

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Progresivní technologie a materiály

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Volba vhodných svařovacích parametrů při robotickém svařování
konstrukčních ocelí

Autor: František Hucek

Vedoucí práce: *Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž IWE*

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **František HUČEK**
Osobní číslo: **S19B0097K**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Progresivní technologie a materiály**
Téma práce: **Volba vhodných svařovacích parametrů při robotickém svařování konstrukčních ocelí**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Teoretický rozbor svařování metodou MAG, využití robotického svařování
2. Charakteristika svařovaných materiálů – konstrukčních ocelí S355 MC
3. Princip programování pro svařování, využití v praxi, popis možností zpětné vazby
4. Praktická část – tvorba koutových svarů u materiálu S355MC za různých podmínek
5. Vyhodnocení svarového spoje
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

PIRES Norberto, LOUREIRO, Altino, BÖLMSJO, Gunnar., *Welding Robots: Technology, System Issues and Application*, Publisher Springer, 2005 ISBN: 1852339535, 97818523395312005 ISBN: 1852339535, 9781852339531

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

OLDŘICH, Ambrož., *Technologie svařování a zařízení Vyd. 1. Ostrava, Zeross, 2001. ISBN: 80-85771-81-0 (brož.)*

TARN, Tzyh-Jong, CHEN, Shan-Ben, CHEN Xiao-Qi., *Robotic Welding, Intelligence and Automation.*, Springer International Publishing Switzerland, 2015. ISBN 978-3-319-18997-0 (eBook)

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jindřich Novák**

Datum zadání bakalářské práce: **6. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Můj největší dík patří panu Prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi za jeho odborné vedení, cenné připomínky a velkou pomoc při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval firmě A. Pöttinger spol. s.r.o. Vodňany, která mi umožnila provést praktickou část mé bakalářské práce. A nakonec musím také poděkovat mé rodině, která mi byla po celou dobu studia velkou oporou.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hucek	Jméno František		
STUDIJNÍ OBOR	B0715A270013 Strojní inženýrství			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Kříž IWE	Jméno Antonín		
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Volba vhodných svařovacích parametrů při robotickém svařování konstrukčních ocelí			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	------------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	67	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	27
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zabývá robotickým svařováním MAG, Cílem této práce je porovnat jednotlivé svařovací procesy moderního svařovacího zdroje od firmy Fronius, zjistit jejich vliv těchto procesů na svařovanou konstrukční ocel. A navrhnout optimální svařovací parametry pro tyto procesy, tak aby byly svary kvalitní a robotická pracoviště byla produktivní
KLÍČOVÁ SLOVA	svařovací parametry; Robot; MIG, MAG, svařování

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Hucek	Name František	
FIELD OF STUDY	B0715A270013 Strojní inženýrství		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing. Kříž IWE	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	The choice of suitable welding parameters in robotic welding of structural steel		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	67	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	27
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with robotic MAG welding. The aim of this thesis is to compare various processes of modern welding power source Fronius, to determine their impact on welded structural steel and to design optimal welding parameters for these processes in order that the welds are high quality and robotic workplaces are productive.
KEY WORDS	welding parameters; robot; MIG; MAG; welding

Seznam použitých zkratk a veličin:

Veličina	Význam	Jednotka
Ac ₁	Teplota	[°C]
Ac ₃	Teplota	[°C]
A5	Tažnost	[%]
Al	Hliník	-
Ar	Argon	-
C	Uhlík	-
CEV	Uhlíkový ekvivalent	-
Cr	Chrom	-
CO ₂	Oxid uhličitý	-
ČSN	Česká státní norma	-
EN	Evropská norma	-
Fe	Železo	-
Fe- α	Železo alfa- ferit	-
Fe- γ	Železo gama- austenit	-
HV	Tvrdost podle Vickerse	-
HRC	Tvrdost podle Rockwella	-
I	Svařovací proud	[A]
ISO	mezinárodní organizace pro normalizaci	-
MOVJ	Obecný pohyb robota	-
MOVL	Lineární pohyb	-
MOVS	Pohyb po splinu	-
MOVC	Kruhový pohyb	-
MIG	(Metal Inert Gas) svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu	-
MAG	(Metal Activ Gas) svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu	-
Mo	Molybden	-
Mn	Mangan	-
Nb	Niob	-
Ni	Nikl	-
NTMZ	Nízkoteplotní termomechanické zpracování	-
O ₂	Kyslík	-
P	Fosfor	-
PA	Poloha svařování vodorovná z hora	-
PB	Poloha svařování vodorovná šikmo z hora	-
PMC	Pulse Multi Control- modifikovaný pulzní přenos kovu	-
Qs	Vnesené teplo	[kJ]
ROS	Ruční obloukové svařování	-
Rm	Mez pevnosti	[MPa]

Re	Mez kluzu	[MPa]
S	Síra	-
Si	Křemík	-
TCP	Tool center point (centrální bod nástroje	-
Ti	Titan	-
TIG	(Tungsten Inert Gas) svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu	-
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	-
TMZ	Tepelně mechanické zpracování	-
U	Svařovací napětí	[V]
v	Rychlost svařování	[mm.s ⁻¹]
VTMZ	Vysokoteplotní termomechanické zpracování	-
111	Technologie svařování obalenou elektrodou	-
131	Technologie MIG	-
135	Technologie MAG	-
136	Obloukové svařování plněnou elektrodou	-
η	Koeficient účinnosti svařování	-
$\Delta t_{8/5}$	Rychlost ochlazování z 800 na 500°C	[s]

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Chemické složení S355MC dle EN 10 149-2.....	16
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti S355MC dle EN 10 149-2	16
Tabulka 3: Návrh svařovacích parametrů	45
Tabulka 4: Zaznamenání skutečných parametrů svařování vzorků.....	46
Tabulka 5: Porovnání hloubky závaru „h“ a šířky TOO „c“	52
Tabulka 6: Porovnání vneseného tepla Q	55
Tabulka 7: Aplikované parametry svařování robot	56
Tabulka 8: Souhrnná tabulka úspor	56
Tabulka 9: Optimální svařovací parametry pro koutový svar a5 a tloušťku materiálu 8 mm .57	

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Logo společnosti PÖTTINGER [1].....	14
Obrázek 2: Příklad svařovaného rámu [autor]	15
Obrázek 3: Označování ocelí dle ČSN EN 100027-7.....	16
Obrázek 4: Schéma průběhu (1) vysokoteplotního a (2) nízkoteplotního tepelně mechanického zpracování [19]	18
Obrázek 5: Vliv řízeného válcování TM a řízeného ochlazování na jemnozrnnost.....	19
Obrázek 6: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [3]	20
Obrázek 7: Charakteristický průběh tvrdosti svarovým spojem [3]	21
Obrázek 8: Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [3].22	
Obrázek 9: Zařízení pro svařování MIG/MAG [11].....	24
Obrázek 10: Srovnání různých V-A charakteristik- vliv strmosti na změnu proudu [10].....	25
Obrázek 11: Průběh startu oblouku [10].....	26
Obrázek 12: Reakce ochranného plynu s povrchem lázně[10].....	27

Obrázek 13: Zakótování koutového svaru dle ČSN EN ISO 2553.....	29
Obrázek 14: Vliv podávání drátu na proud [7]	30
Obrázek 15: Přímá a nepřímá polarita svařovacího proudu [23].....	30
Obrázek 16: Zobrazení volné délky (výletu) drátu [7]	31
Obrázek 17: Oblasti přenosu kovu v oblouku [10].....	32
Obrázek 18: Průběh proudu a napětí při pulzním přenosu [10].....	33
Obrázek 19: 1- robot; 2- polohovadlo; 3- portál, pro posuv robotického ramene[14]	35
Obrázek 20: Bod TCP a základní souřadnicové systémy [13]	35
Obrázek 21: souřadnicové systémy robotu Yaskawa [14].....	36
Obrázek 22: Lineární pohyb [15].....	37
Obrázek 23: Kruhový přípravek [15].....	38
Obrázek 24: Popis dvou po sobě jdoucích kruhových pohybů [15]	38
Obrázek 25: Pohyb typu SPLINE [15]	39
Obrázek 26: Dvě na sebe navazující křivky [15].....	39
Obrázek 27: Základní kývavý pohyb a jeho souřadnicový systém [16].....	40
Obrázek 28: Typy kývavého pohybu [16]	40
Obrázek 29: Robotická buňka Yaskawa [autor]	41
Obrázek 30: Zdroj TPSi 500 od firmy Fronius [12]	42
Obrázek 31: Zdroj TPSi 400 od firmy Fronius[12]	42
Obrázek 32: příprava vzorků pro svařování.....	43
Obrázek 33: Schéma pohybového programu robota [17]	44
Obrázek 34: Schéma zadávání svařovacích příkazů [17]	44
Obrázek 35: Robotické svařování - proces PMC 40 cm/min	47
Obrázek 36: Rentgenový snímek vzorku V-3 měření největšího póru.....	48
Obrázek 37: Místo pro odběr vzorku	49
Obrázek 38: Odebrané naleptané vzorky V1 až V6.....	50
Obrázek 39: Odebrané a naleptané vzorky V7-V12	51
Obrázek 40: Měření údajů: a- velikost svaru; h- hloubka závaru;h ₁ - hloubka závaru; c- šířka TOO	52
Obrázek 41: Pracoviště měření tvrdosti v laboratoři KMM na ZČU.....	53
Obrázek 42: Popis koutového svaru měření mikrotvrdosti dle.....	54
Obrázek 43: Vizualizace měření mikrotvrdosti vzorku V-1	55
Obrázek 44: Základní nastavení svařovacího zdroje [foto autor].....	61
Obrázek 45: Příklad nastavení hlavních podmínek svařování [foto autor].....	62
Obrázek 46: Vzorek V-1 PMC- robotické svařování	62
Obrázek 47: Vzorek V-2 PMC- robotické svařování	63
Obrázek 48: Vzorek V-3 PMC- robotické svařování	63
Obrázek 49: Vzorek V-4 Pulz- robotické svařování.....	63
Obrázek 50: Vzorek V-5 Pulz- robotické svařování.....	64
Obrázek 51: Vzorek V-6 Pulz- robotické svařování.....	64
Obrázek 52: Vzorek V-7 Standard- robotické svařování.....	64
Obrázek 53: Vzorek V-8 Standard- robotické svařování.....	65
Obrázek 54: Vzorek V-9 Standard- robotické svařování.....	65
Obrázek 55: Vzorek V-10 Standard- ruční svařování.....	65

Obrázek 56: Vzorek V11 Pulz- ruční svařování	66
Obrázek 57: Vzorek V-12 PMC- ruční svařování	66
Obrázek 58: Výkres dílu Abstreiferhalter	67

Obsah

1 Úvod [1]	13
2 Teoretická část	15
2.1 Charakteristika svařovaných materiálů	15
2.1.1 Složení konstrukční oceli S355MC [5], [6], [3], [24]	16
2.1.2 Termomechanicky zpracované oceli [18], [19]	17
2.1.3 Svařitelnost ocelí [3], [9]	19
2.1.4 Přídavný materiál [3]	23
2.2 Rozbor svařovací metody MAG [10],[11]	23
2.2.1 Zdroje pro svařování metodou MIG/MAG [10]	24
2.2.2 Metalurgické reakce při svařování MAG [10]	26
2.2.3 Ochranné plyny pro svařování konstrukčních ocelí [10]	27
2.2.4 Svařovací parametry při svařování metodou MAG [7]	28
2.2.5 Přenosu kovu v oblouku při robotickém svařování [10], [11], [12]	31
2.3 Princip programování robotů pro svařování [13]	34
2.3.1 Používané souřadnicové systémy robota [13], [14]	35
2.3.2 Základní pohyby vykonávané robotem [15]	37
2.3.3 Robotické svařování- zadávání svařovacích parametrů [17]	40
3 Experimentální část bakalářské práce	41
3.1 Svařovací pracoviště pro provedení experimentu	41
3.2 Příprava pro provedení experimentu	43
3.2.1 Příprava vzorků pro svařování	43
3.2.2 Tvorba programu robota pro experiment [17]	43
3.3 Návrh svařovacích parametrů	45
3.4 Svaření vzorků a zaznamenání skutečných hodnot svařování	46
3.5 Provedení vizuální kontroly dle ČSN EN 5817	46
3.6 Rentgenová prozařovací zkouška	47
3.7 Destruktivní testování- metalografie	49
3.8 Měření mikrotvrdosti podle normy ČSN EN ISO 9015	53
3.9 Hodnocení svarů z hlediska vneseného tepla	55

4	Ekonomické zhodnocení- aplikace sv. parametrů.....	56
5	Diskuze výsledků a závěrečné zhodnocení	57
6	Použitá literatura	58
7	Přílohy.....	60
7.1	Příloha 1- přídatný materiál inspekční certifikát 3.1	60
7.2	Příloha 2- Program robota pro experiment:	61
7.3	Příloha 3- Příklady nastavení parametrů na konzoli Yaskawa DX 100.....	61
7.4	Příloha 4- Fotky svařených vzorků	62
7.5	Příloha 5- Výkres dílů Abstreiferhalter.....	67

1 Úvod [1]

Cílem práce je stanovit optimální svařovací parametry pro robotické svařování koutových svarů na plechách z oceli S355MC. Účelem je nalézt takové svařovací parametry, které zajistí vysokou kvalitu svaru a zároveň plně využijí potenciál a výkon svařovacího zdroje, tak aby bylo robotické pracoviště maximálně produktivní. Předmětem zkoumání budou různé svařovací procesy, které nabízí svařovací zdroj Fronius TPSi 500 (standardní, pulzní a PMC proces), zjistit vliv těchto procesů na produktivitu a kvalitu svaru.

Konstrukční ocel je ve strojírenství nejpoužívanější a nenahraditelný materiál. Nejvýznamnější vlastnosti konstrukčních ocelí jsou především vysoká pevnost a zároveň dobrá houževnatost. Pro zvýšení pevnosti konstrukčních ocelí a získání možnosti snížit hmotnost konstrukcí, se konstrukční oceli termomechanicky zpracovávají.

Pro svařování konstrukčních ocelí se dnes hlavně využívá metoda MIG/MAG dle ČSN EN ISO 4063 se jedná o metodu 131/135. Tato metoda je produktivnější a efektivnější než dříve používané ruční svařování obalenou elektrodou, která je dle ČSN EN ISO 4063 označována jako 111. Metoda 111 má stále svou úlohu například při svařování montážních svarů přímo na stavbách, v opravárenství a podobně. S vývojem plněných trubičkových drátů, metodu 111 postupně nahrazuje metoda 136, právě kvůli již zmíněné efektivitě.

Metoda MIG/MAG je částečně automatizovaná, přídavný materiál (svařovací drát) je podáván podavačem za přísunu ochranného plynu. Moderní zdroje dokáží částečně i stabilizovat a nastavovat svařovací parametry a svářeč se tak může plně soustředit, už jen na vedení hořáku a tečení tavné lázně. To vše přispívá k vyšší kvalitě svaru a vyšší výkonosti svářeče a zároveň nejsou kladeny takové nároky na zručnost svářeče jako při použití metody 111. Z těchto výše uvedených důvodů používá většina strojírenských firem především metodu MIG/MAG. Podniky tak mají vyšší produktivitu práce a zároveň zvyšují kvalitu svých výrobků.

Právě svařování metodou MIG/MAG se velice snadno zcela plně automatizuje. Pohyb, který vykonával dříve svářeč (vedení hořáku a tavné lázně) může bez problémů vykonávat robotické rameno. Kompletní robotické pracoviště je vybaveno ještě polohovadlem pro polohování dílů, přípravkem pro upnutí dílů a svařovacím zdrojem. Automatizace procesu svařování se musí pečlivě naplánovat a propočítat tak, aby byla rentabilní, protože ne vždy tomu tak je. Automatizovat svařování se vyplatí, pokud svařují velké série dílů nebo provádím dlouhé svary, anebo potřebují dodržovat přesný postup svarů a tím zajistit kvalitu a opakovatelnost výroby dílu.

Velké nároky jsou kladeny na kvalitu vstupního materiálu, který musí být rozměrově stálý. Obdobné nároky jsou také na přípravky, do kterých se vstupní dílce upínají a které drží nejen díly, ale i základní rozměry.

Tyto všechny aspekty ukazují, že náklady na pořízení takového robotického svařovacího pracoviště budou vysoké. Proto se nevyplatí pro kusovou a malosériovou výrobu.

Praktická část byla provedena ve firmě Pöttinger, kde oblast svařování tvoří takřka 50 % veškerých výrobních činností a zadala úkol optimalizovat svařovací parametry při robotickém svařování.

Firma Pöttinger je tradiční rakouský výrobce zemědělské techniky s hlavním sídlem v rakouském Grieskirchenu. Firmu založil v roce 1871 pan Alois Pöttinger, dnes už na celém světě zaměstnává 1778 lidí a poslední roky se firmě daří neustále zvyšovat svůj obrat, který se nyní pohybuje okolo 350 milionů euro. Původní výrobní program firmy PÖTTINGER byl tzv. zelený program. Zelený program zahrnuje stroje pro sklizeň píce. Do tohoto programu patří stroje jako například: sekačky, obrabeče, nahrabovače, sběrací vozy a lisy na kulaté balíky. V průběhu času svůj sortiment strojů rozšířila o secí stroje a stroje na zpracování půdy. V dnešní době má firma PÖTTINGER celkem 3 výrobní závody. Mateřský podnik má sídlo v Grieskirchenu, v roce 2006 se začal budovat výrobní závod ve Vodňanech a poslední závod se nachází v Bernburgu v Německu. Závod v Grieskirchenu se specializuje na zelený program, závod ve Vodňanech na stroje pro zpracování půdy a závod v německém Bernburgu na secí stroje. Stroje označené zeleným čtyřlístkem je možné vidět na celém světě. [1]

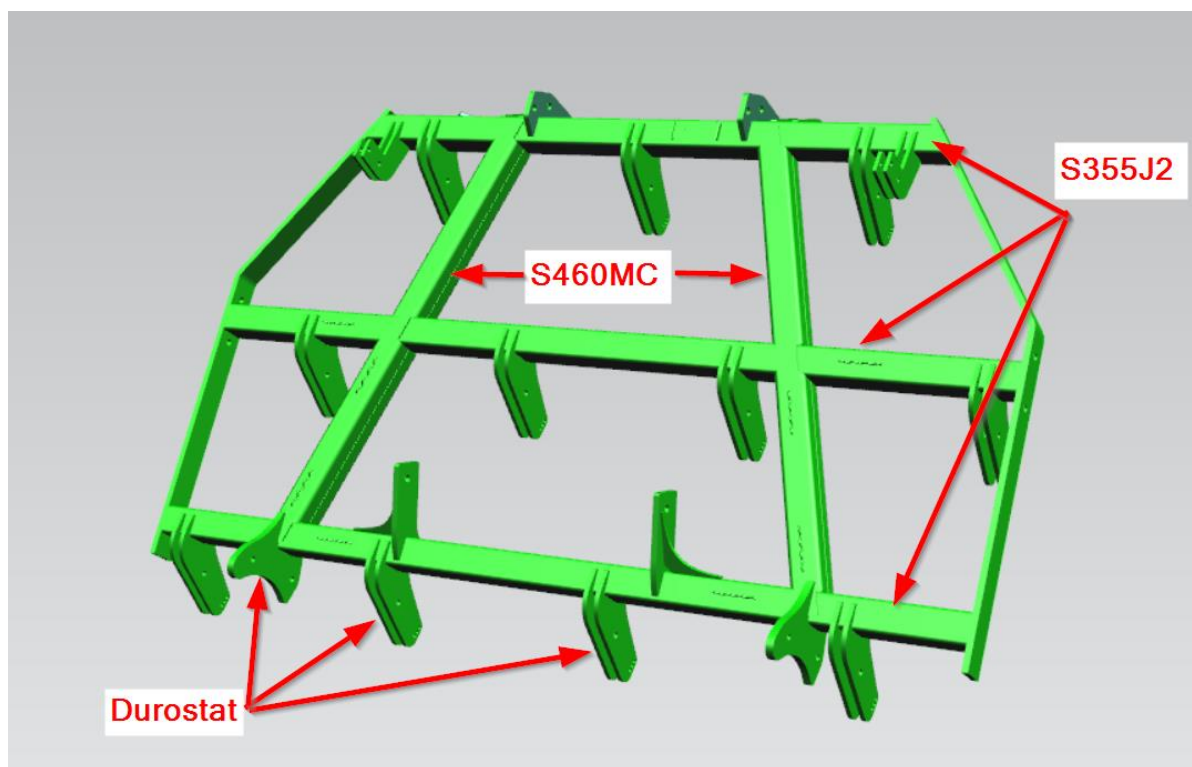


Obrázek 1: Logo společnosti PÖTTINGER [1]

2 Teoretická část

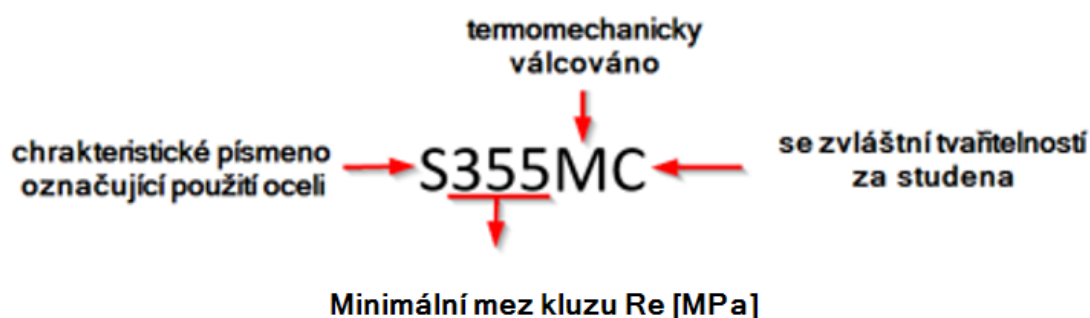
2.1 Charakteristika svařovaných materiálů

Zemědělské stroje se vyrábí z běžných konstrukčních ocelí. Tyto dílce jsou z velké části svařence různých velikostí od nejmenších čepů až po velké rámové konstrukce, které dosahují délky až pěti metrů a šířky až tří metrů. V těchto svařovaných konstrukcích se využívají plechové díly, které se po vypálení přířezů velmi často ohraňují do požadovaných tvarů. Dále se používají klasické válcované profily a to především jekly. Nejčastěji používané materiály, ze kterých se zemědělské stroje z 95 % svařují, jsou oceli S235JR, S355J2G3 (válcované profily) a oceli S355MC, S460MC a Durostat 400 (plechové díly). Z výše uvedených ocelí jsou nejpoužívanější právě oceli s označením MC, které jsou termomechanicky zpracované. Materiál, na kterém bude proveden experiment je ocel S355MC.



Obrázek 2: Příklad svařovaného rámu [autor]

2.1.1 Složení konstrukční oceli S355MC [5], [6], [3], [24]



Obrázek 3: Označování ocelí dle ČSN EN 100027-7

Ocel S355MC je mikrolegovaná konstrukční ocel s jemnou strukturou a s vyšší mezí kluzu. Mikrolegury jsou Al, Nb a Ti. Je válcovaná za tepla a určena pro tváření za studena. Jsou to plechy, které se po nařezání přířezů ještě ohraňují do požadovaných tvarů. Tato ocel je vhodná pro svařování. **Dle ISO TR 15608 je zařazena tato ocel do skupiny ocelí 1.2.**

Tabulka 1: Chemické složení S355MC dle EN 10 149-2

Označení	Obsah prvků - ve hmotnosti [% max.]								
	C	Si	Mn	P	S	Al	Nb.	Ti	V
S 355 MC	0,12	0,5	1,5	0,025	0,02	0,015	0,09	0,15	0,2

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti S355MC dle EN 10 149-2

Označení	Minimální mez kluzu Re [MPa]	Pevnost v tahu Rm [MPa]	Tažnost A [%] t<3 mm min.	Tažnost A [%] t≥3 mm min.
S 355 MC	355	430-550	19	23

Uhlíkový ekvivalent CEV pro S 355 MC je **0,37**.

Výpočet uhlíkového ekvivalentu CEV byl navržen mezinárodním svářečským institutem IIW/IIS a je uveden v normě EN 1011-2 jako metoda A. Je určen pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku $C > 0,18$ hm. %.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%)$$

Další výpočet uhlíkového ekvivalentu je podle japonských autorů Ito- Bessyo a je vhodný pro ocel s obsahem $C < 0,16$ hm. %

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu existuje v jiných literaturách mnoho dalších vzorců od různých autorů. [5], [6], [3], [24]

2.1.2 Termomechanicky zpracované oceli [18], [19]

Termomechanickým zpracováním ocelí je možné zlepšovat její strukturu. Tvářením austenitizované oceli se tvoří značné množství zárodků budoucích nových zrn, takže výsledná struktura oceli bude jemnozrná. Tvářením se také zvyšuje hustota dislokací, které dále přecházejí do produktů přeměny austenitu, a mohou případně měnit mechanismy a kinetiku jeho přeměn.

Nejznámější postupy TMZ jsou:

- Nízkoteplotní tepelně mechanické zpracování- NTMZ
- Vysokoteplotní tepelně mechanické zpracování- VTMZ
- Izoforming
- Řízené válcování
- Zerolling vedoucí transformačně indukované plasticitě- tzv. TRIP efekt.

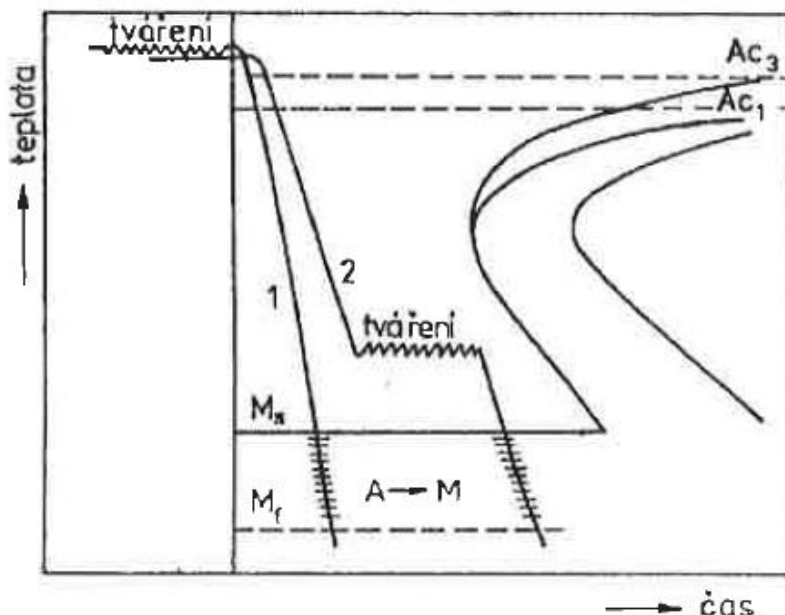
„NTMZ spočívá v austenitizaci nad teplotu A_{c3} , v prudkém ochlazení do oblasti metastabilního austenitu (asi 500 až 600 °C), kde se ocel plasticky deformuje kováním nebo válcováním (deformace až 50 %), a poté následuje kalení. NTMZ je možné použít u ocelí s širokou oblastí metastabilního austenitu (u ocelí legovaných), je však technologicky náročné zajistit prudké ochlazení na tvářecí teplotu a udržet podmínky tváření tak, aby nedošlo k perlitické či bainitické přeměně. Technologické problémy jsou zde vysoký přetvárný odpor díky nízké tvářecí teplotě.“ [19]

„Při VTMZ se ocel tváří nad teplotou A_{c3} v oblasti stabilního austenitu. Stupeň deformace se pohybuje v rozmezí 40 až 90%. Po tváření následuje kalení. VTMZ lze použít i u uhlíkových ocelí s tím, že limitujícím faktorem pro zlepšení vlastností ocelí je proces rekystalizace. Úplná rekystalizace je nežádoucí, protože by došlo ke ztrátě deformačního zpevnění.“ [19]

„Polotovary po VTMZ a NTMZ se většinou popouštějí při teplotách 200 až 300 °C a výsledná struktura je potom velmi jemný popuštěný martenzit.“ [19]

„Metody VTMZ a NTMZ se zatím nejvíce uplatňují u nízkolegovaných a středně legovaných podeutektoidních ocelí s obsahem uhlíku 0,3 až 0,6 hm. %. Zvláště pro NTMZ jsou vhodné oceli komplexně legované Mn, Si, Ni, Cr a Mo s dostatečnou inkubační dobou v oblasti metastabilního austenitu. Použitím TMZ u těchto ocelí lze dosáhnout výrazného zvýšení pevnosti martenzitických ocelí (zvýší až o 50 % na úroveň $R_m = 2800$ až 3000 [MPa] po NTMZ), a to při malém snížení plastických vlastností a současně při zachování nebo zvýšení

charakteristik lomové houževnatosti. Termomechanické zpracování omezuje náchylnost oceli ke vzniku kalických trhlin, předčasných a zbrzděných lomů.“ [19]

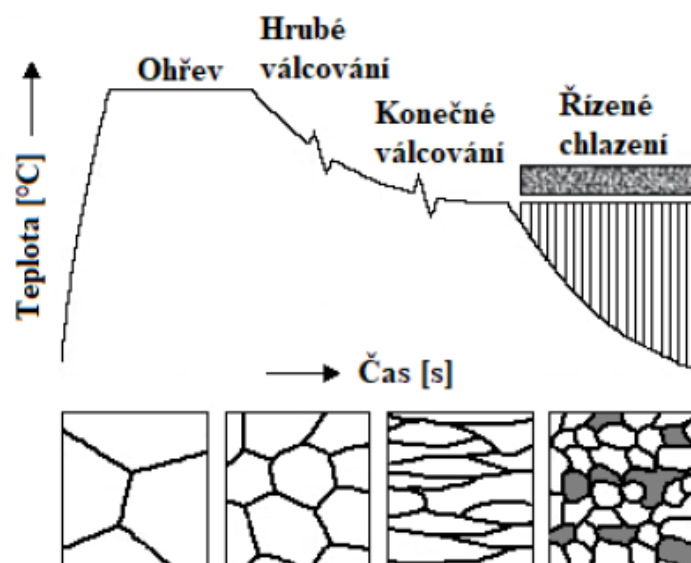


Obrázek 4: Schéma průběhu (1) vysokoteplotního a (2) nízkoteplotního tepelně mechanického zpracování [19]

„**Izofforming** je kombinace izotermické perlitické přeměny a deformace, přičemž deformace se může uskutečnit před nebo v průběhu uvedené přeměny. Izofforming vede ke zjemnění a částečné sferoidizaci perlitu, jehož mechanické vlastnosti jsou lepší než u perlitu získaného izotermickým žháním.“ [19]

„**Řízené válcování a ochlazování** je variantou TMZ, která se používá zejména při válcování mikrolegovaných ocelí. Válcovací i doválcovací teplotou a velikostí úběru lze řídit procesy dynamické a statické rekrystalizace austenitu. Vhodně zvolenou rychlostí ochlazování austenitu z doválcovací teploty lze ovlivnit transformaci jemnozrnného austenitu (částečně nebo úplně rekrystalizovaného) na jehlicovitý ferit anebo na ferit a perlit s výhodnou kombinací pevnosti a ostatních mechanických vlastností. Teplotou svinování lze ovládat úroveň precipitačního zpevnění plechů z mikrolegovaných ocelí. (obr. 5)“ [19]

„**Zerolling** se uplatňuje u vysoce legovaných ocelí se strukturou metastabilního austenitu, jehož teplota M_s leží v oblasti záporných teplot. Plastická deformace austenitu usnadňuje vznik zárodků martenzitu, což se projeví zvýšením teploty počátku martenzitické přeměny na teplotu M_d . V intervalu teplot $M_d - M_s$ ($M_d > M_s$) se plastické deformace využívá k přeměně austenitu na martenzit. Tato přeměna vede ke zvýšení hodnot meze kluzu, při malé ztrátě houževnatosti a značném zvýšení plasticity (Transformačně indukovaná plasticita - TRIP). Tento efekt souvisí s potlačením lokalizace plastické deformace (např. tvorby tzv. krčku při tahové zkoušce) v důsledku transformačního zpevnění.“ [19]



Obrázek 5: Vliv řízeného válcování TM a řízeného ochlazování na jemnozrnnost oceli [21]

2.1.3 Svařitelnost ocelí [3], [9]

Struktura svarového spoje [3]

Při procesu svařování, vlivem působením tepla, dochází krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Vneseným teplem se natavuje malý objem kovu, a v důsledku tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Vysoké teploty a jejich změny v základním materiálu při svařování způsobují:

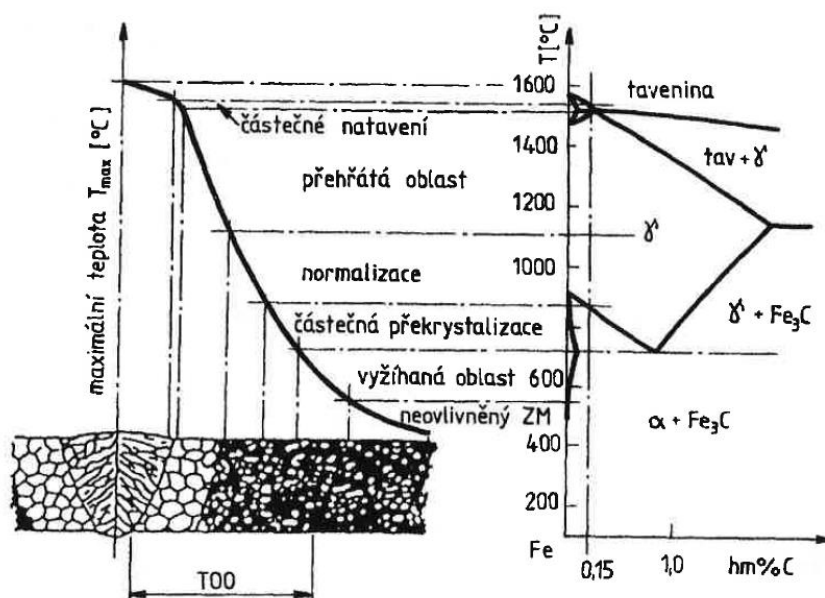
- Fázové přeměny - tavení základního a přídavného materiálu, jeho tuhnutí a změny v tuhém stavu
- Fyzikální a chemické reakce
- Změny struktury v oblasti svarového kovu
- Změny objemu, které ve svarovém spoji způsobují vnitřní napětí a deformace

Dopady svařování závisí zejména na svařovaném základním materiálu (chemickém složení, fyzikálních vlastnostech, geometrických rozměrech) a technologii svařování (způsob svařování, parametry, postup) a množství tepla vneseného do svarového spoje na jednotku délky.

Teplem ovlivněná oblast (TOO) [3]

Teplem ovlivněná oblast je oblast okolo svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury vlivem působení tepla při svařování. Při svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (Cu, Ni, Al) nedochází ke změně mikrostruktury, ale probíhají pouze substrukturní změny, rekrytalizace a růst zrn. U kovů a slitin s polymorfni přeměnou (oceli) dochází v TOO

k výrazným strukturálním změnám, které mají vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování ocelí s polymorfní přeměnou $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, můžeme TOO rozdělit na charakteristická pásma (viz. obr. 6). [3]



Obrázek 6: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [3]

1. Oblast natavení- tvoří přechod z TOO do svarového kovu.
2. Oblast přehřátí- růst zrna
3. Oblast vyžhátá nad A_3 - normalizace
4. Oblast nad teplotu A_1 - částečná překrystalizace mezi teplotami A_1 až A_3
5. Oblast pod teplotou A_1 - vyžíhaná oblast

Chování termomechanicky zpracované oceli při svařování [3]

Vlivem působení tepla při svařování se zruší účinek termomechanického zpracování v TOO svarových spojů. Dojde k poklesu meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti v pásmu částečné překrystalizace (mezi teplotami A_{c1} až A_{c3}). Snížení je patrné zejména v oblasti kolem teploty A_{c1} (tzv. změkčená zóna). Dochází také ke snížení vrubové houževnatosti v pásmu přehřátí TOO limitovaném teplotou solidu a teplotou přehřátí svařované oceli. Svarový spoj má vlivem těchto změn nižší hodnotu meze pevnosti než základní termomechanicky zpracovaný materiál. **Pro co nejmenší snížení pevnosti v TOO, limitujeme vždy při svařování svarových spojů TMZ ocelí tepelný příkon a tím i množství vneseného tepla do svarového spoje. Vnesené teplo při svařování jemnozrnných ocelí by mělo být pod $10 \text{ [kJ.cm}^{-1}\text{]}$.** [21] [3]

Mechanické vlastnosti svarového spoje je možné charakterizovat nepřímo měřením tvrdosti přes svarový spoj a TOO. Charakteristický průběh tvrdosti napříč svarovým spojem pro uhlíkové oceli je znázorněn na obrázku 7. Z obrázku je vidět výrazné zvýšení tvrdosti

v oblasti nad teplotu přehřátí a pokles tvrdosti v okolí Ac_1 . Maximální tvrdost závisí na chemickém složení oceli především na množství uhlíku a použitém příkonu svařování (který ovlivňuje čas chladnutí $\Delta t_{8/5}$). Na obrázku 8 je znázorněna závislost tvrdosti na přítomnosti uhlíku. Obvykle se požaduje, aby maximální hodnoty tvrdosti svarových spojů u skupiny ocelí 1.2 dle ISOTR 15608 pohybovaly v rozmezí mezi 260 až 350 HV. Právě 350 HV je hranice, kdy obsah uhlíku je 0,25 % od této hranice obsahu uhlíku se tvoří zákalné struktury ocel je již podmíněně svařitelná [3]

Měrný příkon svařování:

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} [kJ \cdot mm^{-1}]$$

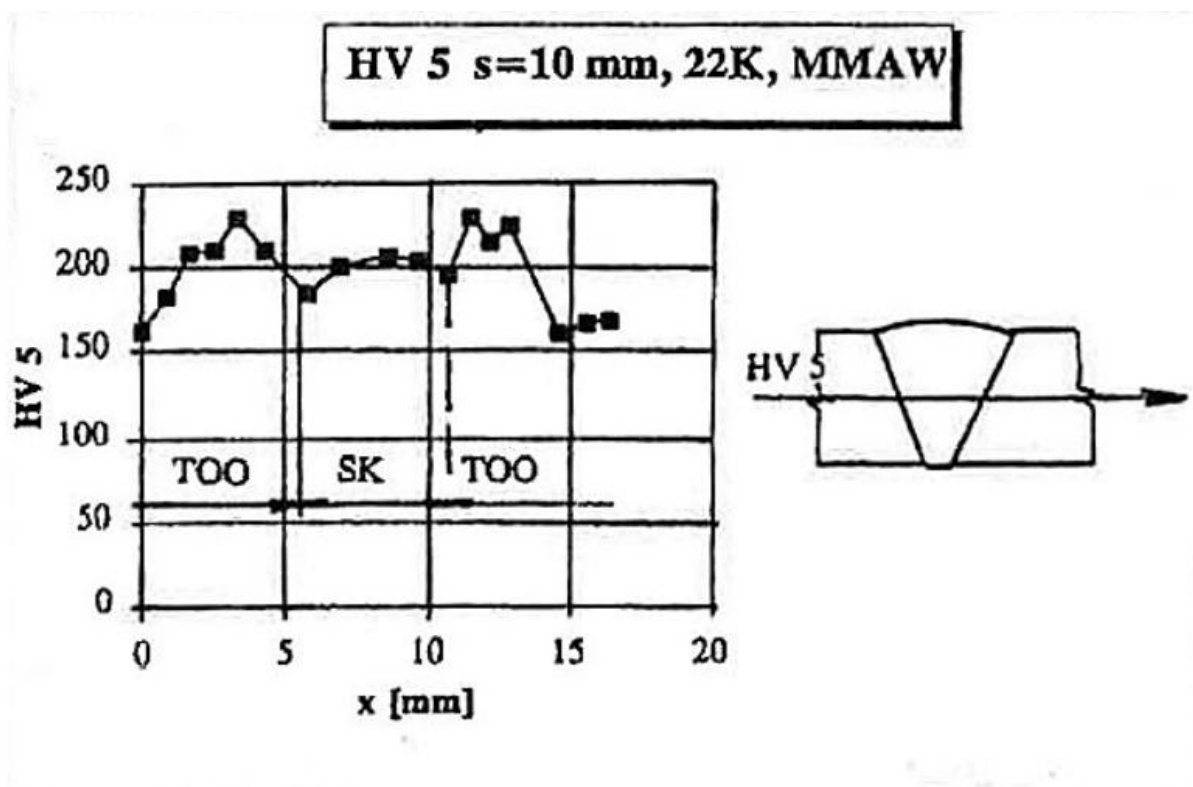
Kde:

η - koeficient účinnosti svařování

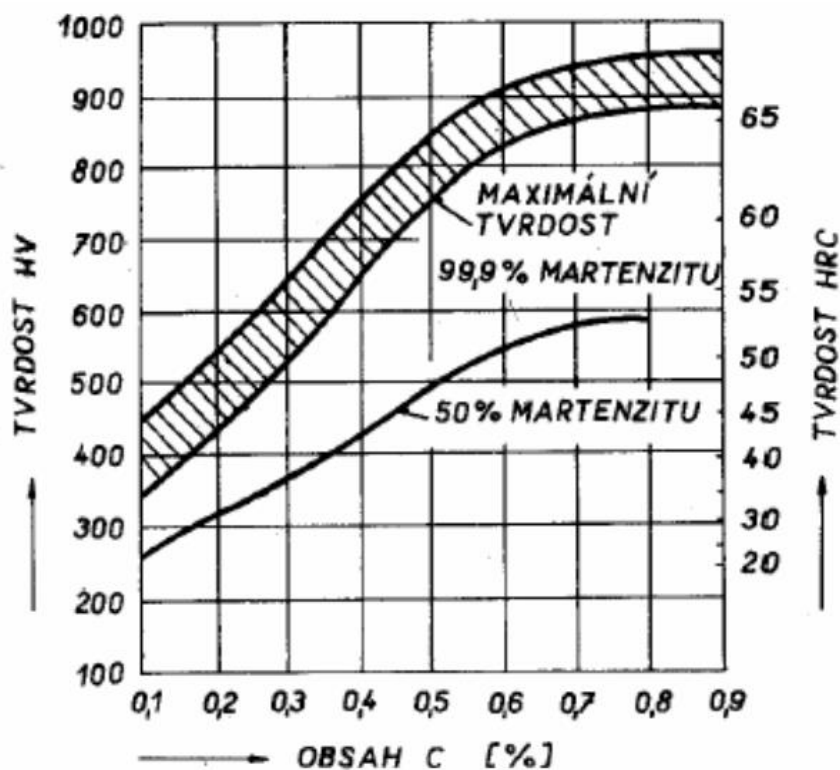
U - svařovací napětí [V]

I - svařovací proud [A]

v - rychlost svařování [mm.s-1]



Obrázek 7: Charakteristický průběh tvrdosti svarovým spojem [3]



Obrázek 8: Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu [3]

Přehřev [9], [8]

Materiály menších tlouštěk do 25 mm do 0,2% obsahu uhlíku se nemusí přehřívát. Mezními hodnotami tlouštěk ocelí svařitelných bez přehřevu se zabývá norma ČSN EN 1011-2. Přehřev se aplikuje hlavně kvůli zamezení tvorby studených trhlin. Teplota přehřevu se určuje nejen podle chemického složení, ale také podle velikosti obsahu difúzního vodíku a do výpočtu také vstupuje tuhost konstrukce. Stanovení teploty přehřevu udává norma ČSN EN 1011-2. Dohřev je nutný pouze u materiálů velkých tlouštěk a u materiálů s vyšším obsahem difúzního vodíku. Podobný efekt jako teplota přehřevu může mít svařování s vyšším tepelným příkonem a to díky teplu vnesenému do okolí čímž se zpomalí ochlazování.

Experiment bude proveden na plechu tloušťky 8 mm a na materiálu S355MC, který má obsah uhlíku menší než 0.2% C a z toho vyplývá, že přehřev není potřeba.

Studené trhliny [3]

Náchylnost ocelí na vznik studených trhlin úzce souvisí s prokalitelností respektive transformačním zkřehnutím (tvorba martenzitické struktury). Souhrnný vliv chemického

složení na náchylnost oceli na zakalení v TOO lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem například

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%)$$

Transformační zkřehnutí TOO je dané chemickým složením oceli, aplikovaným svařovacím cyklem, který je vyjádřen časem $\Delta t_{8/5}$ (rychlost ochlazování z 800 na 500 °C) Průběh ochlazování $\Delta t_{8/5}$ lze ovlivnit změnou technologie svařování, změnou svařovacích parametrů nebo použitím přehřevu nebo dohřevu.

2.1.4 Přídavný materiál [3]

Pro metodu svařování MIG/MAG se používá přídavný materiál ve formě plného drátu, a to na cívkách (např. 15kg) anebo v sudech (např. 250kg) o různých průměrech (běžné jsou průměry od 0,6 mm do 2 mm).

Přídavný materiál se volí podle požadovaných vlastností svarového kovu a metody svařování. Pro náročné svarové spoje se používají z hlediska dosažení požadovaných mechanických svarového kovu přídavné materiály dolegované molybdenem nebo manganem a niklem. Některé mikrolegované jemnozrnné oceli se používají pro výrobu svařovaných konstrukcí, pracujících při pracovních teplotách až -60 °C. Svarový kov o stejném chemickém složení jako má základní materiál, pak s ohledem na lící strukturu svarového kovu, mikrostrukturu svarového kovu a defekty ve svarovém kovu nespĺňuje požadavky na požadované hodnoty vrubové houževnatosti a tranzitní teploty. V takovém případě se používají přídavné materiály dolegované 1 až 2,5 hm. % Ni podle požadované hodnoty vrubové houževnatosti. [3]

2.2 Rozbor svařovací metody MAG [10],[11]

Svařování MIG/MAG je svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře. Svařováním MIG se označuje „**svařování tavící se elektrodou v inertní ochranné atmosféře**“ a svařování MAG je označením pro „**svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře**“. V současné době je metoda MIG/MAG nejpoužívanější metodou v oblasti svařování kovových konstrukcí, protože je značně produktivní a je možné svařovat vyššími svařovacími rychlostmi. Svařovací proces MIG/MAG je vhodný jak pro ruční svařování, tak pro plně automatizované (robotické) svařování. Při svařování MIG/MAG se zapaluje oblouk vysouvající se drátovou elektrodou, a to v momentě kdy se dotkne drát základního materiálu. Odtavený drát je poté spotřebován do svarového kovu jako přídavný materiál. Elektrický oblouk je v době hoření chráněn právě inertní nebo aktivní ochrannou atmosférou před vlivem reaktivního kyslíku z okolní atmosféry, kterou ochranná atmosféra vytlačuje a tak je zabráněno oxidaci svarového kovu v oblouku i v tavné lázni. [11]

Aktivní ochranné plyny, které se používají při svařování MAG, jsou CO₂ a nebo směsi plynů (argon, CO₂, O₂) s různým složením. Tyto plyny jsou velice reaktivní. Metoda svařování MAG se používá pro nelegované, nízkolegované i vysokolegované oceli. [11]

Inertní ochranné plyny, které se používají při svařování metodou MIG, jsou čistý argon a helium anebo směsi plynů argonu a helia. Metoda MIG se používá pro svařování materiálů, jako jsou hliník, měď, hořčík a titan. [11]



KONSTRUKCE SVAŘOVACÍHO SYSTÉMU MIG/MAG:

- (1) Síťové připojení
- (2) Svařovací zdroj
- (3) Hadicové vedení
- (4) Zemnicí kabel
- (5) Svařovací hořák
- (6) Uzemiňovací svorka
- (7) Svařenec
- (8) Přídavný materiál
- (9) Ochranný plyn

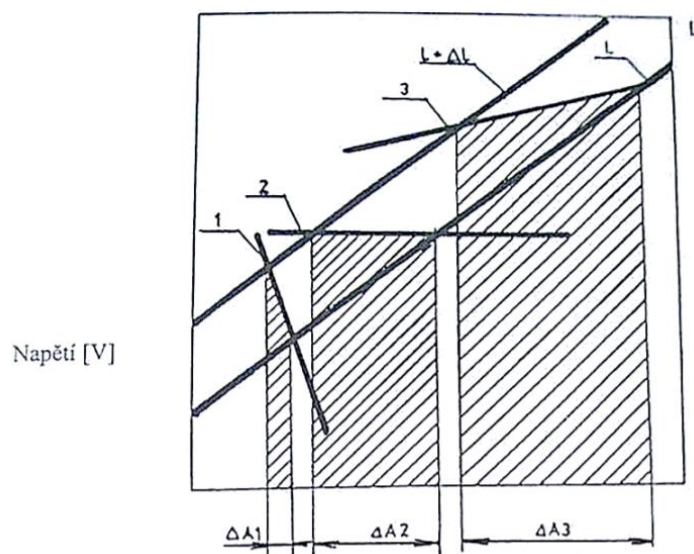
Obrázek 9: Zařízení pro svařování MIG/MAG [11]

2.2.1 Zdroje pro svařování metodou MIG/MAG [10]

Zdroje pro svařování metodou MIG/MAG používají stejnosměrný proud. Dnes se používají převážně invertorové zdroje. Tyto zdroje mají plochou statickou charakteristiku (viz. obr. 10) s prakticky konstantním napětím se samoregulační schopností udržování konstantní délky svařovacího oblouku. Tato regulace je založena na výrazné změně proudu při relativně malé změně délky oblouku a tím i napětí oblouku. Tento princip regulace délky oblouku funguje pouze při stejné rychlosti podávání drátu. Při změně délky oblouku se změní napětí a dle pohybu pracovního bodu na statické charakteristice se mění proud. Při dlouhém oblouku se sníží proud i rychlost odtavování drátu a při konstantní rychlosti podávání tohoto drátu, se začne drát přibližovat k tavné lázni a oblouk se tím zkrátí. Naopak při krátkém oblouku a poklesu napětí se zvyšuje intenzita proudu a odtavování je rychlejší. Délka oblouku se tím zvětší. Při reálném svařovacím procesu délka oblouku osciluje kolem nastavené „rovnovážné“ hodnoty.

Statická charakteristika plochá je využívána u automatizovaných metod, kdy je důležité konstantní svařovací napětí a konstantní délka oblouku. Zde je napětí konstantní a podle délky oblouku kolísá svařovací proud.

Statická charakteristika strmá se používá například u metody ROS, kde se délka oblouku udržuje pohybem svářeč při odtavování elektrody. Svařovací proud je prakticky stejný a kolísá napětí při pohybu svářeče. [10]



Obrázek 10: Srovnání různých V-A charakteristik- vliv strmosti na změnu proudu [10]

Popis obr. 10

- 1 - Strmá charakteristika, 2 - plochá charakteristika mírně klesající,
- 3 - plochá charakteristika mírně rostoucí, L a L+ΔL charakteristiky oblouku

Rozdělení jednotlivých zdrojů [10]

1. **Kompaktní zdroje** s vestavěným podavačem drátu umístěným ve společné skříni se zdrojem. Tyto zdroje jsou spíše nižší až střední výkony cca 250-300 [A] při chlazení hořáku proudícím plynem.
2. **Výkonné zdroje** s chladicí jednotkou ve spodní skříni se zdrojem a odděleným podavačem. Tyto zdroje mají výkon okolo 500 [A].
3. **Stavebnicové uspořádání s odděleným podavačem drátu.** Sestava má invertorový zdroj, podavač drátu a chladicí jednotku. Tato sestava může být doplněna o dálkový řídicí systém (ovládací konzole). Celá sestava bývá většinou na podvozku s konzolou pro plynové lahve. Podavač je se zdrojem propojen propojovacím kabelovým svazkem o různých délkách, od 1,5m do 10 m. Délky kabelů k ručním hořákům jsou různé. Mohou být 3 až 5 metrů, ale i delší například 10 m. Takové hořáky jsou pak vybaveny dalším podavačem, který je přímo součástí rukojeti hořáku. Tento systém se nazývá push- pull. Oba podavače, podavač v hořáku i tak hlavní podavač, jsou spolu synchronizovány. [10]

Technické vybavení moderních svařovacích zdrojů [10]

Moderní svařovací zdroje mají řadu dnes již standardních funkcí, které výrazně zlepšují a stabilitu procesu. Díky rozvoji elektroniky je možné ovládat, sledovat a řídit veškeré svařovací parametry v reálném čase. Mezi běžné vybavení patří: **Horký start** pro zajištění natanení začátku svaru u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí, **databáze svařovacích programů** a **synergické řízení svařovacího procesu**. Při synergickém řízení jsou jedním

manuálně nastavitelným parametrem (tloušťka materiálu, proudem nebo rychlostí podávání drátu atd.) ovládány všechny ostatní svařovací parametry [10]

Řízení zapalovacího cyklu [10]

Umožňuje klidné zapálení oblouku v přesně definovaném místě svaru při mechanizovaném a robotizovaném svařování. V první fázi při zapálení je drát posouván až do kontaktu s materiálem. Po dotyku a zjištění zkratu se začne drát oddalovat při nízkém zapalovacím proudu, který zapálí hlavní oblouk a drát se zastaví na úrovni nastavené délky oblouku. Následuje posuv drátu vpřed při současném proudovém impulsu, kterým se zapálí svařovací oblouk a nataví se základní materiál i drátová elektroda (viz. obr. 11). [10]



Obrázek 11: Průběh startu oblouku [10]

2.2.2 Metalurgické reakce při svařování MAG [10]

Aktivní ochranné plyny působí na svarový kov třemi způsoby, oxidačně, redukčně a také nauhličuje, záleží na složení ochranného plynu. Redukčně působí vodík a směsi obsahující složku vodíku. Oxidačně působí směsi s kyslíkem a nauhličují směsi obsahující uhlík. [10]

Nejdůležitějšími metalurgickými reakcemi jsou oxidační a dezoxidační pochody probíhající v kapkách tavící se elektrody a v roztaveném svarovém kovu. Tyto reakce zásadně ovlivňují tvar oblouku, povrch svarové housenky, přechod svarové housenky do základního materiálu a vnitřní čistotu svaru. Na rozsah reakcí má vliv hlavně množství disociovaného kyslíku schopného slučování s prvky v tavenině. [10]

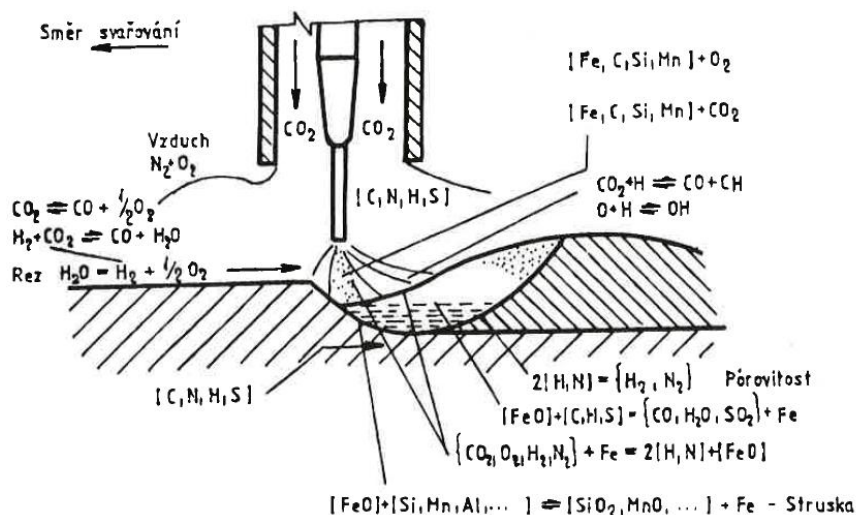
Zdrojem kyslíku je v ochranném plynu typu Ar + (1-3) % O₂ nebo disociace molekul CO₂, které se rozpadají na CO + O₂ při svařování v čistém CO₂ nebo ve směsích s argonem. Nejdůležitější jsou oxidační reakce - slučování O₂ s Fe, Mn a s Si, případně slučování oxidů s uhlíkem za vzniku CO. [10]

Vzniklé kapky svarového kovu jsou obohaceny kyslíkem při přechodu do tavné lázně a dosahují vysoké teploty, protože oxidační reakce jsou exotermické. Obdobně reaguje kyslík s povrchem taveniny (obr. 12) a velikost tepla uvolněného reakcemi je závislé na množství kyslíku v ochranném plynu. Exotermickými reakcemi uvolněné teplo je difúzí vedeno

do okolního materiálu a výsledkem je hlubší a oválnější svarová lázeň u svaru s ochranným plynem CO₂, který má větší oxidační schopnost než u směsi Ar+ CO₂ nebo v čistém Ar. [10]

Slučování oxidu FeO s C se tvoří bubliny CO, které jsou za určitých podmínek příčinou pórovitosti svarů. To je také jeden z důvodů proč se musí provést dokonalá dezoxidace taveniny svarového kovu. Dezoxidačními prvky Mn a Si jsou přídatné materiály předlegovány v určitém poměru tak, aby vzniklá struska měla vhodnou tekutost a snadno se vyplavila na povrch tavné lázně. [10]

Při dezoxidaci svarového kovu se tvoří struska, která se objeví na povrchu svarové housenky. Množství této strusky je závislé na množství kyslíku nebo CO₂ ve směsi ochranného plynu. Na dezoxidaci se nejvíce podílí prvky V, Cr, C, a Mn. S růstem teploty v oblouku a svarové lázni se zvyšuje dezoxidační schopnost Al, Ti, C a Mn. **Struska se musí před navařením každé další vrstvy odstraňovat!** [10]



Obrázek 12: Reakce ochranného plynu s povrchem lázně [10]

2.2.3 Ochranné plyny pro svařování konstrukčních ocelí [10]

Ochranné plyny je základ svařování metodou MIG/MAG. Funkce těchto plynů je bránit přístupu okolního vzduchu, který by jinak způsobila rozsáhlou oxidaci a nitridaci svarového kovu a tím by byl svar znehodnocen. Další funkcí ochranného plynu je zajistit pomocí ionizační schopnosti stabilní hoření elektrického oblouku a přenášet tepelnou energii do svaru. Ochranné plyny svým složením a množstvím ovlivňují celou řadu svařovacích charakteristik.

Významné jsou tyto:

- Způsob přenosu svarového kovu obloukem
- Hloubka závaru a profil svaru
- Množství rozstříku
- Rychlost svařování
- Stabilita elektrického oblouku

Jako ochranné plyny pro metodu MAG se používají čistý plyn CO_2 , směsné plyny s nosným plynem Ar doplněným CO_2 , O_2 , nebo také He. Směsný plyn $\text{Ar} + \text{CO}_2$ se nazývá CORGON. Pro metodu MIG se používá čistý argon nebo helium, anebo směsi těchto plynů. Čistota ochranného plynu je předepsána normou ČSN EN 439. [10]

Zpočátku se u metody MAG používalo pouze čisté CO_2 , ale protože při svařování s CO_2 vzniká velký rozstřík, má horší povrch svarové housenky, svary bývají dost převýšené a produkuje více oxidů a více strusky, se přešlo právě na svařování se směsnými plyny. Používání směsných plynů je produktivnější a povrch svaru je vizuálně lepší s menším rozstříkem a závar dostatečný. Čistý plyn CO_2 má také výhodu a to, že při ručním svařování se s ním dosahuje snáze větší hloubky závaru a nehrozí neprůvary při svařování v různých polohách např. v poloze PF. [10]

Směs $\text{Ar} + 15$ až 25 % CO_2 [10]

„Směs $\text{Ar} + 18$ % CO_2 je univerzální pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí metodou MAG. Má velmi dobré svařovací vlastnosti, stabilní svařovací oblouk a poměrně hluboký závar. Umožňuje svařování se zkratovým i sprchovým přenosem kovu a malým rozstříkem, který neulpívá na povrchu základního materiálu. Má hladký povrch svaru a dobrý přechod do základního materiálu. Je použitelný pro všechny tloušťky plechů.“ [10]

Směs $\text{Ar} + 8$ % CO_2 [10]

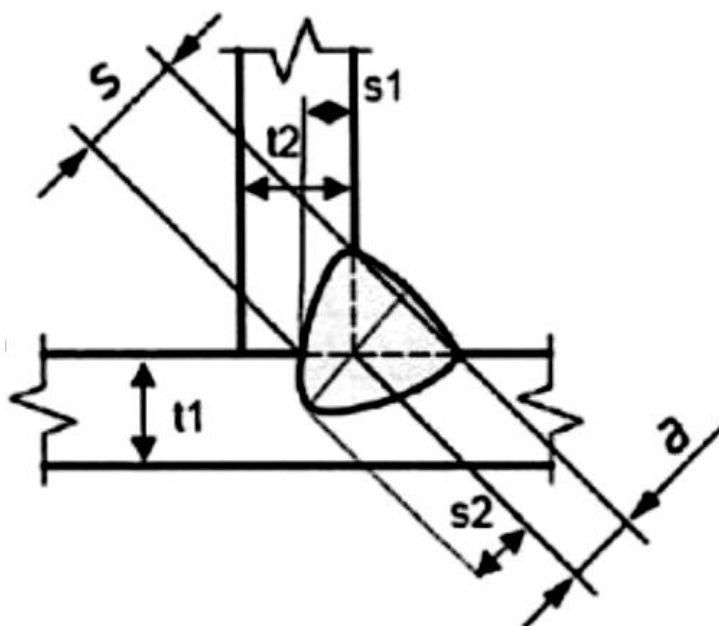
„Tento směsný plyn je optimální pro používání pulzního a sprchového přenosu kovu, zajišťuje dostatečné závary a neprodukuje takový rozstřík a tvoří hladkou povrchovou kresbu svaru. Je použitelný pro všechny tloušťky plechů z konstrukční nízkolegované oceli a je vhodný pro robotizované i mechanizované svařování.“ [10]

A právě tato směs plynu se používá pro svařování dílů všech dílů ve firmě Pöttinger kvůli častému používání pulzního přenosu

2.2.4 Svařovací parametry při svařování metodou MAG [7]

Svarová housenka je základ každého svaru. Hlavní rozměry u koutového svaru, které budou řešeny, jsou hloubka průvaru s_2 a výška svaru a (obr. 13). Rozměry svarů určuje konstruktér, ale proveditelnost svarů by měl konzultovat s technologem svařování.

Tato kapitola se zabývá právě volbou vhodných svařovacích parametrů takových, které ovlivňují výše uvedené rozměry svaru. Nejdůležitější parametry svařování jsou ty, které ovlivňují tepelný výkon svařování. Podle tloušťky plechů, typu přídavných materiálů a požadované rychlosti svařování je nutné zvolit vhodně tyto parametry takové, aby byl proces optimální, to znamená dostatečně kvalitní a produktivní. [7]



Obrázek 13: Zakótování koutového svaru dle ČSN EN ISO 2553

Mezi základní parametry svařování patří:

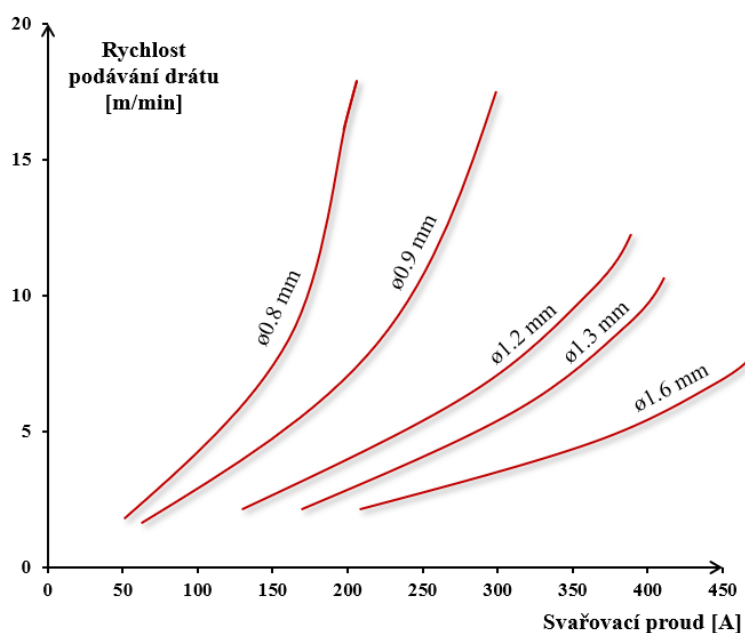
„Svařovací napětí – je dáno rozdílem potenciálu mezi drátem a povrchem svarové lázně. Nejvíce ovlivňuje šířku a profil svaru, kdy se zvětšujícím se napětí tyto parametry rostou. Vysoká hodnota svařovacího napětí je charakterizována dlouhým elektrickým obloukem. S klesající hodnotou napětí se oblouk zkracuje, nedochází k dokonalému natavování a hrozí vznik studeného svaru (má zásadní vliv na typ přenosu kovu). Standardní svařovací napětí v oblouku vycházející z volt-ampérové charakteristiky se vypočítá z empirického vztahu:

$$U = 15 + 0,035I$$

kde: U – svařovací proud [V]

I – svařovací proud [A]“ [7]

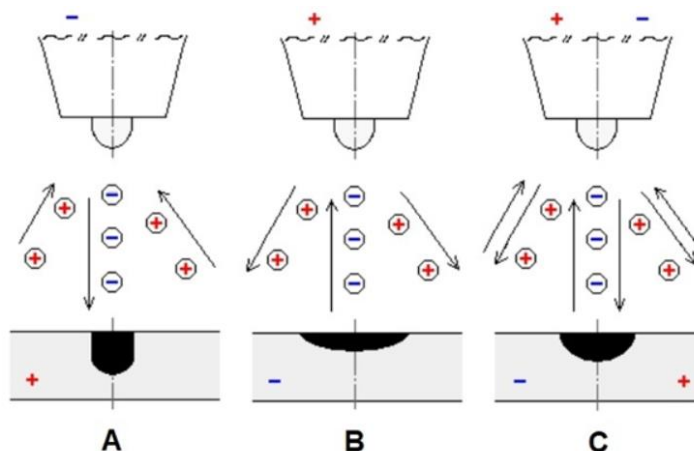
„Svařovací proud a rychlost podávání drátu – mají zásadní vliv na přenos kovu a tvar průřezu svarové housenky. Při zvýšení svařovacího proudu roste proudová hustota, odtavovací výkon i velikost a tekutost svarové lázně. Zvětšují se všechny rozměry svaru, ovšem nejvíce hloubka průvaru. Hodnota svařovacího proudu se nastavuje nepřímou pomocí rychlosti podávání drátu. Tato závislost je experimentálně zjišťována pro různé průměry drátu. Čím vyšší je rychlost podávání drátu, tím se i hodnota proudu zvyšuje (viz. obr.)14.“ [7]



Obrázek 14: Vliv podávání drátu na proud [7]

„Proudová hustota – charakterizuje závislost proudového zatížení drátu na velikosti plochy jeho průřezu. Proudová hustota má při svařování podobný vliv jako svařovací proud. Uvádí se v jednotkách $A \cdot mm^{-2}$ a její hodnoty se pohybují od 80 do $350 A \cdot mm^{-2}$. Výkonnější metody svařování jako FCAW však disponují hodnotami i několikanásobně vyššími.“ [7]

„Druh a polarita svařovacího proudu – při svařování MAG se nejčastěji využívá stejnosměrného proudu a zapojení s nepřímou polaritou (obr. 15). Kladný pól je připojený na svařovací drát (hořák) a záporný pól svařovacího proudu je připojený na základní materiál. U tohoto typu zapojení lze pozorovat zvýšenou hloubku závaru, malé převýšení a širší housenku. Přímá polarita se vyznačuje záporným pólem na svařovacím drátu. Tento typ polarity má opačný vliv na tvar svarové housenky, čehož se využívá při navařování.“ [7]



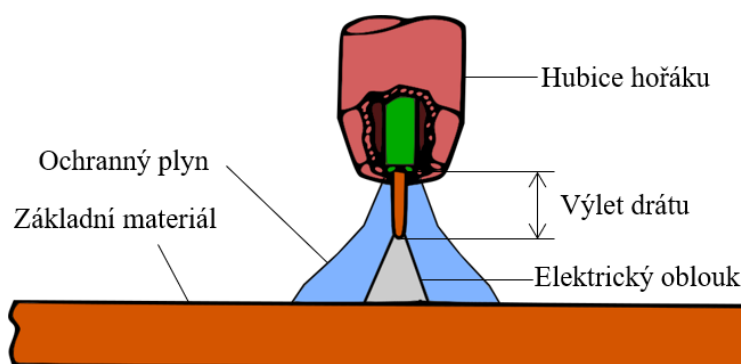
Obrázek 15: Přímá a nepřímá polarita svařovacího proudu [23]

„**Volná délka drátu (výlet drátu)** – je vzdálenost drátu od jeho výstupu z kontaktního průvlastku až po začátek oblouku (obr. 16). Hodnota výletu drátu je ovlivněna průměrem drátu i typem ochranného plynu použitého při svařování. Změny ve výletu drátu značně ovlivňují proces svařování, nejvíce svařovací proud. Větší výlet způsobuje pokles svařovacího proudu přibližně o 10 až 20 A na milimetr volné délky drátu. Obecně platí, že by se výlet měl rovnat desetinasobku průměru drátu. Přesněji lze volnou délku drátu spočítat pomocí vztahů, které se liší dle druhu ochranného plynu, dle vztahů:

$$L = 5 + 5D \text{ pro oxid uhličitý (2.2)}$$

$$L = 7 + 5D \text{ pro směsné plyny (2.3)}$$

kde: L – délka výletu [mm], D – průměr drátu [mm]“ [7]

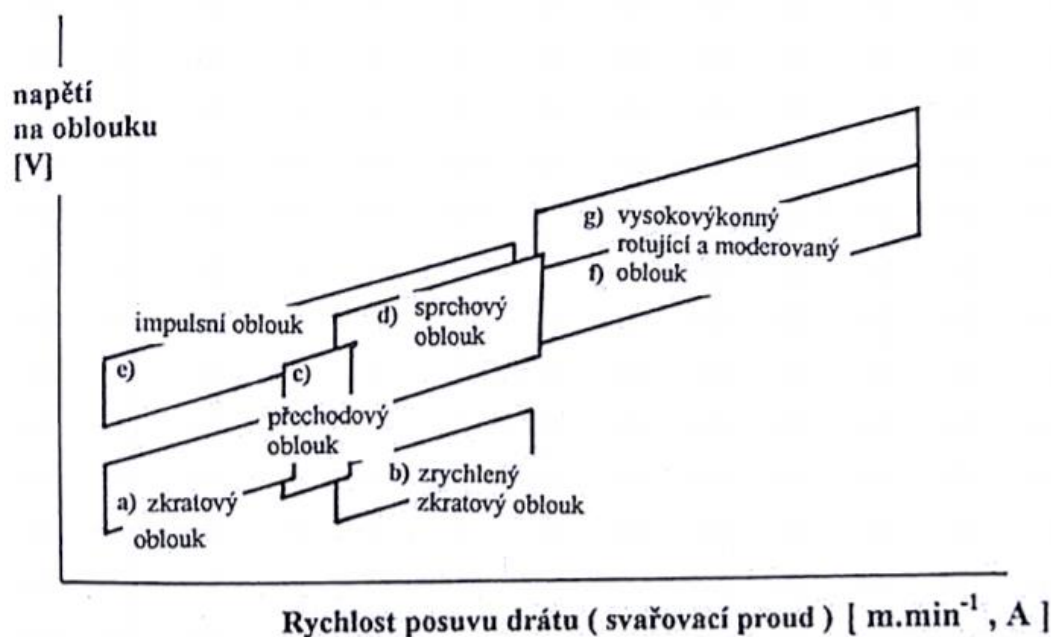


Obrázek 16: Zobrazení volné délky (výletu) drátu [7]

2.2.5 Přenosu kovu v oblouku při robotickém svařování [10], [11], [12]

Přenos kovu v oblouku je jednou ze základních charakteristik přenosu materiálu mezi tavící se elektrodou a základním materiálem pomocí elektrického oblouku. Přenos kovu nám ovlivňuje tvar svarové housenky. Způsob přenosu kovu ovlivňují svařovací parametry proud a napětí, ale také i druh a složení ochranného plynu, složení přídavného materiálu a také technika svařování. Tato práce řeší tyto druhy přenosu kovu v oblouku:

1. Standardní svařovací proces- sprchový oblouk bez zkratu
2. Pulzní proces - impulzní přenos kovu
3. PMC- pulzní přenos kovu s řízenou délkou oblouku a hloubkou závaru



Obrázek 17: Oblasti přenosu kovu v oblouku [10]

Standardní svařovací proces- sprchový oblouk [10]

Tento oblouk hoří neustále bez zkratů v horní oblasti výkonu a hodí se ke svařování tlustších plechů. Umožňuje vysoký odtavovací výkon a hluboký průvar. Vzniká při parametrech 200-500 [A] a napětí 28-40 [V]. Ochrannou atmosféru, kterou tento typ přenosu kovu vyžaduje, je směsný plyn Ar+CO₂ případně s příměsí O₂. S čistým CO₂ nelze tento přenos realizovat, protože se nedokáží kvůli velkým povrchovým napětím tvořit dostatečně malé kapky kovu. Směs ochranného plynu má minimálně 80% Ar, u neželezných kovů se používá čistý argon. Směs plynu s argonem se snadno ionizuje a vytvořená plazma obklopuje drát, který se tak hodně ohřívá a umožňuje vytvářet malé kapky, které se potom oddělují s poměrně vysokou frekvencí 150-300 Hz směrem do tavné lázně. [10]

Pulzní svařovací proces- impulsní oblouk [10]

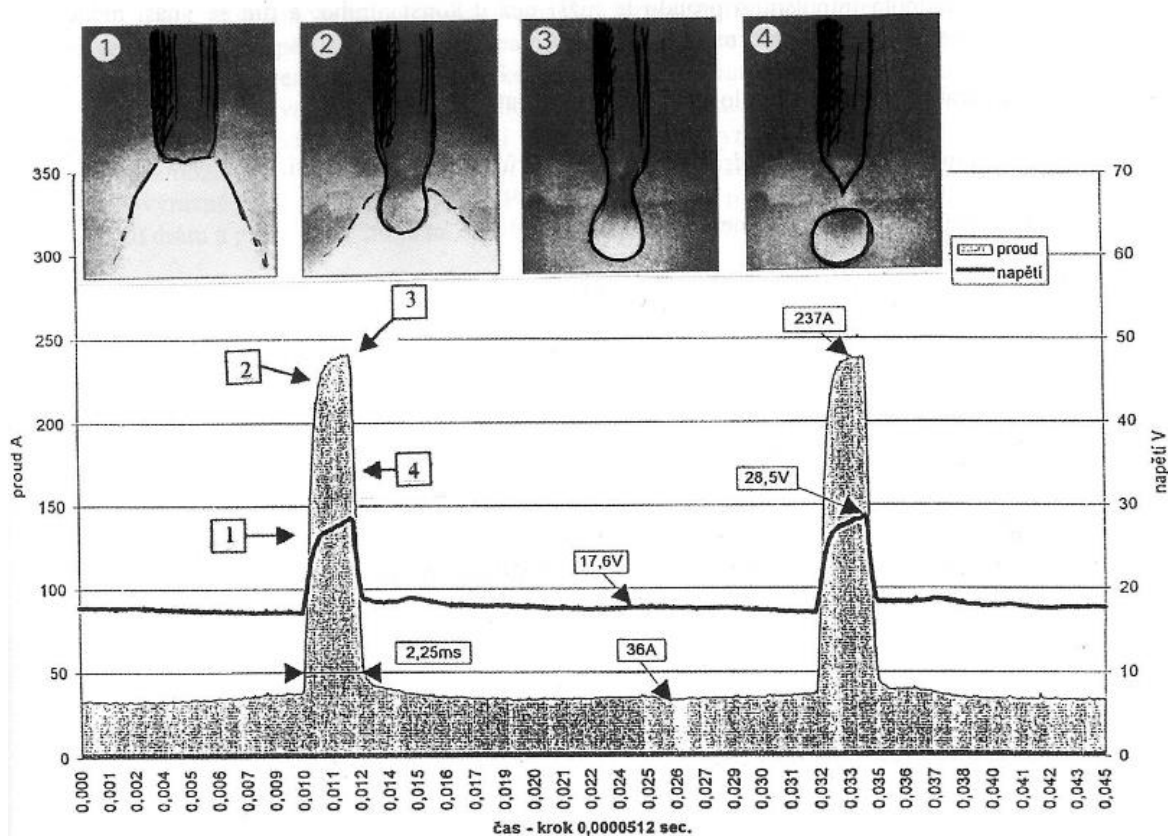
Pulzní oblouk se skládá ze dvou fází, a to ze základního proudu s nízkým výkonem a fáze pulzního proudu s vysokým výkonem bez zkratů. Díky tomu je svařový rozstřík minimální. Svařovací kapka se cíleně uvolňuje ve fázi pulzního proudu prostřednictvím přesně dávkovaného pulzu. Impulsní přenos kovu obloukem je řízen elektronicky, má pravidelně daný cyklus odpadávání kapky svařového kovu, který je daný frekvencí amplitudy impulsního proudu. V celém průběhu amplitudy hoří oblouk, který ohřívá jak základní materiál, tak přídavný materiál. Tvar amplitudy může být různý, u moderních digitálních zdrojů jsou různé tvarovány, záleží na druhu přídavného materiálu. Přibližně konstantní velikost kapky se udržuje pomocí závislosti frekvence na velikosti proudu. Čím je proud na nižší hodnotě, tak je potom frekvence nízká, při velkých proudových hodnotách je zase frekvence vysoká. Současné nejmodernější digitální zdroje od firmy Fronius pro svařování hliníku umožňují střídat

klasickou impulzní frekvenci 25 až 500 Hz a dlouhé pulzy od 0,5 do 10Hz při současné pulzaci podávání drátové elektrody. Při svařování hliníku a jeho slitin se tímto spojením krátkých i dlouhých pulzů se dosáhne kresby svarové housenky obdobné jako u metody TIG a snížení vneseného tepla tak umožňuje svařovat i tenké hliníkové plechy od 0,8 mm. [10]

Výhody svařování impulzním proudem:

- Vnáší méně tepla a tím pádem je i nižší deformace
- Lze svařovat tenké plechy
- Vysoký impulzní proud taví i dráty větších průměrů, které jsou levnější
- Má hezčí povrchovou kresbu
- Výkon navaření se pohybuje mezi 2-5 kg/hod
- Je vhodný pro svařování hliníku a jeho slitin i vysoko legovaných ocelí
- Díky možnostem nastavení proudu, napětí, frekvence a amplitudy může být použit impulzní zdroj na řadu aplikací

Optimální plyn pro svařování ocelí je Ar + 8%CO₂. Pro hliník se používá čistý Ar a pro korozivzdorné oceli se používá Ar+2% O₂. [10]



Obrázek 18: Průběh proudu a napětí při pulzním přenosu [10]

Svařovací proces PMC [11], [12]

PMC je zkratka z angličtiny „Pulse Multi Control“. Jedná se o modifikovaný pulzní přenos. Firma Fronius vyvinula moderní svařovací zdroje s výkonným procesorem, který dokáže měřit parametry svařování velmi vysokou rychlostí a pomocí funkcí Synchronpuls, stabilizátoru průvaru a stabilizátoru délky oblouku dokáže svařovací zdroj usměrnit energii oblouku, tak aby byla hloubka závaru stálá a oblouk co nejstabilnější. PMC proces má velké výhody právě při robotickém svařování, například při změně směru svařování v koutech a nedostupných místech, senzor stabilizátoru průvaru dokáže přímo při svařování měnit rychlost podávání drátu a senzor délky oblouku neustále udržuje stejnou délku oblouku. Z toho vyplývá, že i při měnících se podmínkách svařování v čase dokáže zdroj na tyto změny reagovat a udržovat optimální nastavené podmínky. [11], [12]

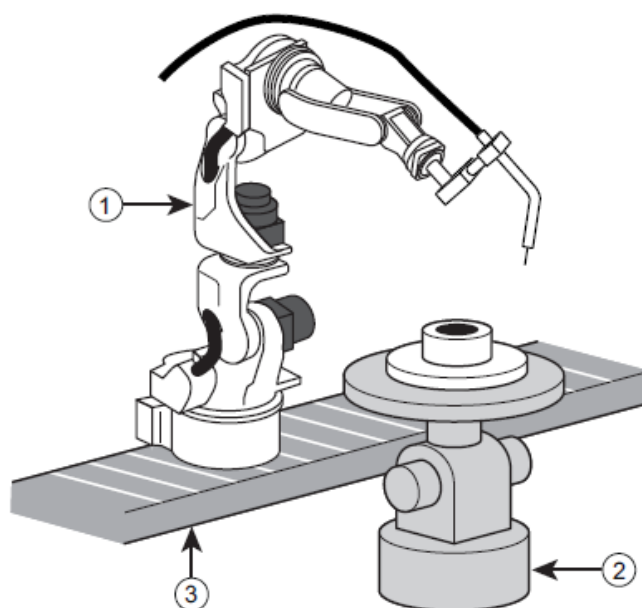
2.3 Princip programování robotů pro svařování [13]

Systém programování většiny robotů je založen na zaznamenávání pozic robotického ramene respektive jeho motorů v prostoru, tak aby byl výsledný pohyb co nejpřesnější a opakovaně proveditelný.

Robotické rameno musí mít pro vykonání pohybu potřebný počet stupňů volnosti. Počet stupňů volnosti soustavy těles nám určují jejich vazby, v tomto případě jsou vazby jednotlivé osy, okolo kterých rotují jednotlivé součásti robotického ramene. Většina robotů je dnes šestiosých, to znamená, že má šest stupňů volnosti. Nástroj umístěný na konci robotického ramene, které má šest os, se může pohybovat v kartézském souřadnicovém systému **ve směrech x, y, z a dále může také kolem těchto os rotovat.**

Pro každou aplikaci nemusí tento počet os robota stačit. Stává se, že obrobek nebo svařenec může být velký, nebo potřebujeme dostat svařenec do určité polohy, aby bylo možné provést svár. A proto se robotická ramena vybavují dalšími přídatnými osami.

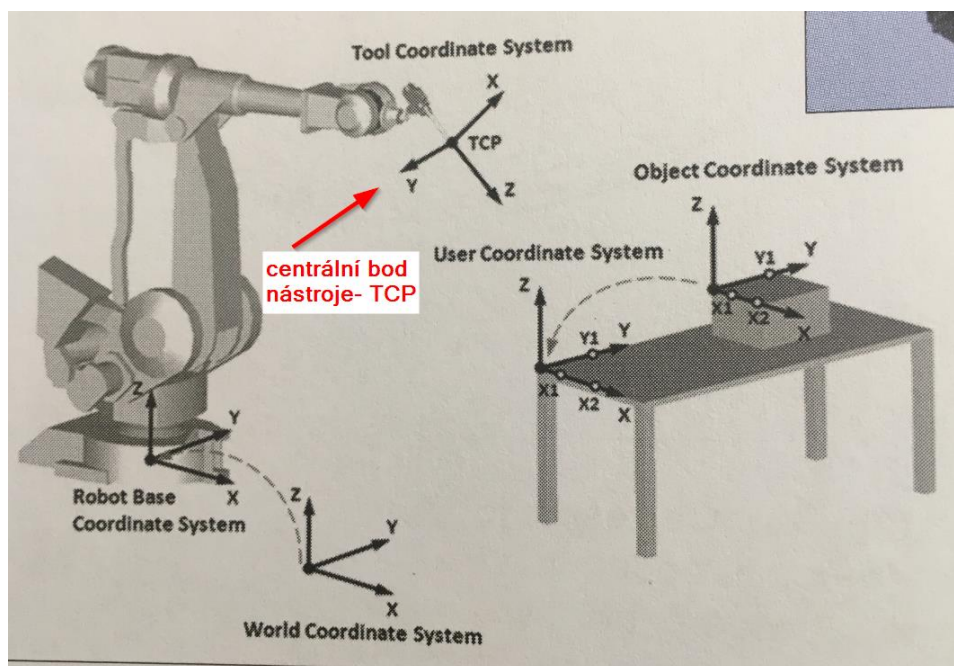
Ke stávajícím šesti osám se může přidat například osa sedmá, která zvýší pohyblivost a dosah robotického ramene. Dále se přidávají portály, po kterých se celý robot posouvá a dokáže obsloužit například svařenec v celé délce. A v neposlední řadě se využívají polohovačla a manipulátory, které naklopí a otočí obrobek či svařenec do požadované polohy (obr. 19).



Obrázek 19: 1- robot; 2- polohovadlo; 3- portál, pro posuv robotického ramene[14]

2.3.1 Používané souřadnicové systémy robota [13], [14]

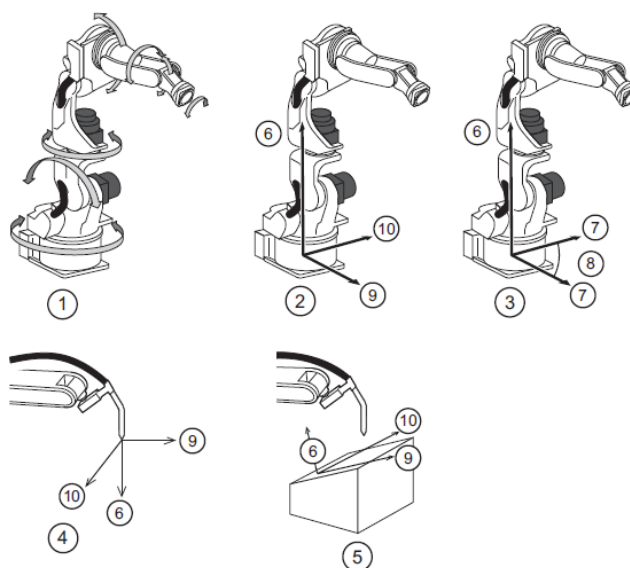
Pro výuku pohybu robota v prostoru je důležitá pro programátora znalost souřadnicových systémů, ve kterých může s robotickým ramenem pohybovat. Pohybovat se s ramenem pouze pomocí jednotlivých os je značně nepraktické, využívá se pohyb nástroje a jeho centrálního bodu v různých souřadnicových systémech. Jak je znázorněno na obrázku 20.



Obrázek 20: Bod TCP a základní souřadnicové systémy [13]

Centrální bod nástroje neboli „TCP“ (z angličtiny Tool Centre Point) je nejdůležitější pro přesnost pohybů robota. Jeho pozice je jednoznačně dána a při případných kolizích je nutné TCP bod znovu kalibrovat a jeho polohu tak opět přesně definovat. Pokud to neuděláme, tak pohyby v programech jsou vykonávány s posunem a například při svařování, je to obrovský problém, kdy sváry jsou mimo definovanou pozici, a jsou například posunuté kořenové vrstvy nebo celé svary a vznikají posunuté „studené svary“ bez průvaru.

Každý výrobce robotů označuje souřadnicové systémy jinak. Souřadnicové systémy použité u robotů Yaskawa jsou znázorněny na obrázku 21 a níže popsány.



Obrázek 21: souřadnicové systémy robotu Yaskawa [14]

Popis obrázku 23 [14]

- | | |
|--|-----------------|
| 1. Souřadnice kloubu Osa Z | 6. Osa Z |
| 2. Kartézské souřadnice Osa R | 7. Osa R |
| 3. Cylindrické souřadnice osa θ | 8. Osa θ |
| 4. Souřadnice nástrojové | 9. Osa X |
| 5. Uživatelské souřadnice | 10. Osa Y |

- **Souřadnice kloubu [14]**

- pohybují každým kloubem jednotlivě. Používáme je většinou při výjezdu z kolizí (uvolňujeme tak osy)

- **Kartézské souřadnice [14]**

- TCP bod nástroje robota se pohybuje paralelně s osou X, Y a Z. Používají se při programování přejezdů robota

- **Cylindrické souřadnice (rotace) [14]**

- Osa θ se pohybuje kolem osy S. Osa R se pohybuje paralelně s ramenem osy L. U vertikálního pohybu jede hrot nástroje robota paralelně s osou Z. Tento souřadnicový systém se používá při naklápění nástroje

- **Souřadnice nástroje [14]**
 - Skutečný směr nástroje namontovaného v ručním kloubu je definován, jako osa Z. Tato osa řídí souřadnice koncového bodu nástroje
- **Uživatelské souřadnice [14]**
 - Kartézské souřadnice osy X, Y a Z se dosadí k libovolnému bodu a úhlu. Hrot nástroje robota se pohybuje paralelně s osami kartézských souřadnic. Uživatelský souřadnicový systém si definuje programátor, pokud mu nevyhovuje klasický kartézský souřadnicový systém. Uživatelský souřadnicový systém pomáhá programátorovi v jeho orientaci vůči svařenci nebo obrobku.

2.3.2 Základní pohyby vykonávané robotem [15]

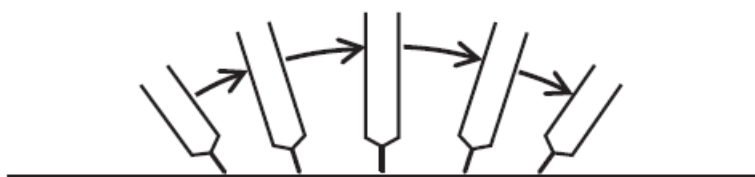
Základní program respektive jeho pohybová část se skládá ze základních pohybových instrukcí, které určují jaký typ pohybu má nástroj umístěný na robotickém rameni vykonat z bodu A do bodu B.

Typ pohybu JOINT (instrukce MOVJ) [15]

Tento typ pohybu se používá při přejezdech mezi jednotlivými činnostmi robota, když nezáleží, po jaké dráze robot z bodu do bodu přijede. Zjednodušeně přejíždí robot tou nejkratší a nejvhodnější trajektorií tak, aby byl pohyb proveditelný pro všechny osy robota. Z bezpečnostních důvodů musí být tento typ pohybu používán obezřetně, vždy je potřeba dráhu robota zkontrolovat, aby nedošlo ke kolizi s přípravkem nebo svařencem. Nejčastěji se tento pohyb používá při příjezdu nebo odjezdu do pracovní pozice. Jeho rychlost se udává v procentech, kdy 100% je nejrychlejší pohyb. Pohybová instrukce v systému Yaskawa je **MOVJ**. [15]

Lineární typ pohybu tzv. lineární interpolace (instrukce MOVL) [15]

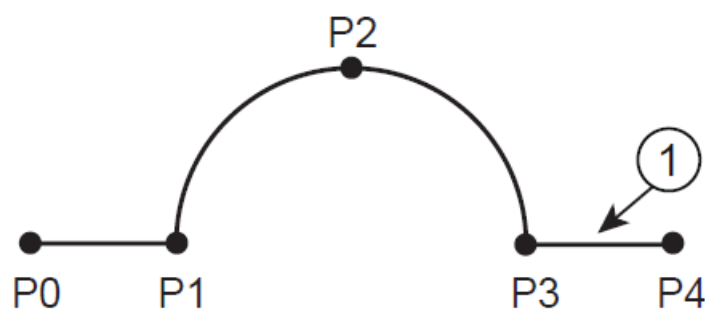
Tento typ pohybu je využíván při pracovní činnosti (hlavně při svařování) nebo když se musí robot pohybovat po přímce, aby nedošlo ke kolizi. Při tomto pohybu mění robot automaticky pohyb simulace zápěstí. Bod TCP je neustále na přímce, jak je vidět na obrázku 25. Rychlost tohoto pohybu se udává v centimetrech za minutu. Pohybová instrukce v systému Yaskawa je **MOVL**. (Obr. 22) [15]



Obrázek 22: Lineární pohyb [15]

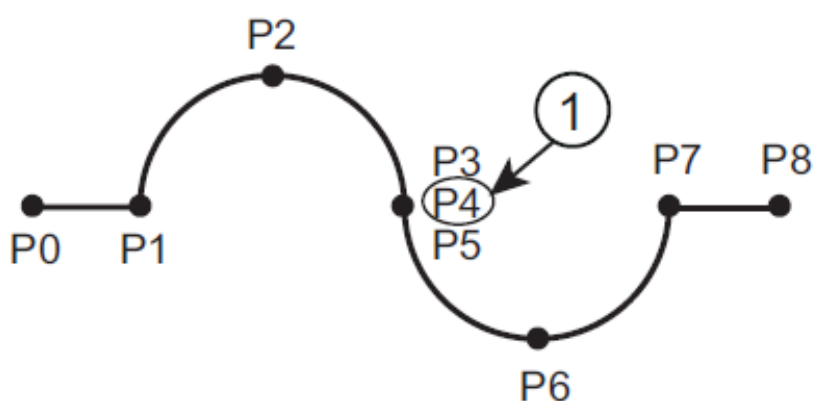
Kruhový pohyb tzv. kruhová interpolace (instrukce MOVC) [15]

Pro vytvoření kruhového pohybu po kružnici je potřeba zadat na trajektorii minimálně tři body (obr. 23) Bod P0 je lineární nebo Joint body P1, P2, P3 jsou kruhové a bod P4 může být zase lineární nebo Joint. [15]



Obrázek 23: Kruhový přípravek [15]

Pokud na sebe navazují dva kruhové pohyby, musí být tyto pohyby odděleny bodem lineárním nebo JOINT. (obr. 24) Bod P0 je Joint nebo lineární P1, P2 a P3 jsou body kruhové, pak bod P4 už musí být joint nebo lineární a dále body P5, P6 a P8 jsou opět kruhové a poslední bod P8 může být opět lineární nebo Joint. Body P3, P4 a P5 jsou uloženy na stejné pozici. [15]



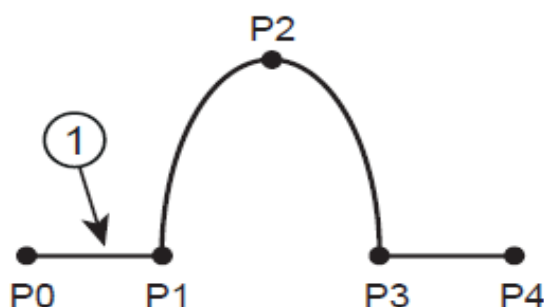
Obrázek 24: Popis dvou po sobě jdoucích kruhových pohybů [15]

Kružnici je lepší provádět na více kruhových bodů rovnoměrně rozmístěných. Pohyb po kružnici s více definovanými body je pak plynulejší, a protože je přesněji definován, tak se vyhne chybovým hlášení o překročení interpolace (nepřirozený pohyb „zápěstí robota“).

Rychlosti tohoto pohybu jsou stejné jako při pohybu lineárním. Pohybová instrukce v systému Yaskawa je **MOVC**. [15]

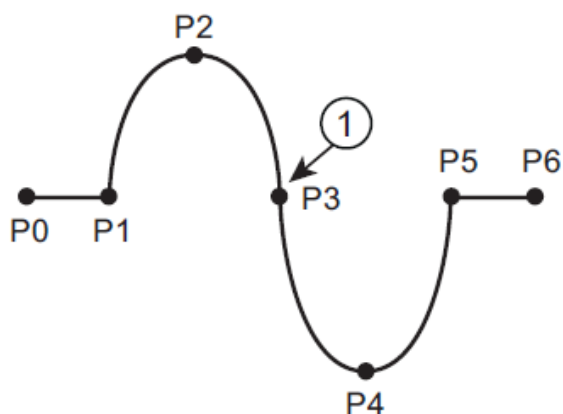
Pohyb po křivce tzv. Spline pohyb (instrukce MOVS) [15]

Tento pohyb se využívá při svařování, řezání nebo nástřikách. Jeho výuka je obdobná jako u kruhového pohybu. Opět se provede výuka třemi body P1, P2 a P3 a body P0 a P4 jsou opět lineární nebo JOINT (obr. 25). [15]



Obrázek 25: Pohyb typu SPLINE [15]

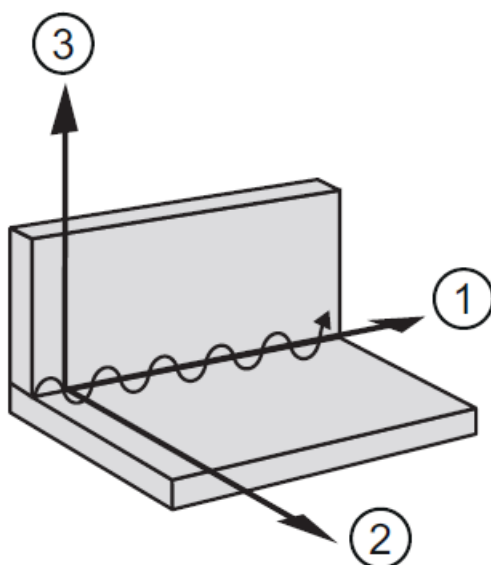
Manipulátor se pohybuje po naučené trajektorii tvořené kombinací parabol. Na rozdíl od kruhového pohybu není nutné vkládat žádný bod mezi navazující dvě křivky typu SPLINE (obr 26). Pohybová instrukce v systému Yaskawa je **MOVS**. [15]



Obrázek 26: Dvě na sebe navazující křivky [15]

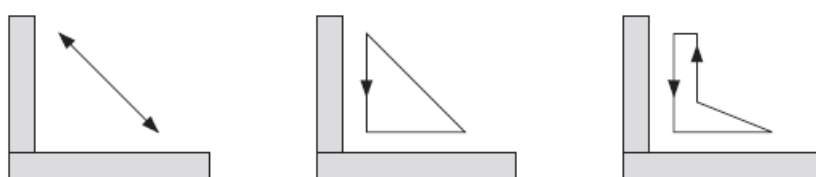
Kývavý pohyb [16]

Kývavý pohyb se využívá při svařování nejen koutových svárů, ale i tupých. Tvoříme tímto pohybem širší svarovou housenku a snáze vyplňujeme mezery vzniklé přípravou svarových ploch. Kývavý pohyb je prováděn pomocí základního souřadnicového systému. Tento souřadnicový systém není možné zvolit, je automaticky vytvořen už v souboru nastavování kývavého pohybu (obr. 27). [16]



Obrázek 27: Základní kývavý pohyb a jeho souřadnicový systém [16]

Existují tři druhy kývavého pohybu, které je možné nastavit a to jednoduchý kývavý pohyb, trojúhelníkový kývavý pohyb a pohyb do tvaru L (obr. 28)



Obrázek 28: Typy kývavého pohybu [16]

2.3.3 Robotické svařování- zadávání svařovacích parametrů [17]

Každý výrobce robotů má jiný systém zadávání svařovacích parametrů do programu robota. V podstatě existují pouze dvě možnosti zadávání svařovacích parametrů do programu robota.

1. První způsob je vyvolávání přednastavených svařovacích programů (jobů) přímo uložených v databázi svařovacího zdroje. Takže pokud je nutné upravit nějaký parametr, musí se upravit přímo na svářečce.
2. Druhý způsob je nastavování svařovacích parametrů v programu řídicí jednotky robota, kde se nastavené parametry ukládají do souboru a ten soubor je následně možné vyvolat v programu robota. Zde pokud je potřeba upravit nějaký svařovací parametr, tak je možné upravit parametr pohodlně přímo přes ovládací konzoli robota.

Pro experiment bude použit druhý způsob, (v systému Yaskawa je pojmenovaný tento systém Weldcom), protože je pohodlnější a šetří čas. **Vizualizace nastavení svařovacích parametrů je v příloze 3.**

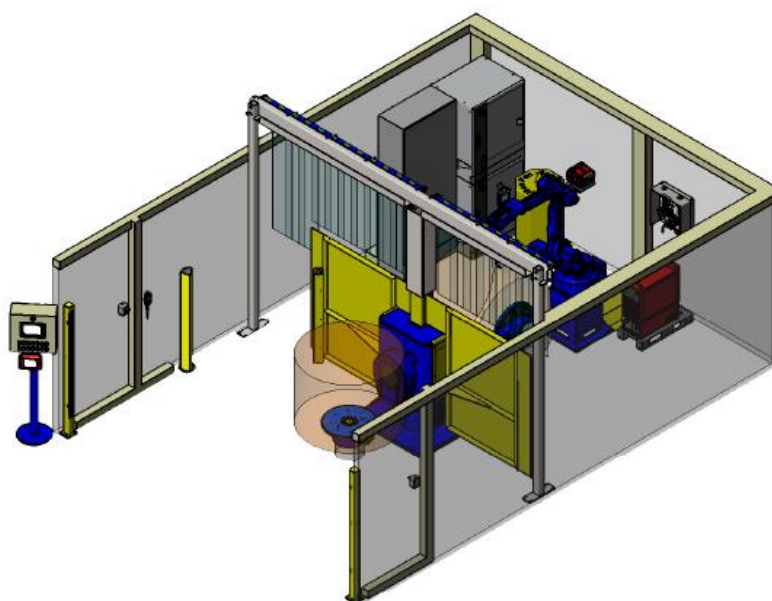
3 Experimentální část bakalářské práce

Z úvodu této bakalářské práce vyplývá její cíl. Je jím stanovení optimálních svařovacích parametrů pro robotické svařování tak, aby bylo robotické pracoviště maximálně produktivní a kvalita svaru odpovídala požadavkům podle EN ISO 5817 „C“. Dalším cílem je porovnat kvalitu a produktivitu jednotlivých svařovacích procesů. V této praktické části bude pro tento účel vytvořen svařovací program, budou použity různé parametry a různé svařovací procesy, které dovoluje svařovací zdroj využít. Za použití stejných svařovacích procesů budou svařeny vzorky také ručně kvůli možnosti porovnání. Následně bude provedena vizuální kontrola a kontrola prozářením. Dále budou odebrány vzorky pro metalografický výbrus, kde bude změřena šířka TOO, hloubka závaru a bude změřen průběh mikrotvrdosti. Nakonec bude porovnána velikost vneseného tepla.

3.1 Svařovací pracoviště pro provedení experimentu

Robotické rameno má klasicky 6 os. Rameno má vedený kabelový svazek skrze 5. osu, což je velmi výhodné, protože kabelový svazek nepřekáží a rameno se dostane snadno i na nepřístupná místa.

Jedna z nejdůležitějších součástí robota, která zajišťuje kvalitu i produktivitu je polohovadlo. Na obrázku 29 je zobrazeno tříosé polohovadlo s dvěma pracovními stanicemi (stoly) takzvanými L-manipulátory. L- manipulátor nám zajišťuje natáčení svařence, tak že je vždy možné svařovat v poloze PA nebo PB. Dvě stanoviště má robotické buňka kvůli produktivitě. Praktikuje se takzvaný „pendl systém“, kdy operátor výroby na jedné stanici zakládá díl do přípravku a to v čase, kdy na druhé stanici robot svařuje. Tak je udrženo co největší poměr hoření oblouku k pracovní době.



Obrázek 29: Robotická buňka Yaskawa [autor]

Svařovací zdroj TPS 500i je modernější svařovací zdroj od firmy Fronius. Je určený pro robotické svařování. Je velice výkonný, je vybaven svařovacími procesy STANDARD, PULZ a PMC. Má velkou paměťovou jednotku pro ukládání svařovacích programů a je vybavena stabilizátorem délky oblouku a stabilizátorem závaru.



Specifikace:

Síťové napětí: 3x 400 V

Síťové jištění: 35 A

Rozsah svařovacího proudu: 3–500 A

Napětí naprázdno: 71 V

Pracovní napětí MAG: 14,2–39 V

Svařovací procesy: Standard, Pulz, PMC

Svařovací proud při 10 min / 40° C

40 % 60 % 100 %

500 A 430 A 360 A

Obrázek 30: Zdroj TPSi 500 od firmy
Fronius [12]



Pro ruční svařování byl k dispozici rovněž zdroj od firmy Fronius TPSi 400, která má veškeré funkce shodné jako TPSi 500

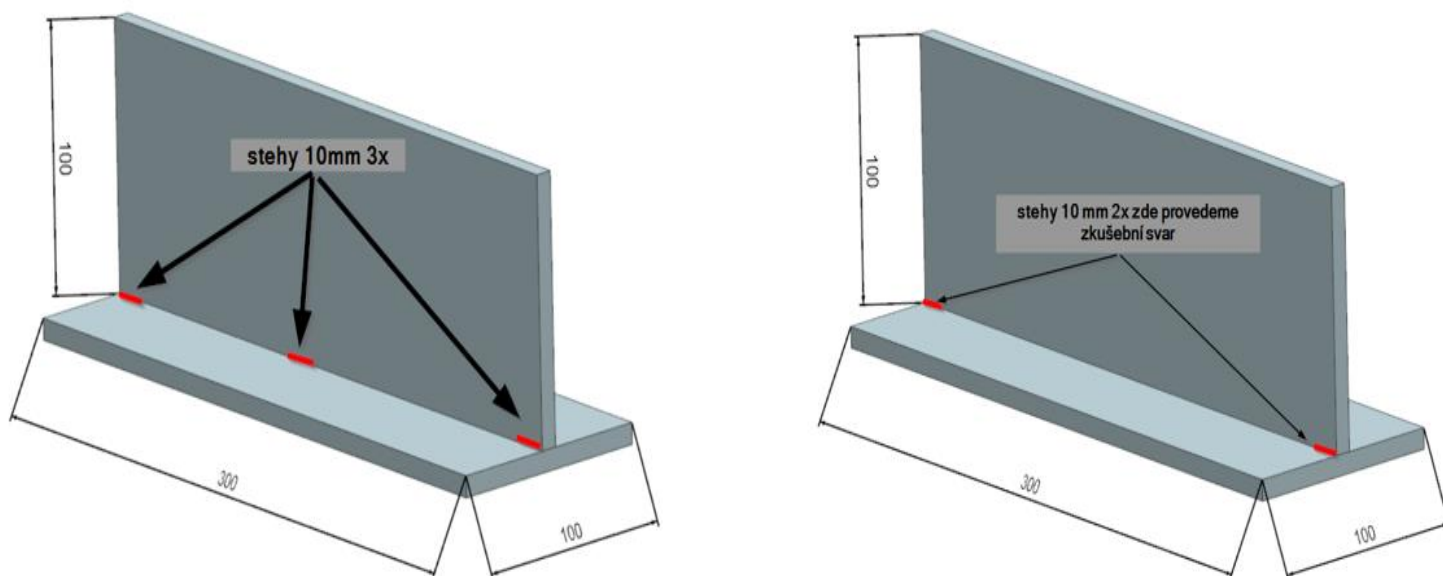
Obrázek 31: Zdroj TPSi 400 od firmy
Fronius[12]

3.2 Příprava pro provedení experimentu

Pro experiment byly připraveny plechy z oceli S355MC o tloušťce 8 mm. Použit byl drát o průměru 1 mm od firmy ESAB OK Aristorod 12.63. Inspekční certifikát 3.1 přídavného materiálu je v příloze 1. Ochranné atmosféra bude o složení 90 % Ar a 10 % CO₂. Je to univerzální atmosféra pro pulzní svařování a sprchový přenos kovu.

3.2.1 Příprava vzorků pro svařování

Plechý pro vzorky byly nařezané laserem TruLaser 5030 na rozměry 300x100 mm. Plechý byly otryskány. Tyto plechý byly stehovány na jedné straně rovnoměrně třemi stehy 10 mm dlouhými a na druhé straně dvěma stehy při krajích. Stehy byly provedeny z obou stran, aby se vzorek při svaření nezavíral. Svar byl proveden na straně se dvěma stehy. Svary byly provedeny v poloze PB. (obr. 32.)

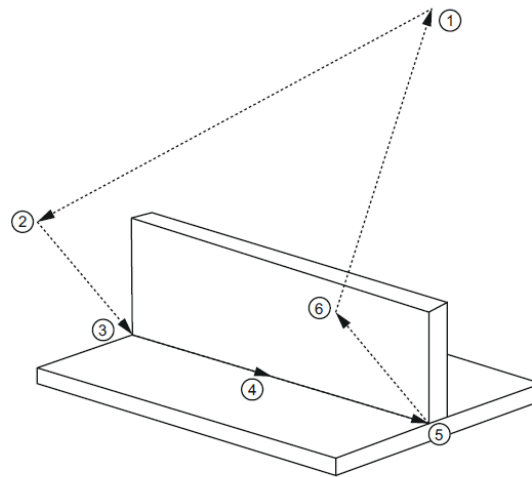


Obrázek 32: příprava vzorků pro svařování

3.2.2 Tvorba programu robota pro experiment [17]

Program robota pro experiment byl vytvořen dle následujícího schématu viz. obr. 33. Kdy jednotlivé úseky například z bodu 1 do bodu 2 jsou definovány pohybovou instrukcí, která definuje způsob pohybu robotického ramena z bodu 1 do bodu 2. (Jednotlivé pohyby a pohybové instrukce byly popsány v kapitole 3.2)

Ve chvíli kdy byl vytvořen pohybový program, tak bylo možno zadávat příkazy pro svařování dle schématu viz. obr 34. **Kompletní program pro svaření vzorků je přiložen jako příloha 2.**

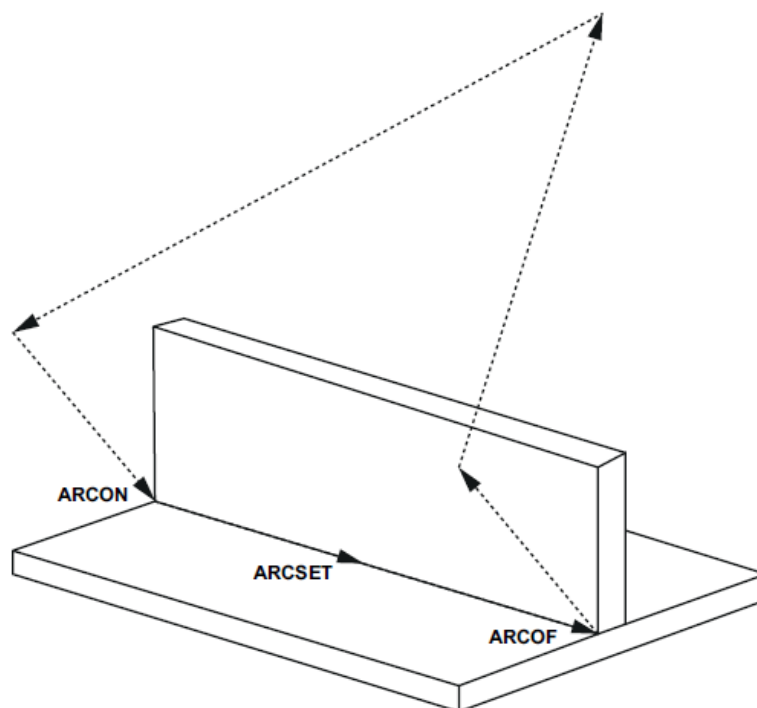


- | | | | |
|---|-----------|---|--------|
| ① | Krok 1, 7 | ④ | Krok 4 |
| ② | Krok 2 | ⑤ | Krok 5 |
| ③ | Krok 3 | ⑥ | Krok 6 |

Obrázek 33: Schéma pohybového programu robota [17]

Příkazy pro svařování:

- ARCON- začátek svařování
- ARCSET- změna svařovacího parametru
- ARCOFF- konec svařování



Obrázek 34: Schéma zadávání svařovacích příkazů [17]

3.3 Návrh svařovacích parametrů

Navrženy byly parametry pro svařovací proces standard, PMC a pulz. **Návrh svařovacích parametrů vychází z cíle práce maximálně využít svařovací zdroj a dosáhnout největší možné produktivity** a z poznatku, že hranice maximálního proudu pro drát o průměru 1 mm je cca okolo 300 [A] (viz. kapitola 2.2.4 obr. 14). Svařovací napětí pohybuje okolo 30 [V], bývá nastaveno automaticky synergickou funkcí svářečky (je možné samozřejmě manuálně korigovat). Díky volbě základních svařovacích parametrů je možné **pouze orientačně určit rychlost svařování**, okolo které by se měla rychlost svařování pohybovat, aby nedošlo k překračování množství vneseného tepla do materiálu, které se u termomechanických ocelí a jemnozrnných ocelí mělo limitovat a mělo by být co možná nejnižší. Vnesené teplo při svařování jemnozrnných ocelí by mělo být pod 10 [kJ.cm⁻¹].[21]

Výpočet možné dosažitelné rychlosti ze vzorce pro vnesené teplo viz kapitola 2.1.3 :

$$v = \mu \frac{U * I}{Q_s} = [m * s^{-1}]$$

$$v = 0,8 \frac{300 * 30}{10^6} = 0.0072 [m * s^{-1}] \sim 43 [cm * min^{-1}]$$

Po zjištění přibližné rychlosti svařování byly provedeny tři vzorky s různou rychlostí svařování a to 40 cm/min 43 cm/min a 45 cm/min pro každý svařovací proces.

To znamená 9 vzorků pro robotické svařování a tři vzorky pro ruční svařování, celkem 12 vzorků. Navržené parametry jsou shrnuty v tabulce 3.

Tabulka 3: Návrh svařovacích parametrů

Popis	Číslo vzorku	Svařovací proces	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost posuvu podávání drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [-10/+10]	Rychlost svařování [cm/min]
Robotické svařování	V1	PMC	310-280	25,5-30	16-17	0	45
	V2	PMC	310-280	25,5-30	16-17	0	43
	V3	PMC	310-280	25,5-30	16-17	0	40
	V4	Pulz	310-280	25,5-30	16-17	0	45
	V5	Pulz	310-280	25,5-30	16-17	0	43
	V6	Pulz	310-280	25,5-30	16-17	0	40
	V7	Standard	310-280	25,5-30	16-17	0	45
	V8	Standard	310-280	25,5-30	16-17	0	43
	V9	Standard	310-280	25,5-30	16-17	0	40
Ruční svařování	V10	Standard	240-260	25,5-30	11-13	0	30
	V11	Pulz	240-260	25,5-30	11-13	0	30
	V12	PMC	240-260	25,5-30	11-13	0	30

3.4 Svaření vzorků a zaznamenání skutečných hodnot svařování

Po zavaření dvanácti zkušebních vzorků byly zaznamenány tyto skutečné střední hodnoty (viz. Tabulka 4). Navržené parametry svařování musely být zkorigovány tak, aby byly splněny základní parametry svaru, jeho velikost tvar a kvalita povrchu.

Tabulka 4: Zaznamenání skutečných parametrů svařování vzorků

Popis	Číslo vzorku	Svařovací proces	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost posuvu podávání drátu [m/min]	Korekce délky oblouku [-10/+10]	Rychlost svařování [cm/min]
Robotické svařování	V1	PMC	285	25,5	17,5	-1	45
	V2	PMC	260	25	16,5	-1	43
	V3	PMC	250	24,5	16	-1	40
	V4	Pulz	317	29,5	16,5	0	45
	V5	Pulz	305	29,1	15,8	0	43
	V6	Pulz	295	28,6	15	0	40
	V7	Standard	325	28,6	16	-2	45
	V8	Standard	305	27,5	15,5	-3	43
	V9	Standard	290	27,2	15	-3	40
Ruční svařování	V10	Standard	263	26,9	12,6	-1,5	31
	V11	Pulz	260	26,5	13,5	-0,9	31
	V12	PMC	240	25,8	13,7	-1	31

Nižší svařovací proud u svařovacího procesu PMC, i přes vyšší nebo shodnou rychlost podávání drátu, je důsledek aktivních snímačů korekce délky oblouku a stabilizátoru závaru.

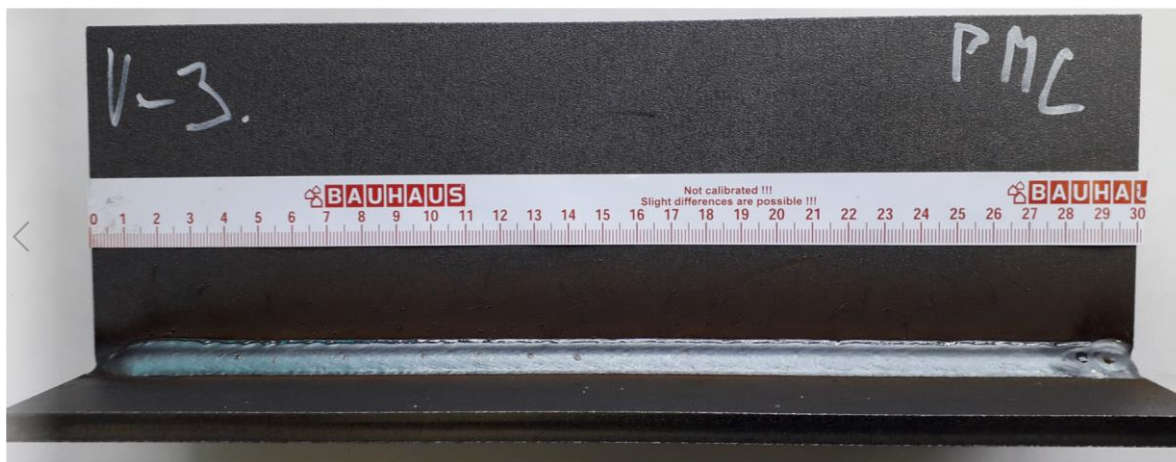
3.5 Provedení vizuální kontroly dle ČSN EN 5817

Byla provedena vizuální kontrola svarů podle ČSN EN ISO 5817 pro stupeň „C“. Kde u robotických svarů nebyly indikovány žádné větší vady, pouze u některých vzorků svařených robotem byl znatelný špatně vyplněný koncový kráter (hrozí kráterová trhlinka). **Tato závada se odstraňuje snížením svařovacího proudu na konci svaru na minimum a nastavením časového úseku prodlevy robota tak, aby se koncový kráter zcela vyplnil.** U ručního svařování byl zjištěn na vzorku V-10 neprůvar ve vzdálenosti 220 až 260 mm, který je pro stupeň kvality „C“ podle ČSN EN ISO 5817 nepřípustný!! Neprůvar byl způsoben vlivem svářeče. U ostatních vzorků nebyly indikovány nepřípustné vady. Fotodokumentace svařovaných vzorků jsou součástí přílohy 4.

Vizuálně nejlépe vypadaly svary svařené v režimu PMC. Při rychlosti 40 cm/min. byl svar nejvhlednější. Tyto svary měly čistý a rovný povrch s minimálním rozstříkáním a to i při vyšší zkoušené rychlosti 45 cm/min.

Při svařování v pulzním režimu při rychlosti 45 cm/min. byl rozstřík u vzorků vyšší, bylo to způsobeno nutností zvýšit posuv svařovacího drátu, kvůli dodržení velikost svaru, to zapříčinilo navýšení svařovacího proudu přes 300 ampér, povrch svaru již nebyl tak rovný a tvořilo se více strusky (skloviny). Při postupném snižování rychlosti svařování na rychlost 40 cm/min a poklesu svařovacího proudu pod 300 ampér bylo i zde dosaženo poměrně kvalitního povrchu svaru s minimem strusky (skloviny) a rozstříku svarového kovu.

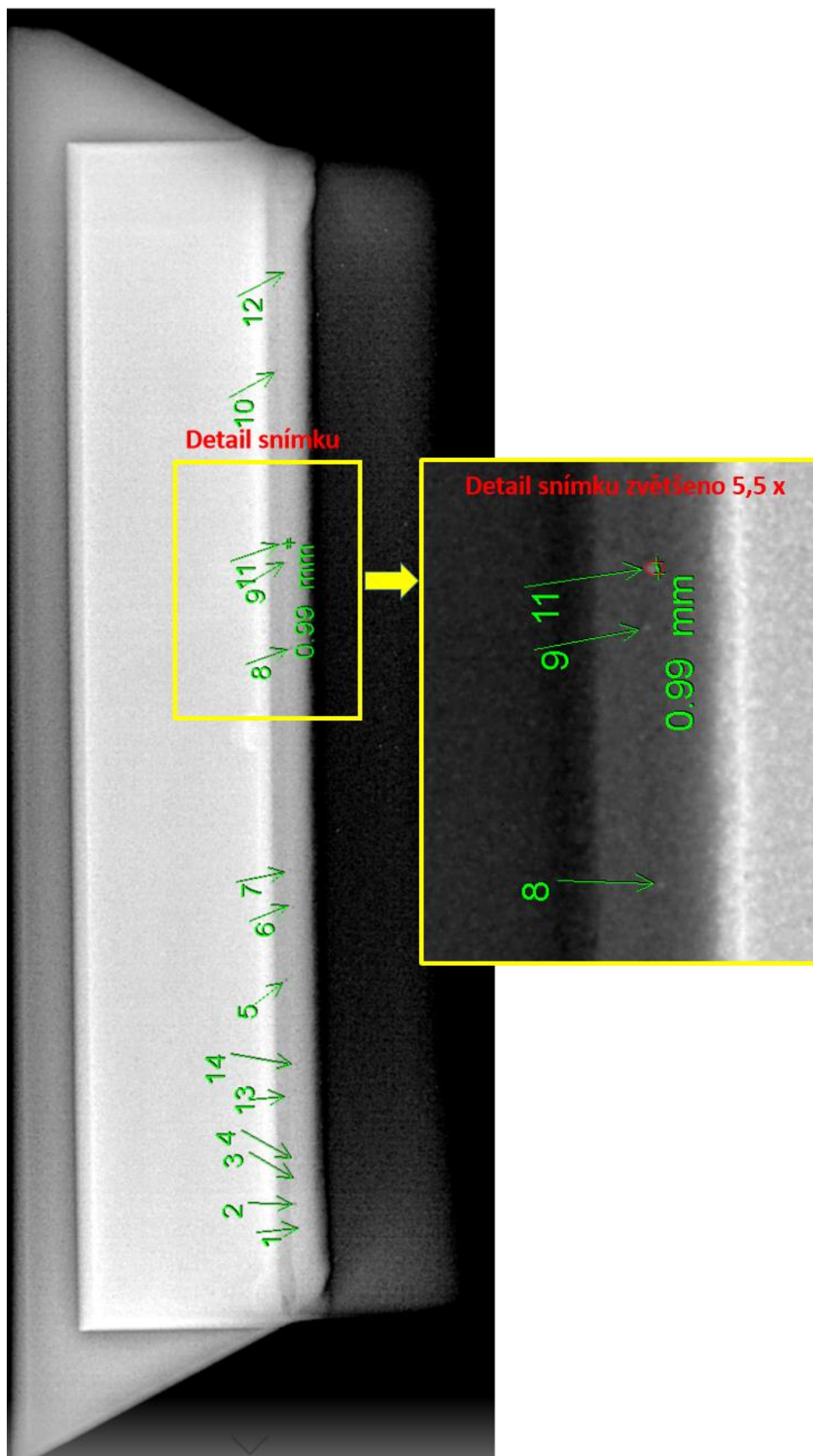
Obdobný trend jako u pulzního svařování byl i u vzorků svařovaných ve **standardním režimu**. Zde také bylo docíleno nejkvalitnějšího povrchu až při snížení rychlosti svařování ze 45 na 40 cm/min. a snížením svařovacího proudu pod 300 [A].



Obrázek 35: Robotické svařování - proces PMC 40 cm/min

3.6 Rentgenová prozařovací zkouška

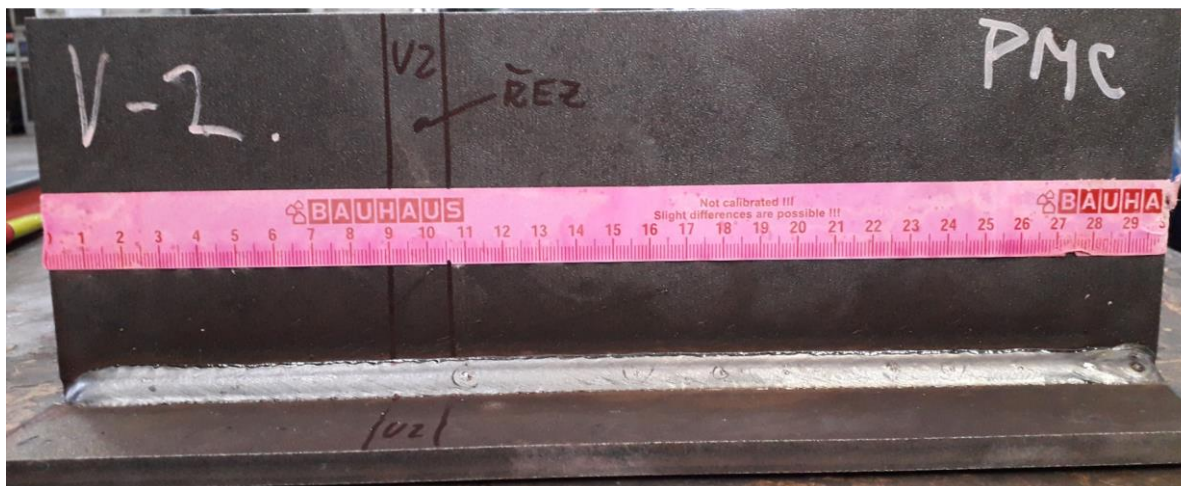
Po provedení rentgenové prozařovací zkoušky byly indikovány u všech vzorků nějaké mikropóry. U vzorku 10. byl potvrzen neprůvar. Jiné vady nebyly indikovány nebo byly miniaturní. Pravidelná vnitřní pórovitost je podle normy EN ISO 5817 pro stupeň „C“ přípustná do množství 1,5% plochy jednovrstvého svaru a jednotlivý pór nesmí být větší než 0,3 velikosti svaru „a“. Což pro svar velikosti a5 je přípustná velikost póru 1,5 mm. **Všechny indikované póry na všech vzorcích byly menší a největší póry měly průměr okolo 1 mm (Viz obr. 36).**[22]



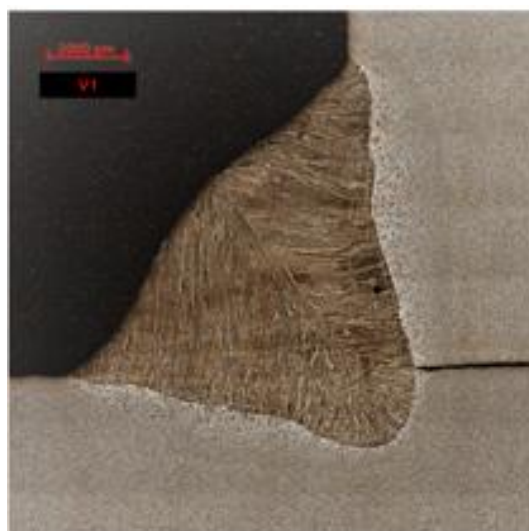
Obrázek 36: Rentgenový snímek vzorku V-3 měření největšího póru

3.7 Destruktivní testování- metalografie

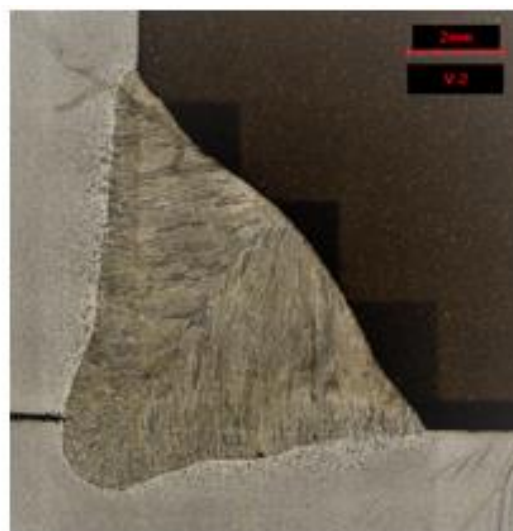
Řez vzorku byl proveden napříč svarovým spojem mechanickou pilou s chlazením, tak aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury. Všechny vzorky byly odebrány ze stejné vzdálenosti od začátku zkušebního svaru a to 90 mm od kraje a šířka vzorku byla cca 15 mm (Viz. Obr. 37). Struktura svarového spoje byla zviditelněna naleptáním látkou NITAL 5%. (Viz. Obr. 38 a 39)



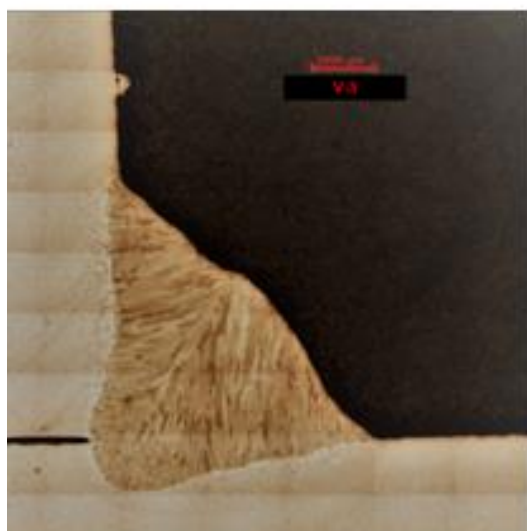
Obrázek 37: Místo pro odběr vzorku



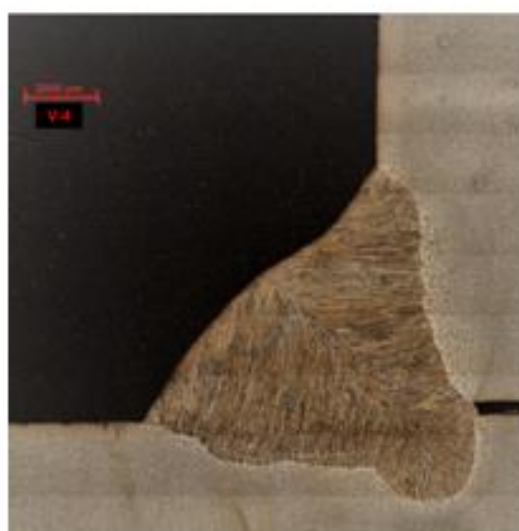
Vzorek V-1- PMC



Vzorek V-2-PMC



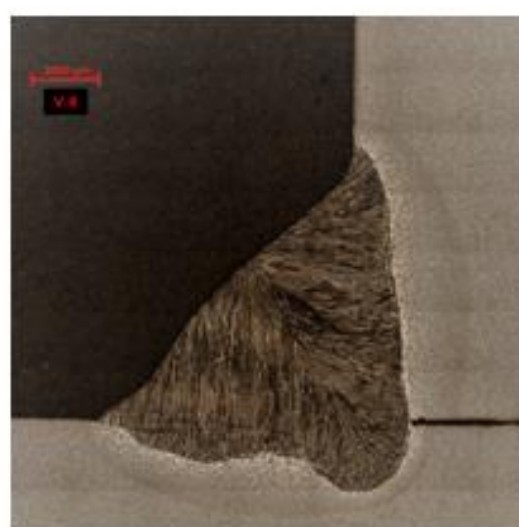
Vzorek V-3- PMC



Vzorek V-4-PULZ



Vzorek V-5- PULZ

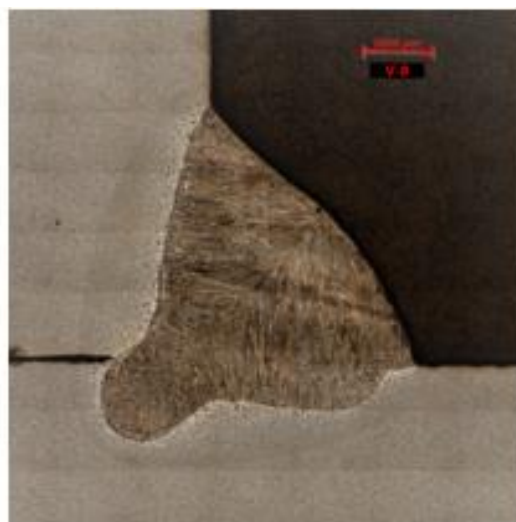


Vzorek V- 6- PULZ

Obrázek 38: Odebrané naleptané vzorky V1 až V6



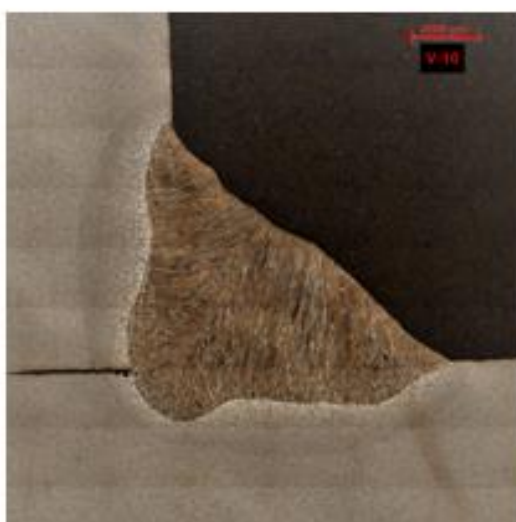
Vzorek V-7- Standard



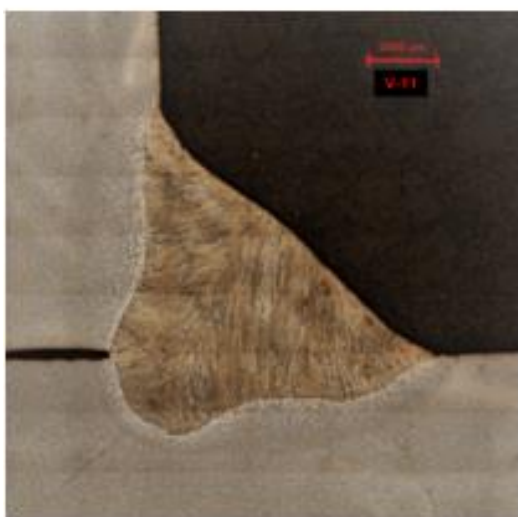
Vzorek V-8- Standard



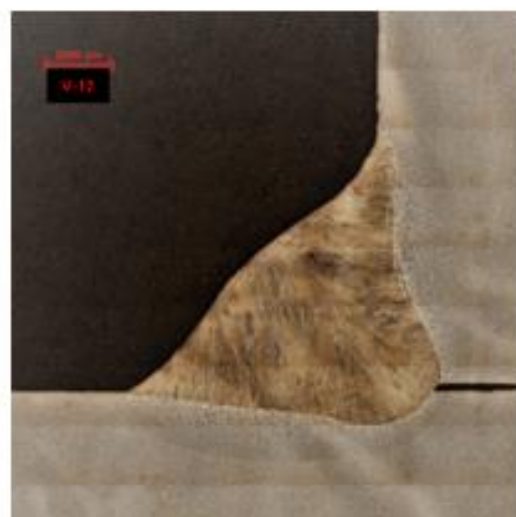
Vzorek V-9-Standard



Vzorek V-10-Standard-ruční



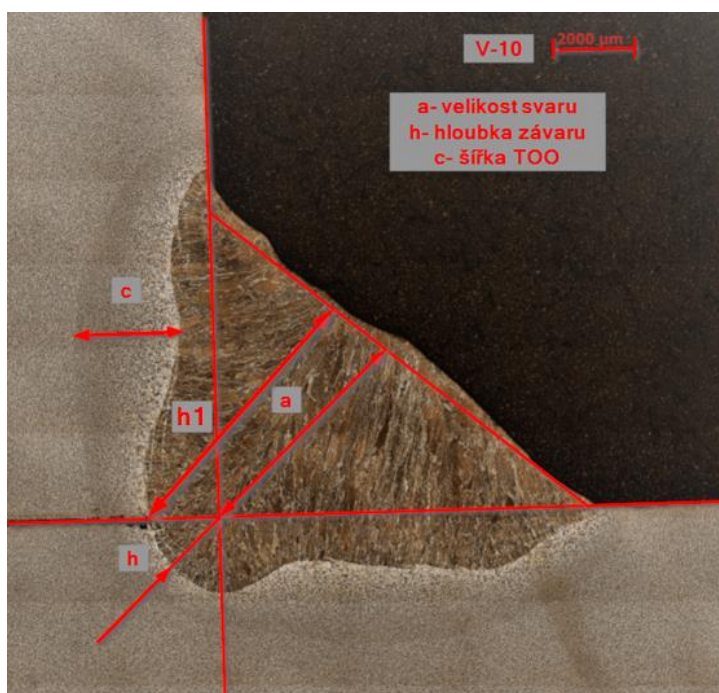
Vzorek V-11-PULZ-ruční



Vzorek V-12-PMC-ruční

Obrázek 39: Odebrané a naleptané vzorky V7-V12

Na vyfocených makrech bylo provedeno pomocí analytického softwaru světelného mikroskopu měření hloubky závaru a přeměření šířky TOO. (viz. obr. 40) Výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.



Obrázek 40: Měření údajů: a- velikost svaru; h- hloubka závaru; h₁- hloubka závaru; c- šířka TOO

Tabulka 5: Porovnání hloubky závaru „h“ a šířky TOO „c“

Popis	Číslo vzorku	Svařovací proces	Velikost svaru a ₅	Hloubka závaru h [mm]	Hloubka závaru h ₁ [mm]	Šířka TOO c [mm]
Robotické svařování	V1	PMC	5,3	1,7	6,35	1,9
	V2	PMC	5,36	1,6	6,2	2,0
	V3	PMC	5,2	1,4	6,1	2,4
	V4	Pulz	5,1	3,2	6,6	2,6
	V5	Pulz	5,1	3,1	6,6	2,8
	V6	Pulz	5,3	2,1	6,3	2,8
	V7	Standard	5,1	3,5	7,0	2,4
	V8	Standard	5,0	3,5	6,7	2,5
	V9	Standard	5,2	2,7	6,7	2,8
Ruční svařování	V10	Standard	5,2	1,3	6,1	2,5
	V11	Pulz	5,1	1,7	6,0	2,9
	V12	PMC	5,2	1,1	5,9	2,4

Z tabulky 5 vyplývá, že nejužší TOO má svařovací proces PMC, ale také má i poloviční hloubku závaru oproti svařování v standardním režimu je to díky výšce svařovacího proudu. Obdobný výsledek je viditelný i u vzorků svařených ručně. I Tam je TOO nejužší při svařování procesem PMC a hloubka závaru je také nižší. U jednotlivých procesů má samozřejmě velký vliv na šířku TOO ještě rychlost svařování, opět je patrné, že při vyšší rychlosti svařování je TOO trochu užší.

3.8 Měření mikrotvrdomosti podle normy ČSN EN ISO 9015

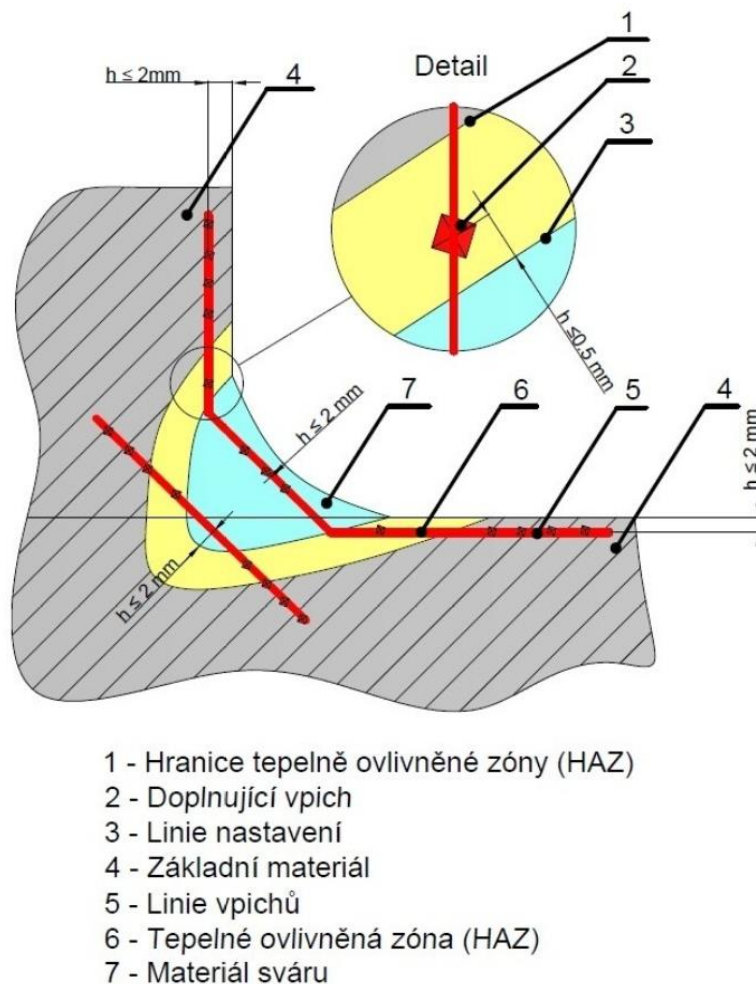
Měření mikrotvrdomosti a tvrdosti pomocí tvrdoměru je poměrně jednoduchý způsob měření mechanických vlastností materiálů. Tvrdost svarového kovu je určena elasticko-plastickými vlastnostmi materiálů a měření tvrdosti dokáže odhalit skutečný stav struktury materiálů. Díky tomuto měření je možné predikovat místo zrodu případné trhliny a porušení svarového spoje.

Tato měřicí metoda je poměrně jednoduchá. Jedná se o vnikací metodu, to znamená, že těleso o tvaru jehlanu je určitou silou zatlačeno do materiálu a po vniknutí tělesa se pomocí světelného mikroskopu měří velikost otisku tělesa. Respektive se měří úhlopříčky vtisku. Měření bylo provedeno ve školní laboratoři na mikrotvrdoměru Struers Durascan (viz. obr. 41).



Obrázek 41: Pracoviště měření tvrdosti v laboratoři KMM na ZČU

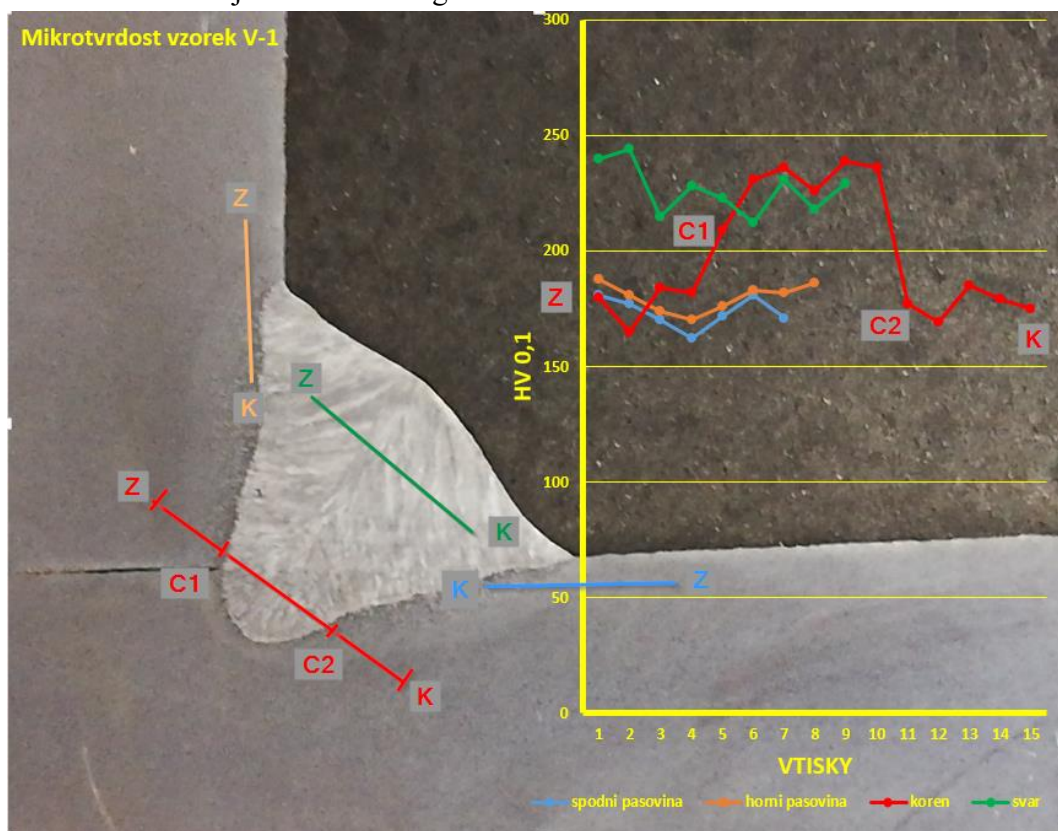
Měření mikrotvrdomosti bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 9015, byla použita Vickersova metoda (Vickersův jehlan). Zatížení bylo nastaveno na HV 0,1, toto zatížení odpovídá cca 100 gramům. Byly provedeny řady vtisků (obr. 42). Vzdálenost vtisků od sebe byla nastavena na 0,7 mm.



Obrázek 42: Popis koutového svaru měření mikrotvrdomosti dle

ČSN EN ISO 9015-1 [20]

Jak je vidět na obrázku 43, který dokumentuje mikrotvrdomost vzorku V-1, tvrdost svarového kovu se pohybuje mezi 245 HV a 212 HV, což je v pořádku tvrdost svarového kovu může být u obsahu uhlíku 0,12 hm % cca 270 HV (viz. kapitola 2.1.3 svařitelnost ocelí). Dále byly pozorovány v TOO mírné poklesy tvrdosti oproti základnímu materiálu. Tento pokles tvrdosti je typický v místě, kde je zrno hrubší, než je zrno neovlivněného základního materiálu. Právě v místě poklesu tvrdosti může dojít nejnázne k vyčerpání plastické deformace a při vysoké napjatosti může zejména v těchto místech TOO docházet k vzniku trhlin. **Obdobné výsledky byly pozorovány prakticky u všech vzorků.**



Obrázek 43: Vizualizace měření mikrotvrlosti vzorku V-1

3.9 Hodnocení svarů z hlediska vneseného tepla

Hodnocení vneseného tepla provedeme podle vzorce viz. kapitola 2.1.3. Vnesené teplo nám ovlivňuje šířku TOO. Výše v kapitole svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí bylo uvedeno, že vnesené teplo by se mělo maximálně limitovat a pohybovat pod $10 \text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$. Výsledné hodnoty jsou zdokumentovány v tabulce 6.

Tabulka 6: Porovnání vneseného tepla Q

Popis	Číslo vzorku	Svařovací proces	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost svařování [cm/min]	Vnesené teplo Q [kJ/cm]
Robotické svařování	V1	PMC	285	25,5	45	7,75
	V2	PMC	260	25	43	7,26
	V3	PMC	250	24,5	40	7,35
	V4	Pulz	317	29,5	45	9,97
	V5	Pulz	305	29,1	43	9,91
	V6	Pulz	295	28,6	40	10,12
	V7	Standard	325	28,6	45	9,91
	V8	Standard	305	27,5	43	9,36
	V9	Standard	290	27,2	40	9,47
Ruční svařování	V10	Standard	263	26,9	30	11,32
	V11	Pulz	260	26,5	30	11,02
	V12	PMC	240	25,8	30	9,91

Jak je vidět v tabulce 6 nejméně vneseného tepla je u svařovacího procesu PMC, to se potvrdilo i u vzorků svařených ručně.

4 Ekonomické zhodnocení- aplikace sv. parametrů

Výsledné parametry pro standardní režim svařování byly aplikovány na skupinu dílů Abstreifträger (viz obr. příloha 5), které se svařují ve společnosti PÖTTINGER s využitím robotického pracoviště. Na základě pozitivních výsledků byly použity parametry vzorku V-9. Ročně se svařuje 8633 kusů. **Nové parametry uspořily cca 151 hodin svařování ročně, což je úspora cca 158 tis. CZK/ROK!** Výkres součásti je součástí přílohy

Tabulka 7: Aplikované parametry svařování robot

Parametry svařování		Proud [A]	napětí [V]	rychlost posuvu [cm/min.]
Původní parametr	Standard	245	25	30
Nový parametr V-9	Standard	290	27,2	40

Tabulka 8: Souhrnná tabulka úspor

úspora času svařování- starý parametr vs. nový parametr					Tarif robot	1 hod= 40,4 €
číslo dílu	Název dílu	počet [ks/rok]	délka svaru a5 [cm]	Suma hodin pro 30 cm/min [hod./rok]	Suma hodin pro 40 cm/min. [hod./rok]	úspora v [hod/rok]
8732.49.430.0	Abstreifträger SZ	3258	144	261	195	65
8732.55.430.0	Abstreifträger SZ	2120	120	141	106	35
8732.50.030.0	Abstreifträger SZ	1021	116	66	49	16
8732.59.435.0	Abstreifträger SZ	676	91,2	34	26	9
8751.58.030.0	Abstreifträger SZ	452	144	36	27	9
8732.55.435.0	Abstreifträger SZ	416	90	21	16	5
8732.51.030.0	Abstreifträger SZ	220	148	18	14	5
8732.50.035.0	Abstreifträger SZ	200	87	10	7	2
8751.58.035.0	Abstreifträger SZ	100	91,2	5	4	1
8732.50.030.1	Abstreifträger SZ	100	112	6	5	2
8732.58.030.0	Abstreifträger SZ	70	120	5	4	1
Suma úspory v hod/rok						151
Suma úspory v €/rok						6.087
Suma úspory v CZK/rok						158.267

5 Diskuze výsledků a závěrečné zhodnocení

Cílem této práce bylo určit optimální svařovací parametry pro robotické svařování se svařovacím zdrojem Fronius TPSi 500, pro svar a5 a materiál S355MC o tloušťce 8 mm a stupeň kvality dle ČSN EN ISO 5817 „C“ tak, aby bylo svařování robotem kvalitní a produktivní. Svařovací zdroj umožňoval svařovat ve třech režimech, a to standard, pulz a PMC. Hlavní poznatek je zde, že hraniční parametry jsou pro drát 1 mm mírně pod 300 [A] a napětí okolo 24,5- 29 [V]. Optimální parametry a dosažené výsledky jsou shrnuty v tabulce 9.

Tabulka 9: Optimální svařovací parametry pro koutový svar a5 a tloušťku materiálu 8 mm

Popis	Číslo vzorku	Svařovací proces	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost svařování [cm/min]	Hloubka závaru h [mm]	Šířka TOO c [mm]	Vnesené teplo Q [kJ/cm]
Robotické svařování	V1	PMC	285	25,5	45	1,67	1,89	7,75
	V2	PMC	260	25	43	1,54	1,95	7,26
	V3	PMC	250	24,5	40	1,4	2,35	7,35
	V6	Pulz	295	28,6	40	2,05	2,75	10,12
	V9	Standard	290	27,2	40	2,71	2,8	9,47

Při těchto parametrech je možné svařovat rychlostí 40 cm/min pouze u procesu PMC bylo dosaženo rychlosti 45 cm/min. Nejvyšší kvalita svařování byl vyhodnocen vzorek V9, **pro pulzní režim** vzorek V6, **u procesu PMC** se jeví vzhledem ke kvalitě všechny tři vzorky obdobně. U zbylých vzorků byla už horší kvalita povrchu svaru a hrozila případná pórovitost a jiné vady pokud by byl základní materiál trochu znečištěn.

Potvrdilo se, že různé procesy (respektive jejich výsledný proudové a napěťové hodnoty) mají vliv na dosaženou hloubku závaru, šířku TOO a vnesené teplo. Se svařovacím procesem PMC lze svařit velmi kvalitní svár, co se týká povrchu, je možno dosáhnout vyšší svařovací rychlosti, ale hloubka závaru je nižší, ale díky stabilizátorům délky oblouku a hloubky závaru je závar stabilní. (v této práci to nebylo ověřeno, odkazují se na kapitulu 2.2.5 Svařovací proces PMC). Nejvyššího závaru bylo dosaženo svařováním ve standardním režimu, ale za cenu většího vneseného tepla do svařence.

Strukturu svarového kovu, po provedení měření mikrotvrdosti, svařovací procesy nijak neovlivňují. Tvrdost svaru byla obdobná u všech vzorků, pohybovala se okolo 230 HV. V TOO docházelo u všech vzorků k mírným poklesům mikrotvrdosti oproti základnímu materiálu a právě tam může docházet k případným trhlinám. Jediný rozdíl byl v šířce TOO, která byla jasně nejmenší u svařovacího procesu PMC a to díky lepším výsledným svařovacím parametrům.

Na závěr bylo možné tyto parametry ověřit v praxi ve firmě Pöttinger, kdy se aplikovaly parametry pro svar a5 na dílech Abstreifträger, které se vyrábí z obdobných plechů a optimalizací parametrů pro tyto díly bylo dosaženo zkrácení výrobního času a celkové roční úspory 158 tis. CZK. Čímž byl splněn cíl této práce.

6 Použitá literatura

1. PÖTTINGER. *www.poettinger.at*. [Online] [Citace: 20. 10. 2020.] Dostupné z: https://www.poettinger.at/cs_cz/unternehmen/portraet
2. ČSN EN 100027-1. *Systémy označování ocelí- Část 1: Stavba značek oceli*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha 2017
3. FOLDYNA Václav a kolektiv: *Materiály a jejich svařitelnost*. Vyd. 1. Ostrava, Zeross 2001, ISNB 80-85771-85-3
4. ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí: Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2020
5. ČSN EN 10149-1. *Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena Část 1: Obecné technické dodací podmínky*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha 2013
6. ČSN EN 10149-2. *Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha 2013
7. KUTIL, Petr. *Porovnání produktivity technologie svařování MAG a FCAW*. [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117315>.
8. ČSN EN 1011-2. *Svařování- Doporučení pro svařování kovových materiálů- Část 2: Obloukové svařování feritických ocelí*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha 2013
9. SNÁŠEL, Pavel - *Diplomová práce- Optimalizace parametrů technologie GMAW-135 pro robotické svařování*. [Online] [Citace: 20. 10. 2020.] dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/114995/SNA0021_FS_N2301_2303T00_2_20_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y
10. MINAŘÍK, Václav a kolektiv autorů: *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava, Zeross- svářečské nakladatelství 2001, ISNB 80-85771-81-0
11. FRONIUS. *svarovani mig-mag*. [online] [citace 28.10.2020] dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/svet-svarovani/svaovn-migmag>
12. FRONIUS, *Tisková zpráva firmy Fronius k procesu PMC*. [online] [citace 8. 11. 2020] dostupné ke stažení z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding>
13. KOLÍBAL, Z. a kol. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTIUM, 2016. ISBN 987-80-214-4828-5.
14. WOE; *Příručka Yaskawa E1102000147CZ05; revize 05*. vydáno 02/2015
15. WOE; *Příručka Yaskawa E1102000144CZ03; revize 03*. vydáno 04/2015
16. WOE; *Příručka Yaskawa E1102000148CS01; revize 01*. vydáno 12/2013
17. WOE; *Příručka Yaskawa E1102000149CZ02; revize 02*. vydáno 12/2013
18. URBAN, Vratislav. *Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
19. PTÁČEK, Luděk a kolektiv: *Nauka o materiálu II*. Akademické nakladatelství CERN 2002 ISBN 80-7204-248-3
20. TESTSYSTEM. *zkoušení-tvrlosti-svarových-spojů*. [online] [citace 19.4.2021] dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/zkouseni-tvrlosti-svarovych-spoju>

21. KADLEC, Tomáš *Vliv svařování na změny únavové životnosti spojů z jemnozrnné oceli S700MC*. [Online]. Liberec 2019 [Citace: 2021-4-23]
Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/153930>
Vedoucí práce doc. Ing. Jaroslav Moravec Ph.D.
22. ČSN EN ISO 5817 *Svařování- Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování)- určování stupňů kvality*. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví Praha 2014
23. WWW.ELEKTRODY.CZ, *prima-neprima-polarita* [online] [citace 12.5.2021]
dostupné z: <https://www.elektrody.cz/svarovani-tig-dc-prima-neprima-polarita>
24. ISO/ TR 15608. *Svařování- směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Vydal Český normalizační institut Praha 2008

7 Přílohy

7.1 Příloha 1- přídavný materiál inspekční certifikát 3.1



**INSPEKČNÍ CERTIFIKÁT (3.1) - Chemická analýza
ZKUŠEBNÍ ZPRÁVA (2.2) - Mechanické vlastnosti
INSPECTION CERTIFICATE (3.1) - Chemical analysis
TEST REPORT (2.2) - Mechanical properties**

Odběratel Customer:	00011754PRA LINDE GAS a. s. U Technoplynu 1324 198 00 PRAHA 9
------------------------	--

Číslo certifikátu/Cert no: **646/2020**

Obj.č./Your order No: 13.07.2020

Zakáz.č./Our ref.:

Číslo výrobku Item no	Název výrobku Description	Množství Quantity	Jedn. Unit	LOT
1A63109320	OK ARISTOROD 12.63 1,0 mm		Kg	PVU13040270B

Chem.složení/Chem.composition(%) - Skutečně hodnoty/Actual results-v souladu s/acc to EN 10204 - 3.1

Drát Wire	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
	0,07	1,66	0,94	0,011	0,017	0,04	0,01
	Mo	V	Nb	Cu	As	Al	Ti
	0,001	0,006	0,01	0,013	0,003	0,003	0,012
	Co	Sb	O	Zr+Ti			
0,006	0,002	0,0024	0,02				

Zkouška tahem/Tensile test Typické hodnoty/Typical data-v souladu s/acc to EN 10204 - 2.2

Svarový kov Weld metal	Temp °C	Rp 0.2 N/mm 2	Re H N/mm 2	Rm N/mm 2	A5 %
	+20			495	580

Zkouška rázem/Impact test Typické hodnoty/Typical data-v souladu s/acc to EN 10204 - 2.2

Svarový kov Weld metal	Temp °C	J	Temp °C	J
	+20	130	-30	70
	-20	90	-40	60
	-29	70		

Doplňující data/Additional data

Class. Weld Metal: EN ISO 14341-A: G 42 3 C1 4Si1, EN ISO 14341-A: G 46 4 M21 4Si1, EN ISO 14341-B-G 55A 5 M21 S6 Classifications Wire Electrode: EN ISO 14341-A: G4Si1; SFA/AWS A5.18: ER70S-6, CAN/CSA-ISO 14341: B-G 49A 3 C1 S6; EN ISO 14341-B: G S6

Datum/Date: 14.07.2020

Jana Jirušková
Q.C.Department

ESAB VAMBERK s.r.o.,
člen koncernu
Smetanovo nábř. 334, 517 54 Vamberk
IČ 25268023 DIČ: CZ 25268023

Adresa/Address	IČO	Telefon/Phone	Fax
ESAB VAMBERK, s.r.o., člen koncernu Smetanovo nábřeží 334 517 54 VAMBERK CZECH REPUBLIC	25268023	+420 494 501 476	+420 494 501 423

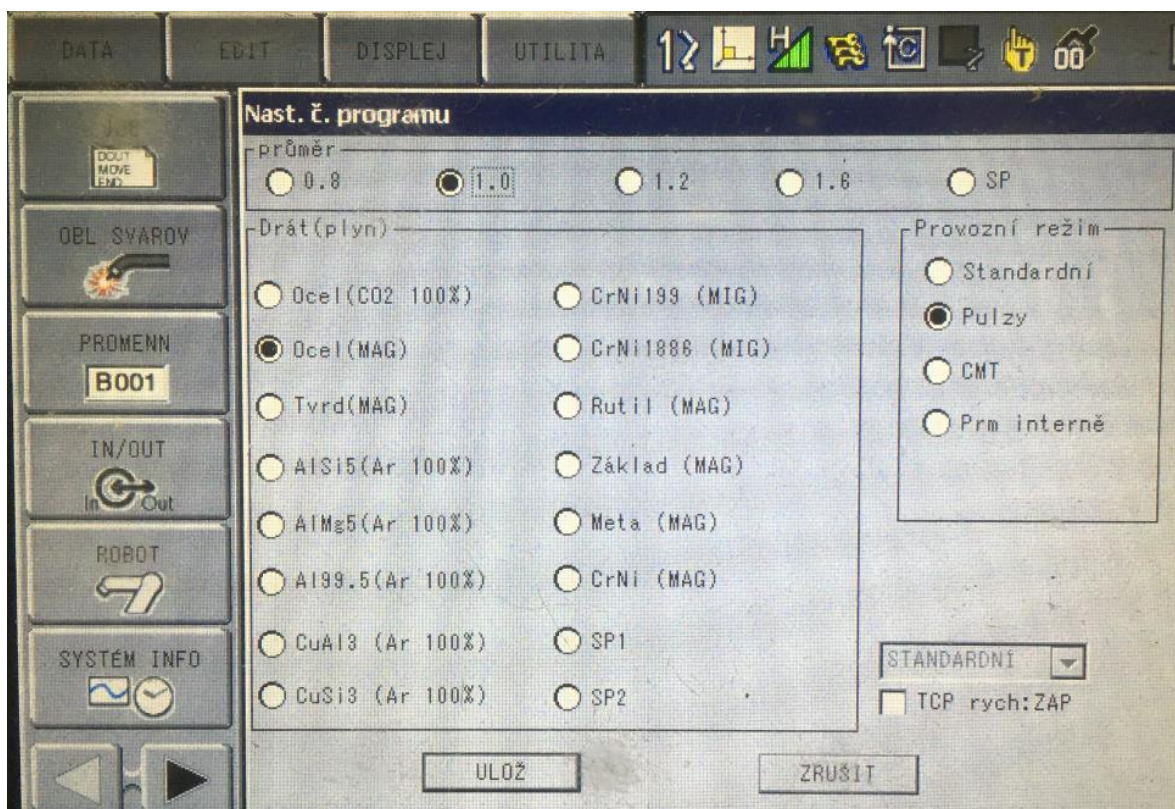
Zapsaná v obchodním rejstříku vedeném Krajským soudem v Hradci Králové, oddíl C, vložka 11484.

7.2 Příloha 2- Program robota pro experiment:

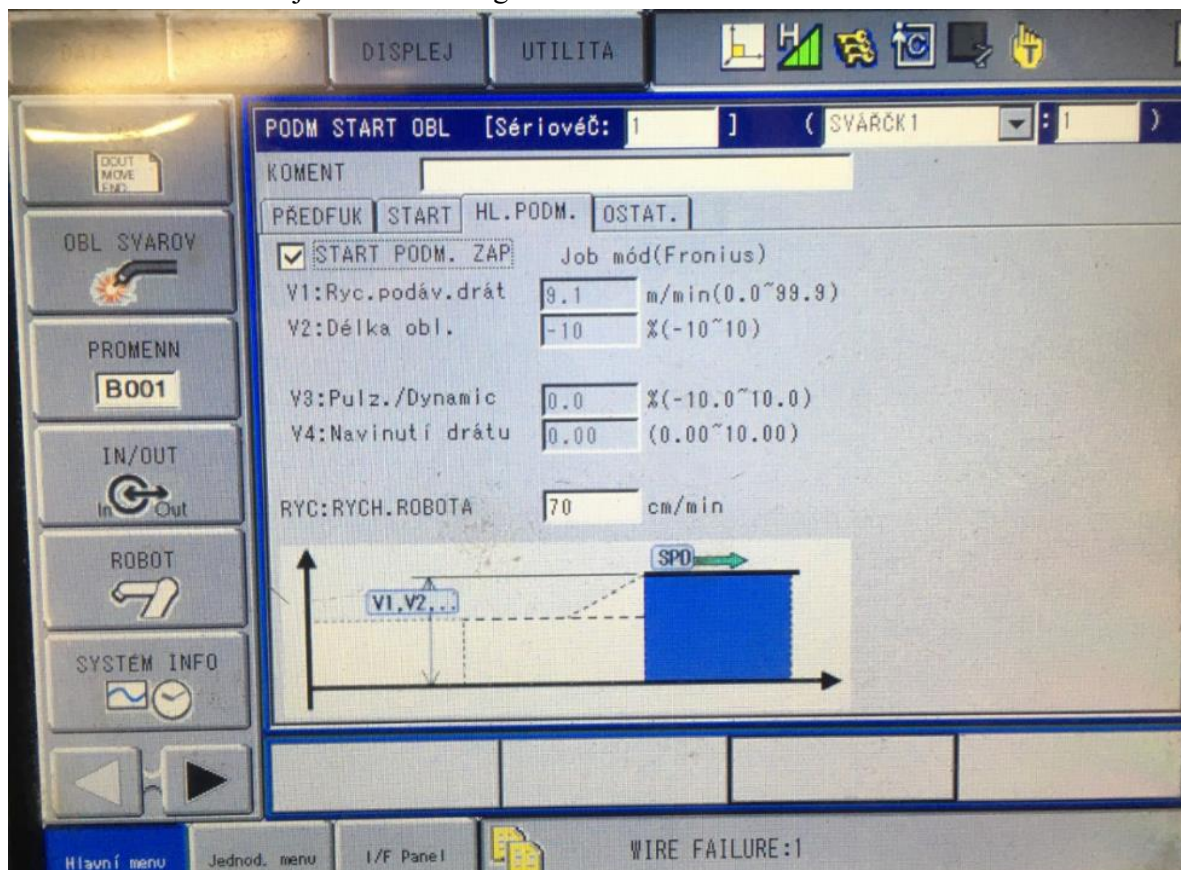
```
000 NOP
001 MOVJ VJ=10.00 Vyčkávací poloha
002 MOVJ VJ=80.00 nájezd do polohy
003 MOVL V=800 počáteční bod svařování
004 ARCON ASF#(1) Začíná svařování
005 MOVL V=50
006 ARCSET AC=200 AVP=100 Změna podmínky svařování
007 MOVL V=50 koncový bod svařování
008 ARCOF AEF#(1) Konec svařování
009 MOVL V=800 Jet zpět na pozici
010 MOVJ VJ=50.00 Vyčkávací poloha
011 END
```

[17]

7.3 Příloha 3- Příklady nastavení parametrů na konzoli Yaskawa DX 100



Obrázek 44: Základní nastavení svařovacího zdroje [foto autor]



Obrázek 45: Příklad nastavení hlavních podmínek svařování [foto autor]

7.4 Příloha 4- Fotky svařených vzorků



Obrázek 46: Vzorek V-1 PMC- robotické svařování



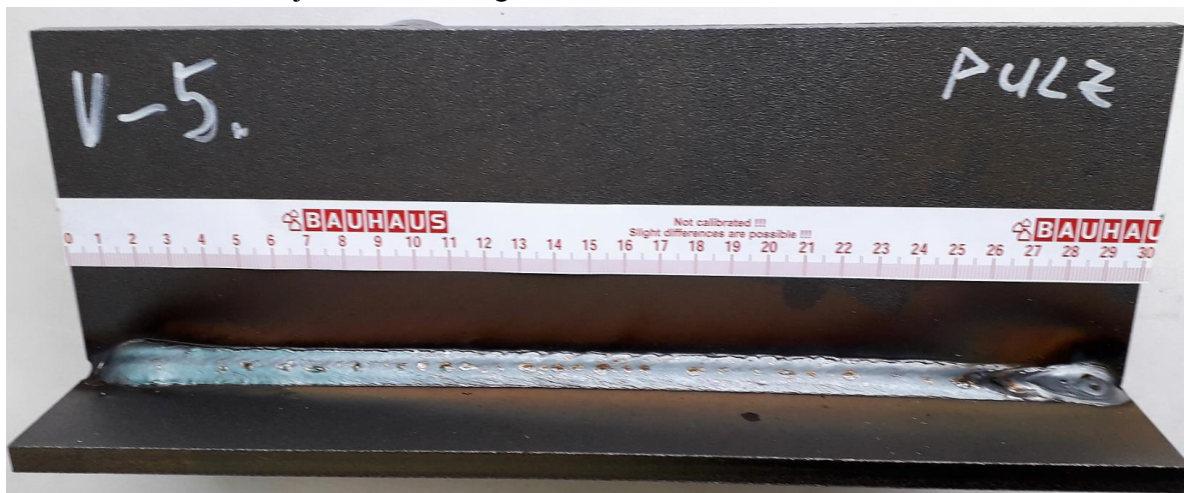
Obrázek 47: Vzorek V-2 PMC- robotické svařování



Obrázek 48: Vzorek V-3 PMC- robotické svařování



Obrázek 49: Vzorek V-4 Pulz- robotické svařování



Obrázek 50: Vzorek V-5 Pulz- robotické svařování



Obrázek 51: Vzorek V-6 Pulz- robotické svařování



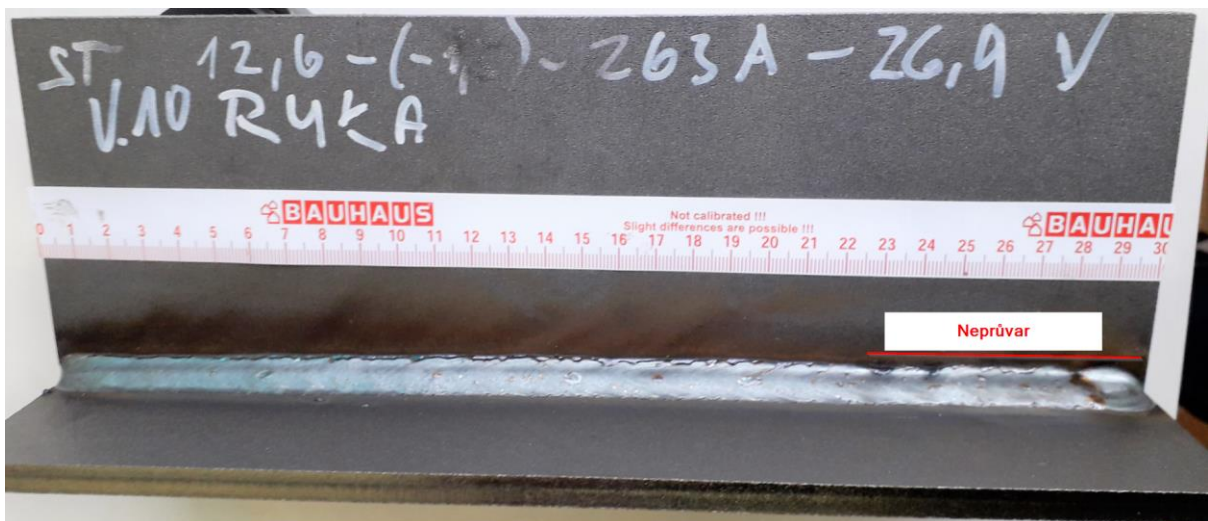
Obrázek 52: Vzorek V-7 Standard- robotické svařování



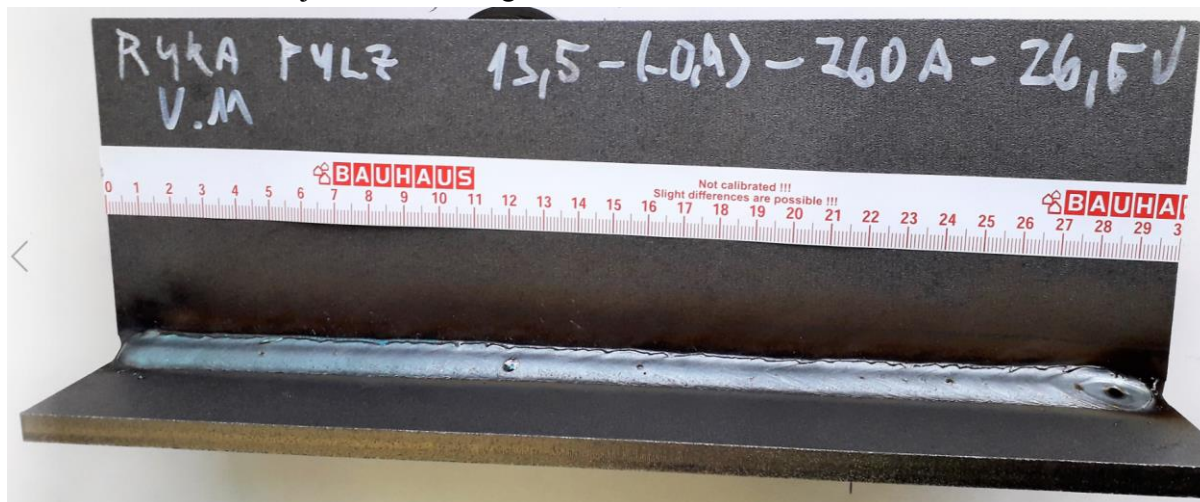
Obrázek 53: Vzorek V-8 Standard- robotické svařování



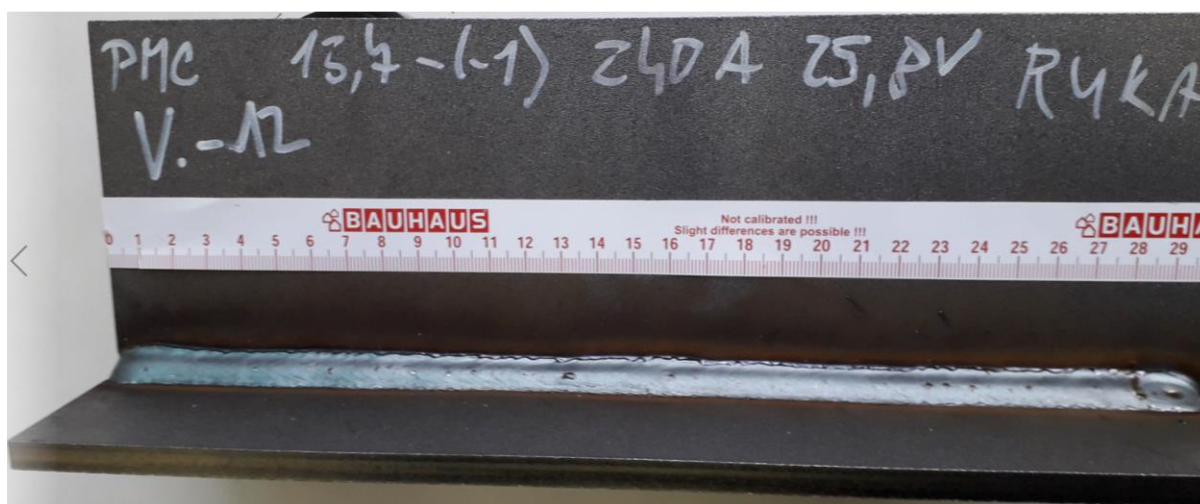
Obrázek 54: Vzorek V-9 Standard- robotické svařování



Obrázek 55: Vzorek V-10 Standard- ruční svařování

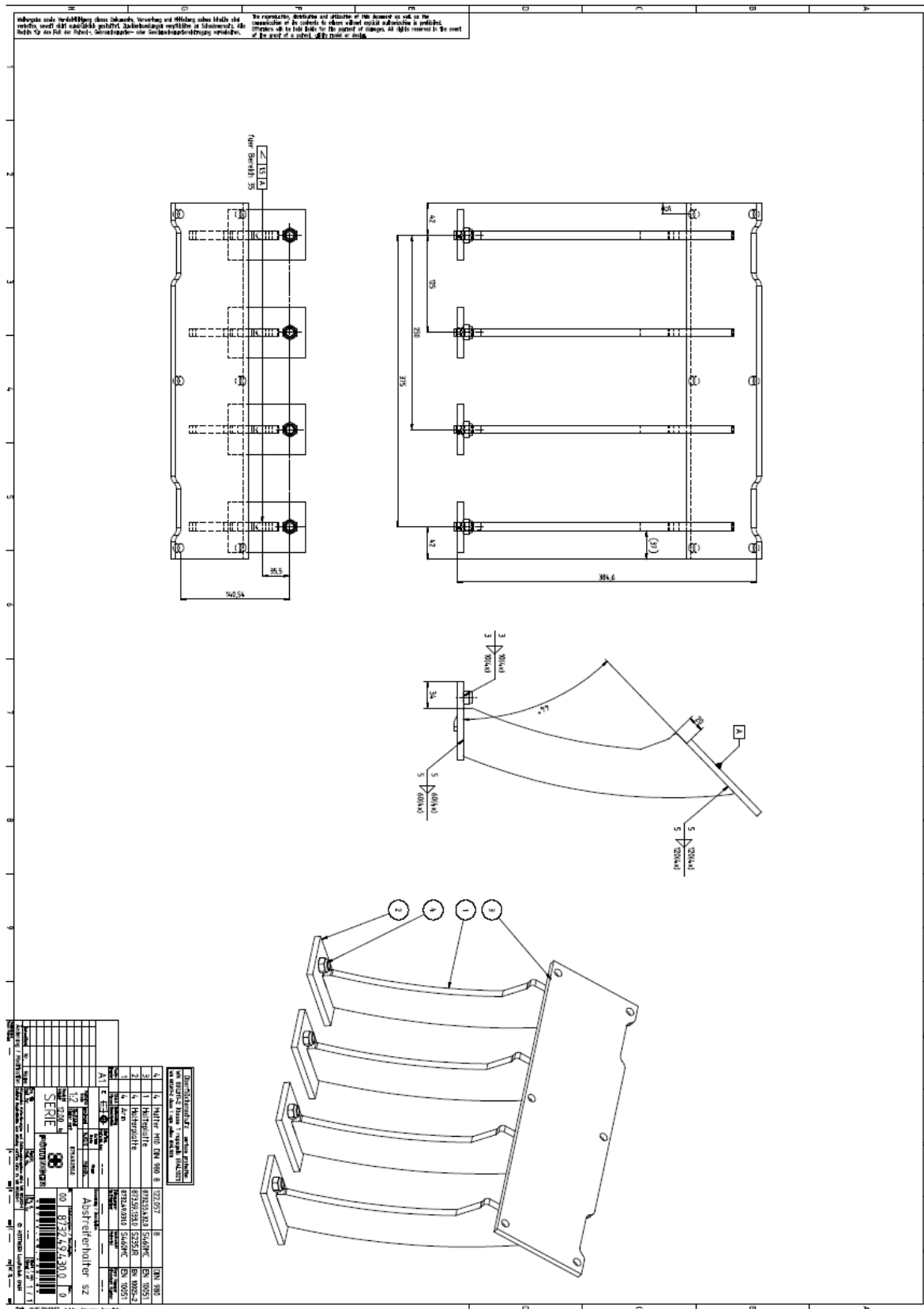


Obrázek 56: Vzorek V11 Pulz- ruční svařování



Obrázek 57: Vzorek V-12 PMC- ruční svařování

7.5 Příloha 5- Výkres dílů Abstreiferhalter



Obrázek 58: Výkres dílu Abstreiferhalter