat různé typy výrobních součástí a vkládat je do rukou lidského pracovníka." [29]. Na první pohled se kolaborativní roboty liší svým vzhledem. Mají zaoblenější tvary z důvodu rozložení sil při kolizi na širší plochu. Dále obsahují polstrované a měkčené části. Dochází tedy ke snížení tlaku působícího na kolizní předmět nebo osobu.

Další charakteristickou vlastností kobotů v porovnání s běžnými průmyslovými roboty je jejich zjednodušené programování. Většinu lze naučit svou trajektorií v uživatelsky přívětivém prostředí pomocí demonstrace pohybů a nastavení konkrétní funkce v daném bodě. Také díky absenci objemných bezpečnostních prvků je implementace do výrobních procesů mnohem rychlejší [28].

O kolaborativních robotech se většinou mluví jako o manipulátorech. Nicméně v roce 2017 se objevuje první kombinace spolupracujícího robota a svařovacího zařízení. Dánský výrobce svařovacích zdrojů Migatronic spojil své výrobky se společností Universal Robots sídlící také v Dánsku. Výsledkem je kolaborativní svařovací robot s názvem CoWelder, který splňuje definice kolaborativních robotů – bezbariérový přístup, rychlá implementace do výroby a snadná programovatelnost. Nicméně je stále nutné mít na mysli rizika svařování achránit zrak, zajistit odsávání či zástěny. Migatronic CoWelder (obr. 3.18) kombinuje robota UR-5 (rozsah 850 mm, nosnost 5 kg) nebo UR-10 (rozsah 1300 mm, nosnost 10 kg) se zdroji MIG/MAG a TIG [31]. Využití kolaborativního svařovacího robota se nabízí ve společnostech s kusovou výrobou.

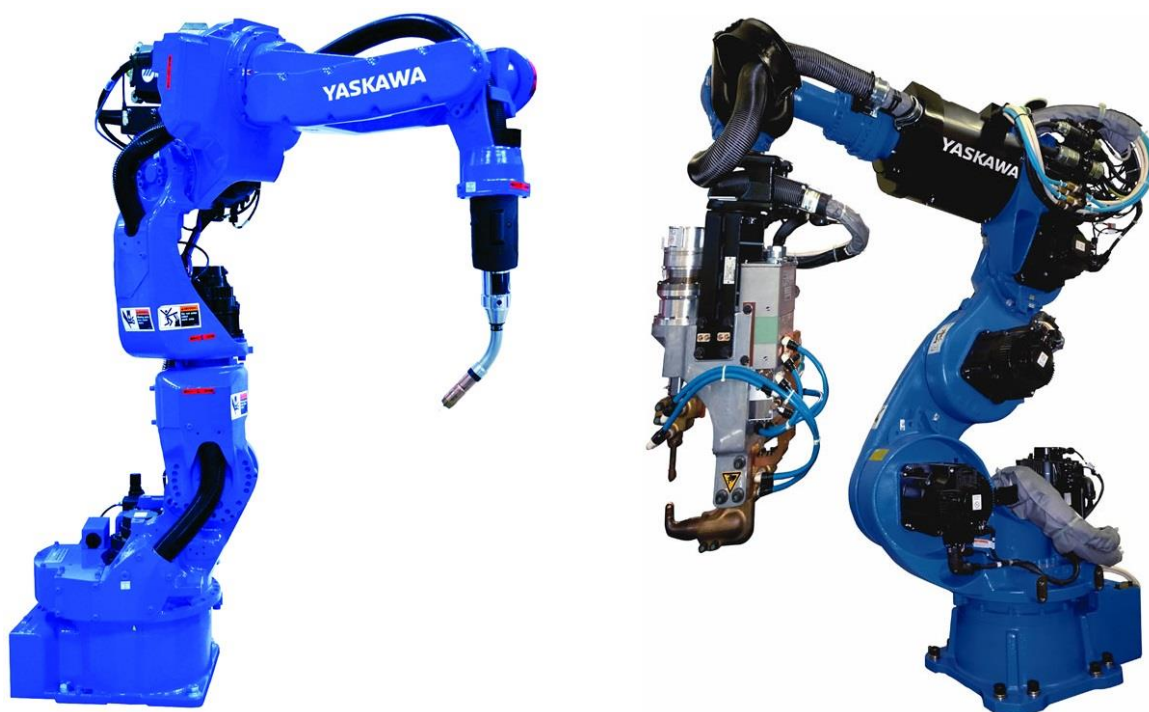


Obr. 3.18 - Migatronic CoWelder [31]

3.7.2. Roboty se sedmou osou

Dosavadním řešením pro aplikaci robotických pracovníků ve stísněných podmínkách bylo využití robota s krátkými rameny, což mělo za následek snížení rozsahu robota. Proto se v posledních třech letech začaly objevovat roboty s přidanou sedmou osou. Sedmá osa umožňuje umístit robota blíže k pracovnímu bodu, aniž by se zhoršily další vlastnosti.

Přidanou sedmou osu na robotech značky Fanuc a Motoman lze nalézt na druhém rameni. Robot VA1400-II značky Motoman má druhé rameno rozděleno horizontálně. Kontrukce od společnosti Motoman výrazně zvyšuje možnosti pohybu a je tak snadnější udržet při svařování správnou polohu [32]. Další řešení nabízí model VS100, který využívá kloub vertikální (viz obr. 3.19).



Obr. 3.19 - Roboty Motoman, vlevo VA1400-II [32], vpravo VS100 [33]

Firma Fanuc nabízí robota se stejným řešením jako Motoman VS100. Použila tedy vertikální kloub. Z běžného sériového modelu řady R-1000iA se tak stal model R-1000iA/120F-7B. Výhoda tohoto řešení je, že rameno se může zkrátit a pracovat tak ve stísněných podmínkách, aniž by robot ztratil pracovní rozsah. Důležité je, že při porovnání šestiosé a sedmiosé verze vyšly stejné výsledky pro dobu cyklu a opakovatelná přesnost byla u obou verzí $\pm 0,2$ mm [34].



Obr. 3.20 - Roboty Fanuc, vlevo šestiosý R-1000iA130F [35], vpravo sedmiosý R-1000iA/120F-7B [36]

3.7.3. Roboty s dutou první osou

Nová konstrukce svařovacích robotů umožňuje protažení svařovacího zařízení první osou robota. Kompaktnější skladba příslušenství tak brání v nežádoucím kontaktu robota s dalšími předměty. Roboty jsou tak vhodnější pro prostorově omezené svařovací buňky [11]. Obr. 3.21 nabízí porovnání nové konstrukce robota Fanuc s fotografií školního robota s okolní kabeláží a příslušenstvím (vlevo).

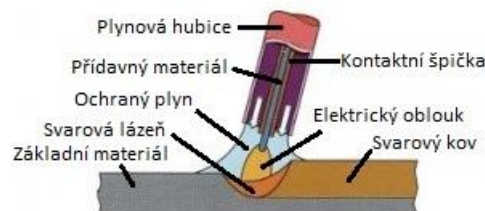


Obr. 3.21 - Porovnání robota bez duté osy (vlevo) a konstrukce s dutou první osou (vpravo) [11]

4. Nejčastější metody v robotizovaném svařování

4.1. MIG, MAG

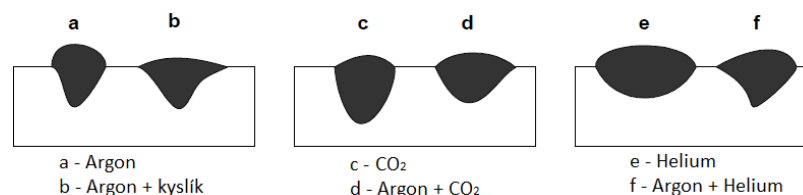
MIG/MAG jsou metody obloukového svařování v ochranné atmosféře plynu (GMAW – Gas Metal Arc Welding), kde hoří oblouk mezi tavící se elektrodou a svařovaným materiálem. Používají se zdroje stejnosměrného proudu tak, že kladný pól je připojen na elektrodu a záporný pól na svařenec. Oblouk je během svařování chráněn plynem, který má vliv na stabilitu oblouku, přenos kovu, tvar svarové housenky a rychlost tavení, množství vneseného tepla, pórovitost – obecně tedy kvalitu svaru. Tavící elektrodou je drát v podobě cívky v zásobníku. Do svařovací hubice je dopraven pomocí podavačů. Metody se tedy rozlišují dle druhu použitého plynu [3, 14].



Obr. 4.1 - Princip svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře MIG/MAG [15]

Použití vhodné metody se liší dle svařovaného materiálu. Pro lehké kovy a jejich slitiny (hliník, měď, nikl) a reaktivní materiály se využívá inertního (netečného) plynu. Plyn zamezením přístupu vzduchu zajišťuje čistotu svarové lázně a chrání ji před oxidací. Nejčastěji používanými inertními plyny jsou argon, helium a jejich směsi. Při použití těchto plynů se jedná o svařování metodou MIG – **Metal Inert Gas**.

Pro svařování převážně nelegovaných ocelí se přivádí jako ochrana plyn aktivní. U ocelí s vyšším stupněm legování je nutné zvyšovat poměr inertní složky v ochranném plynu. Plyn opět zajišťuje čistotu lázně, zároveň ale reaguje se svařovaným kovem, čímž může pomáhat tavnému procesu (například umožňuje velkou hloubku průvaru). Jako aktivní plyny se používá čistý oxid uhličitý CO_2 nebo jeho směs s argonem. Při použití zmíněných plynů se jedná o svařování metodou MAG – **Metal Active Gas** [14, 15].



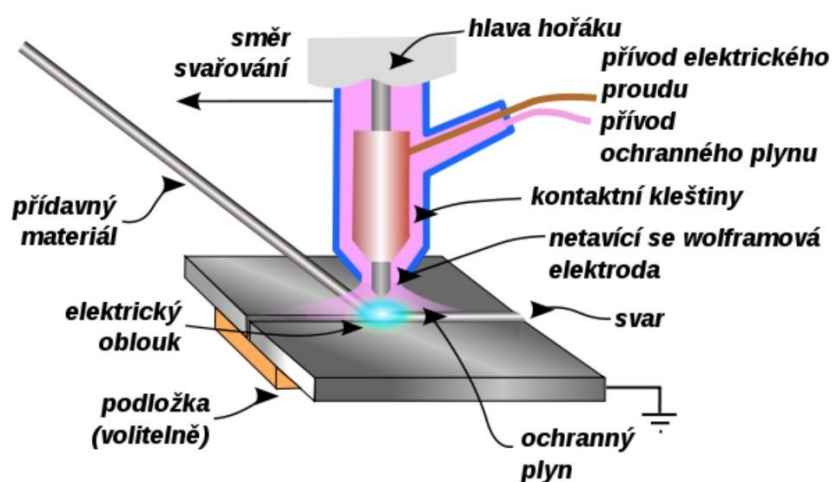
Obr. 4.2 - Vliv ochranných plynů na geometrii svaru (přeloženo) [14]

Tabulka 4.1 - Výhody a nevýhody MIG/MAG [14, 15]

Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none"> • svařování téměř všech kovů • svařování plechů tloušťky od 1 mm • svařování ve všech polohách • vysoká rychlost • nižší nároky na očištění svaru • jasná viditelnost oblouku i lázně • menší deformace po svaření 	<ul style="list-style-type: none"> • náchylné na větrné podmínky (rozptýlení ochranných plynů) • velikost svařovací hubice (náročná práce ve stísněných podmínkách) • důraz na technologičnost (ochranný plyn, rychlost podávání drátu, stabilita oblouku atd.)

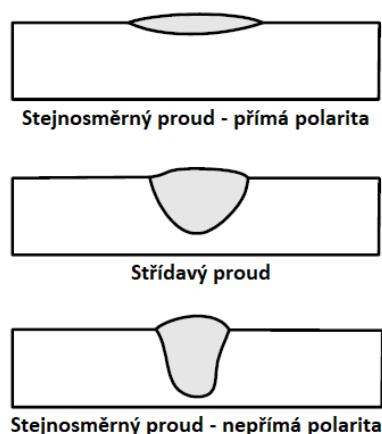
4.2. TIG

Tato metoda známá pod anglickou zkratkou TIG (Tungsten Inert Gas), německou zkratkou WIG (Wolfram Inert Gas) nebo v Americe označována jako GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). Jedná se o svařování elektrickým obloukem, kde oblouk hoří mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem. Oblouk je během svařování chráněn, ale tentokrát výhradně inertním plynem (argon, helium a jejich směsi). Metodu TIG lze využít téměř pro všechny kovy, nicméně nejčastěji se s touto metodou setkáme při svařování hliníku, korozivzdorných ocelí, slitin titanu a chromu. Metoda TIG umožňuje dobrou kontrolu nad svarovou lázní a přísunem přídavného materiálu. Dále je možné svařovat zcela bez přídavného materiálu, například u lemových spojů. Takto se nevnese žádné další prvky a udrží se čistota svarové lázně. Metoda TIG obecně zajišťuje vysoce kvalitní spoje. Tato metoda může využívat zdroj stejnosměrného, střídavého i impulzního proudu [3, 14].


Obr. 4.3 – Princip svařování metodou TIG [16]

Zdroj stejnosměrného proudu (DC) v přímém zapojení (elektroda záporný pól, svařenec kladný pól) lze použít pro všechny typy ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Výhodou je nerovnoměrné rozdělení tepla, přibližně 66 % celkového tepla oblouku připadá na svařenec. Díky tomu lze dosáhnout hlubšího průvaru a zároveň elektroda není tepelně přetěžována. Při správném poměru ochranného plynu (min. 75 % helium, zbytek argon) lze přímým zapojením svařovat i hliník [3, 14].

Zdroje střídavého proudu (AC) se využívají pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Hlavní výhoda střídavého proudu spočívá v čistícím efektu, přičemž se rozpadá povrchová vrstva oxidů Al_2O_3 . Hloubka průvaru u střídavého proudu se pohybuje mezi přímým a nepřímým zapojením u proudu stejnosměrného viz obr. 4.4 [3, 14].



Obr. 4.4 - Vliv elektrického proudu na hloubku průvaru u metody TIG (přeloženo) [14]

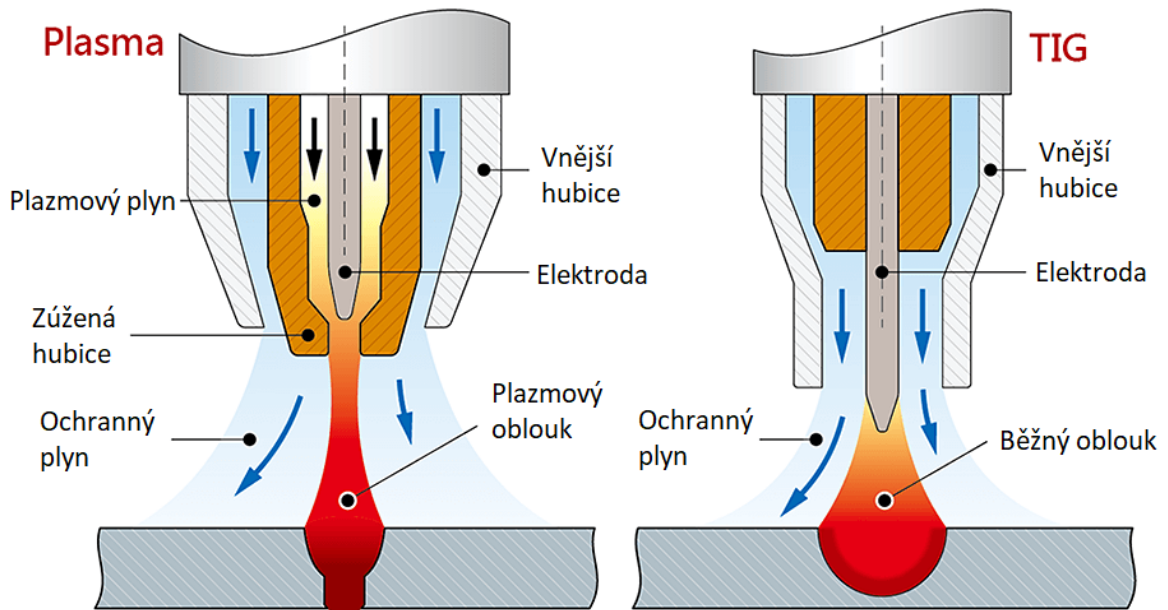
Impulzní proud je další variantou TIG. Intenzita proudu se mění mezi základním a impulsním proudem. Základní proud pouze ionizuje oblast oblouku a impulsní proud natavuje materiál. Při používání impulzního proudu lze velice přesně regulovat svařecí proces. Tepelně ovlivněná oblast je malá a materiál neztrácí mechanické vlastnosti [3]. Impulzní proud s nízkou frekvencí (1-10 Hz) se využívá pro snížení deformací po svaření. Nejčastější využití je u korozi-vzdorných ocelí. Impulzní proud s vysokou frekvencí (5-30 kHz) zvyšuje stabilitu oblouku, hloubku průvaru, rychlost svařování a snižuje pórovitost. Tento způsob je často uplatňován pro robotické svařování [14].

Tabulka 4.2 - Výhody a nevýhody TIG [14, 16]

Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none"> • svařování téměř všech kovů • varianty zdrojů proudu • vysoká kontrola nad svarovou lázní • kvalitní spoje • malé deformace a rozstřík • svařování s přídavným i bez přídavného materiálu 	<ul style="list-style-type: none"> • menší produktivita • obecně náročnější technologie než MIG/MAG • technická náročnost zařízení • méně ekonomické • vyšší citlivost na nečistoty v přídavném i základním materiálu

4.3. Plazmové svařování

Plazma je částečně ionizovaný plyn, vznikající při průchodu elektrickým obloukem. Zdrojem tepla pro ionizaci plynu je elektrický oblouk nízkého proudu mezi elektrodou a zúženou hubicí. Zúžením plazmy v hubici se zvyšuje její teplota, stupeň ionizace a elektrická vodivost. Přenosový plazmový oblouk mezi elektrodou a svařovaným materiálem dosahuje teplot až 11 000°C. Svařování plazmou (PAW – Plasma Arc Welding) navazuje na TIG, využívá se také netavící se wolframová elektroda a inertní plyn, ale liší se konstrukcí hořáku viz obr. 4.5. Jako ochranné plyny se používají argon nebo helium [3, 20, 21].


Obr. 4.5 - Porovnání PAW a TIG (přeloženo) [22]

PAW dosahuje v porovnání s TIG vyšších rychlostí, energie a efektivity. Dále lze dosáhnout silného průvaru. Znečištění wolframové elektrody je díky zapuštění minimalizováno a prodlužuje se její životnost. Plazmový paprsek vykazuje větší průměr než laserový, a nevyžaduje takové nároky na opracování či malé velikosti svarových mezer. Svařitelnost materiálů je také podobná jako u

metody TIG a je možné svařovat s přídavným nebo bez přídavného materiálu [3, 21].

Obvykle se využívají dva režimy PAW. Běžný tavný proces používá nižší proudy v rozsahu 1-200 A, méně zúžený oblouk a nižší průtok plazmového plynu. Vytváří svarovou lázeň podobnou metodě TIG. Tento typ se využívá pro svařování plechů. Svařování s proudem pod 30 A se označuje jako mikroplazmové svařování, kterým se svařují kovové fólie v rozsahu tloušťky 0,01 až 2 mm [3, 21].

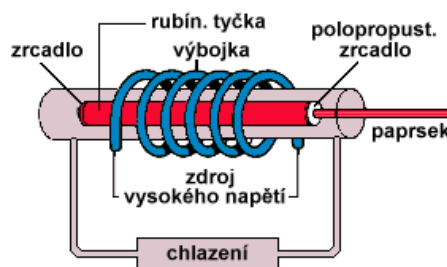
Režim klíčové dírky (keyhole welding) používá vyšší proudy, oblouk je více zúžen a je zvýšený průtok plynu. Vytváří se otvor skrz celou tloušťku materiálu (obvykle se tloušťka materiálu pohybuje v rozmezí 3 až 12 mm) a při pohybu svařovací hubice se kov za otvorem slévá a tuhne. Režim klíčové dírky PAW může využívat přímý proud, pulzní proud nebo lze uplatnit zapojení s proměnlivou polaritou. PAW nachází silné uplatnění v automobilovém a leteckém průmyslu [21].

Tabulka 4.3 - Výhody a nevýhody PAW [3, 21, 22]

Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none">• svařování téměř všech kovů• produktivita• přesnost a kvalita svaru• dobrý průvar a tvar svaru• mechanické vlastnosti spoje• svařování s přídavným i bez přídavného materiálu	<ul style="list-style-type: none">• velikost svařovací hubice• komplexnější a finančně náročnější technologie• náročnější seřízení parametrů svařování

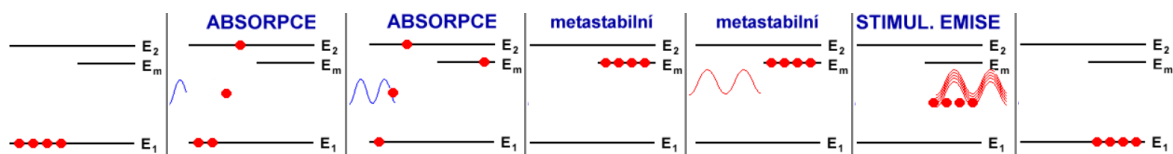
4.4. Laserový paprsek

Svařování laserovým paprskem (LBW – Laser Beam Welding) je jedna z nejmodernějších a neproduktivnějších svařovacích metod. Laserové svařování lze snadno automatizovat, proto nalézá nejširší zastoupení v automobilovém průmyslu. Svařitelnost touto metodou je podobná jako u metody TIG, ale díky vysokým teplotám lze svařovat i materiály jako wolfram, titan, molybden či tantal. LASER je akronymem *“light amplification by stimulated emission of radiation”*, neboli zesílení světla stimulované emisí záření [3]. Úkolem laserového přístroje je získat zesílené světlo elektromagnetickým zářením na látky, jejichž atomy obsahují metastabilní hladinu E_m (např. rubín).



Obr. 4.6 - Schéma laseru s rubínovým médiem [17]

Fotony (v obyčejném světle výbojky) ozáří atomy dané látky na energetické hladině E_1 . Tyto atomy absorbují fotony, zvýší svou energii a přeskočí na vyšší energetickou hladinu E_2 . Z hladiny E_2 okamžitě padají na E_m , kde atomy vydrží dostatečně dlouhou dobu, než přiletí další foton. Ten vrátí všechny excitované atomy z hladiny E_m na E_1 , tyto atomy přitom koordinovaně vyloučí přebytek energie – ve formě dalších fotonů viz obr. 4.7 [3, 17].



Obr. 4.7 - Princip zesílení světla stimulovanou emisí záření [17]

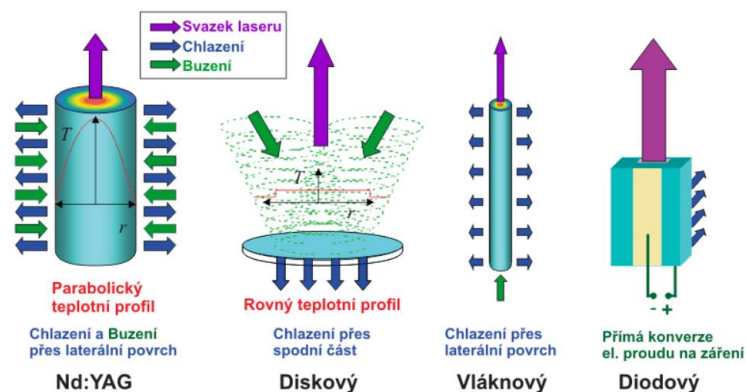
Dále dochází k usměrnění fotonů pomocí optického rezonátoru, skládajícího se ze zrcadla se 100% odrazivostí a polopropustného zrcadla s 80-90% odrazivostí [3]. Fotony se odrážejí od zrcadel, a tím stimulují další excitované atomy. Intenzita světla narůstá až do chvíle, kdy polopropustné zrcadlo neudrží nahromaděnou energii – vypustí laserový paprsek [17]. Pro svařování jsou nejčastěji používány tzv. pevnolátkové lasery. Nd:YAG je v současnosti nejoblíbenější typ. Jeho médiem je krystal Yttrium Aluminium Granátu, na který dopadají fotony

neodymu Nd^{3+} . Dalším typem je plynový CO_2 laser, jehož medium směs CO_2 , He, N_2 . Intenzita ozáření I_e laserem ($10^9\text{-}10^{11} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) je vyšší než I_e u obloukového svařování ($10^6\text{-}10^8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) [14].

Za zmínku stojí také diskové lasery, které se od Nd:YAG liší diskem tvořícím aktivní prostředí (viz obr. 4.10) Disk zajišťuje rovný teplotní profil a laser může dosahovat výkonů až 16 kW. Oproti Nd:YAG mají diskové lasery vyšší kvalitu výstupního svazku. Nevýhodou je nízká účinnost a životnost [51].

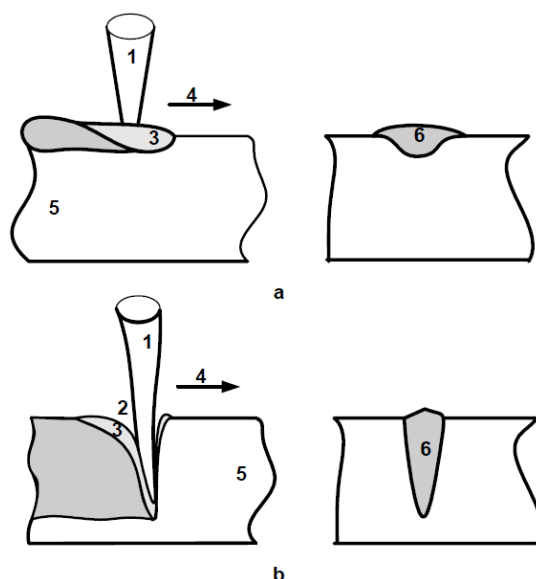
Dalším typem je laser vláknový. Aktivním prostředím je dlouhé optické vlákno s ytterbiem (viz obr. 4.10). Výhodou je možnost spojení více modulů a dosáhnout výkonu až 80 kW při účinnosti 30 až 35% a vysoké životnosti [51].

Posledním zde zmíněným typem je laser diodový. Diodové lasery se skládají do řad z tzv. mikroskopických emiterů. Po složení v délce několika milimetrů dosahuje laser výkon přibližně 10 kW. Řady emiterů se dále skládají do sloupců a výkon lze zvýšit až na několik kW. Kvalita výstupního svazku je nízká, ovšem výhodou je vysoká účinnost (50 až 60%) [51].



Obr. 4.8 - Porovnání laserů [51]

Laserový paprsek je soustředěn na jeden bod, ve kterém se hromadí velké množství energie. Při dopadu je část energie odražena a část pohlcena, svařenec se ohřívá a materiál se následně taví, či dokonce vypařuje. Použití laseru lze rozdělit dle intenzity ozáření I_e na povrchové svařování (heat conduction welding) a režim hlubokého průniku viz obr. 4.9 (keyhole welding). Při povrchovém svařování je až 90% energie ztraceno díky odrazu paprsků. Svarová lázeň je formována povrchovým napětím a kapilárními silami. Svarová housenka je charakteristická svou šířkou a mělkým průvarem. Povrchové svařování se využívá například pro malé elektronické součástky [14].



Obr. 4.9 - Laserové režimy: a - povrchové svařování, b - hluboký průnik
1 - paprsek, 2 - kovové výpary, 3 - svařovací lázeň, 4 - směr svařování, 5 - svařenec, 6 - ztuhlý svar [14]

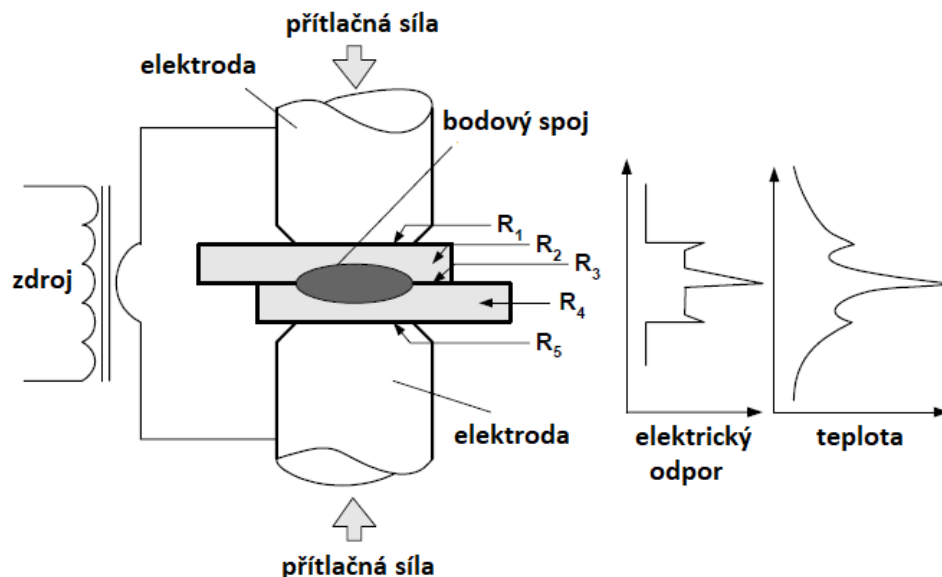
Pro svařování tloušťky až 50 mm se využívá druhá metoda, kde intenzita ozáření I_e musí dosáhnout $10^{10} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Dochází k vypařování materiálu a vytváří se tzv. klíčová dírka (obr. 4.9). Ta společně s generováním plazmy napomáhá pohlcování energie a šíření tepla hlouběji do materiálu. Kovové výpary udržují klíčovou dírku, zatímco tok materiálu a povrchové napětí klíčovou dírku chladí a uzavírají. Laserový paprsek takto vytváří úzký a hluboký svar [14].

Tabulka 4.4 - Výhody a nevýhody laserové svařování [3, 14]

Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none"> • vysoká produktivita • vysoká přesnost • svařitelnost materiálů s vysokou teplotou tání • malé tepelně ovlivněné oblasti • čisté svary, bez rozstříku 	<ul style="list-style-type: none"> • náročná montáž • požadavek na přesnou polohu svařenců • vysoká pořizovací cena • náchylné na optické vlastnosti materiálů • zejména u Al a jeho slitin náchylnost k pórovitosti a prasklinám

4.5. Odporové svařování

U odporového svařování teplo vzniká přechodovým odporem, který vzniká v místě styku svařovaných materiálů. Lze rozlišovat odporové svařování bodové, švoré, výstupkové nebo stykové. Nejčastější průmyslovou aplikací je ovšem bodové odporové svařování (RSW – Resistance Spot Welding). Bodové spojení přeplátovaných materiálů se skládá ze tří kroků. Nejprve dojde ke stlačení materiálů. Jakmile je dosaženo požadovaného tlaku, začne místem styku procházet elektrický proud a díky přechodovému odporu se materiál nataví. V poslední fázi se odpojí zdroj proudu a spoj je díky stálému působení tlaku tvářen a chlazen. Z důvodu nízkého elektrického odporu a vysoké tepelné vodivosti se využívají měděné elektrody. Mezi svařované materiály se řadí nelegované i legované oceli, hliník, měď, nikl a jejich slitiny [3, 14].



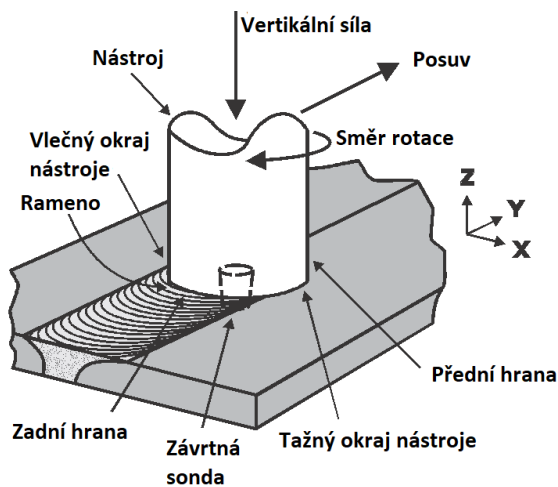
Obr. 4.10 - Princip bodového odporového svařování (přeloženo) [14]

Tabulka 4.5 - Výhody a nevýhody odporového svařování [3, 14]

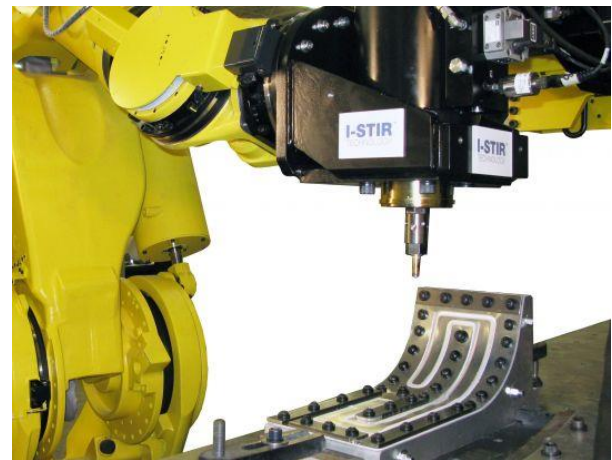
Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none"> • vysoká produktivita • malé deformace • svařování bez přídavného materiálu • všechny polohy svařování 	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší náklady • technická náročnost zařízení

4.6. Třecí svařování promísením

Třecí svařování promísením (FSW – Friction Stir Welding) se objevuje od roku 1991. Proces je založen na vtlačování rotujícího nástroje kolmo na čelní plochy svařovaných materiálů současně s podélným posuvem. Teplo vzniká v místě kontaktu závrtné sondy se svařovaným materiálem pomocí tření a deformace. Nástroj svým třením pomáhá zintenzivňovat ohřev a rozšiřovat termomechanicky ovlivněnou oblast. Tvářecí silou je materiál vytlačován z tažné na vlečnou stranu nástroje, čímž dochází k mísení částic a vzniká tak za nástrojem svarový spoj (viz obr. 4.12) [3, 14, 18].



Obr. 4.12 - Schéma FSW (přeloženo) [18]



Obr. 4.11 - FSW namontované na šestiosém robotu [52]

Vzhledem k tomu, že zde probíhá svařování pod teplotou tavení materiálu se u FSW nesetkáme s problémy jako u obloukových metod. Vady jako praskliny po tuhnutí, pórovitost, rozstřík, tepelné deformace nebo změny mechanických vlastností jsou díky svařování v pevném stavu materiálu nulové či minimální. Třecí svařování promísením nepotřebuje žádný přídavný materiál, svarovou oblast není nutné chránit plynem a povrch nevyžaduje výrazné opracování (např. při svařování hliníku povrchová vrstva oxidů Al_2O_3 nepředstavuje významný problém). Na obr. 4.13 je vidět metalurgický výbrus po svaření metodou FSW [1, 14].



Obr. 4.13 - Metalurgický výbrus po svaření dvou hliníkových slitin EN AW-5052 a EN AW-6061 (přeloženo) [18]
TMAZ = termomechanicky ovlivněná oblast, HAZ = tepelně ovlivněná oblast, Svarový nuget = dynamicky rekrystalizovaná oblast svaru

Metoda FSW je nejčastěji používána pro svařování hliníku a jeho slitin. Dále lze svařovat materiály jako měď, zinek, titan, ale i plasty či kompozitní materiály s kovovou maticí. Metoda našla uplatnění obecně v dopravním průmyslu pro výrobu nádrží, trupů vlaků, různých panelů či plošin, ale převážně v letectví [1, 14].

Tabulka 4.6 - Výhody a nevýhody FSW [1, 14, 19]

Výhody:	Nevýhody:
<ul style="list-style-type: none"> • bez vad spojených s tavnými procesy (pórovitost, praskliny, rozstřík, deformace) • všechny polohy svařování • svařování bez přídavného materiálu • čistota • ekologické • bez ochranných plynů 	<ul style="list-style-type: none"> • vyšší náklady • menší rychlost • nutnost silných upínek a přípravků

5. Senzorické systémy používané v robotickém svařování

Zaváděním stále více robotů do výroby se přirozeně otevírá i prostor pro vývoj a aplikaci senzorů. Vzhledem k tomu, že průmyslový robot nahrazuje práci člověka, pro kterého jsou jeho vjemové smysly zásadní, je tendencí roboty učit stejné schopnosti vnímání. Průmyslové roboty se objevují v širokém poli aplikací, a proto je nutné mít k dispozici různé druhy snímačů, které v řízení robota napomáhají [37].

Jak bylo uvedeno dříve, průmyslové roboty zvyšují produktivitu a kvalitu práce tak, že jejich úkolem je postupovat dle zadaného programu a vyřazením lidského faktoru při provádění daného úkonu, vyloučit možnosti pro chybování. Problém nastává v návaznosti výroby, kdy před prací robota je část z technologického postupu dělána ručně nebo došlo k různým odchylkám na výrobku (např. nepřesné umístění dílu v polohovadle či deformace materiálu). Za účelem překonání zmíněných nepřesností a zdokonalení automatizovaného svařovacího procesu jsou na roboty instalována různá optická či dotyková snímací zařízení. Sensory jsou navíc nutné pro vývoj inteligentních technologií robotického svařování s možnostmi optického a dotykového snímání, rozpoznání svařovacího prostředí, sledování polohy svařence a správné umístění svaru. Dalším cílem je zdokonalování metod „samoučení„ robotů [38].

Hlavním úkolem senzorů v robotickém svařování je vyhodnocení geometrie svaru, lokalizace polohy svaru a adaptivní řízení (změna procesních parametrů v závislosti na zpětné vazbě během prováděného výkonu). Ideální senzor by snímal TCP (Tool Center Point), detekoval počáteční bod, rohy a dokázal se vyhnout kolizím. Samozřejmě je důležité dosáhnout při konstrukci senzorů co nejmenší velikosti, aby nedocházelo k omezení pohybů robota. Vzhledem k širokému spektru aplikací svařovacích robotů je nutné vždy zvolit vhodnou variantu sensoriky podle konkrétní aplikace a finančních možností [38, 39].

5.1. Primární funkce senzorů

5.1.1. Nalezení svaru (Seam finding)

Tento proces lokalizuje pomocí referenčních bodů spoj tak, aby housenka byla přesně umístěna do svarové mezery. Největší uplatnění technologie lokalizace spoje se nachází ve velkosériových výrobcích pro krátké a opakující se svary, kdy je hlavním cílem začít svařování na správném místě [38]. K tomuto účelu je možné použít více senzorů. První variantou je metoda taktilní neboli kontaktní, kdy pomocí hubice nebo přidavného drátu je realizován dotyk se součástí a určil tak polohu svaru. Další možností je využití bodového laseru. Výhodou je bezkontaktní skenování

povrchu a mnohem vyšší rychlost než při taktilním snímání. Také lze použít laserovou kameru, která snímá pomocí laserové čáry. Kamera skenuje obě části dílu a může tak vyhodnotit i šířku svarové mezery. Následně pak lze upravit parametry svařovacího procesu v závislosti na zjištěných údajích [40].

5.1.2. Sledování svaru (Seam tracking)

Tento systém umožňuje sledovat svařovací proces v reálném čase. Pomocí zpětné vazby se poloha svařovacího hořáku a procesní parametry přizpůsobují aktuálnímu stavu. Tím se předchází problémům s odchylkami součásti či nepřesnému upevnění. Výsledkem jsou z hlediska polohy přesnější svary a vyšší rychlost svařovacího cyklu. Další výhodou je usnadnění programování drah robota, protože robot je schopen nepřesnosti kompenzovat sám. Senzory pro tuto činnost mohou být opět dotykové a bezdotykové. Samostatnou kategorií je sledování pomocí elektrického oblouku viz 5.3.3. TAST. Senzory pro sledování svaru v reálném čase poskytují korekce dráhy v horizontálním a vertikálním směru, přizpůsobení procesních parametrů a díky nim lze snížit nárok na přesnost geometrie a umístění svařenců [38, 40].

5.1.3. Skenování dílu (Part scanning)

Skenování dílu nejčastěji pomocí kamerových či laserových systémů může sloužit pro navádění robota. Po nalezení pozice dílu a následným porovnáním 2D či 3D obrazu systém vyhodnotí například pootočení dílu na pracovní desce a přiřadí naprogramované dráhy. Skenování dílu může probíhat během nebo až po dokončení svařovací operace. Optické senzory mohou poté vyhodnotit chyby, což vede ke snížení kontrolního času. Pro kontrolu dílu mohou být využity například i termální senzory.

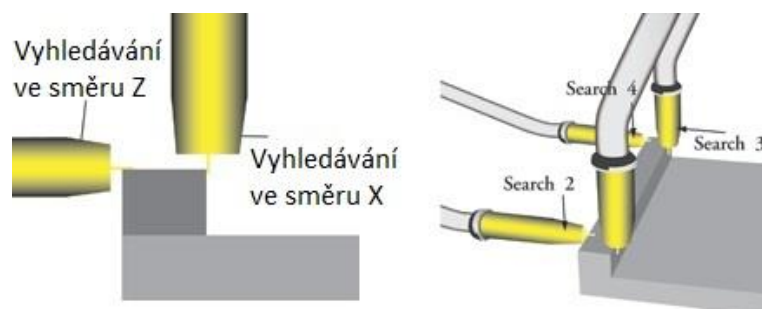
5.2. Dotykové systémy

5.2.1. Vyhledávání pomocí drátu

Dotykový systém sloužící k vyhledání pozice svaru. Jedná se o metodu, kdy pomocí svařovacího drátu robot vyhledává elektricky vodivý povrch svařované součásti. Využívá se nízkonapěťový obvod při nízkých rychlostech pohybu. Aby se docílilo stejných vyhledávacích podmínek, bývá drát v čistící jednotce zastřižen na požadovanou délku [39]. Při kontaktu drátu s povrchem součásti dojde k propojení elektrického obvodu. Řídící jednotka uloží pozici a následně přiřadí odpovídající bod, po úpravě celé svařovací dráhy začne svařovací proces [41].

Výhodou tohoto systému je nízká cena, jelikož patří do základní softwarové výbavy robotů a není potřeba žádný speciální hardware. Nejčastěji se tento systém využívá pro jednoduché svary a geometrie svařence. Nevýhodou je prodloužení svařovacího cyklu, ovšem za účelem zvýšení

kvality. Tato metoda není vhodná pro spoje s malou svarovou mezerou a tupé svary bez úkosů [39].



Obr. 5.1 - Schéma snímání polohy pomocí svařovacího drátu [41]

5.2.2. Vyhledávání pomocí hubice

Na podobném principu jako vyhledávání pomocí drátu funguje i vyhledávání pomocí svařovací hubice. Po propojení elektrického obvodu mezi svařencem a hubicí opět dojde k zaznamenání získané polohy a výpočtu korekce mezi skutečnými a naprogramovanými souřadnicemi. Oproti vyhledávání pomocí svařovacího drátu je zde požadavek na větší svařovací prostory. Dále je nutné před snímáním zajistit čistotu svařovací hubice, aby nedošlo k nepřesnostem měření v důsledku rozstříku, okují atd. Ze stejného důvodu není vhodné pro snímání použít čelo hubice. Nejvhodnější geometrií pro dotek se základním materiálem je válcová část hubice, což může vést ke složitějšímu polohování hořáku. Vyhledávání pomocí hubice je nejlevnější metodou dotykového vyhledávání [42].

5.2.3. Taktilní snímače

Jedná se o dotykové snímače obvykle ve tvaru koule či jehly. Snímač daného tvaru se pohybuje po svarovém švu (viz obr. 5.3). Zjištěné nerovnosti způsobují odchylky, na které reaguje systém a následně upraví dráhu. Výhodou taktilních snímačů je dobrá cena, univerzálnost technologie a oproti optickým systémům nejsou závislé



Obr. 5.2 - Ukázka taktilních snímačů [43]

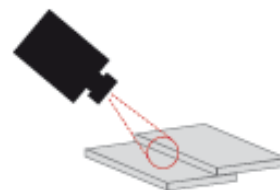
na světelných podmínkách. Důležitým aspektem používání taktilních senzorů je jejich údržba. Následkem fyzického kontaktu se svařenci může dojít k opotřebení snímačů, což může vést ke přibližování svařovacího hořáku blíže k základnímu materiálu a vést k nekvalitním spojmům či poškození zařízení. Nevýhodou je také nepřizpůsobivost nečekaným jevům. Při snímání je senzor umístěn ve drážce a drží se své dráhy, pokud ale je v drážce například dostatečně velký bodový spoj, může dojít k vychýlení sondy od naprogramované dráhy [43, 44].



Obr. 5.3 - Využití taktilního senzoru při SAW svařování [45]

5.3. Bezdotykové systémy

Bezdotykové systémy lze chápat jako optické senzory typu kamer a laserů. Jejich typickým znakem je umístění senzoru v blízkosti svařovacího hořáku, odkud sledují geometrii svarů. Funkce optických senzorů je stejná jako u dotykových – nalezení svaru či sledování svarové mezery během svařování. Velkou výhodou oproti dotykovým senzorům je vyhledávání téměř v jakékoliv poloze hořáku, vyhledávání v místech, kde není možné z prostorových důvodů uskutečnit dotek se základním materiálem a rychlost snímání. Nevýhodou optických senzorů může být jejich citlivost na reflexní materiály a cena, která bývá mnohonásobně vyšší než u dotykových systémů [41, 42].



Obr. 5.4 - Ukázka bezdotykového snímače

5.3.1. Kamery

2D kamery tedy umožňují podobné funkce jako systémy dotykové. Nejčastěji jsou využívány pro nalezení polohy svaru. Dotykové snímání může trvat tři až pět sekund, zatímco kamera stejný úkol stihne za zlomek sekundy. Pro správnou funkci je nutné kameru zkalibrovat. Nejprve se vytvoří referenční obraz ideální polohy dílu. Pozice je uložena v paměti systému a před každým zahájením svařovací operace robot vyfotí polohu dílu a porovná s referenčním obrazem. Robot následně vyhodnotí odchylky a přiřadí svařovací dráhy [41]. Běžné 2D kamery využívají pouze černobílý obraz, a proto jsou velice citlivé na světelné podmínky. Proto je vhodné pracovní prostor odstínit například od slunečního záření. Nežádoucí světelné paprsky či nevhodný odraz

od reflexních materiálů (např. hliník, leštěné materiály, korozivzdorná ocel) mohou vyústit v nekvalitní fotografii a v nevhodné přiřazení drah [43].

2D kamery jsou vhodné pro díly s velkým rozptylem umístění (v jedné rovině), kde je navíc požadavek na vysokou rychlost výrobního cyklu (viz obr. 5.5). Nevýhodou 2D kamer je, že nedokáží vyhodnotit výšku či hloubku, takže nejsou příliš vhodné pro tupé svary. 2D kamery jsou tedy vhodné pro nalezení dílu a přiřazení svarových drah, ale nejsou vhodné pro sledování svarových švů během procesu svařování [39, 43].



Obr. 5.5 - Optický 2D systém (vlevo) [41] a 3D systém (vpravo) [39]

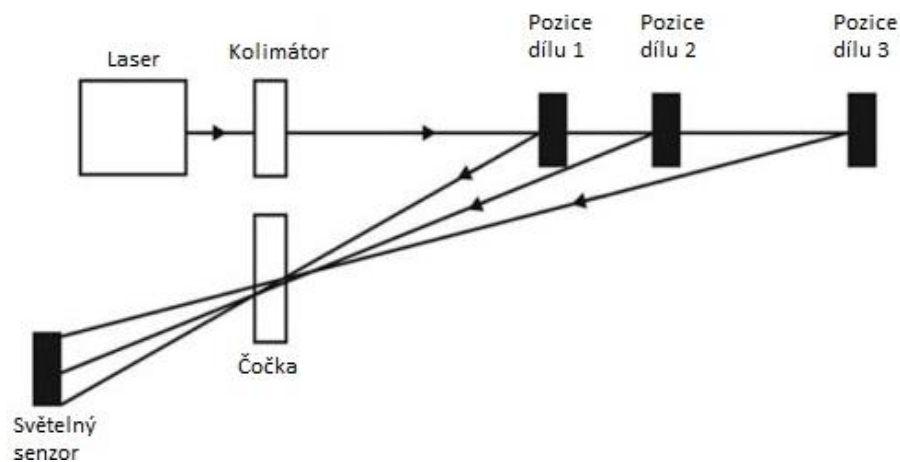
3D kamery se od 2D kamer liší použitím přídavného zdroje osvětlení (obvykle laser). 2D kamera vyhledává pozice dílu v rovině XY, zatímco laser zde zastává vyhledávání i ve směru Z, tedy hloubky [41]. 3D kamery mohou být použity pro sledování tupých svarů s úkosem, nicméně typickým využitím tohoto senzoru jsou spíše manipulátory, které uchopí jakkoliv orientovaný díl z přepravky a umístí jej do svařovacího přípravku. Optický 3D systém je vhodný pro vysoký stupeň automatizace, jelikož s sebou přináší vysoké pořizovací náklady [39].

5.3.2. Laserové systémy

Běžné laserové systémy jsou schopny vyhledávat až pětikrát rychleji než senzory dotykové. Lze s nimi měřit vzdálenost a vyhledávat pozici švu. Laserové zdroje jsou namontovány na svařovacím hořáku. Uplatnění nachází u výroby, kde je požadavek na vysokou rychlost výrobního cyklu, tedy tam kde dotykové systémy nestačí [39].

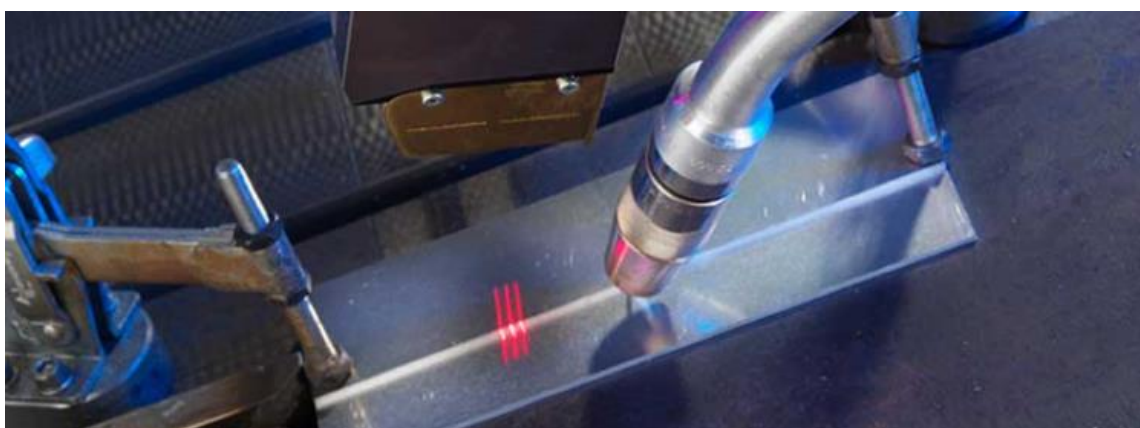
Zajímavější jsou ovšem 3D laserové systémy pro sledování svaru v reálném čase. Senzor je namontován na hořáku tak, aby mu předcházel. Laser promítá na základní materiál čáru, kterou skenuje geometrii svarového švu [41]. Princip snímání je založen na triangulaci.

Laserový paprsek se odráží od povrchu součásti zpět do senzoru a díky znalosti dráhy laseru mezi laserovou diodou a světelným snímačem dokáže systém dopočítat pozici dopadu laseru [43].



Obr. 5.6 - Princip triangulace (přeloženo) [46]

Z dostupných metod jsou 3D lasery nejrychlejší a téměř tak neomezují rychlost pracovního cyklu. Oproti systému TAST (viz 5.3.3.) má laserový systém výhodu, protože nedokonalosti jako rez, větší odchylky polohy nebo bodové svary mají minimální nebo žádný dopad na výsledky snímání. Problémy mohou opět nastat u odrazivých materiálů. Pokud se bude navíc jednat o složitější geometrii svařence může mít senzor problém určit, který z odražených paprsků je ten správný. Nicméně tento problém lze řešit softwarovými filtry. Ačkoliv 3D laser systém dosahuje nejvyšších rychlostí a přesností, jeho zařazení do výroby je vždy náročným rozhodnutím, jelikož cena takového systému se pohybuje okolo 1 150 000 Kč [41, 43].



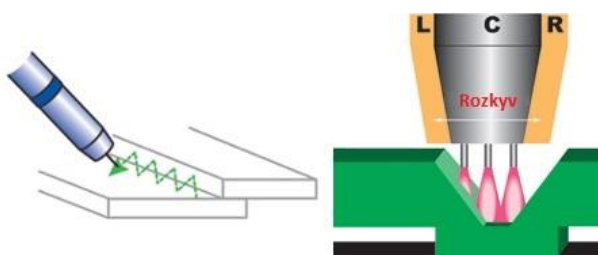
Obr. 5.7 - Sledování svarového švu pomocí 3D laseru [43]

5.3.3. Sledování elektrického oblouku (TAST)

Vzhledem k navazující praktické části se následujícímu systému práce věnuje podrobněji.

Through Arc Seam Tracking (TAST) neboli sledování svařovacího procesu prostřednictvím proudu na elektrickém oblouku. Osobně systém TAST řadím mezi bezdotykové metody, jelikož při snímání nedochází k fyzickému kontaktu mezi základním materiálem a hořákem. TAST se využívá u svařovacích metod s konstantním napětím (MIG, MAG). Účelem snímače je sledovat elektrický proud na svařovacím oblouku a dle měnící se velikosti odporu (tedy zvyšováním či snižováním proudu) upravovat dráhu robota. Pro svařovací metodu TIG se používá stejného principu, akorát místo elektrického proudu je měřeno elektrické napětí.

TAST je vhodný pro díly s dlouhými nebo zakřivenými spoji, případně pro výrobu dílů s podobnou geometrií. Jeho použití se naopak nedoporučuje pro materiály tenčí než 2 mm, výrobu s požadavkem na vyšší produktivitu (TAST omezuje svařovací rychlost přibližně na $21 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$) a švy s velkou svařovou mezerou [40].



Obr. 5.8 - Ilustrace sledování senzorem TAST [40, 41]

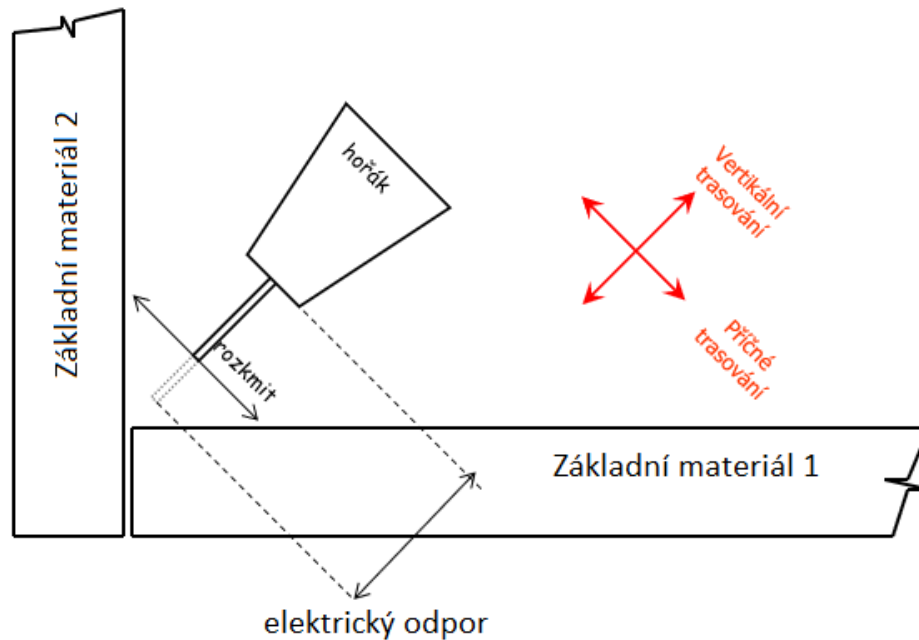
Základními předpoklady pro používání senzoru TAST jsou [47, 48]:

- Souřadnice Z+ musí vstupovat do osy hořáku (drátu)
- Uživatel musí zaručit stabilní zpětnou vazbu proudu
- Tloušťka základního materiálu minimálně 2 mm
- Sinusový rozkyv hořáku

Faktory ovlivňující funkci systému TAST [47, 48]:

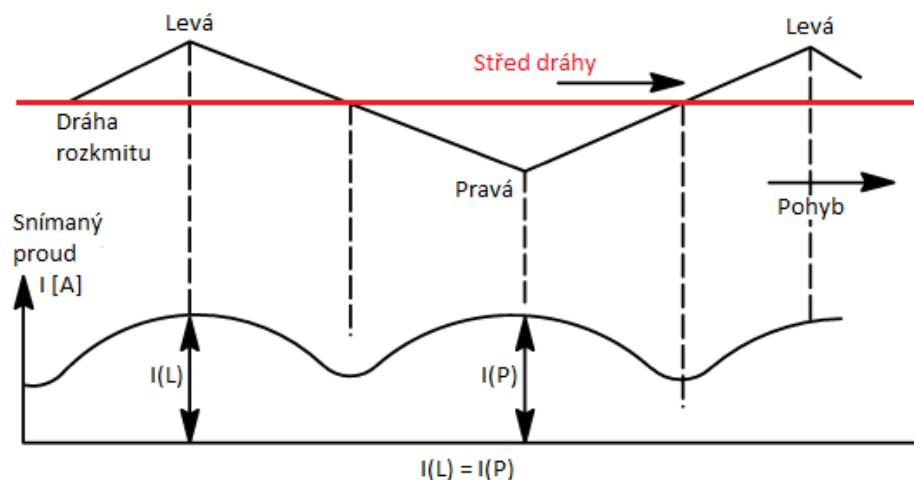
- Typ svařovacího drátu a jeho průměr
- Značné změny ve velikosti svaru
- Složení ochranného plynu (poměr Ar/CO₂ – 82/18, 92/8, 98/2)
- Typ přenosu (sprchový, zkratový, pulsní)
- Kvalita povrchu materiálu
- Změny v parametrech rozkyvu

Systém TAST umožňuje korekci ve dvou směrech – vertikálně (vzdálenost mezi základním materiálem a hořákem) a laterálně (příčné trasování – směr rozkvyvu) viz obr. 5.9 [47].



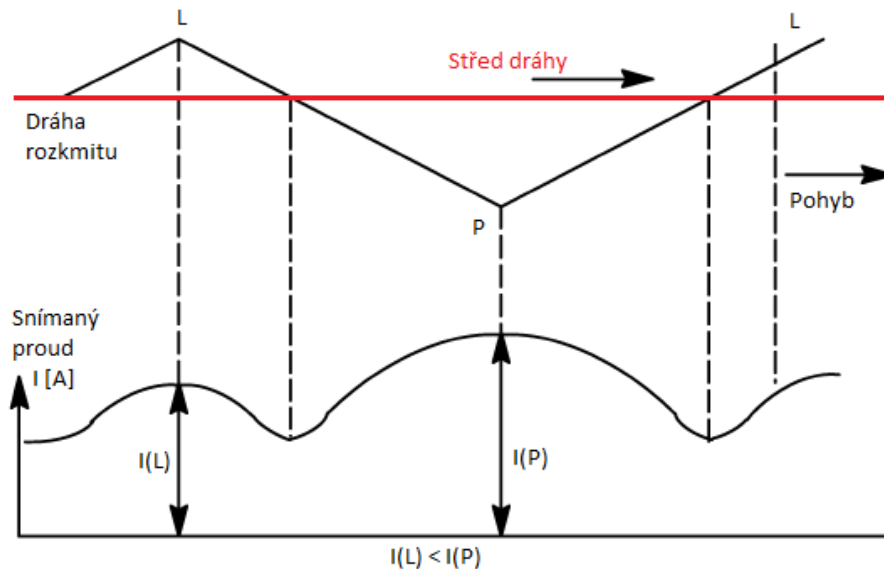
Obr. 5.9 - Vertikální a laterální (příčné) trasování [48]

Příčné trasování (v rovině XY) využívá sinusový rozkmit. Při pohybu hořáku doleva a doprava ve směru naprogramované dráhy dochází ke změnám hodnot elektrického proudu. V amplitudách dochází ke zmenšení vzdálenosti mezi základním materiálem a hořákem (kratší výlet drátu). Se zkrácením této vzdálenosti klesá elektrický odpor drátu, čímž se zvýší proud na oblouku. TAST kolísání elektrického proudu snímá v reálném čase (feedback) a vypočítává plochu pod křivkou pro levou i pravou stranu [47].



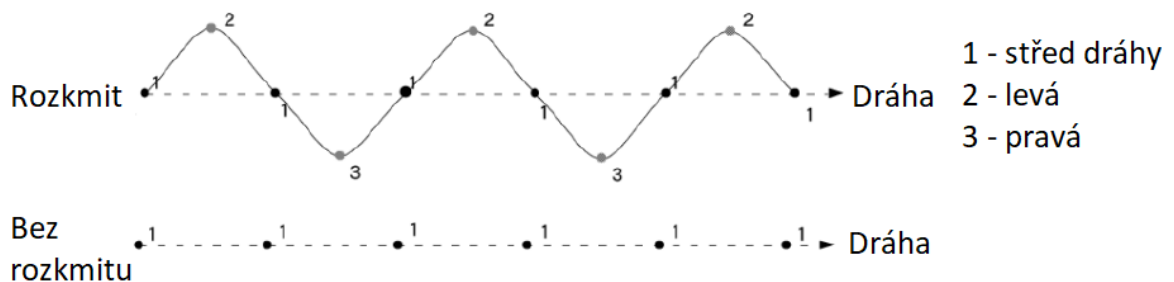
Obr. 5.10 - Průběh cyklu u vycentrovaného svaru (přeloženo) [47]

Vychýlení od původní dráhy se projeví nerovností obsahu levé a pravé plochy. Na obr. 5.11 je vidět, že plocha pod pravou stranou je v důsledku vyšších proudových hodnot větší než na straně levé. Z toho vyplývá, že došlo k vychýlení k pravé straně (kratší vzdálenost, nižší odpor, tedy vyšší proud). Po dokončení sinusového cyklu dojde ke korekci dráhy k levé straně [47].



Obr. 5.11 – Průběh cyklu u svaru vychýleného doprava (přeloženo) [47]

Vertikální trasování (ve směru Z) lze realizovat opět pomocí snímání aktuálního proudu (feedback) tak, že TAST zaznamenává proud ve středu dráhy svaru po dobu několika cyklů (dle uživatelem zadaných parametrů). Vertikální trasování je realizovatelné i bez rozkvyvu. Naměřenou hodnotu si následně určí jako referenční. Oproti příčnému trasování je zde možnost změnit feedback na konstantní hodnotu zadanou uživatelem [47].



Obr. 5.12 - Snímání referenční hodnoty proudu (přeloženo) [47]

TAST následně porovnává referenční hodnotu a hodnotou aktuální. Na obr. 5.13 je vidět průběh vertikálního snímání. Ve chvíli, kdy dojde ke zkrácení vzdálenosti mezi hořákem a základním materiálem opět klesá odpor drátu a zvyšuje se proud. Proud je větší než referenční hodnota, a proto dojde k posuvu hořáku ve směru Z+ (dál od základního materiálu) [47].

Po otevření jednoho ze souborů se objeví obrazovka dle obr. 5.15. Nyní lze optimalizovat veškeré parametry v daném souboru *TAST Schedule*. Jednotlivé parametry jsou vysvětleny v tabulce 5.1.

```
DATA TAST Sched          JOINT 10 %
                          1/30

TAST Schedule: [ 1]

1 TAST Schedule: [      Schedule 1 ]
2 V_compensation enable:  TRUE
3 L_compensation enable:  TRUE
4 V_master current type:  FEEDBK
  (feedback/constant)
5 Sampling timing (no WV): .50  sec
6 Comp frame (no WV):     TOOL
7 V_compensation gain:    20.0
  (sensitivity)
8 V_dead band:            0.0  mm
9 V_bias rate (up+):      0.0  %
10 V_tracking limit:      600.0 mm
11 V_tracking limit per cycle:.4  mm
12 V_compensation start count:5  cyc
13 V_master sampling start: 4  cyc
  count (feedback)
14 V_master sampling count: 1  cyc
  (feedback)
15 V_master current constant: 0.0  A
  data (constant)
16 L_compensation gain:    15.0
  (sensitivity)
17 L_dead band:           0.0  mm
18 L_bias rate (right+):  0.0  %
19 L_tracking limit:      600.0 mm
20 L_tracking limit per cycle:.4  mm
21 L_compensation start count:5  cyc
22 Robot Group Mask: [1,*,*,*,*,*,*,*]
23 Adjust delay time:     .136  sec
  -- Adaptive gain control --
24 V_AG_correction count:  0  cyc
  (0:disable)
25 L_AG_correction count:  0  cyc
  (0:disable)
26 V_AG_correction band:  4.0
27 L_AG_correction band:  4.0
28 V_AG_multiplier:       1.5
29 L_AG_multiplier:       1.5
30 TAST Equip Mask: [1,*,*,*,*,*,*,*]

[ TYPE ]SCHEDULE          1      *
```

Obr. 5.15 - TAST parametry [47]

Tabulka 5.1 - Nastavení TAST podmínek [47]

	TAST Schedule: [n]	Číselné označení zobrazeného TAST schématu.
1	TAST Schedule: [comment]	Umožňuje komentovat/pojmenovat schéma.
2	V_compensation enable	Aktivace/deaktivace vertikálního sledování spoje.
3	L_compensation enable TRUE / FALSE	Aktivace/deaktivace laterálního sledování spoje. Pokud je vertikální i laterální deaktivované, TAST nebude pracovat.
4	V_master current type FEEDBACK / CONSTANT	Volba zdroje pro stanovení referenční hodnoty el. proudu: FEEDBACK – hodnota el. proudu je přečtena na začátku svařování a poté použita jako referenční (viz nastavení parametrů 13 a 14). CONSTANT – referenční hodnota el. proudu je zadána ručně (v parametru 15).
5	Sampling timing (no WV) Výchozí hodnota: 0,5 sec Min: 0 sec / Max: 99,99 sec	Nastavení časové konstanty (v sekundách), která nahrazuje jednu periodu (cyklus) v případě, že není použit rozkmit (Weave) při svařování.
6	Comp frame (no WV) TOOL / FRAME	Vertikální navádění probíhá vždy v ose Z, Laterální vždy v ose Y. Orientace těchto os je běžně převzata z funkce rozkmitu. V případě, že rozkmit není použit je potřeba definovat jiný zdroj orientace kartézského prostoru. Zdrojem orientace může být User Frame (uživatelsky definovaný prostor) nebo Tool frame (definice nástroje).
7	V_compensation gain (sensitivity) Výchozí hodnota: 25 Min: 0 / Max: 99,999	Citlivost vertikální kompenzace. Ovlivňuje poměr mezi zjištěnou proudovou odchylkou a mírou prováděné kompenzace. Příliš vysoká citlivost může vést k překompenzovanému stavu – od kmitání kolem ideální trajektorie až po ztrátu schopnosti navádění.
8	V_dead band Výchozí hodnota: 0 mm Min: 0 mm / Max: 999,9 mm	Definuje velikost vychýlení ve vertikálním směru, které systém ignoruje. Tzn. pokud je hodnota parametru 0,5, TAST začne korigovat dráhu, až poté, co velikost nutné korekce přesáhne 0,5 mm. Parametr se využívá pro svařování v nestabilním prostředí (s nestabilní zpětnou vazbou).
9	V_bias rate (up+) Výchozí hodnota: 0 Min: -99,9 / Max: 99,99	Upravuje v procentech velikost korekce vzhledem k základnímu materiálu. Pokud jsou nastaveny záporné hodnoty korekce se posune blíže k základnímu materiálu. Pokud jsou nastaveny kladné hodnoty korekce se posune dále od základnímu materiálu.
10	V_tracking limit Výchozí hodnota: 600 mm Min: 0 mm / Max: 9999,9 mm	Definuje oblast v milimetrech, ve které dochází k vertikální korekci. Pokud se robot dostane přes zadanou hodnotu, vertikální navádění přestane fungovat. Pokud je hodnota nastavena na 0, navádění ve vertikálním směru je vypnuto.
11	V_tracking limit per cycle Výchozí hodnota: 1 mm Min: 0 mm / Max: 9999,9 mm	Definuje maximální velikost vertikální korekce v milimetrech, jakou může systém provést za jeden cyklus (mm/cykus).
12	V_compensation start count Výchozí hodnota: 5 Min: 3 / Max: 999	Definuje počet cyklů, po kterých začne TAST korigovat dráhu ve vertikálním směru. Elektrický oblouk tak získá čas ke stabilizaci. Pokud je hodnota nižší než 4 systém ji ignoruje a korigování dráhy začíná po třetím cyklu.



13	V_master sampling start count (feedback) Výchozí hodnota: 4 Min: 2 / Max: 999	Definuje počet cyklů, po kterých začne TAST zaznamenávat referenční hodnotu (feedback) pro vertikální navádění. Elektrický oblouk tak získá čas ke stabilizaci.
14	V_master sampling count (feedback) Výchozí hodnota: 1 Min: 1 / Max: 999	Definuje počet cyklů, během kterých TAST zaznamenává referenční hodnotu.
15	V_master current constant data (constant) Výchozí hodnota: 0 Min: 0 / Max: 999,9	Definuje referenční hodnotu elektrického proudu, pokud je v řádku číslo čtyři nastavena hodnota CONSTANT.
16	L_compensation gain (sensitivity) Výchozí hodnota: 25 Min: 0 / Max: 99,999	Citlivost laterální kompenzace. Ovlivňuje poměr mezi zjištěnou proudovou odchylkou a mírou prováděné kompenzace. Příliš vysoká citlivost může vést k překompenzovanému stavu – od kmitání kolem ideální trajektorie až po ztrátu schopnosti navádění.
17	L_dead band Výchozí hodnota: 0 mm Min: 0 mm / Max: 999,9 mm	Definuje velikost vychýlení v laterálním směru, které systém ignoruje. Tzn. pokud je hodnota parametru 0,5, TAST začne korigovat dráhu, až poté, co velikost nutné korekce přesáhne 0,5 mm. Parametr se využívá pro svařování v nestabilním prostředí (s nestabilní zpětnou vazbou).
18	L_bias rate (right+) Výchozí hodnota: 0 Min: -99,9 / Max: 99,99	Upravuje v procentech velikost korekce vzhledem k základnímu materiálu. Pokud jsou nastaveny záporné hodnoty korekce se posune k levé straně svaru. Pokud jsou nastaveny kladné hodnoty korekce se posune k pravé straně svaru.
19	L_tracking limit Výchozí hodnota: 600 mm Min: 0 mm / Max: 9999,9 mm	Definuje oblast v milimetrech, ve které dochází k laterální korekci. Pokud se robot dostane přes zadanou hodnotu, laterální navádění přestane fungovat. Pokud je hodnota nastavena na 0, navádění ve laterálním směru je vypnutá.
20	L_tracking limit per cycle Výchozí hodnota: 1 mm Min: 0 mm / Max: 9999,9 mm	Definuje maximální velikost laterální korekce v milimetrech, jakou může systém provést za jeden cyklus (mm/cyklus).
21	L_compensation start count Výchozí hodnota: 5 Min: 3 / Max: 999	Definuje počet cyklů, po kterých začne TAST korigovat dráhu ve laterálním směru. Elektrický oblouk tak získá čas ke stabilizaci. Pokud je hodnota nižší než 4 systém ji ignoruje a korigování dráhy začíná po třetím cyklu.
22	Robot Group Mask Výchozí: [1,*,*,*,*,*,*]	Definuje pohybovou skupinu, která provádí svařování. Pokud nepoužíváme více skupin, neměnit výchozí nastavení.
23	Adjust delay time Výchozí hodnota: 10	Tento parametr reprezentuje schopnost akcelerace robotu v kombinaci s rychlostí komunikace mezi robotem a svařovacím zdrojem. Hodnoty jsou zde automaticky nastaveny po instalaci systému TAST. Doporučuje se neměnit.
	--Adaptive gain control--	Systém TAST zaznamenává směr navádění. Pokud je směr navádění po několika cyklech stejný, systém dostává informaci, že velikost korekce je nedostačující. Adaptivní řízení umožňuje nastavit hodnotu násobení citlivosti. Korekce se tak zvyšuje a hořák se dostává do správné pozice rychleji.

24	V_AG_correction count Výchozí hodnota: 0 Min: 0 / Max: 99	Definuje počet cyklů, po kterých začne adaptivní řízení ve vertikálním směru. Funkce je výhodná, pokud je vychýlení v jednom směru – nahoru či dolů. Pokud je hodnota nastavena na 0, adaptivní řízení je vypnuto. Pro aktivaci je nutné nastavit hodnotu na 2 nebo více.
25	L_AG_correction count Výchozí hodnota: 0 Min: 0 / Max: 99	Definuje počet cyklů, po kterých začne adaptivní řízení v laterálním směru. Funkce je výhodná, pokud je vychýlení v jednom směru – vlevo či vpravo. Pokud je hodnota nastavena na 0, adaptivní řízení je vypnuto. Pro aktivaci je nutné nastavit hodnotu na 2 nebo více.
26	V_AG_correction band Výchozí hodnota: 4 Min: 0 / Max: 9,9	Definuje množství dat, vůči kterým vertikální adaptivní řízení porovnává vypočítanou korekci. Adaptivní řízení nebude aktivováno, dokud velikost korekce nepřesáhne zadanou hodnotu. Pro nestabilní procesy svařování se doporučuje nastavit hodnotu na 6 a více.
27	L_AG_correction band Výchozí hodnota: 4 Min: 0 / Max: 9,9	Definuje množství dat, vůči kterým laterální adaptivní řízení porovnává vypočítanou korekci. Adaptivní řízení nebude aktivováno, dokud velikost korekce nepřesáhne zadanou hodnotu. Pro nestabilní procesy svařování se doporučuje nastavit hodnotu na 6 a více.
28	V_AG_multiplier Výchozí hodnota: 1,5 Min: 1 / Max: 9,9	Definuje hodnotu násobení pro vertikální adaptivní řízení.
29	L_AG_multiplier Výchozí hodnota: 1,5 Min: 1 / Max: 9,9	Definuje hodnotu násobení pro laterální adaptivní řízení.
30	TAST Equip Mask Výchozí: [1,*,*,*,*,*,*]	Definuje číslo svařovacího zdroje, který svařuje. Pokud nepoužíváme více svařovacích zdrojů, neměnit výchozí nastavení.

Pro spuštění trasování pomocí TAST slouží příkaz Track TAST [číslo souboru] a pro ukončení příkaz Track End. Nicméně je třeba pamatovat na posloupnost příkazů (viz obr. 5.16) – nejprve určit startovní bod, dále zahájit svařování a rozkvy, až následně zapnout TAST.

```
1: L P[1] 100mm/sec FINE
   : Arc Start E1[1]
2: Weave Sine[7]
3: Track TAST[7]
4: L P[2] WELD_SPEED FINE
   : Arc End E1[1]
5: Track End
6: Weave End
7: J P[3] 100%CNT70
```

Obr. 5.16 - Ukázka posloupnosti příkazů pro spuštění a ukončení TAST



6. PRAKTICKÁ ČÁST

6.1. Popis experimentu

Ačkoliv sledování svarového švu pomocí TAST není žádnou novinkou, jsem prvním osobou, která se tímto systémem na Strojní fakultě ČVUT v Praze zabývá. Experiment je tedy soustředěn na zmapování funkčnosti a užitečnosti senzoru TAST.

Nejprve bylo nutné poznat pracovní prostředí robota a naučit se manipulaci a příkazy k ovládní robota. Následuje příprava vzorků, a nakonec testování TAST.

Cílem experimentu je seznámit se s tímto systémem po teoretické části (viz kapitola 5.3.3.). Postupně vyzkoušet různé kombinace nastavení, poukázat na nejzásadnější příkazy a otestovat TAST v odlišných úlohách.

Závěrem je vyhodnocení vhodných parametrů, případně jak se k takovým parametrům dostat. Příprava ukázky pro ideální použití TAST s možností využití tohoto materiálu ve cvičeních pro studenty nadcházejících ročníků.

6.1.1. Postup experimentu

- 1) Veškeré svařování sledovat pomocí programu WELDMonitor v.4.1 (snímá průběh napětí a proudu v čase).
- 2) Vytvořit přesný referenční vzorek bez použití TAST.
- 3) První seznámení s TAST – náhodné nastavení s malým vychýlením vzorků (nejprve při odchylce v příčném směru).
- 4) Zaznamenat chování svařovacího procesu při zahájení svařování
- 5) Chování TAST s různou kombinací trasování (Vertikální – vypnuto, Laterální – zapnuto a naopak)
- 6) Vyhodnocení prvních poznatků
- 7) Prohloubit znalosti a dále stavět na předchozích výsledcích.
- 8) Další testování za složitějších podmínek

6.2. Popis pracoviště

Praktická část byla realizována v laboratoři výuky svářečských technologií (dále jen LVST) fakulty strojní ČVUT v Praze. V laboratoři se nachází šestiosý robot Fanuc ARC Mate 100iC s nosností 10 kg na šesté ose, rozsahem 1420 mm a opakovatelností $\pm 0,08$ mm [49]. Řídící jednotka Fanuc R-J3i C ovládá celý systém, obsahuje uživatelská data a umožňuje on-line i off-line programování. Teach pendant s ovládacími prvky a displejem slouží k již zmíněnému on-line programování. Pomocí jednoosého polohovadla P250 od firmy Fanuc, s rámem o rozměrech 1600x1000 mm a děrovanou pracovní deskou 1200x800 mm pro snadné upínání, lze otáčet se svařencem o 720°.



Obr. 6.1 - Pracoviště LVST s robotem Fanuc ARC Mate 100iC

Pro experiment byl použit mikroprocesorový, digitálně řízený zdroj Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT s podavačem přídavného materiálu VR 7000 CMT. Součástí svařovacího zdroje je i jednotka dálkového ovládání RCU 5000i, kterou lze vytvářet svařovací programy a sledovat svařovací data [50]. Dále se zde nachází PLC systém pro zabezpečení komunikace řídicí jednotky se svařovacím zdrojem při jeho výměně (pracoviště obsahuje dále svařovací zdroj Sigma Galaxy 400 a svařovací zdroj TIG PI320). Samozřejmostí jsou tlakové láhve s ochrannými plyny, upínky,

dorazy a další přípravky pro polohování a upnutí svařenců. Nezbytnou součástí robotizovaného pracoviště jsou bezpečnostní prvky zamezující vstup do pracovního prostoru robota, kontrolní panel se STOP tlačítkem a také systém pro odsávání svařovacích výparů.



Obr. 6.2 - Prvky pracoviště (zleva: hořák RA280 CMT, kontrolní panel, RCU 5000i, Teach pendant, PLC a řídicí jednotka Fanuc R-J3i C, svařovací zdroj TPS 3200 CMT s podavačem VR 7000 CMT)

6.3. Příprava vzorků

Pro výrobu vzorků byly použity plechové destičky z materiálu S235JR o rozměrech 200x75x3 mm. Plechy byly obroušeny v místě budoucího svaru pro dosažení co nejkvalitnějších výsledků. Následně jsem plechy stehoval pro koutový spoj. Pro kontrolu složení materiálu jsem použil spektrometr BAS Delta X.



Obr. 6.3 - Připravený vzorek, Spektrometr Delta X

Tabulka 6.1 - Složení materiálu S235JR [%]

C	Mn max.	Si max.	P max.	S max.	N max.
0,190	1,500	-	0,045	0,045	0,014

6.4.Svařovací parametry

Požadavek na svar – velikost svaru byla zvolena a4 a stupeň kvality B.

Očekávaná chyba: Nadměrná asymetrie koutového svaru (dle ISO 6520-1 chyba číslo 512).

Tabulka 6.2 - Nadměrná asymetrie koutového svaru ČSN EN ISO 5817 – B [53]

	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 \cdot a$ $h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15 \cdot 4$ $h \leq 2,1 \text{ mm}$
--	---

Tabulka 6.3 - Svařovací parametry (Data Weld Sched 1)

Metoda svařování		MAG (135)
Přídavný materiál		OK AristoRod 69
Průměr přídavného drátu	[mm]	1,0
Svařovací napětí	[V]	16,9
Svařovací proud	[A]	150,0
Druh proudu / polarita		DC / +
Korekce délky oblouku		0
Korekce dynamiky		0
Rychlost podávání drátu	[m·min ⁻¹]	5,3
Rychlost posuvu pojezdu	[mm·s ⁻¹]	5,0
Tepelný příkon	[kJ·mm ⁻¹]	0,45
Ochranný plyn (EN ISO 14175)		M21 (82%Ar, 18% CO ₂)

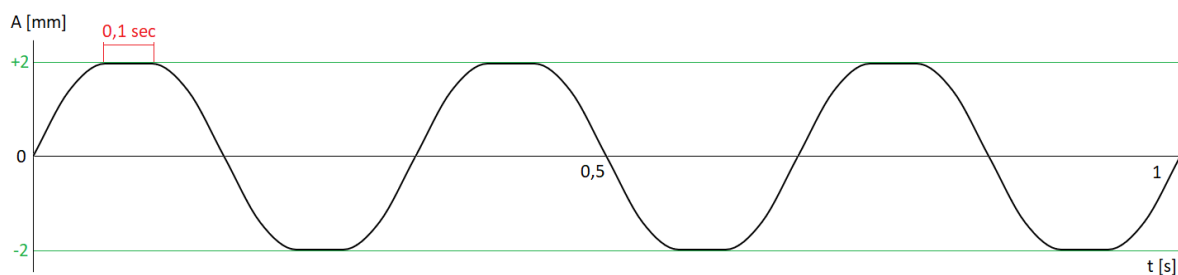
Tabulka 6.4 - Vlastnosti přídavného materiálu

Přídavný materiál						
Typ	OK AristoRod 69 – ø1 mm					
Klasifikace	EN ISO 16834-A: G 69 4 M Mn3Ni1CrMo					
Typické chemické složení drátu [%]						
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V
0,06	0,60	1,60	0,30	1,40	0,25	0,07

Pro použití senzoru TAST je nutné mít aktivovaný sinusový rozkvyv hořáku s minimální amplitudou 1,5 mm.

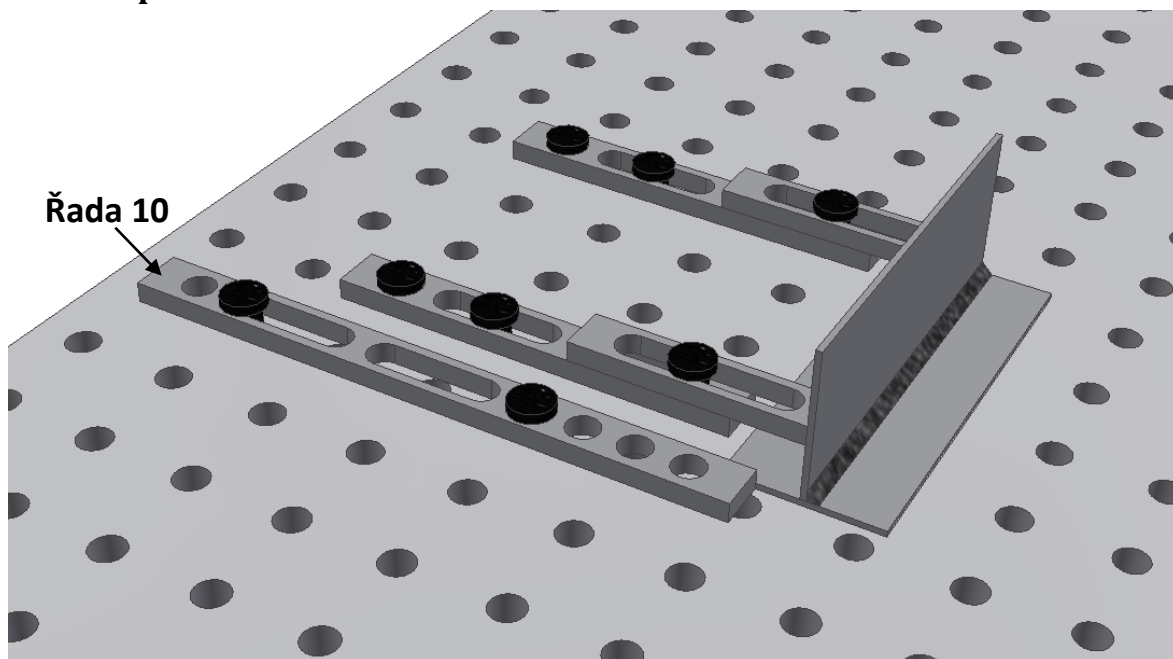
Tabulka 6.5 - Parametry rozkvyvu (Data Weave Sched 7)

Frekvence	[Hz]	3
Amplituda	[mm]	2
Výdrž v amplitudě (vpravo)	[sec]	0,1
Výdrž v amplitudě (vlevo)	[sec]	0,1



Obr. 6.4 - Znárodnění frekvence rozkvyvu

6.5. Upnutí



Obr. 6.5 - 3D model upnutí

6.6. Programování dráhy

Využitím možnosti on-line programování s využitím teach pendantu jsem naprogramoval dráhy robota tak, že se nejprve přes pomocné body přiblíží k pozici vzorku. Dále robot přijede k počáteční pozici, zapne rozkyv, zahájí svařování, a po přímce dojede na koncový bod. Nyní robot ukončí svařování a rozkyv, následně přes pomocné body odjíždí do výchozí pozice (HOME).

Číslo řádku	Druh pohybu	Instrukce	Popis
1:	J	@PR[90:HOME] 100% FINE	Startovací poloha robota
2:		UFRAME_NUM=2	Definice prostředí – souřadný systém
3:		UTOOL_NUM[GP1,2]=6	Vyvolání nástroje – hořák
4:			
5:	J	P[2] 100% CNT70	Bod v prostoru (dráha příjezdu ke svařenci)
6:	J	P[1] 100% CNT70	Bod v prostoru (dráha příjezdu ke svařenci)
7:			
8:	L	P[4] 100mm/sec FINE	Bod pro začátek svaru
9:		Arc Start E1[1]	Příkaz pro zahájení svařování
:		Weave Sine[7]	Příkaz pro zahájení rozkyvu
10:		Track TAST[7]	Příkaz pro zahájení TAST sledování svaru
11:	L	P[3] WELD_SPEED FINE	Bod pro ukončení svaru
12:		Arc End E1[1]	Příkaz pro ukončení svařování
:		Track End	Příkaz pro ukončení TAST
13:		Weave End	Příkaz pro ukončení rozkyvu
14:			
15:	J	P[5] 100% CNT70	Bod v prostoru (dráha odjezdu)
16:	J	P[2] 100% CNT70	Bod v prostoru (dráha odjezdu)

Obr. 6.6 - Výpis svařovacího programu s popisem

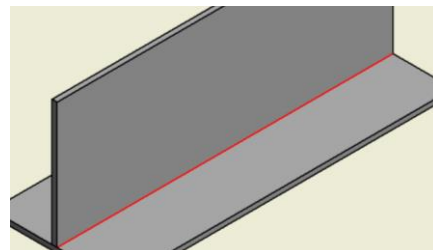
6.7. Průběh experimentu

Po založení vzorků do přípravku bude provedena kontrola dráhy robota a na přilehlém počítači se aktivuje sledování napětí a proudu pomocí programu WELDMonitor v.4.1.

6.7.1. EXPERIMENT 1 – JK1

Jedná se o referenční kus, kdy nebyl použit TAST senzor. Robot se pohybuje přesně po naprogramované dráze. Výsledkem je ideální koutový svar.

Červená = naprogramovaná i skutečná dráha

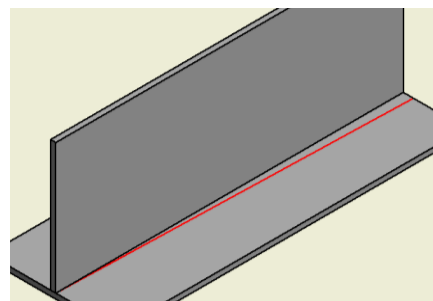


Obr. 6.7 - Foto svařeného vzorku JK1

6.7.2. EXPERIMENT 2 – JK2

Pro druhý vzorek byla upravena dráha robota tak, že v koncovém bodě došlo k vychýlení v ose X o 5 mm (cca 1,5°). Tímto krokem se simuluje vychýlení vzorku, k čemuž by mohlo ve skutečné výrobě dojít. Opět nebyl použit TAST senzor.

Červená = naprogramovaná i skutečná dráha



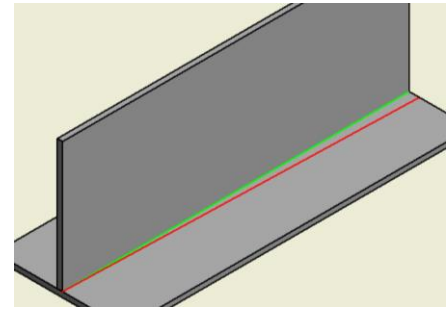
Na obr. 6.8 je vidět, že se zvětšující vzdáleností od počátku svaru roste asymetrie koutového svaru (chyba 512 dle ČSN EN ISO 5817 viz tabulka 6.2) až do momentu, kdy je svar zcela mimo požadovanou polohu.



Obr. 6.8 - Foto svařeného vzorku JK2

6.7.3. EXPERIMENT 3 – JK3

U třetího vzorku bylo použito stejné nastavení jako u JK2, s tím rozdílem, že došlo k aktivaci TAST snímání. Citlivost v laterálním (příčném) směru byla nastavena na hodnotu 5. Citlivost ve vertikálním směru je 50, nicméně v tuto chvíli by neměla být tak důležitá.



Červená = naprogramovaná dráha
Zelená = skutečná dráha

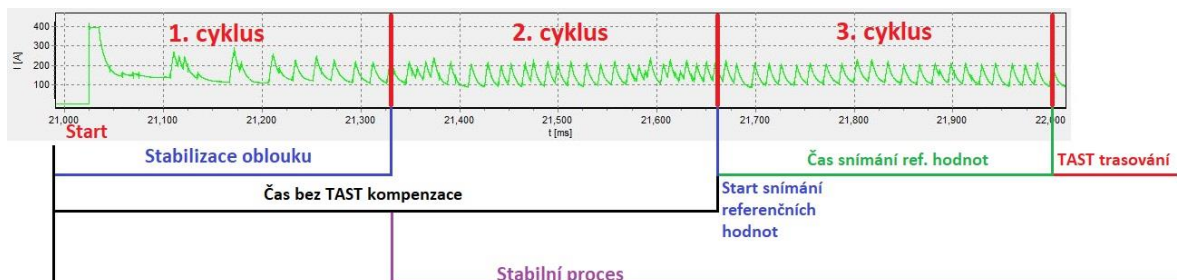
Zde již fungovalo trasování, nicméně ve vzdálenosti přibližně 100 mm se projevuje asymetrie koutového svaru (chyba 512).



Obr. 6.9 - Foto svařeného vzorku JK3

Z JK3 bylo také vyhodnoceno startování svařovacího procesu a ukázka, jak se systém TAST stabilizuje. Nastavení stabilizace je následující:

V_compensation start count:	3	počet cyklů (viz frekvence obr. 6.4), po kterých začne TAST korigovat dráhu ve vertikálním směru
V_master sampling count:	2	počet cyklů, po kterých začne TAST nahrávat referenční hodnotu (feedback) pro vertikální trasování
V_mastering sampling count:	1	Počet cyklů, během kterých TAST vytváří referenční hodnotu
L_compensation start count:	3	počet cyklů, po kterých začne TAST korigovat dráhu v laterálním (příčném) směru



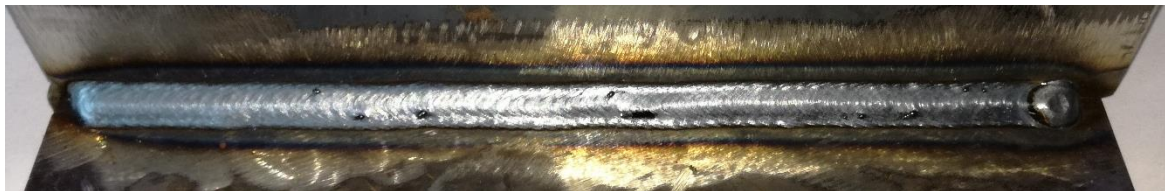
Obr. 6.10 - Počáteční fáze TAST

V podstatě:

$$V_compensation\ start\ count - V_master\ sampling\ count = V_mastering\ sampling\ count\ (3-2=1)$$

6.7.4. EXPERIMENT 4 – JK4

Čtvrtý vzorek je stejný jako JK3. Ke změně došlo v nastavení laterální citlivosti z 5 na 50. Zvýšením citlivosti se robot dokázal snáze držet plechu a vznikl vyhovující svar.

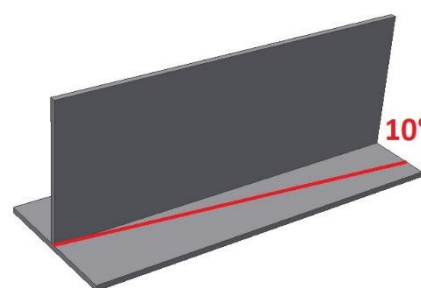


Obr. 6.11 - Foto svařeného vzorku JK4

6.7.5. EXPERIMENT 5 – JK5, JK6, JK7

U dalšího vzorku bylo simulováno vychýlení 10°, ale zároveň citlivost v příčném směru nastavena na hodnotu 1 a citlivost ve vertikálním směru vypnuta.

Výsledkem je obr. 6.12, kde je vidět, že robot se vůbec nedokázal nasměrovat ke svařenci. Svařování bylo ručně ukončeno z důvodu velice nestabilního oblouku.



Obr. 6.12 - Foto vzorku JK5

Problém byl řešen zvyšováním citlivosti na dalších vzorcích až do maximální hodnoty, nicméně jak se později potvrdilo na dalších vzorcích, problém byl především ve vypnutém vertikálním korigování (viz obr. 6.13 a 6.14).



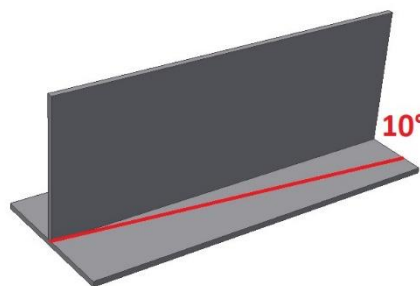
Obr. 6.14 – JK6



Obr. 6.13 – JK7

6.7.6. EXPERIMENT 6 – JK8, JK8.5

U dalšího vzorku stále pokračuje experimentování a seznamování se systémem TAST. Vychýlení stále 10°, vertikální trasování stále vypnuté, příčné na maximum (99), důležitá změna zde nastala ve velikosti dovolené korekce za jeden cyklus (z 1 mm na 10 mm/cyklus).



Výsledkem je naprosto nečekaná změna v chování robota, kdy i přes vypnutou vertikální korekci, robot během svařování šplhá po plechu. Z vzorku JK8.5 byla korekce za cyklus snížena na 5 mm, avšak výsledek je velice neuspokojivý – nelze hovořit svaru (viz obr. 6.15 a 6.16).



Obr. 6.16 - JK8



Obr. 6.15 - JK8.5

6.7.7. EXPERIMENT 7 – JK10, JK11, JK12

Následující čtyři vzorky jsou zde zmíněny z důvodu ukázky změny chování při jiných svařovacích parametrech. Nedopatřením byly tyto vzorky svařeny ve chvíli, kdy na svařovacím zdroji byly nastaveny korekce svařovacích parametrů. Při vypnutí svařovacího zdroje dochází ke změně korekcí délky elektrického oblouku, a je nutné korekce vždy po zapnutí svařovacího zdroje kontrolovat. Detaily parametrů nejsou nyní důležité (liší se v laterální citlivosti a korekci za cyklus), ale pokud by podmínky byly správné, došlo by nejspíš k vytvoření vyhovujících svarů.

Díky chybě v korekcích, která se může opakovat v dalších experimentech ostatních uživatelů svařovacího robota, se zde nabízí možnost vytvořit programovou knihovnu („JOB,,), kde budou jasně určené charakteristiky svařovacího procesu a korekce se již nebudou po každém zapnutí automaticky měnit.

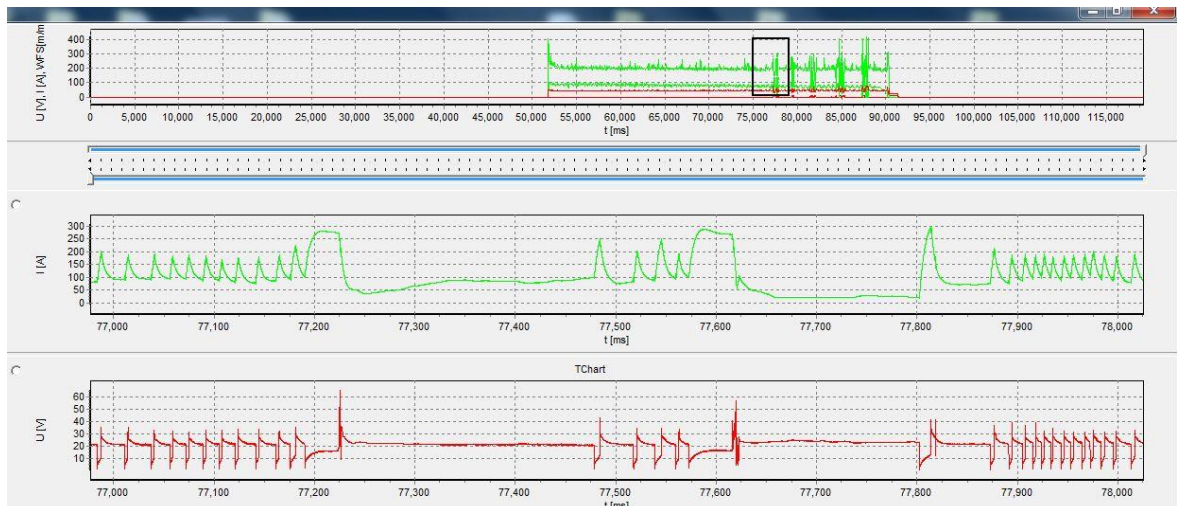
Ke vzorkům JK11 a JK12 je přiložen průběh proudu a napětí v čase, kdy se robot začal vzdalovat od základního materiálu a oblouk se stal nestabilním. Z průběhu je vidět, jak proud začíná silně kolísat od nominální hodnoty 150 A. U vzorku JK11 se kolísání začíná projevovat ve vzdálenost 130 mm (obr. 6.18), což odpovídá času 78 sec (obr. 6.19). Podobné chování je vidět na vzorku JK12, kde došlo ke změně velikosti dovolené korekce za jeden cyklus (z 1 mm na 5 mm/cyklus) viz obr. 6.20 a 6.21. Vysvětlení, proč se robot vzdaluje od požadované polohy (přestože byla zvýšena korekce za cyklus) je, že navýšováním limitu pro kompenzaci se zvyšuje zpětná vazba systému, který není správně vyladěn. Dojde k rozkmitání nad únosnou mez a robot „utíká“ ze svaru.



Obr. 6.17 - JK10



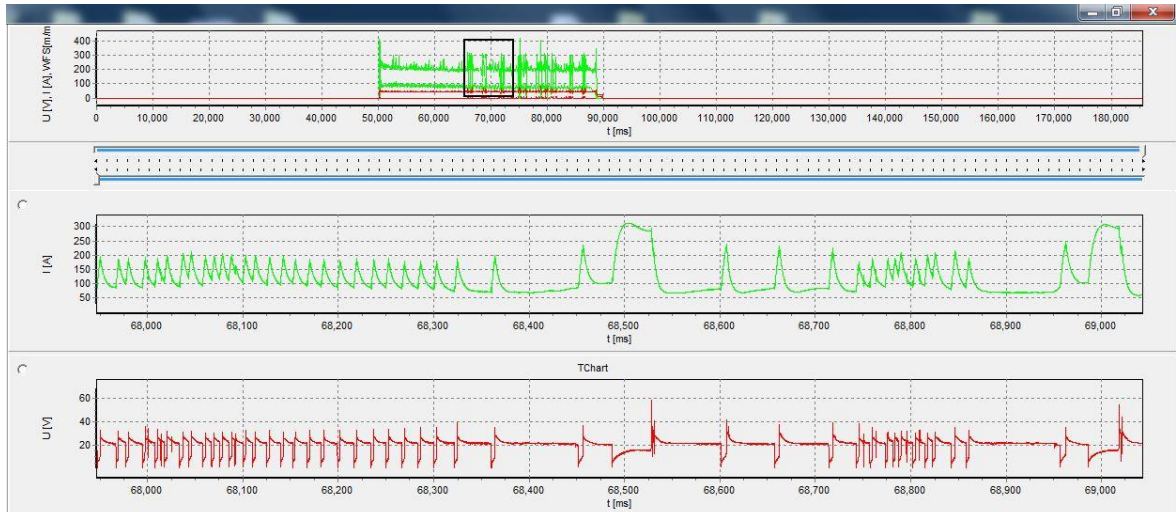
Obr. 6.18 - JK11



Obr. 6.19 - JK11_ Průběh I a U



Obr. 6.20 - JK12



Obr. 6.21 - JK12_Přůběh I a U

6.7.8. EXPERIMENT 8 – JK13, JK14, JK15

Tímto experimentem byla ověřena funkčnost systému TAST, pokud dojde k vypnutí jednoho ze směrů korekce. Všechny tři vzorky mají stejné parametry, laterální i vertikální citlivost je nastavena na 50 a korekce za cyklus 1 mm.

JK13 – zapnuty oba směry korekce. Výsledek je uspokojivější než už JK14 a JK15, přesto je svar na konci dráhy asymetrický. Dovolená chyba dle ČSN EN ISO – B byla spočítána na 2,1 mm. Velikost chyby je zde 4,1 mm.



Obr. 6.22 - JK13

JK14 – vypnutá vertikální korekce. Jak je vidět, tak bez vertikální korekce dokázal robot zdařile svařit přibližně 50 % délky svaru.



Obr. 6.23 - JK14

JK15 – vypnutá laterální korekce. Vypnutím této funkce se robot držel naprogramované dráhy, jelikož neměl, jak detekovat chybu v příčném směru.

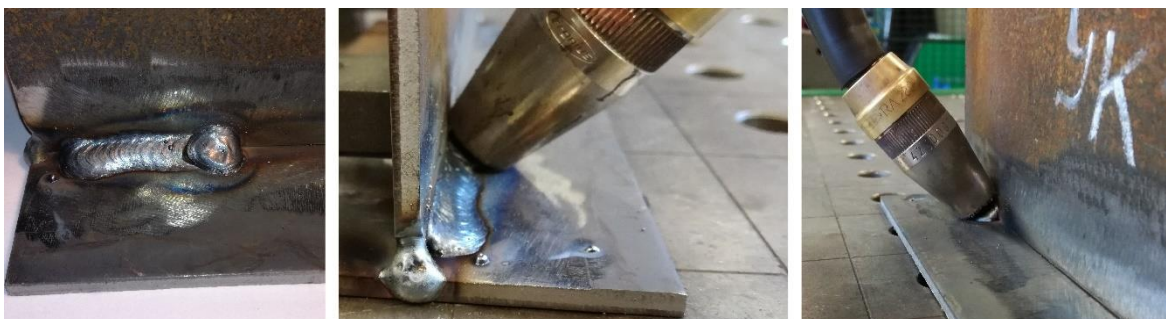


Obr. 6.24 - JK15

6.7.9. EXPERIMENT 9 – JK17

Veškeré předchozí vzorky byly svařeny pomocí zpětné vazby (FEEDBACK), tedy robot si v prvních cyklech nejdříve změří hodnotu proudu, kterou si označí za referenční. V tomto případě byla tato možnost přepnuta na konstantu proudu, kterou zadává uživatel – $I = 150 \text{ A}$.

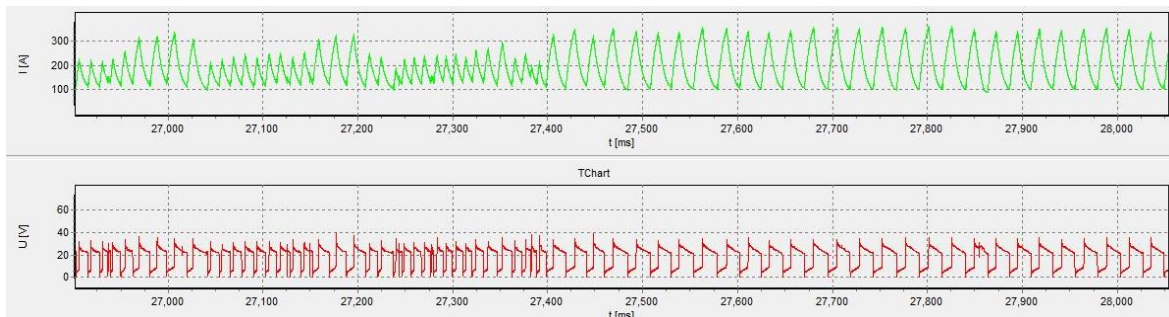
Svařovací proces byl přerušen ručně. Robot totiž vedl hořák do kolize se základním materiálem. Při stejném nastavení, ale s použitím zpětné vazby byl svařen vzorek JK16 (obr. 6.26, citlivost 99).



Obr. 6.25 - JK17

Je zde přiložen i záznam napětí a proudu v momentu, kdy začalo docházet ke kolizi se základním materiálem. Nicméně i před časem 24,4 s hodnota proudu kolísá s vyšší amplitudou než u vzorků

se zapnutou zpětnou vazbou. Volbu konstantní hodnoty proudu lze považovat za nevhodnou pro MIG/MAG svařování. Další testování by bylo vhodné se svařovacím zdrojem TIG. Následující experimenty budou prováděny pouze s aktivovaným feedbackem.



Obr. 6.26 - JK17_Průběh I a U

6.7.10. Průběžné hodnocení výsledků

- Používat oba směry korekce
- Hlavní vliv má nastavení citlivosti (příliš malá nebo velká citlivost způsobeno nekvalitní geometrií svaru)
- Limit korekce za cyklus 1 mm je naprosto dostačující (při nastavení frekvence 3 Hz je rychlost až 3 mm/sec)
- Změna svařovacích parametrů vyžaduje úpravu i nastavení TAST
- Používat FEEDBACK

Ze zjištěných poznatků se jako hlavní dovednost projevilo určování citlivosti, která nesmí být ani příliš malá, ani velká. Proto se v následujících měřeních budou experimenty věnovat zkoumáním závislosti citlivosti na velikosti odchylky.

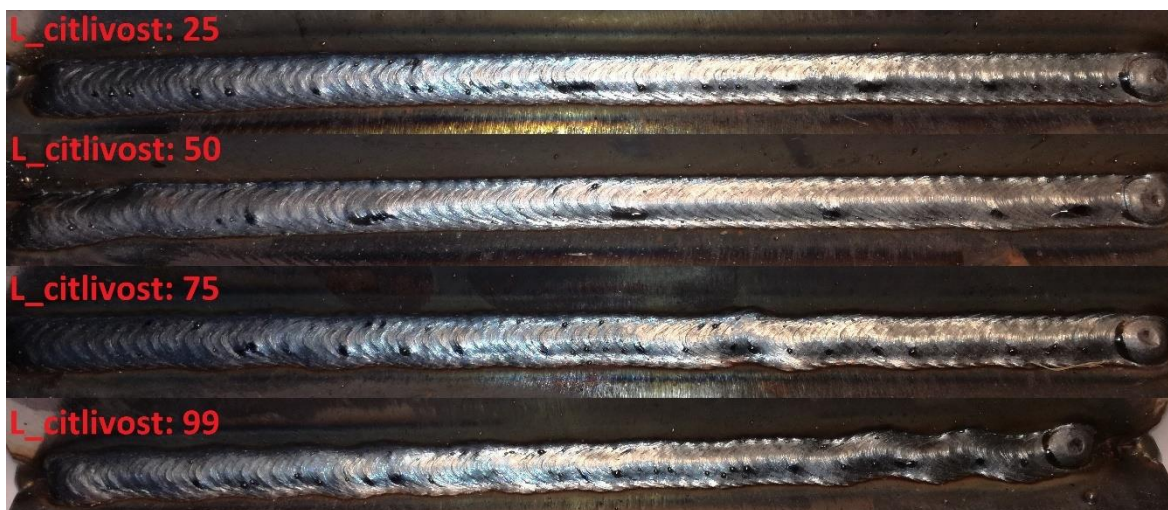
6.7.11. EXPERIMENT 10 – JK13, JK16, JK18, JK19, JK21-26, JK28, JK29

Způsob pro získání závislosti *citlivost (laterální) – odchylka* byl zvolen následující:

- 1) S odchylnou 5° se svaří čtyři vzorky – citlivost 25, 50, 75, 99.
- 2) Z těchto vzorků se vybere nejvyšší – získá prvního bodu grafu
- 3) Proces se zopakuje pro odchylku 10°
- 4) Proces se zopakuje pro odchylku 15°
- 5) Vyhodnocení experimentu – získání grafické závislosti

Odchylka 5°

Nejlepší geometrie svaru je zde jednoznačně u vzorku s citlivostí 25. U citlivosti 50 se na konci lehce projevilo vlnění svaru – anglicky "*snaking*" neboli "*hadování*". Se vzrůstající citlivostí se tento problém prohlubuje, což potvrzuje, že předimenzovaná citlivost je chybou v nastavení.



Obr. 6.27 - Testování citlivosti, odchylka 5° (pořadí vzorků: JK23, JK19, JK21, JK22)

Odchylka 10°

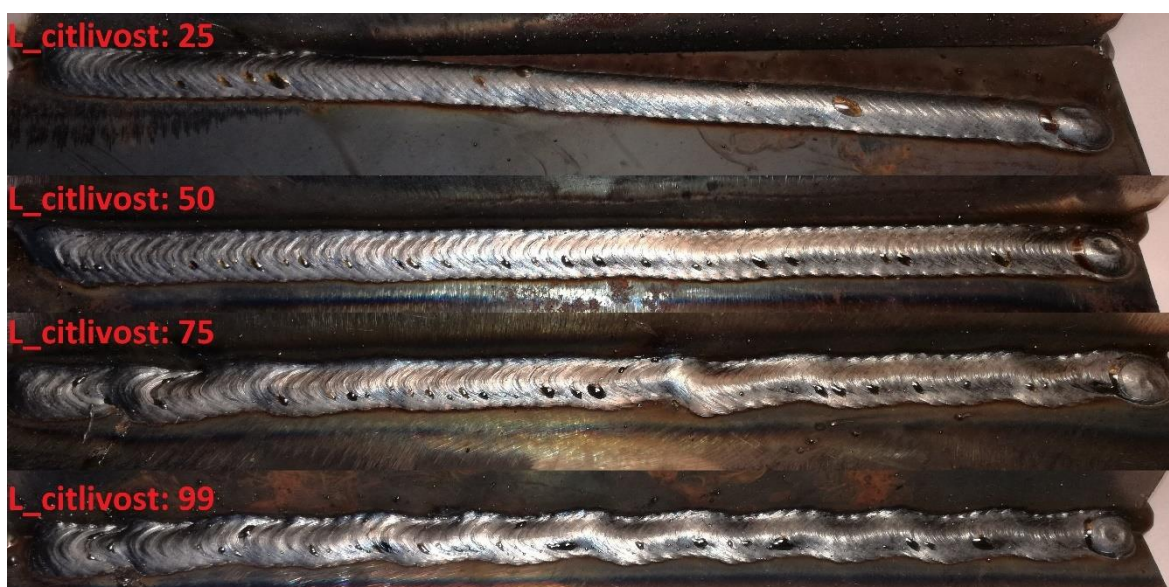
Postup byl opakován pro odchylku 10°. Citlivost 25 je zde na první pohled nedostačující, jelikož je u svaru asymetrie o velikosti 3,9 mm (tzn. chyba asymetrie 1,8 mm). U citlivosti 50 je začátek svaru vyhovující, nicméně ke konci dochází ke stejnému problému jako u citlivosti 25. Nejlepšího výsledku dosáhla citlivost 75. Dochází sice k mírnému vlnění, ale velikost asymetrie je 1,8 mm, což je v toleranci (2,1mm). Citlivost 99 opět předimenzovaná a vlnění se značně projevuje (viz obr. 6.28).



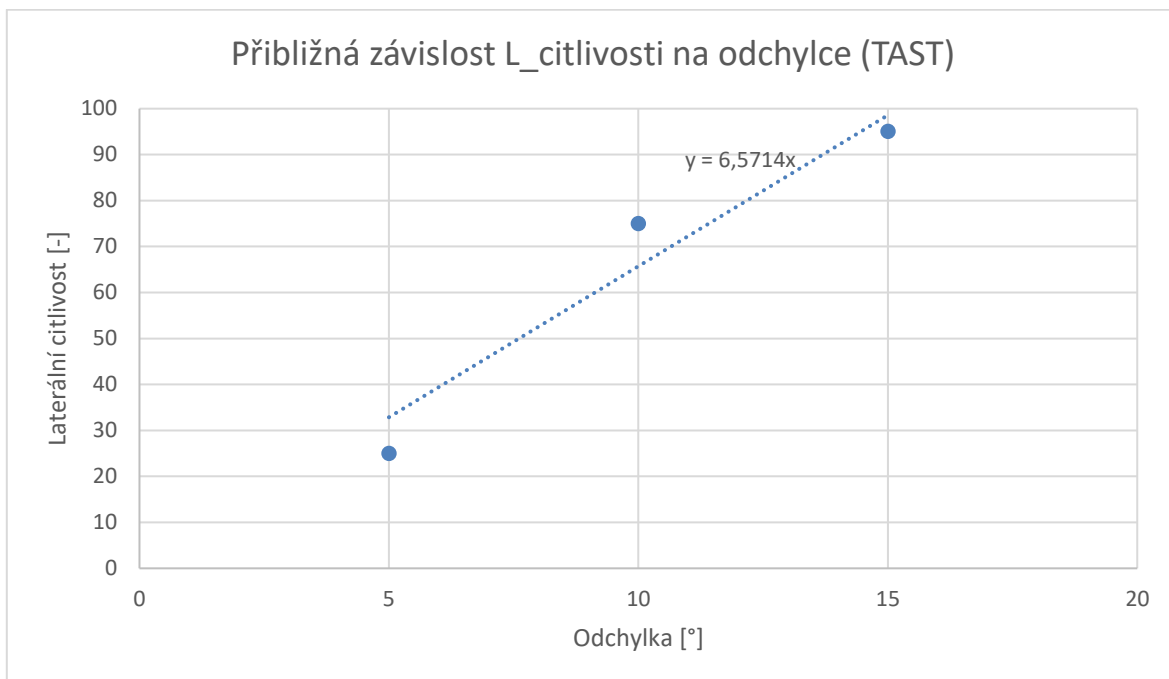
Obr. 6.28 - Testování citlivosti, odchylka 10° (pořadí vzorků: JK24, JK13, JK18, JK16)

Odchylka 15°

Citlivost 25 je opět naprosto nedostačující viz obr. 6.29. Bohužel zde ani jedna z možností nebyla správná a nebylo docíleno dostatečně kvalitního svaru. Tento jev je pravděpodobně způsobem možnostmi TASTu, pro který je odchylka 15° limitující (i dle návodu). Ačkoliv za vhodný svar se nedá považovat ani jeden vzorek, nejlepší možností i přes značné vlnění je vzorek s citlivostí 99. Ten nejvíce vyplňuje kovem svarovou mezeru koutového spoje. Jako závěr z tohoto testu s odchytkou 15° vyplývá, že pro kvalitní použití systému TAST je vhodné zajistit svařenec stehováním, tak aby se maximální odchylka pohybovala pod 15° a citlivost volit menší než maximální možnou.



Obr. 6.29 - Testování citlivosti, odchylka 15° (pořadí vzorků: JK25, JK26, JK29, JK28)



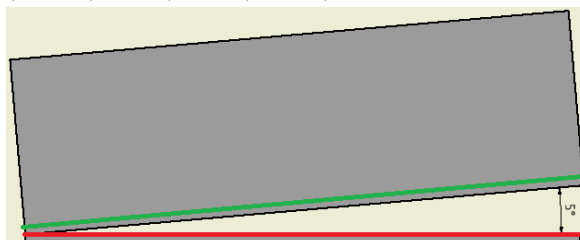
Graf 6.1 - Závislost laterální citlivosti na velikosti odchylky

6.7.12. EXPERIMENT 11 – JK35, JK37, JK38, JK39, JK40, JK42, JK44

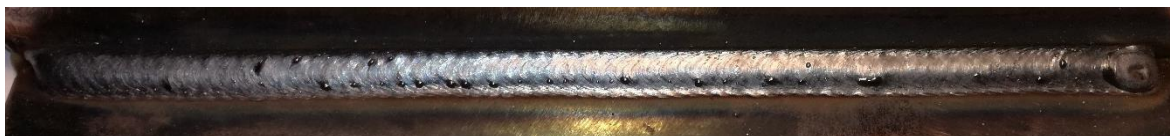
Aplikace poznatků zjištěných při testování laterální kompenzace na odchylku vertikální.

Trasování ve vertikální směru se zdá pro TAST jako snazší práce. Při vychýlení 5° (výška

cca 18 mm) byly vyhovující svary s citlivostí ve vertikálním směru 25, 75 i 99. Všechny svary mají odchylku asymetrie kolem 0,3 mm. Nicméně citlivost 25 je po vizuální stránce nejlepší.



Obr. 6.30 - JK35 (V_citlivost = 25)

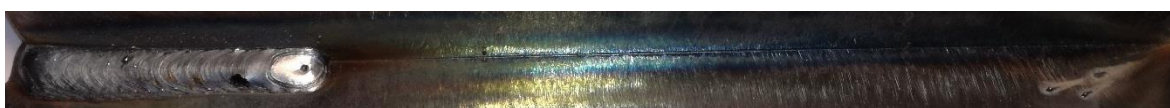
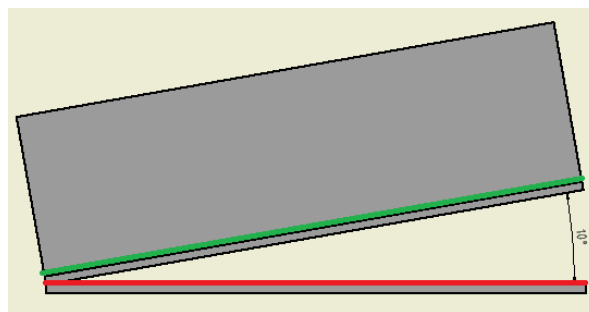


Obr. 6.31 - JK37 (V_citlivost = 75)



Obr. 6.32 - JK38 (V_citlivost = 99)

Opakování pro vertikální odchylku 10° . Jelikož jde převážně o ověření, byly zvoleny jen dvě nastavení citlivosti. Nastavení s citlivostí 25 bylo příliš nízké a došlo ke kolizi hubice se základním materiálem cca po ujetí 50 mm. Citlivost 50 byla dle očekávání dostačující a vznikl svar s vyhovující geometrií. Zajímavé je, že prvních 70 mm je svar mírně asymetrický (avšak v rámci tolerance 2,1mm). Od vzdálenosti 70 mm do až konce svaru je asymetrie téměř nulová. Ideálně by pravděpodobně byla citlivost o velikosti 60 až 70.

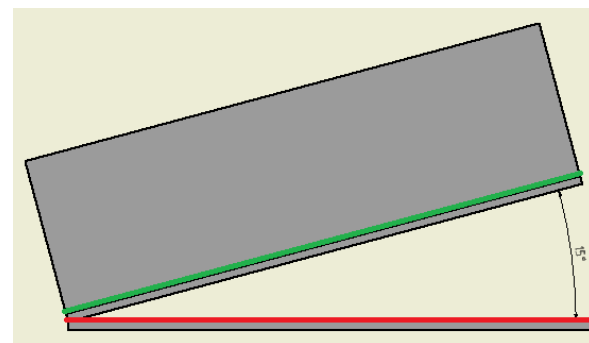


Obr. 6.33 - JK39 (V_citlivost = 25)



Obr. 6.34 – JK40 (V_citlivost = 50)

Dále byl experiment ověřen pro odchylku 15° . Zkoušen byl vzorek s nastavením citlivosti 75 a 99. Opět se hranice 15° projevila jako problémová. TAST s citlivostí 75 nebyl schopen dráhu dostatečně kompenzovat. V podstatě nedošlo ani k vytvoření koutového svaru. Po nastavení maximální vertikální citlivosti, tedy 99, došlo sice k výraznému zlepšení, ale svar je stále asymetrický (mimo toleranci 2,1 mm)



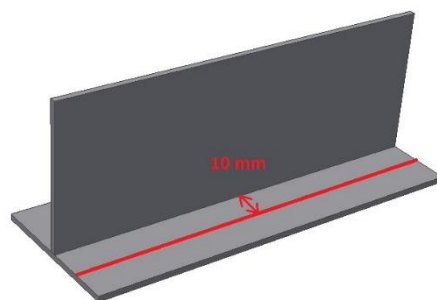
Obr. 6.35 - JK42 (V_citlivost = 75)



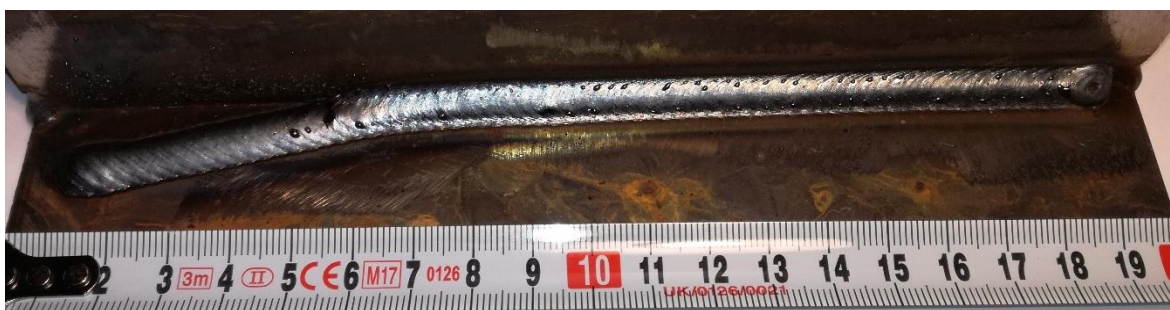
Obr. 6.36 - JK44 (V_citlivost = 99)

6.7.13. EXPERIMENT 12 – JK45, JK46

Cílem experimentu bylo zjistit, za jak dlouho se dokáže systém TAST zkorigovat k plechu, i když začíná ve volném prostoru. Vzorek byl odsunut 10 mm od naprogramované dráhy.



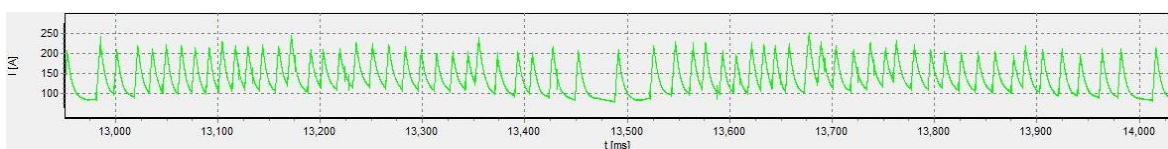
Pro vzorek JK45 (obr. 6.37) byla nastavena citlivost v laterálním i vertikálním směru na 25. Vzorek JK50 má upravenou laterální citlivost na 50 (obr. 6.38). Robot dosáhl správné pozice o 12 mm dříve než při citlivosti 25.



Obr. 6.37 - JK45 (V_citlivost = 25)



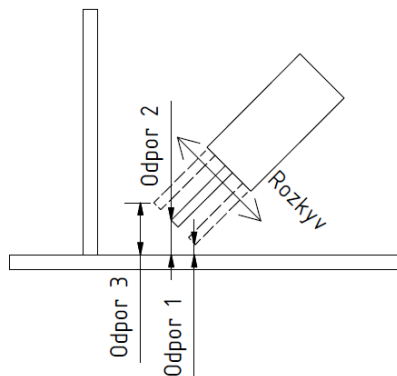
Obr. 6.38 - JK46 (V_citlivost = 50)



Obr. 6.39 - JK45 - Průběh proudu I

Z obr. 6.38 lze vidět, že v časovém rozmezí 13,000 až 13,400 sec proud neklesne pod 100 A, poté nastává kratší období 13,400 až 1,550 sec, kdy proud lehce klesne pod 100 A, a následně opět roste. Při směru pohybu hořáku kolmo s grafem (vpravo), se vrchní část grafu stává levou stranou, kterou by měl robot kompenzovat. A skutečně kompenzuje tímto směrem, protože jsou zde větší hodnoty proudu v delším časovém období. TAST dráhu kompenzuje, protože při koutovém svaru

je svařovací hořák naklopen o 45°. Díky posunu o 10 mm u vzorku JK46 ovšem neměl svislý plech v dostatečné blízkosti. Na jedné straně (vlevo ve směru pohybu) je tedy vždy vyšší elektrický odpor než na druhé.



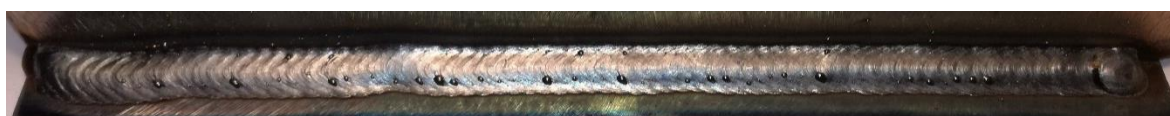
Obr. 6.40 - Změny odporu při rozkyvu

6.7.14. EXPERIMENT 13 - JK47

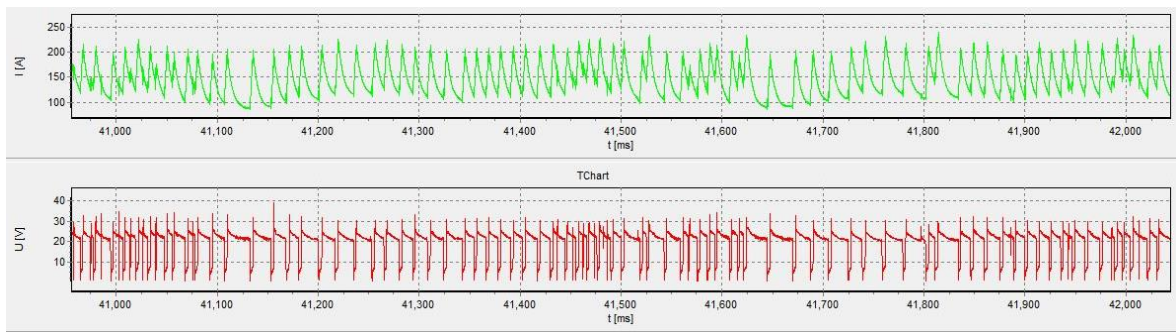
Ověření poznatků na vzorku, který je vychýlen v obou směrech 10°. Citlivosti v laterálním i vertikálním směru nastaveny na 60. Výsledkem je svar s asymetrií o velikostí 2,5 mm, což o 0,4 mm překračuje dovolenou odchytku. Na obr. 6.43 je vidět průběh proudu, který kolísá kolem hodnoty 150 A. TAST vykompenzoval odchytku v obou směrech, nicméně svar nesplnil (chybou číslo 512) nejpřísnější stupeň kvality dle ČSN EN ISO 5817 – B.



Obr. 6.41 - JK47 ukázka vychýlení



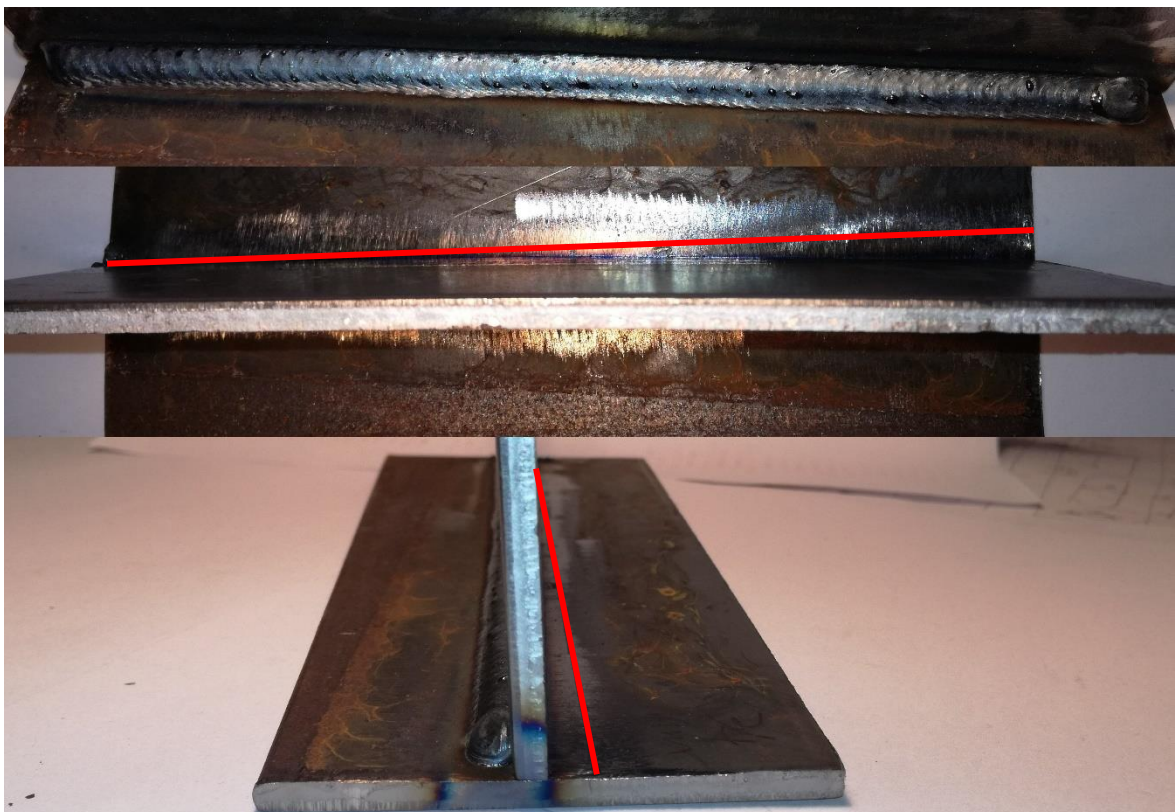
Obr. 6.42 - JK47 po zavaření



Obr. 6.43 - JK47 průběh proudu I

6.7.15. EXPERIMENT 14 – JK34

Tento vzoreček slouží jako ukázka sil působících při svařování a také zkouška, jak si TAST poradí s plechem, který se pohybuje během svařovacího procesu (plechy jsou k sobě nastehované pouze na jedné straně (vlevo)). TAST zvládl úlohu velice dobře a vychýlení po svaření bylo 6 mm. Na obr. 6.44 je na prostřední fotografii vidět červená čára označující původní polohu svislého plechu. Použito bylo nastavení s citlivostí 50 ve vertikálním směru a s citlivostí 25 v laterálním směru.



Obr. 6.44 - JK34

7. Závěrečné zhodnocení

Teoretická část diplomové práce popisuje roboty, robotizovaná pracoviště a zmiňuje nové trendy v robotizovaném svařování. Dále se práce věnovala vhodným svařovacím metodám pro robotizaci. V poslední kapitole teoretické části se práce věnuje sensorům používaným pro robotizované svařování, nejvíce se však zabývá teorií ohledně systému TAST.

Pro uskutečnění kvalitní výroby s robotizovaným svařováním jsou senzory téměř nezbytné. Vzhledem k nízkým nákladům je senzor TAST výbornou volbou, ačkoliv jeho nastavení může být časově náročnější a nezkušený pracovník může narazit na větší množství nejasností.

Pro experimentální část bylo svařeno přibližně 50 vzorků, díky kterým jsem dokázal nastavení TAST vymezit na nejdůležitější kroky a pochopit zásadní prvky nastavení.

- Dodržet základní pokyny pro nastavení (viz 5.3.3.)
- Trasovat vždy v laterálním i vertikálním směru
- Aktivovaný FEEDBACK
- Limitovat velikost korekce za cyklus (1mm/cyklus)
- Hlavní parametr = citlivost (viz graf 6.1)

Závěrem práce je představena ukázka použití senzoru TAST viz experiment číslo 14, kdy TAST aktivně reagoval na změny umístění svařovaných plechů. Dále je zde návrh cvičení pro budoucí studenty FS ČVUT, kde si studenti během dvou cvičení vyzkoušejí nejprve ruční svařování a připraví si vzorky. Následně tyto vzorky upnou do přípravků robota a budou si moci vyzkoušet práci se senzorem – viz příloha číslo 2.

Vzhledem k vývoji v oboru robotizovaného svařování se nabízí uplatnění senzoru TAST u svařovacích kolaborativních robotů. Kombinace TAST se senzorem schopným vyhledat umístění svaru se jeví jako velice výhodná. Požadavky na kvalitu a rychlost výroby napovídají, že by se roboty s podobnou kombinací sensorů mohly nacházet ve firmách zaměřených spíše na kusovou výrobu. A právě pro takové společnosti by TAST mohl být oproti jiným sensorům ideální volbou – hlavně z finančních důvodů.

Cíle práce byly splněny v plném rozsahu.

8. Seznam použité literatury

- [1] HONG, T.S., M. GHOBAKHLOO a W. KHAKSAR. *Robotic Welding Technology. Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, 2014, s. 77-99 [cit. 2019-02-27]. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00604-X. ISBN 9780080965338.
Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B978008096532100604X>
- [2] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2007] [cit. 2019-02-27]. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [3] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- [4] Motoman: Proč roboty. *Motoman: Doma* [online]. Copyright © 2013 YASKAWA Europe GmbH [cit. 28.02.2019]. Dostupné z: <http://www.motoman.cz/cs/spolecnost/o-yaskawe/proc-roboti/>
- [5] PIRES, J.N., A. LOUREIRO, T. GODINHO, P. FERREIRA, B. FERNANDO a J. MORGADO. Welding robots. *IEEE Robotics & Automation Magazine*[online]. 2003, 10(2), 45-55 [cit. 2019-02-27]. DOI: 10.1109/MRA.2003.1213616. ISSN 1070-9932.
- [6] Druhy průmyslových robotů. *FactoryAutomation.cz | Časopis o automatizaci a robotice* [online]. [cit. 11.03.2019]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/prumyslove-roboty-jake-jsou-jejich-druhy/>
- [7] International Federation of Robotics. *Sources and Methods WR Industrial Robots 2018* [online]. Copyright © [cit. 11.03.2019]. Dostupné z: <https://ifr.org/downloads/press2018/Sources%20and%20Methods%20WR%20Industrial%20Robots%202018.pdf>
- [8] Plantautomation-Technology. *Top industrial robotics companies in the world* [online]. [cit. 13.03.2019]. Dostupné z: <https://www.plantautomation-technology.com/articles/top-industrial-robotics-companies-in-the-world>
- [9] ABB. *ABB logo standard (JPG)*. [online]. Copyright © 2019 ABB. [cit. 13.03.2019]. Dostupné z: <http://www.abb.com/ContentPages/C3Page.aspx?&db=abbzh252&c=8f503a1b9869cc4dc1256b0400552aa9>
- [10] TOP 10 výrobců robotů na světě. *FactoryAutomation.cz | Časopis o automatizaci a robotice* [online]. Copyright © [cit. 13.03.2019]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/top-10-vyrobcu-robotu-na-svete-kolik-instalovali-robotu/>
- [11] FANUC | The Factory Automation Company - Fanuc [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs>
- [12] Rosindustrial. *Yaskawa america motoman robotics division ric member of the week* [online]. Dostupné z: <https://rosindustrial.org/news/2014/2/18/yaskawa-america-motoman-robotics-division-ric-member-of-the-week>
- [13] Kawasaki Robotics. *Industrial Robots & Automation Solutions* [online]. Dostupné z: https://robotics.kawasaki.com/en1/userAssets/images/com_header_splogo.png
- [14] PIRES, J. N., LOUREIRO, A., BOLMSJÖ, Gunnar. (2006). *Welding robots: Technology, system issues and applications*. DOI: 10.1007/1-84628-191-1. ISBN 1-85233-953-5.
- [15] MIG/MAG (CO₂) - svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování | Svářecí technika Schinkmann.cz. *Svářecí technika Schinkmann.cz* [online]. Copyright © 1991 [cit. 21.03.2019]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>

- [16] Co je metoda TIG? Základní seznámení | SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ. SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ - profesionální e-shop se svařovací technikou [online]. [cit. 22.03.2019]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [17] ČEZ - Lasery a jeho využití. Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE [online]. Copyright © 2019, ČEZ, a. s. [cit. 23.03.2019]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/laser/k22.htm>
- [18] MISHRA, Akshansh. (2018). *Friction Stir Welding Of Dissimilar Metal: A Review*. DOI: 10.13140/RG.2.2.25672.62727.
- [19] VURAL, M. Welding Processes and Technologies. *Comprehensive Materials Processing* [online]. Elsevier, 2014, s. 3-48 [cit. 2019-03-28]. DOI: 10.1016/B978-0-08-096532-1.00603-8. ISBN 9780080965338. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780080965321006038>
- [20] Plasma Arc Welding - YouTube. *YouTube* [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=588EJInHLsc>.
- [21] WU, C.S., L. WANG, W.J. REN a X.Y. ZHANG. Plasma arc welding: Process, sensing, control and modeling. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. 2014, **16**(1), 74-85 [cit. 2019-03-29]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2013.06.004. ISSN 15266125. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S152661251300073X>
- [22] Plasma Welding Machines, Inverter Plasma Welder. *CSY TECH 志盛德科技有限公司* [online]. Copyright © 2019 [cit. 03.04.2019]. Dostupné z: <http://www.csy-tech.com/EN/?f=Plasma-Welding-Machines>
- [23] Complete Guide to Robotic Welding | Fairlawn Tool, Inc.. *Metal Fabrication Contract Manufacturing | Fairlawn Tool Inc.* [online]. Copyright © 2016. ALL RIGHTS RESERVED [cit. 03.04.2019]. Dostupné z: <https://www.fairlawntool.com/blog/complete-guide-robotic-welding/>
- [24] MOTOMAN Roboty - Yaskawa Europe GmbH. *Česká republika - Yaskawa Europe GmbH* [online]. Copyright © 2019 YASKAWA Europe GmbH [cit. 04.04.2019]. Dostupné z: <https://www.cz.yaskawa.eu.com/cs/produkty/roboty/motoman-roboty/>
- [25] Standardní systémy - Yaskawa Europe GmbH. *Česká republika - Yaskawa Europe GmbH* [online]. Copyright © 2019 YASKAWA Europe GmbH [cit. 04.04.2019]. Dostupné z: <https://www.cz.yaskawa.eu.com/cs/produkty/navrhovani-systemu/systemy-svarovani-elektrickym-obloukem/standardni-systemy/>
- [26] RobotWorx – SCOTT company. *Fanuc Educational Workcell* [online]. Copyright ©2019 RobotWorx [cit. 04.04.2019]. Dostupné z: <https://www.robots.com/workcells/fanuc-educational-workcell>
- [27] From robot to cobot, a look through history. | WiredWorkers | Blog. *Collaborative Robotics and Cobot Specialist - WiredWorkers*[online]. Copyright © [cit. 06.04.2019]. Dostupné z: <https://wiredworkers.io/from-robot-to-cobot/>
- [28] BÉLANGER-BARRETTE, Mathieu. *Collaborative robots ebook. Workfloor: Robotics News for the Factory* [online]. [cit. 06.04.2019]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/collaborative-robot-ebook>
- [29] Kolaborativní robot? 5 věcí, které musíte vědět. *FactoryAutomation.cz | Časopis o automatizaci a robotice* [online]. [cit. 06.04.2019]. Dostupné

- z: <https://factoryautomation.cz/co-je-to-kolaborativni-robot-5-veci-ktete-byste-o-nem-meli-vedet/>
- [30] Spolupracující roboty FANUC | The Factory Automation Company - Fanuc [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/spolupracující-roboty>
- [31] Migatronic CoWelder. *Migatronic - Welding Machines and Automated Solutions* [online]. Copyright © [cit. 06.04.2019]. Dostupné z: https://www.migatronic.com/Files/Files/Downloads/Brochures/52259203_CoWelder.pdf
- [32] VA1400 II - Yaskawa Robotics. *Home - Yaskawa Robotics* [online]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/welding-cutting/va-series/va1400-ii>
- [33] VS100 - Yaskawa Robotics. *Home - Yaskawa Robotics* [online]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/welding-cutting/vs-series/vs100>
- [34] FANUC introduces a 7-axis Robot at EuroBLECH. *Fanuc news* [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/de/en/who-we-are/news/de-press-release-new-robot-r-1000ia>
- [35] R-1000iA/130F. *Kompaktní, rychlý a výkonný - Fanuc* [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/řada-r-1000/r-1000ia-130f>
- [36] R-1000iA/120F-7B. *Kompletní manipulace v omezeném prostoru - Fanuc* [online]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/řada-r-1000/r-1000ia-120f7b>
- [37] GIRÃO, Pedro Silva, Pedro Miguel Pinto RAMOS, Octavian POSTOLACHE a José MIGUEL DIAS PEREIRA. Tactile sensors for robotic applications. *Measurement* [online]. 2013, 46(3), 1257-1271 [cit. 2019-04-16]. DOI: 10.1016/j.measurement.2012.11.015. ISSN 02632241.
- [38] KAH, P, M SHRESTHA, E HILTUNEN a J MARTIKAINEN. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*[online]. 2015, 10(1) [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1186/s40712-015-0042-y. ISSN 1823-0334. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1186/s40712-015-0042-y>
- [39] Knowing When Welding Sensors Make Sense - Yaskawa Motoman Robotics. *Home - Yaskawa Motoman Robotics* [online]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/about/blog/knowning-when-welding-sensors-make-sense>
- [40] Improve Robotic Welding Applications with Seam Finding and Tracking. *Workfloor: Robotics News for the Factory* [online]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/bid/66800/Improve-Robotic-Welding-Applications-with-Seam-Finding-and-Tracking>
- [41] Intelligent Robotic Arc Sensing. *Lincoln Electric* [online]. Copyright © 1999 [cit. 24.06.2019]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/process-and-theory/Pages/intelligent-robotic-detail.aspx>
- [42] Fakta a mýty o dotykovém vyhledávání při robotickém svařování. *Nejčtenější strojírenský časopis - MM spektrum* [online]. Copyright © 2019 www.mmspektrum.com [cit. 24.06.2019]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/fakta-a-myty-o-dotykovem-vyhledavani-pri-robotickem-svarovani.html>
- [43] How Seam Tracking Solutions Compare. *ABIBLOG English* [online]. Copyright © 2019 ABICOR BINZEL [cit. 24.06.2019]. Dostupné z: <https://blog.binzel-abicor.com/how-seam-tracking-solutions-compare>

- [44] Tactile Seam Tracking Systems. *Lincoln Electric* [online]. Copyright © 1999 [cit. 24.06.2019]. Dostupné z: <https://www.lincolnelectric.com/en-gb/support/process-and-theory/Pages/tactile-seam-tracking-systems.aspx>
- [45] Tactile Seam Tracking Column and Boom Welding Manipulator Demonstration. *Welding Automation and Material Handling Systems | LJ Welding* [online]. Copyright © 2019 LJ Welding [cit. 24.06.2019]. Dostupné z: <https://www.ljwelding.com/videos/tactile-seam-tracking/column-boom-welding-manipulator>
- [46] Optronic Sensors: Applications in Detonics | Optronic Triangulation. *Electronics For You | If It's Electronics, It's Here* [online]. Copyright © Copyright 2019 [cit. 27.06.2019]. Dostupné z: <https://electronicsforu.com/technology-trends/tech-focus/optronic-triangulation-sensors>
- [47] *Fanuc robot series R-30iA controller ARC tool operators manual B-82594EN-3/03*. Interní materiál. Fanuc. 2003.
- [48] *T.A.S.T. tracking*. Interní materiál. Migatronic CZ a.s., Teplice. 25. 6. 2007.
- [49] Arc Mate 100ic Brochure. *Askaynak Automation* [online]. Copyright © [cit. 09.07.2019]. Dostupné z: https://www.askaynakautomation.com.tr/contents/63/arc-mate-100ic_Brochure_130707211327676211.pdf
- [50] Katalog TransSynergic zdrojů Fronius. *Fronius - profesionální svařovací, řezací a nabíjecí technika* [online]. Copyright © [cit. 09.07.2019]. Dostupné z: http://www.froweld.cz/fotky3812/fotov/_ps_1179TS-TPS.pdf
- [51] Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu > LAO - lasery a optika. *LAO - lasery a optika* [online]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
- [52] I-Robo Stir - Friction Stir Welding Robot for Complex Paths and Curvatures. *Robotic Automation | Engineering, Material Handling | PaR* [online]. Copyright © 2019 [cit. 19.07.2019]. Dostupné z: <https://www.par.com/technologies/friction-stir-welding/i-robo-stir/>
- [53] 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: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.



9. Seznam příloh

PŘÍLOHA Č. 1: Jednotlivá nastavení TAST pro použité svařovací vzorky.

PŘÍLOHA Č. 2: Návrh cvičení pro nadcházející ročníky