

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2019

**DANIEL
PAPKOVÍČ**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Papkovič** Jméno: **Daniel** Osobní číslo: **470026**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv parametrů svařování na rozměry tavné lázně

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of welding parameters on the dimension of the weld pool

Pokyny pro vypracování:

- Popis robotického svařování konstrukčních ocelí metodou MAG
- Rozbor problematiky tepelného pole v souvislosti se simulací svařovacího procesu
- Návrh experimentů pro měření rozměrů tavné lázně
- Vyhodnocení experimentů a vytvoření závislosti rozměrů tavné lázně na parametrech svařování

Seznam doporučené literatury:

- [1] KOUKAL, Jaroslav, Schwarz DRAHOMÍR a Jiří HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009.
- [2] Technologie svařování a zařízení. učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771810.
- [3] STEMNE, [Daniel, Torbjörn NARSTRÖM a Bogoljub HRNJEZ]. Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox. Oxelösund: SSAB, 2010. ISBN 9789197857307.
- [4] ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. Úvod do metody konečných prvků. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2010.
- [5] GOLDAK, John, Aditya CHAKRAVARTI a Malcolm BIBBY. A new finite element model for welding heat sources. Metallurgical Transactions B [online]. 1984, 15(2), 299-305 [cit. 2018-07-22]. DOI: 10.1007/BF02667333. ISSN 0360-2141. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF02667333>

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Štěpán Ježek, ústav strojírenské technologie FS

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


doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS

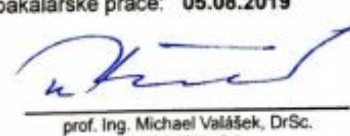
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


Ing. Štěpán Ježek
podpis vedoucí(ho) práce


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


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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

3.5.2019

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

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

V Praze dne:

.....

Podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Štěpánu Ježkovi za cenné rady a připomínky při vypracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za jejich podporu při mém dosavadním studiu.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vlivů parametrů svařování na velikost svarové lázně. Řeší tvorbu svarové lázně, její geometrii a velikost svarové lázně u metod svařování elektrickým obloukem, konkrétně pro metodu 135 (MAG). Cílem práce je návrh a provedení experimentu, pro získání modelu svarové lázně vhodného pro simulaci procesu svařování zadanou metodou. Vzorek byl koutový svar, velikosti a4 dle ČSN EN ISO 2553, základním materiálem byl S335J2+N. Svařování probíhalo třemi různými rychlostmi. Následně pro tento experiment byly vytvořeny grafy se závislostmi rychlosti svařování a velikosti vneseného tepla na geometrii svarové lázně.

This bachelor thesis deals with the influence of welding parameters on the size of the weld pool. It solves the formation of the weld pool, its geometry and the size of the weld pool in the methods of arc welding, specifically for method 135 (MAG). The aim of this work is to design and execute an experiment to obtain a model of a weld pool suitable for simulating the welding process by a given method. The sample was a fillet weld size a4 according to ČSN EN ISO 2553, the basic material was S335J2 + N. Welding occurred at three different speeds. Subsequently, graphs were created for this experiment with the dependence of the welding speed and the amount of heat input on the geometry of the weld pool.

Obsah

1	Úvod.....	8
1.1	Cíl práce.....	8
2	Teoretická část.....	9
2.1	Obloukové metody svařování.....	9
2.1.1	Princip svařování metodou MAG.....	9
2.1.2	Způsob přenosu kovu při svařování MAG.....	10
2.2	Robotizace ve svařování.....	12
2.2.1	Ruční svařování.....	12
2.2.2	Mechanizované svařování.....	12
2.2.3	Automatizované svařování.....	12
2.2.4	Robotické svařování.....	13
2.2.4.1	Řídicí systém robota.....	14
2.2.5	Programování svařovacího robota.....	14
2.2.5.1	On-line programování.....	14
2.2.5.2	Off-line programování.....	15
2.3	Jemnozrné oceli.....	15
2.3.1	Svařitelnost konstrukčních ocelí.....	16
2.4	Rozbor problematiky tepelného pole a v souvislosti se simulacemi svařovacího procesu.....	17
2.4.1	Teplotní pole, teplotní cykly.....	17
2.4.2	Svarová lázeň.....	18
2.5	Geometrie svarové lázně.....	18
2.5.1	Dvouelipsoidní zdroj tepla.....	18
2.5.2	Definice dle Goldaka.....	19
2.5.3	Matematický popis parametrů svarové lázně.....	20
2.5.4	Vliv technologických vlivů na rozměry svarové lázně.....	22
2.5.5	Ochranná atmosféra.....	25
2.5.6	Poloha drátu a technika svařování.....	25
2.5.7	Výlet drátu.....	26
2.5.8	Princip funkce simulačních programů.....	27
2.5.8.1	Vliv rozměrů svarové lázně pro potřeby simulací.....	27
3	Praktická část.....	28
3.1	Definice použitého svaru.....	28

3.2	Definice procesu svařování	28
3.3	Požité materiály	28
3.4	Použitý svařovací zdroj	30
3.5	Svařovací robot	30
3.6	Postup experimentu	31
3.7	Ověření navržených parametrů svařování	31
3.8	Vyhodnocení pomocí makrovýbrusů	31
3.9	Vyhodnocení dle záznamu z videa	36
3.10	Měření délky svarové lázně vizuálně na zvolené trajektorii	37
3.11	Vyhodnocení dle koncového kráteru	39
4	Závěr	42
5	Zdroje	44
6	Seznam obrázků	46
7	Seznam tabulek	47
8	Přílohy	47

Seznam zkratek

MKP	Metoda konečných prvků
PA	Vodorovná shora
PB	Vodorovná šikmo shora
SE	SolidEdge (CAD systém)
a_f	Přední délka svarové lázně
a_r	Zadní délka svarové lázně
b	Šířka svarové lázně
d	Hloubka svarové lázně
θ	Součinitel formy svaru
$v_{sv.}$	Svařovací rychlost
WFS	Wire Feed Speed (Rychlost podávání drátu)
Q	Vnesené teplo
ROE	Ruční obalená elektroda
MAG	Metal active gas (Svařování odtavující se elektrodou v aktivním plynu)
MIG	Metal inert gas (Svařování odtavující se elektrodou v inertním plynu)
TIG/WIG	Tungsten inert gas (Svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu)
SAW	Submerged arc welding (Svařování pod tavidlem)
PAW	Plasma arc welding (Metoda svařování plazmou)
EBW	Electron Beam welding (Svařování elektronickým paprskem)
MMA	Manual metal arc welding (svařování elektrickým obloukem)
TOO	Tepelně ovlivněná oblast

1 Úvod

Zadání této bakalářské práce navazuje na celou řadu diplomových a bakalářských prací [8] [12], které se zabývají popisem robotického svařování konstrukčních ocelí metodou MAG. Zabývá se rozбором problematiky tepelného pole v souvislosti se simulacemi svařovacího procesu. Svařování kovových materiálů je specifický proces, který zahrnuje spoustu faktorů ovlivňující kvalitu svaru. Ve všech oblastech svařovaných konstrukcí se v současnosti zvyšuje uplatnění metody MAG (135). Tato metoda získává v dnešní době své uplatnění, kvůli své ohromné produktivitě spojené s jednoduchou robotizací a automatizací.

Numerické simulace stále víc nachází své využití v oblasti vývoje procesu, jelikož neustále rostou požadavky na výslednou kvalitu svařovaných konstrukcí. Bez využití numerických simulací je jakost spojů je ověřována experimentální nebo prototypovou výrobou, kde se ověří vhodnost zvolené metody svařování. Tato prototypová výroba, pak zvyšuje celkové výrobní náklady a prodlužuje celkovou dobu přípravy výroby.

Jedním z důležitých vstupů do simulace je určení rozměrů tepelného zdroje, což je velmi obtížné. Kvůli těmto příčinám se pro určení rozměrů využívá častěji v praxi matematické vyjádření tvaru nebo definice dle Goldaka. Výsledky dnešních numerických simulací se výrazně blíží reálnému stavu po svaření.

1.1 Cíl práce

Cílem bakalářské práce byl návrh experimentů pro měření rozměrů svarové lázně, následné vyhodnocení experimentů a vytvoření závislosti rozměrů svarové lázně na parametrech svařování pro základní materiál S335J2+N. Cílem bylo vyhodnotit délku, šířku a hloubku svarové lázně pro tři různé rychlosti svařování. Naměřené hodnoty a provedená měření, mají velký vliv na přesnost budoucích simulací. Před měřením byl navržen koutový svar velikosti a4 dle ČSN EN ISO 2553. Používaný základní materiál byl S335J2+N a jako ochranný plyn byla použita směs 82 %Ar + 18 %CO₂ s průtokem 12 l.min⁻¹.

2 Teoretická část

2.1 Obloukové metody svařování

Obloukové svařování je celosvětově nejznámější a nejvíce používanou technologií svařování v počtu svařovaných konstrukcí. Největší nárůst objemu svařovaných ocelových konstrukcí vykazuje především metoda MAG, která stále častěji nahrazuje ruční svařování obalenou elektrodou. Výrazné zvýšení využití svařování metodu MAG s plněnou elektrodou se zaznamenává především v technicky vyspělých státech.

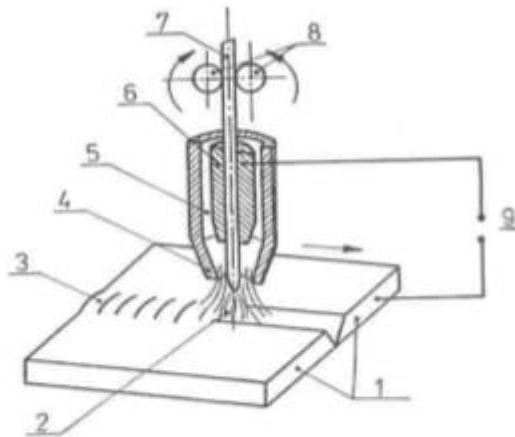
Pro svařování velkých hliníkových konstrukcí se používá MIG svařování s pulsním proudem. Pro zvýšení objemové produktivity je technologie metoda MIG/MAG aplikovaná do mechanizovaných a robotizovaných výrobních systémů. V oblasti svařování trubkových systémů, chemických, potravinářských a energetických zařízení je nejvíce aplikovaná technologie metoda WIG neboli TIG, která je určena pro ruční svařování.

Metoda svařování elektrickým obloukem pod tavidlem neboli SAW je výkonnější v porovnání se svařováním ručním obalenou elektrodou. Přenos kovu je 2x až 5x vyšší než u ROE. Mezi výhody patří velký průvar do základního materiálu, velká proudová hustota a výborná kvalita povrchu. Mezi nevýhody patří zvýšené nároky na přípravu svařovacích ploch a jejich čistotu, široká tepelně ovlivněná oblast, zakrytý svařovací proces, který je obtížný na jeho kontrolu a možnost svařování jenom v poloze PA podle ČSN EN ISO 6947. [1] [2]

2.1.1 Princip svařování metodou MAG

MAG (135) – Metal Active Gas je obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu, schéma metody viz Obr. 1. Jedná se o celosvětově nejpoužívanější metodu pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Hlavní výhody MAG metody jsou široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment produkce svařovacích zařízení a mnoho dalších výhod spojených s uvedenou metodou svařování. [2]

Napětí (Napájení) drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektrický zatížení délka drátu byla co nejkratší 15 až 20 mm. Drát je podáván z cívky podávacími kladkami umístěnými v podávači, vlastním hořáku nebo kombinací obou systému. [2]



Obr. 1 Princip svařování metodou MAG [2]

1. Základní materiál, 2. Elektrický oblouk, 3. Svar, 4. Plynová hubice, 5. Ochranný plyn, 6. kontaktní průvlek, 7. Přídavný materiál, 8. Podávací kladky, 9. zdroj

Nejvyužívanější ochrannou atmosférou při ručním a mechanizovaném svařování nelegovaných, nízkolegovaných a nízkouhlíkových ocelí je směs argonu s oxidem uhličitým v poměru (82/18).

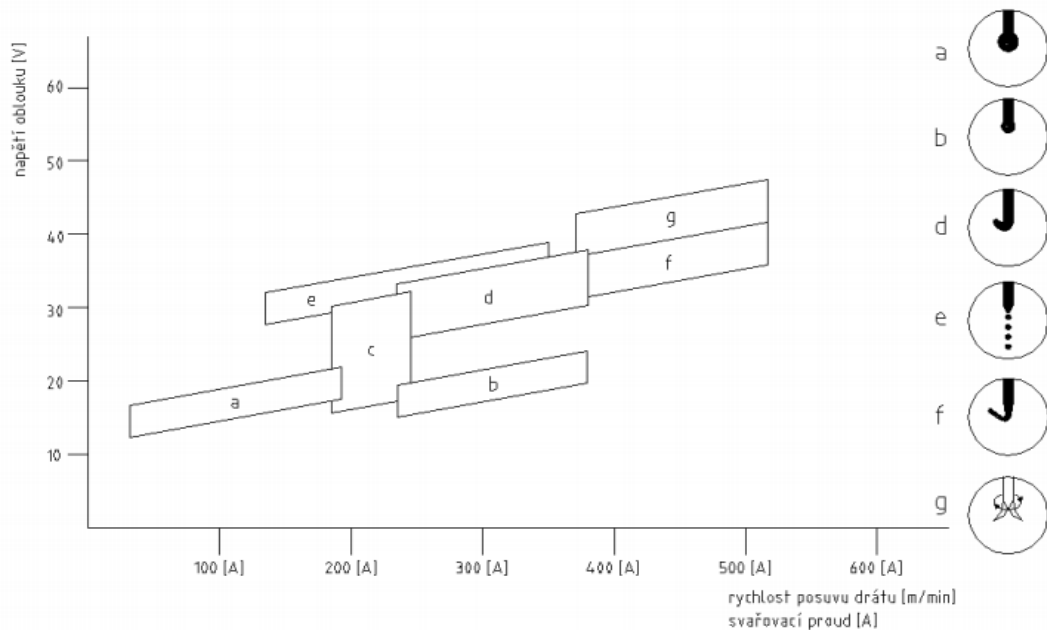
Hlavní výhody svařování metodou MAG jsou [2]:

- Svařování ve všech polohách.
- Minimální tvorba strusky.
- Přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně.
- Vysoká efektivita.
- Snadný start oblouku.
- Velmi dobrý profil svaru a hloubky závar.
- Malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování.
- Vysoká proudová hustota.
- Vysoký výkon odtavení.
- Široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu.
- Stabilní plynová ochrana.
- Nízká pórovitost.
- Malý nebo žádný rozstřík.
- Snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování.

2.1.2 Způsob přenosu kovu při svařování MAG

Charakter přenosu kovu závisí na parametrech svařování a druhu použitého ochranného plynu. Nejčastěji používaný je zkratový přenos pro tenké plechy a sprchový pro tlustší plechy. U vyšších hodnot proudu se bude dále měnit charakter přenosu kovu a vlivem elektromagnetických sil se dosáhne rotujícího oblouku. Teplota kapek u MAG svařování se pohybuje v rozmezích 1700 až 2500 °C. Teplota svarové lázně se pohybuje

mezi 1600 až 2100 °C v závislostech na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu. Díky vysokým použitým proudům se svařovací rychlosti blíží hranici $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Ochranná atmosféra se volí podle složení základního materiálu a velice ovlivňuje přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní rozdíly v oblouku. Poloha oblastí různých druhů přenosu kovu v závislosti na proudu a napětí viz Obr. 2.[2]



Obr. 2 Základní rozdělení přenosu kovu při svařování [8]

- Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu – projevuje se při nižších proudových hustotách, vzniká v něm kapkový přenos.
- Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem – projevuje se při vyšších proudových hustotách, vzniká v něm kapkový přenos s menšími kapkami, frekvence oddělení kapek je vyšší.
- Přechodová oblast – Je charakteristická dlouhým obloukem s nepravidelnými zkraty. Tato oblast není vhodná pro svařování. Projevuje se v ní nestabilita oblouku.
- Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem.
- Impulzní bezzkratový přenos, vzniká sprchový přenos.
- Moderovaný bezzkratový přenos.
- Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu. Zvýšením intenzity napětí se proud taveniny na konci drátu zužuje do tenčího proudu, který za působení elektromagnetického pole rotuje a tvoří širokou svarovou lázeň. [8]

2.2 Robotizace ve svařování

V dnešní době jsou stále kladeny vyšší požadavky na vývoj technologických procesů, výrobních zařízení, na mechanizaci a automatizaci svařování. Nové výrobní technologie se zavádějí ve výrobě svařovaných konstrukcí pro zvýšení produktivity práce. Postupnou automatizací a mechanizací se zvyšuje produktivita práce a výkon strojů. [2]

2.2.1 Ruční svařování

Technologie ručního svařování, především plamenem nebo ROE (ruční obalenou elektrodou), můžeme zařadit mezi nejstarší metody svařování. Kvůli své univerzálnosti a možnosti svařování ve všech polohách je stále často využívána. Náklady na pořízení svařovacího příslušenství jsou nižší než u mechanizovaného a robotického svařování. Také jsou snadno dostupné široké veřejnosti. Pro dosažení vysoké kvality svarů provedených metodou ručního obloukového svařování je velmi podstatná dobrá zručnost svářeče. V Porovnání s mechanizovaným a automatizovanými metodami je výkon odtavení nízký. [3]

2.2.2 Mechanizované svařování

Technologie ručního svařování s kombinací s mechanickým podáváním přídavného materiálu při použití jednoduchých nebo mechanizovaných svařovacích přípravků a polohovadel. V porovnání s ručním svařováním, odstraňuje namáhavou lidskou práci, ale zahájení a ukončení pracovního cyklu je zabezpečováno člověkem. [2]

2.2.3 Automatizované svařování

Technologie je realizovaná jednoúčelovými svařovacími stroji nebo manipulátory a průmyslovými roboty s pružným neboli adaptivním programovým řízením. Programem řízený proces svařovacího proudu může být funkcí dráhy, času, vneseného tepla. Zastoupení svařovacími technologiemi je podobný jako u mechanizovaného svařování. Hlavními cíle a přínosy při zavádění automatizovaného svařování je zvýšení kvality a užitekových vlastností svařovaných spojů, což může být eliminování vlivu poruchových veličin svařovacího procesu, zrovnomnění kvality svařenců a zvýšení přesnosti, zvýšení produktivity, snížení nákladů na výrobu svařenců, zvýšení spolehlivosti svařovacích operací a také programovatelnost a variabilnost výroby svařenců. Metody svařování vhodné pro automatizaci a robotizaci patří obloukové svařování v ochranném plynu MIG, MAG a TIG, obloukové svařování plněnou elektrodou, odporové bodové svařování. [2]

Jednoúčelové svařovací stroje: jsou s mechanickým vedením svařovacího hořáku vzhledem k pevnému nebo pohyblivému svařenci, což jsou automatické svařování pod tavidlem, svařování obvodových svarů, orbitální svařování.

Automatické svařování s robotem: v tomto případě je robot na základě programu kontroluje proces svařovacích operací na svařenci. Přitom ustavování a upínání na přípravku se provádí manuálně. K obloukovému svařování v ochranných plynech tvoří tyto prvky:

- a) Průmyslový robot s řídicím systémem ve funkci manipulátoru svařovacího hořáku.

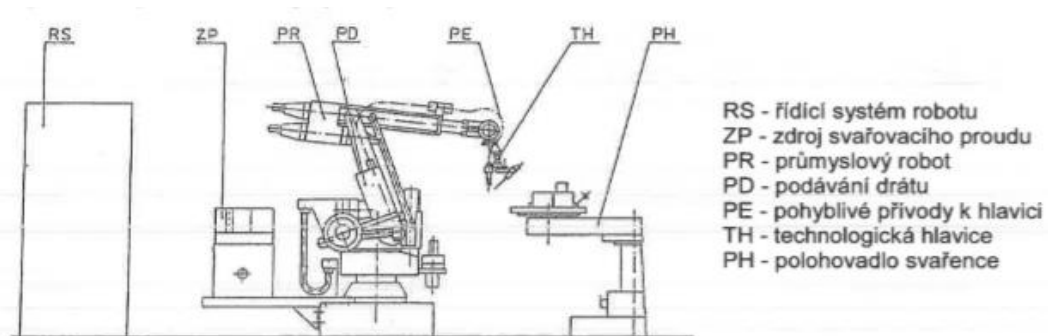
- b) Svařovací vybavení, což zahrnuje svařovací zdroj s podáváním drátové elektrody a přívodem plynu.
- c) Polohovadlo ve funkci manipulátoru svařence, obvykle dvoustupňové polohovadlo nebo dvě polohovadla pro překrytí upínacích a svařovacích časů.
- d) Energetické a signálové propojení pracoviště.
- e) Řídicí systém pracoviště jako celku, zahrnuje zabezpečení vazeb mimo pracoviště.

Řídicí jednotka ovládá pohyby svařovacího robota a polohovadla, což znamená že svařenec se v procesu svařování pohybuje tak, aby zajištěna jeho orientace v pracovním prostoru robota do optimálních poloh pro svařování. [2]

2.2.4 Robotické svařování

Hlavním důvodem využití robotů v oblasti svařování je zvýšení jakosti svařenců a produktivity svařovacích operací, eliminování vlivu lidského faktoru na kvalitu a produktivitu práce a snížení nákladů výroby. [2]

Automatické svařovací pracoviště s robotem, zahrnující polohovadlo a podavač [2]: Přeprava svařenců, ustavování, upínání a výměna svařenců na polohovadle se provádí automaticky za pomoci manipulátoru nebo dopravníku, což se jedná o plně automatizované svařovací pracoviště, které je vybavené někdy dvěma i více svařovacími roboty. V současné době se svaří stále s větším počtem svařovacích robotů na jednom svařenci. V takové výrobě mají roboty nezastavitelnou úlohu. Technologie se aplikuje tam kde je třeba vyrábět více různých výrobků na jedné lince. Příklad robotického pracoviště s popisem jednotlivých součástí viz Obr. 3.

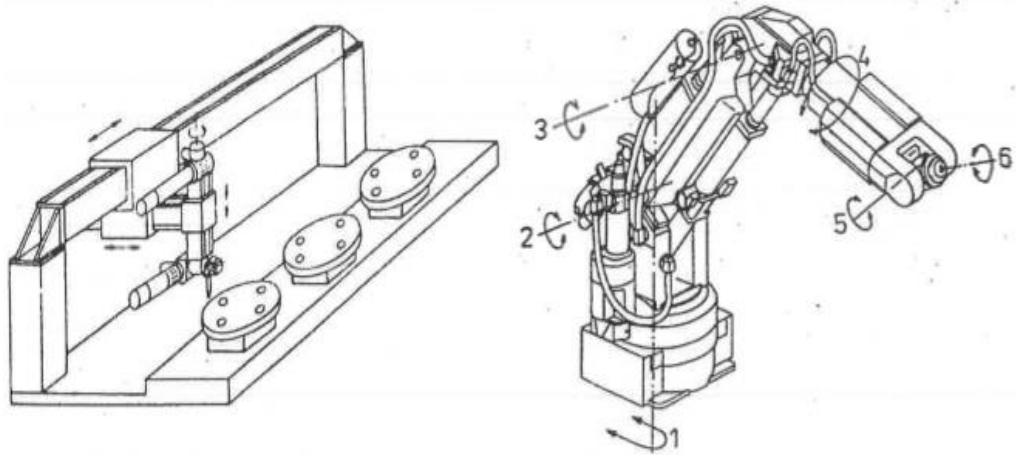


Obr. 3 Robotická buňka s dvoustupňovým polohováním [2]

Při návrhu robotizace je třeba uvažovat několik hledisek [2]:

- Hledisko svařence – technologičnost konstrukce, svařitelnost a přesnost z hlediska celkové ekonomie projektu. Zde záleží na složitosti svařence, ne každý svařenec je vhodný pro robotizaci.
- Kontrakční řešení svařovacího robota – Pro úspěšný chod všech funkcí musí být svařovací robot vybaven mechanickými částmi a příslušným autonomním pohonem, správnou kinematikou propojující základ robota s hořákem,

zdrojem, řídicí jednotkou, snímači pro interakci s okolním prostředím. Ukázka nejčastějších koncepcí průmyslových svařovacích robotů viz Obr. 4.



Obr. 4 Nejčastější koncepce průmyslových svařovacích robotů [2]

2.2.4.1 Řídicí systém robota

Řídicí systém svařovacího robota zajišťuje řízení postupných kroků a průběhu jednotlivých příkazů vykonávané technologické operace na základě předem definovaného programu, kterým je operační systém vybaven. Programování probíhá tak, že se předem sestaví algoritmus svařovacího cyklu. To znamená definování jednotlivých kroků operací a instrukce k nim spojené. Zápisem algoritmu do paměti řídicího systému robota se vytvoří program. U svařovacího robota řídicí systém zpravidla kontroluje celý svařovací proces pro realizaci požadované kvality a přesnosti svarových spojů. K dosažení požadované kvality jsou kladeny požadavky zejména na řízení pohybu svařovacího nástroje po definované trajektorii, požadovanou rychlost svařování a součástí je také řízení technologických parametrů svařování, jako jsou regulace časového průběhu svařovacího proudu, napětí na oblouku, délky oblouku, rychlostí podávání přídavného materiálu, průtoku ochranného plynu. [2]

2.2.5 Programování svařovacího robota

Z důvodu výrazného pokroku v oblasti výpočetní techniky lze hlavní řídicí systémy robotů a manipulátorů komplexně programovat. V rámci výrobního programu lze zahrnout polohování hořáku, pohyby kompletního robota a současně zahrnout technologické parametry.

Ve významu programování lze chápat proces ukládání informací a instrukcí o požadovaných polohách, trajektoriích, rychlostech pohybů a dalších funkcích. [2]

2.2.5.1 On-line programování

Dříve mnohdy používaný princip programování systémem prvního předvádění nebo učení s pomocí přehrávání záznamu robotem. V současnosti jsou častěji nahrávány tzv. expertními systémy. Expertní systém během optimalizaci programu je propojen se svařovacím procesem za pomoci procesového počítače. Jeho funkce se skládá nastavení a dohled nad svařovacími parametry. Mimo jiné zajišťuje přísun informací z interních i

externích snímačů. Poté co se optimalizují parametry, použitím expertního systému, procesový počítač kontroluje svařovací proces podle předem definovaných hodnot svařovacích parametrů. [2]

2.2.5.2 Off-line programování

Během svařování menších sérií výrobků, které jsou tvarově komplikované, může být čas programování velmi dlouhý, tím je programování spojeno s velkou ztrátou výrobního času. On-line programování může být až 50krát delší než samotný svařovací cyklus. Z těchto důvodů se aplikuje programování robotu off-line, což je programování mimo svařovací pracoviště. Pokaždé se odkazuje na geometrii výrobku, který je popsán v CAD systému. Aplikují se vizuální snímače na detekování modelu svařence a také inteligentní řídicí jednotky na řízení robotu a manipulátoru. Eliminace problému požaduje integraci jednotlivých elementů na numerické řízení operačního systému robotu, což jsou programy pro analýzu obrazu v návaznosti na analýzu chyb a algoritmy pro autonomní úlohy a plánování trajektorie svaru. K programování složitých operací se používají systémy CAD/CAM simulující funkce robotu. [2] [13]

2.3 Jemnozrná oceli

Jemnozrná oceli patří jejich požadované vlastnosti jsou specifikované v ČSN EN ISO 10025. Výrobky válcované za tepla z konstrukční oceli. Do této normy jsou zařazeny oceli S185, S235, S275, S355, S450, E295 A E360, které mají odlišnosti ve svých mechanických vlastnostech. Symbol E je značení oceli pro strojní součásti. Nejčastěji používané jemnozrné konstrukční oceli s jejich chemickým složením jsou uvedeny v Tab. 1. [4] [5] [15]

Tab. 1 Nejčastěji používané nelegované konstrukční oceli válcované za tepla [15]

Označení podle	Označení podle	C (hmot.%) pro t (mm)	Si (hmot.%) max.	Mn (hmot.%) max.	N (hmot.%) max.	CEV - CE (hmot.%) t ≤40 mm
EN 10027-1	EN 10027-2	> 16 ≤ 40				
S235J2+N	1.0117	0,19	0,35	1,50	0,014	0,40
S275J2+N	1.0145	0,21	0,35	1,60	-	0,44
S355J2+N	1.0577	0,23	0,60	1,70	-	0,49
S355K2+N	1.0596	0,23	0,60	1,70	-	0,49
S450J0+N	1.0590	0,23	0,60	1,80	0,027	0,51

Tyto oceli nemají konkrétní obsah doprovodných prvků, jen maximální obsah C. Nelze je doporučit pro tepelné způsoby zušlechťení v sériové výrobě, jak v objemové ani povrchové. Z důvodu rozdílů v chemickém složení různých taveb dodávaných hutních výrobků jedné jakosti oceli obvyklých jakostí.

V současné době při výběru svařovaných konstrukcí pro stavební statické, dynamicky a únavově namáhané konstrukce, jsou kladou velké nároky na výběr základního materiálu. Tyto konstrukce následně musí vyhovovat konstruktérům při vyhodnocení zatížení, tak i při minimalizaci hmotnosti konstrukce a tím snížení nákladů ve výrobě, tak i při jeho použití v provozu. Obecně jsou tyto oceli zpevněny především jemnozrnou

strukturou, pomocí které lze navýšit mez kluzu a mez pevnosti nelegovaných ocelí při zachování jejich houževnatosti. Jejich svařitelnost je zajištěna limitním obsahem uhlíku a nečistot (S, P) u vyšších pevností se využívá prvky jako Al, Ti, Nb a V. Všechny jmenované mikrolegury zamezují růst zrna v TOO při svařování, cílem je zachovat jemnozrnnou strukturu i po procesu svařování. [4] [5]

Polotovary z jemnozrnných ocelí se běžně vyrábějí řízeným válcováním v kombinaci s tepelným zpracováním, které zvýší vliv mikrolegur Al, Ti, Nb a V, Někdy se materiály označují toho typu jako mikrolegované jemnozrnné oceli. Obsahy těchto mikrolegujících prvků jsou limitované. [4] [5]

Jemnozrnné oceli můžeme rozdělit na [5]:

- a) Normalizačně žíhané jemnozrnné oceli (N)
- b) Zušlechtěné jemnozrnné oceli (Q)
- c) Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli (M)

Pro svařování jemnozrnných ocelí se používají hlavně tyto metody svařování [5]:

- a) Ručně obalenými elektrodami (111)
- b) Svařování el. obloukem v ochranné atmosféře MAG (135)
- c) Svařování pod tavidlem (121)

2.3.1 Svařitelnost konstrukčních ocelí

Svařování je spojování jednotlivých součástí a dílů v nerozebíratelný celek. Podstatou svařování je vytvoření metalurgického spojení, tzn. spojení založeného na působení meziatomových vazebných sil, které jsou příčinou soudržnosti a pevnosti kovů. K vytvoření svarového spoje je nutno vynaložit určitou energii, která může být mechanická, tepelná nebo mechanická i tepelná v různých vzájemných poměrech.

Základním předpokladem k získání kvalitních spojů požadovaných vlastností je však použití svařitelných materiálů a vhodná volba způsobu a postupu svařování.

Uhlík výrazně ovlivňuje svařitelnost oceli. Vysoký obsah uhlíku zvyšuje pevnost oceli, ale snižuje její tažnost a houževnatost. Jiné legující prvky mohou mít podobné účinky, ale s rozdílnou výslednou pevností. Empirické vyjádření vlivu chemického složení, nazývané uhlíkový ekvivalent, se používá k posouzení náchylnosti slitiny k problémům při svařování. Ekvivalent uhlíku CE je pravděpodobně nejdůležitějším kritériem pro posouzení svařitelnosti oceli. Existuje mnoho definic těchto parametrů, ale dva (CEV, CET) jsou běžně používány pro konstrukční oceli. Vzorce pro výpočet zmíněných uhlíkových ekvivalent jsou uvedeny níže. (1) (2). [6] [7] [16]

$$CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad (1)$$

$$CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40 \quad (2)$$

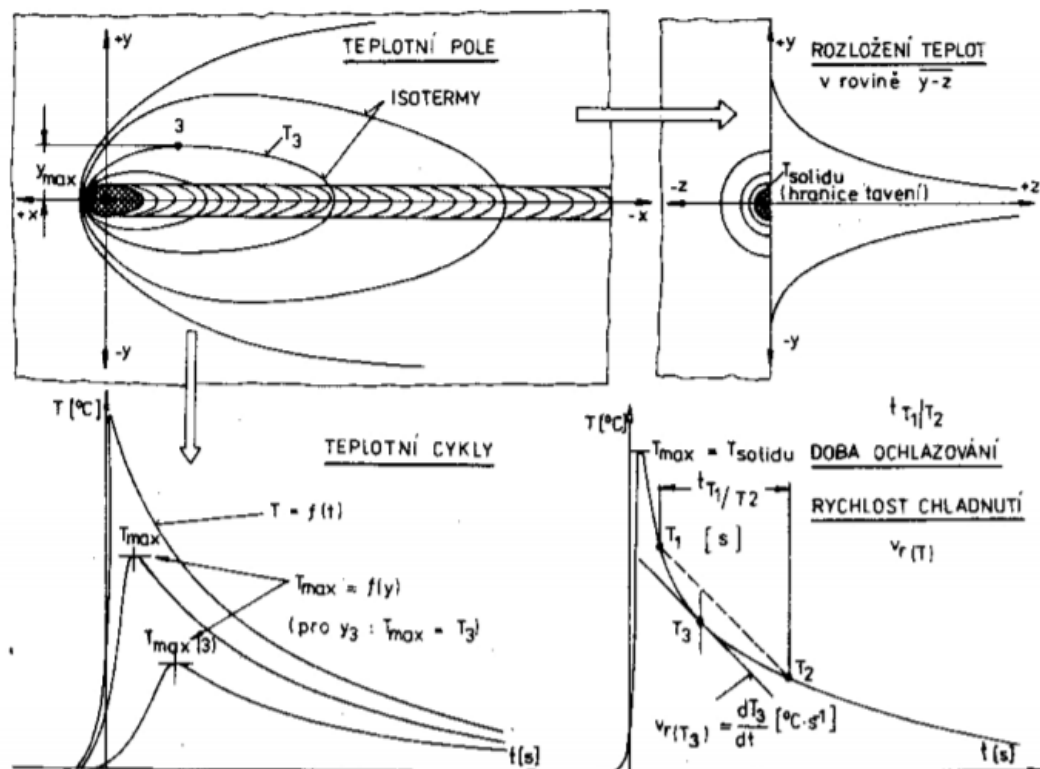
Obsahy prvků [hm. %]

Faktory ukazují, že je velmi účinné snižovat obsah uhlíku v oceli, aby se zlepšila jeho svařitelnost. Tímto se současně zlepšuje houževnatost, ale snižuje pevnost. [7]

2.4 Rozbor problematiky tepelného pole a v souvislosti se simulacemi svařovacího procesu

2.4.1 Teplotní pole, teplotní cykly

K tomu, aby základní a přídavný materiál při svarovém svařování byl nataven v krátkém čase je nutné použít velmi koncentrovaný zdroj tepla. Výsledkem je působení a vznik tepelného pole kolem místa svařování. Tvar tepelného pole je závislý na intenzitě zdroje tepla, fyzikálních vlastnostech svařovacího materiálu, použité metodě svařování, rychlost svařování a charakteru odvodu tepla z místa svaru. Teplotní pole během svařování je výsledkem teplotních cyklů, podle kterých můžeme vyhodnocovat vliv zdrojů tepla využívaných pro svarové svařování na strukturu a vlastnosti svarových spojů, viz Obr. 5. [2]

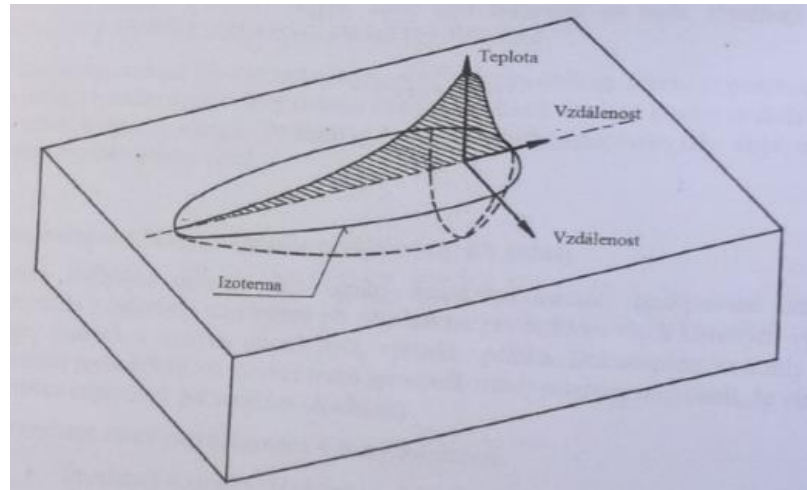


Obr. 5 Teplotní pole, teplotní cykly, doby a rychlosti chladnutí [17]

Měření a hodnocení tepelných cyklů se také využívá pro výzkum a vývoj svařitelnosti materiálů, studium praskavosti svarových spojů a detailní studium mikrostruktury a mechanických vlastností jednotlivých oblastí svarových spojů. Z důvodu působení zdrojů tepla na svařovaný materiál vznikají změny jeho mikrostruktury a mechanických vlastností. [2]

2.4.2 Svarová lázeň

Svarová lázeň je oblast teplotního pole, kde teplota překročila teplotu solidu a základní a přídavný materiál jsou ve formě taveniny. Ztuhnutím svarové lázně vzniká svarový spoj. Rozměry svarové lázně ovlivňují jak materiálové vlastnosti, tak technologické parametry. Znázornění svarové lázně pro třírozměrný tepelný tok viz Obr. 6. [2]



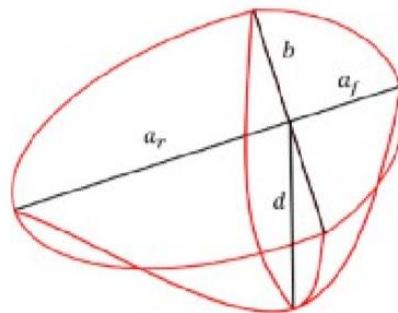
Obr. 6 Svarová lázeň [2]

2.5 Geometrie svarové lázně

Při určování velikosti svarové lázně, může být postupováno dle různých přístupů. Mezi hlavní přístupy se řadí definice dle Goldaka či dle matematického popisu. [11]

2.5.1 Dvouelipsoidní zdroj tepla

Zde je popsán zdroj tepla pro svařování metodou MAG, jelikož se tato bakalářská práce touto problematikou zabývá. Rozměry tohoto zdroje jsou popsány dvěma do sebe zasazenými elipsoidy. Matematicky je popsán dvěma rovnicemi (3), (4) zvlášť pro každý z elipsoidu. Níže je zobrazený na Obr. 7 dvouelipsoidního zdroje tepla s charakteristickými rozměry. [8] [12]



Obr. 7 Model dvouelipsoidního zdroje tepla dle Goldaka [11]

Rovnice definující dvouelipsoidní zdroj [8]:

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_1 \cdot Q}{b \cdot d \cdot a_f \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{kx^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{ly^2}{d^2}} \cdot e^{\frac{m\xi^2}{a_f^2}} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (3)$$

$$q(x, y, \xi) = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot f_2 \cdot Q}{b \cdot d \cdot a_r \cdot \pi \cdot \sqrt{\pi}} \cdot e^{\frac{kx^2}{b^2}} \cdot e^{\frac{ly^2}{d^2}} \cdot e^{\frac{m\xi^2}{a_r^2}} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (4)$$

Kde:

$q(x, y, \xi)$ – hustota tepelného toku do materiálu $\left[\frac{W}{m^3} \right]$

Q – celkový výkon zdroje [W]

a_r, a_f, b, d – parametry natavení oblasti [m]

x, y, z – souřadnice bodů [m]

f_1, f_2 – konstanty ovlivňující rozložení intenzity toku energie do materiálu [-]

k, l, m – koeficienty v exponent sloužící k modifikacím zdroje tepla

ξ – poloha zdroje v závislosti na době svařování [m]

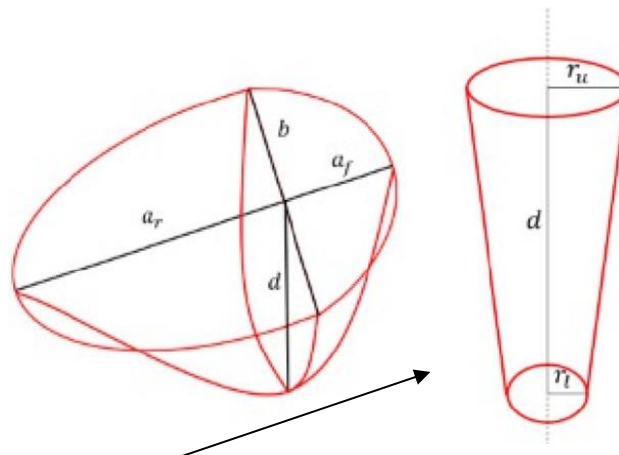
Pro aplikaci dvouelipsoidního modelu je třeba předem vědět velikost parametru nastavitelné oblasti a_r, a_f, b a d . Parametry mohou být odhadovány dle předem provedených experimentů.

2.5.2 Definice dle Goldaka

Rozměry svarové lázně jsou charakterizovány písmeny a_r, a_f, b a d , který tvoří tvar elipsoidu. Šipka ve spodní části obrázku udává směr svařování viz. Obr. 8. Geometrie Goldakova dvou elipsoidního modelu je popsána tak, aby byla jednoduše aplikovaná pro různé druhy tepelných zdrojů, to je např.: svařování obloukem. [11] [12]

a) Konvenční metoda svařování: ruční svařování elektrickým obloukem MMA, MIG/MAG a TIG. Je to normálně šířený zdroj tepla v kombinaci s konstantním válcovitým zdrojem tepla, viz Obr. 8 vlevo.

b) Key-hole – svarová lázeň typická pro metody s vysokou koncentrací energie (laser, PAW, EBW, viz Obr. 8 vpravo.



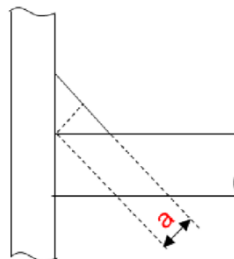
Obr. 8 Definice svarové lázně dle Goldaka [11]

Pro získání potřebných rozměrů jsou dva různé postupy. V případě, že známe hodnoty b a d z příčného řezu, lze délku vypočítat dle níže uvedených vztahů

Přední délka: $a_f = 0,6 \cdot b$ [mm] (5)

Zadní délka: $a_r = 2,0 \text{ až } 2,5 \cdot b$ [mm] (6)

Pokud bychom chtěli přibližně odhadnout veškeré rozměry svarové lázně u koutového svaru, lze tak provést na základě znalosti požadované velikosti koutového svazu dle uvedených rovnic. Definice velikosti koutového svaru viz Obr. 9.[11]



Obr. 9 Velikost koutového svaru [11]

Hloubka: $d = a + 2,0 \text{ až } 5,0$ [mm] (7)

Včetně hloubky průniku pro přijatý kořen svaru.

Šířka: $b = a + 1 \text{ nebo } 2$ [mm] (8)

Přední délka: $a_f = (a + 1,5) \cdot 0,6$ [mm] (9)

Zadní délka: $a_r = 2,2 \cdot (a + 1,5)$ [mm] (10)

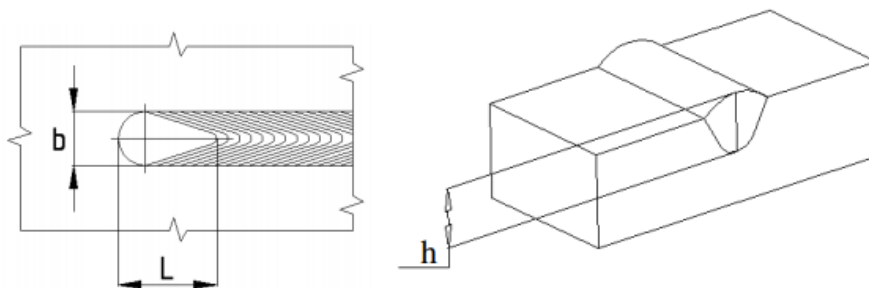
2.5.3 Matematický popis parametrů svarové lázně

Matematickým popisem můžeme v určitých omezeních odhadnout budoucí rozměry svarové lázně. K tomu nám postačí jednoduché matematické vzorce. Výhodou je

jednoduchost a finanční nenáročnost, ale přesnost výsledků je nižší oproti reálnému měření. Vzorce se dělí na dvě skupiny, první popisuje geometrii svarové lázně a druhá popisující svarovou lázeň z jiných než geometrických hledisek.

Matematické vzorce popisující geometrii lze použít pro predikci šířky svarové lázně, hloubky svarové lázně, délky svarové lázně. Další jsou vzorce popisující svarovou lázeň z hlediska doby existence a také jednotkového vneseného tepla. Definice rozměrů použitých pro matematické vyjádření viz Obr. 10.

Původní vznik těchto vzorců je výsledkem zkušeností a řadou zkoušek zhotovených svarů za různých vstupních podmínek. Často se pracuje jen s některými z těchto vzorců, jelikož počítat se všemi parametry svarové lázně je velice náročné. [8]



Obr. 10 Geometrie svarové lázně [8]

Matematický popis geometrie svarové lázně [8]:

Šířka svarové lázně:

$$b = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P}{\pi \cdot e \cdot c \cdot \rho \cdot v_s \cdot T_t}} \quad [mm] \quad (11)$$

kde:

P – vnesený výkon [W]

e – Eulerovo číslo (základ přirozených logaritmů) [-]

c – měrné teplo [kJ.mm⁻¹]

ρ – hustota použitého materiálu [kg.m⁻³]

v_s – rychlost svařování [m.s⁻¹]

T_t – teplota tavení použitého materiálu [K]

Hloubka svarové lázně:

$$h = \frac{1}{2} \cdot b \quad [mm] \quad (12)$$

kde:

b – šířka svarové lázně [mm]

Délka svarové lázně:

$$l = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot T_t} [mm] \quad (13)$$

kde:

P – vnesený výkon [W]

λ – součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

T_t – teplota tavení [K]

Matematický popis veličin svarové lázně [8]:

Doba existence svarové lázně:

$$\tau_E = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot v_s \cdot T_t} [s] \quad (14)$$

kde:

P – vnesený výkon [W]

v_s – rychlost svařování [$m \cdot s^{-1}$]

λ – součinitel tepelné vodivosti [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]

T_t – teplota tavení [K]

Jednotkové vnesené teplo:

$$Q_1 = k \cdot \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \left[\frac{kJ}{cm} \right] \quad (15)$$

kde:

k – převodní koeficient (podle rychlosti svařování) [-]

η – účinnost oblouku [-]

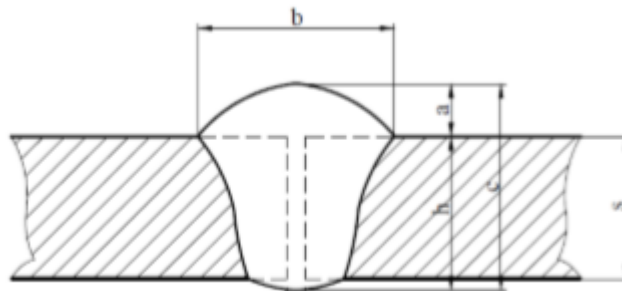
U – svařovací napětí [V]

I – svařovací proud [A]

v_s – rychlost svařování [$m \cdot s^{-1}$]

2.5.4 Vliv technologických vlivů na rozměry svarové lázně

Hlavními parametry, které mají vliv na vznik pnutí a výsledné rozměry svaru po svařování je velikost vneseného tepla, typ materiálu, konstrukce svaru a velikost svarové lázně. Definice rozměrů tupého svaru (h – hloubka průvaru do základního materiálu, a – převýšení svaru, b – šířka svaru) viz Obr. 11. [10]



Obr. 11 Charakteristické rozměry svaru [10]

Chemické složení, struktura materiálu a mechanické vlastnosti svaru mají vliv na hodnotu součinitele formy svaru. Součinitel se počítá dle vztahu uvedeného níže:

$$\theta = \frac{b}{h} \quad (16)$$

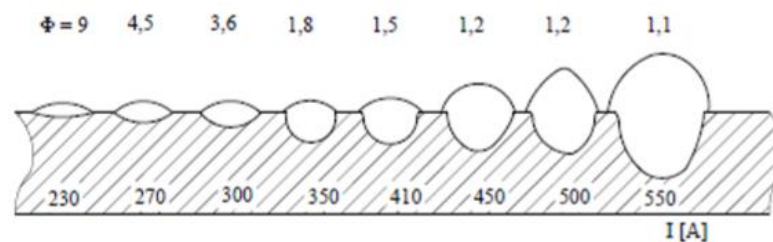
Rozměry svaru závisí na velikosti vneseného tepla, které je ovlivněno svařovacím proudem, napětím, rychlostí svařování, použitá metoda svařování. Další faktory, jsou parametry vedlejší. Důležité a vedlejší parametry jsou:

- Hlavní parametry: Svařovací proud [A]
Napětí na oblouku [V]
Rychlost svařování [cm.min-1]
- Vedlejší parametry: Průměr svařovacího drátu [mm]
Sklon elektrody [°]
Poloha svařování

Detailní popis vlivu hlavních parametrů na rozměry svarové lázně:

- Vliv svařovacího proudu:

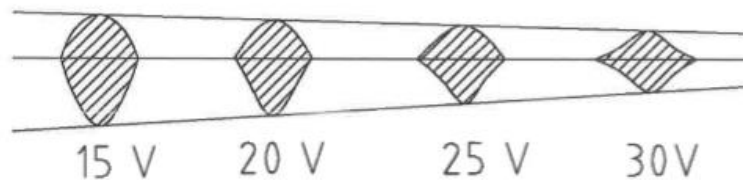
Proudem u svařování lze regulovat intenzitu tepla. Výsledným vlivem je velikost průvaru svarové lázně do základního materiálu. Tento děj je přímo úměrný tudíž s rostoucím proudem roste i intenzita vneseného tepla a vzniká větší množství nataveného kovu. Výsledkem je hlubší průvar svarové lázně do základního materiálu a růst převýšení, čímž se na základě vzorce 16 se zmenšuje součinitel formy svaru, viz Obr. 12. U metody MAG je hodnota proudu přímo spojená s rychlostí podávání drátu, při vyšších hodnotách proudu je do místa svaru dodáváno více přídavného materiálu. [10]



Obr. 12 Vliv velikosti svařovacího proudu na změnu formy svaru [10]

- Vliv velikosti napětí:

Napětí je jeden z důležitých pracovních parametrů, ovlivňuje délku oblouku. Napětím lze měnit stabilitu oblouku. Pokud působí teplo vzniklé v elektrickém oblouku na rozsáhlé ploše základního materiálu má to za následek zmenšení hloubky protavení a zvětšení šířky svarové housenky, napětí má největší vliv na šířku a profil svarové housenky, viz Obr. 13. [10]



Obr. 13 Vlivu napětí U [V] na tvar svarové housenky [2]

Pokud bude použité nízké napětí má za důsledek nestabilní svařovací proces, v kterém vznikají úzké housenky s velkým převýšením. To se týká především vyšších rychlostí svařování.

Obecná platnost nastavení hodnot napětí u charakteristického oblouku:

$$U = 15 + 0,035 \cdot I_s \text{ [V]} \quad (17)$$

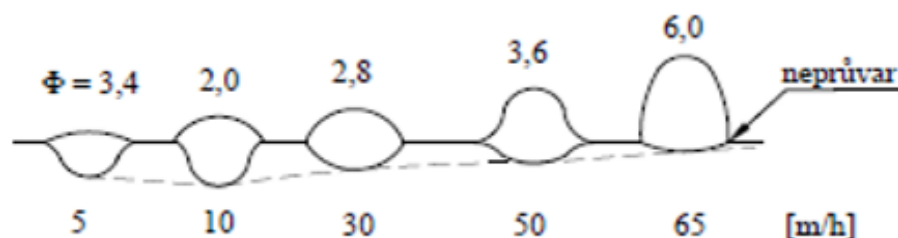
kde:

U = pracovní napětí [V]

I_s = svařovací proud [A]

- Vliv velikosti rychlostí svařování:

Pokud se svařovací napětí a svařovací proud nemění, tak se změnou svařovací rychlosti ovlivníme velikosti vneseného tepla na jednotku délky svaru. Ve vyšších rychlostech není toto teplo schopné natavit svarovou plochu. Tím pádem může docházet k tvorbě neprůvaru, viz Obr. 14. [10]



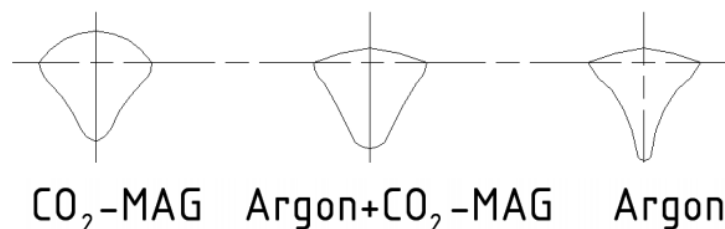
Obr. 14 Vliv rychlosti na součinitel formy svaru [10]

2.5.5 Ochranná atmosféra

Výběr ochranné atmosféry pro svařování má vliv nejen na tvar svarové lázně ale i na celkovou kvalitu svarového spoje. Podmínkou je správné nastavení průtoku a zvolení správného typu ochranného plynu. Malé množství přiváděného plynu má za následek nedostatečnou ochranu svarové lázně a přilehlé oblasti před vlivem vzdušných plynů (O_2 , N_2 , H_2). Při velkém množství přiváděného plynu zase může vznikat turbulentní proudění, které způsobuje přísávání vzduchu z okolí do ochranné atmosféry. Při používání většího množství přiváděného plynu je nutno počítat s nižším množstvím tavení. Je to zapříčiněno tím, že v bezprostřední blízkosti oblouku nastává disociace molekul na atomy a k tomu ději je odebráno velké množství tepla z oblouku. [8]

Výběrem ochranné atmosféry je ovlivněna požadovaná geometrie svaru, což je velikost a tvar závaru, nízké převýšení svaru, plynulý přechod mezi povrchem svaru a základním materiálem a zároveň dobré mechanické vlastnosti svaru. Volba množství přiváděného plynu závisí na druhu spoje a na parametrech svařování. Ideální ochrana svarové lázně činí průtok ochranného plynu přiváděného 12 až 17 litrů/min. [8]

Vliv ochranného plynu na geometrii svaru lze posuzovat také podle tepelné vodivosti ochranného plynu, viz Obr. 15. Tepelná vodivost atmosféry oblouku zapříčiňuje tepelné ztráty od středu k obvodu. Nejžhavější místo oblouku je jeho jádro. Při svařování v ochranných plynech s nízkou tepelnou vodivostí, jako například argon je jádro úzké a má vysokou teplotu. Oproti tomu při svařování v ochranných plynech s vysokou tepelnou vodivostí, což je CO_2 je jeho teplota intenzivně odváděna z jádra k obvodu, důsledkem je jádro oblouku daleko širší a svarová lázeň má formu čočkovitou. [8]



Obr. 15 Vliv typu ochranné atmosféry na geometrii závaru při svařování metodou MAG s porovnání čistým ochranným plynem Ar [8]

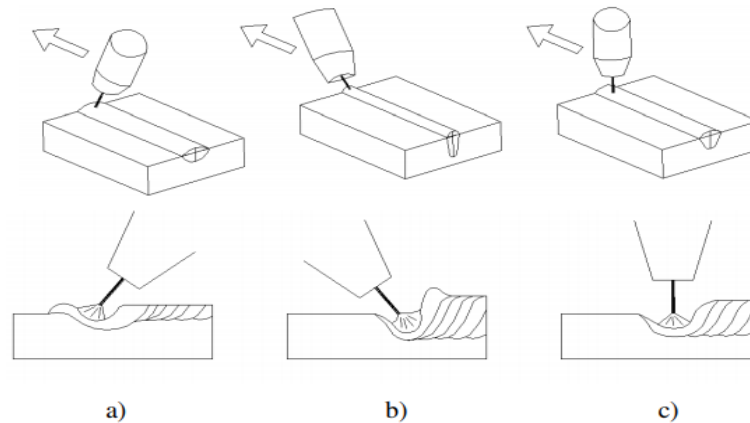
2.5.6 Poloha drátu a technika svařování

Podle sklonu osy svařovacího drátu ve směru svařování rozlišujeme tři způsoby svařování

- a) Svařování vpřed
- b) Svařování vzad
- c) Vertikální svařování

Při svařování vpřed, viz Obr. 16 teplo oblouku působí na větší plochu základního materiálu. To má za následek zlepšení předehřevu svarové plochy, čímž se zvětšuje objem nataveného kovu pod obloukem. To má dopad na geometrii, zmenšuje se hloubka protavení, zvětšuje se šířka svarové lázně, zmenšuje se převýšení housenky nad základním materiálem. Svar není v oblasti kořene ideálně ochráněn ochranným plynem,

což má za následek větší náchylnost ke vzniku vad. Při svařování vzad Obr. 16 je roztavený kov vtlačován do oblasti svarové lázně. Tím je zapříčiněno ke zvýšení hloubky průvaru, k velkému převýšení svaru a zmenšení šířky svaru. Vertikální svařování Obr. 16, se docílí přibližně průměrných hodnot geometrie svaru mezi svařováním vzad a svařováním vpřed. [8]



Obr. 16 Vliv polohy elektrody a svařovací techniky na geometrii svarové lázně [8]

2.5.7 Výlet drátu

Výlet drátu je délka volného konce elektrody, což je délka drátu měřená od nastaveného konce v elektrickém oblouku k místu výstupu z kontaktní špičky, viz Obr. 17. Jakákoliv změna vzdálenosti kontaktní špičky od materiálu může zapříčinit změnu výletu drátu i délku oblouku. Pokud zvyšujeme rychlost podávání drátu, zvyšujeme výlet drátu, a naopak snižujeme délku oblouku. Délka oblouku je určena pro rozdělení hustoty proudu a velikost jeho tlaku na povrchu se tvoří svarová lázně a také tvar a její rozměry. Kratší oblouk tvoří zkrat elektrody se svarovou lázní, nižší rychlosti tavení základního materiálu, vysoký a úzký závar, nerovnoměrné vnášení tepla a větší pravděpodobnost tvorby vad. Naopak dlouhý oblouk má vliv na geometrii výsledného svaru, která může ve výsledku vypadat s plochým mělkým závarem, tím dovoluje oblouk větší rozstřík a může následně vytvořit porózní turbulenci vzduchu. Délka oblouku je důležitou podmínkou existence procesu a je ekvivalentní s napětím oblouku. Před nastavením vzdálenosti kontaktní špičky od základního materiálu můžeme k tomu použít empirické vztahy uvedené níže, viz vzorec (18) a (19). [8]

Zkratový režim přenosu kovu:

$$L = (10 \cdot d) + 3 \text{ [mm]} \quad (18)$$

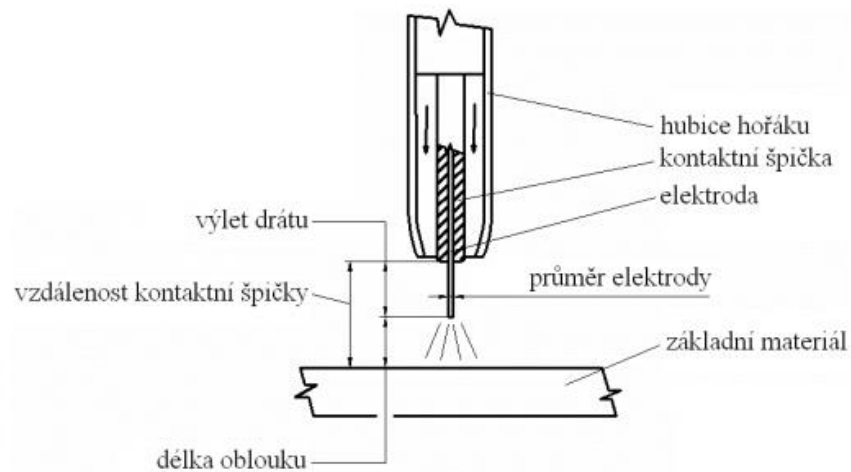
Bezzkratový režim přenosu kovu:

$$L = (10 \cdot d) + 5 \text{ [mm]} \quad (19)$$

kde v obou případech platí:

L – vzdálenost kontaktní špičky [mm]

D – průměr elektrody [mm]



Obr. 17 Výlet drátu [8]

2.5.8 Princip funkce simulačních programů

Numerické simulace svařování stále nacházejí větší uplatnění nejen ve vývojích odděleních při přípravě výroby, ale i při opravách nebo renovacích. Tyto simulace nahrazují výrobu složitých experimentálních svarů, a tudíž nahrazují i experimentální ověřování správnosti volby pro vybranou technologii svařování, vhodnosti materiálů, teplot předehřevů, použití předávných materiálů a ostatní parametry. [8]

2.5.8.1 Vliv rozměrů svarové lázně pro potřeby simulací

Základní úlohou simulačního výpočtu je predikce výsledku procesu při požadovaných parametrech, s co nejvyšší přesností. Při simulacích jsme nuceni odhadnout okrajové podmínky, které snižují přesnost výpočtu. Výsledná přesnost se odvíjí na kvalitě vstupních dat, proto je nutné se zaměřit na přesnost měřených parametrů. Numerické analýzy svařovacích procesů jsou velmi složité z důvodu velkého množství a požadavků na kvalitu vstupních dat. [8]

Vstupní data pro simulaci procesu svařování se dělí do čtyř oblastí [8]:

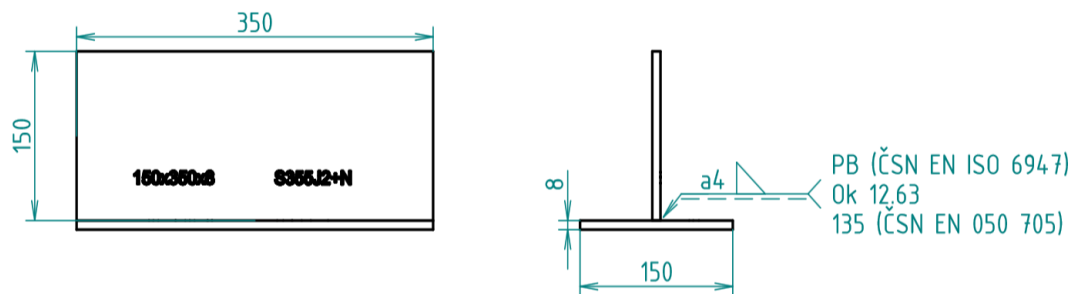
- a) Materiálová vstupní data.
- b) Data pro definici mohutnosti a tvaru tepelného zdroje.
- c) Data pro vytváření prostorového modelu.
- d) Trajektorie pohybu tepelného zdroje

3 Praktická část

Cílem experimentu bylo získání reálných rozměrů svarové lázně a následně vyhodnocení závislosti rozměrů svarové lázně na parametrech rychlosti svařování a celkového výkonu zdroje. Pro měření byly stanoveny tři různé rychlosti svařování (40, 50, 60 [cm.min⁻¹]) viz Tab. 2 tak, aby se dosáhlo různých rozměrů svarové lázně dle předpokladů.

3.1 Definice použitého svaru

Ve všech experimentech byl použit základní materiál S355J2+N, který disponoval rozměry 350x150x8. Měření probíhalo na koutovém svaru, který ve všech pokusech disponoval velikostí svaru a4, viz Obr 18.



Obr. 18 Rozměry svařence s naznačeným místem svaru

3.2 Definice procesu svařování

Svařování vzorků probíhalo v poloze PB (vodorovná šikmo shora) podle ČSN EN ISO 6947. Byl použit zdroj Fronius Trans Puls Synergic 3200 CMT. Ochranný plyn 82% Ar + 18 % CO₂ s průtokem 12 l.min⁻¹. Pro výpočet Q [kJ.mm⁻¹] se použil vzorec (15) s účinností 0,8.

Tab. 2 Zvolené rychlosti svařování a jejich parametry

Č. vzorku	V _{sv.} [cm/min]	WFS [m/min]	I [A]	U [V]	Q [kJ/mm]
1.	40	9,0	206	21,7	0,54
2.	50	11,7	245	27,0	0,64
3.	60	13,5	280	29,5	0,66

3.3 Požité materiály

- **Základní materiál**

Byla zvolena ocel S355J2+N, ČSN EN 10025-2 jedná se o nelegované konstrukční oceli. Jsou to výrobky válcované za tepla z konstrukční oceli. Ocel S355 v tomto případě je dodávána v jakosti stupni J2. Hodnota nárazové práce je 27 J při teplotě -20 °C, což se označuje symbolem J2. (+N) je značení ve stavu po normalizačním žíhání. Normalizační válcování N je proces, při kterém dochází v rámci válcování provádí konečná deformace v konkrétní teplotní oblasti (teplota Ar₃ + 50 °C), což vede ke stavu materiálu, který

odpovídá stavu získanému po normalizačním žíhání (+N) s tím, že hodnoty mechanických vlastností jsou shodné s mechanickými vlastnostmi získanými po válcování s následným klasickým normalizačním žíháním (za teploty $A_{c3} + 50$ °C). Chemické složení oceli je uvedeno v Tab. 3 a mechanické vlastností v Tab.4. [15]

Tab. 3 Chemické složení nelegované konstrukční oceli S355J2+N [18]

Označení		Způsob desoxidace ^{b)}	C v % max. pro výrobek jmenovité tloušťky v mm			Si	Mn	P ^{d)}	S ^{d), e)}	N ^{f)}	Cu ^{g)}	Další prvky ^{h)} % max.
Podle EN 10027-1 a CR 10260	Podle EN 10027-2		≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ^{e)}	% max.	% max.	% max.	% max.	% max.	% max.	
S355J2	1.0577	FF	0,20 ^{j)}	0,20 ^{k)}	0,22	0,55	1,60	0,025	0,025	—	0,55	—

Tab. 4 Mechanické vlastnosti pro ploché a dlouhé výrobky oceli [18]

Označení		Minimální mez kluzu R_{eH} ^{a)} MPa ^{b)} Jmenovitá tloušťka mm									Pevnost v tahu R_m ^{a)} MPa ^{b)} Jmenovitá tloušťka mm				
Podle EN 10027-1 a CR 10260	Podle EN 10027-2	≤ 16	> 16 ≤ 40	> 40 ≤ 63	> 63 ≤ 80	> 80 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 200	> 200 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^{c)}	< 3	≥ 3 ≤ 100	> 100 ≤ 150	> 150 ≤ 250	> 250 ≤ 400 ^{c)}
S355J2	1.0577	355	345	335	325	315	295	285	275	265	510 - 680	470 - 630	450 - 600	450 - 600	450 - 600

• Příkladový materiál

Jako přídatný materiál byl použit plný svařovací drát G 46 4 M G4Si1, OK AristoRod 12.63, d = 1 mm, EN ISO 14 341 - A od společnosti ESAB. Nepoměděný drát, který se používá pro svařování nízkolegovaných jemných. Přídatný materiál je vhodný pro svařování materiálu, jako jsou P235/S235 až P 460/S460 a jiné. Chemické složení drátu je uvedeno v Tab. 5 a mechanické hodnoty v Tab.6. [14]

Tab. 5 Chemické složení drátu [14]

C	Si	Mn
0,10	1,00	1,70

Tab. 6 Mechanické hodnoty čistého svařového kovu [14]

Podmínky	Stav	Plyn	R_m MPa	R_{eL} ($R_{p0,2}$) MPa	A_5 (A_4) %	KV (J)/°C				
						+20	-20	-30	-29	-40
EN	TZ 0	M21	595	525	26	130	90	70		60

3.4 Použitý svařovací zdroj

Jako svařovací zdroj byl zvolen Trans Puls Synergic 3200 CMT od společnosti Fronius, viz Obr. 19. Pro krátký, sprchový a impulzní oblouk je zcela digitalizován a mikroprocesorem řízený svařovací zdroj MIG/MAG o výkonu 320 A. Zkratka CMT označuje funkci Cold Metal Transfer. Pohyb drátu je začleněn do procesního řízení. [20]



Obr. 19 Svařovací zdroj TransPuls Synergic 3200 CMT [20]

3.5 Svařovací robot

Během všech prováděných experimentů byl používán robot pro svařování elektrickým obloukem ARC Mate 100iC, viz Obr. 20. Jedná se o robota se šesti stupni volnosti. [19]



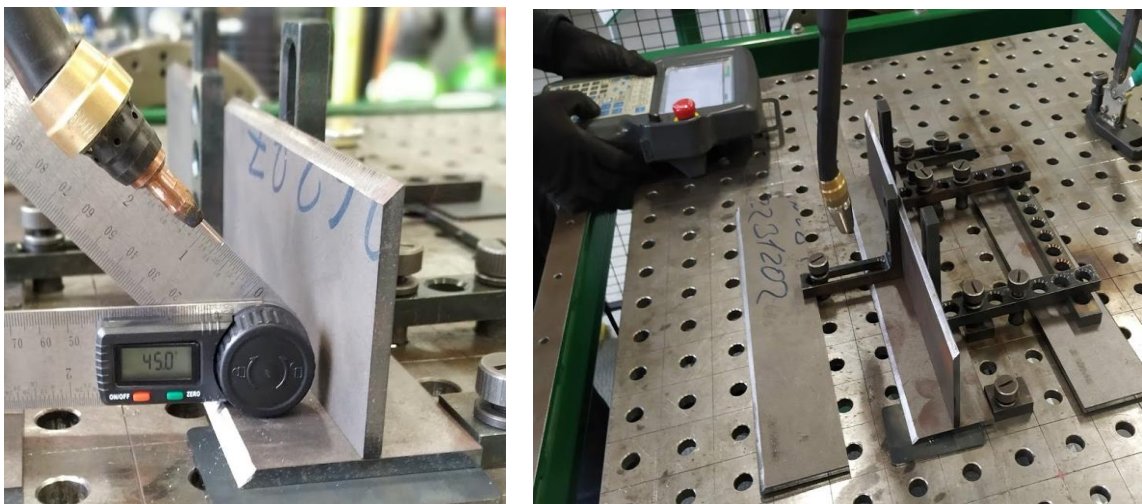
Obr. 20 Svařovací robot ARC Mate 100iC [19]

3.6 Postup experimentu

Při experimentu bylo postupováno v několika krocích. Prvním z kroků bylo ověření navržených parametrů pro svařování vzorků. Druhým krokem bylo svařování vzorků a vyhodnocení šířky a hloubky tavné lázně pomocí makrovýbrusů. Dále již následovalo měření délky tavné lázně pomocí několika různých postupů. Prvním bylo měření délky svarové lázně vizuálně na zvolené trajektorii, druhým vyhodnocení dle záznamu z videa a třetím bylo vyhodnocení dle koncového kráteru.

3.7 Ověření navržených parametrů svařování

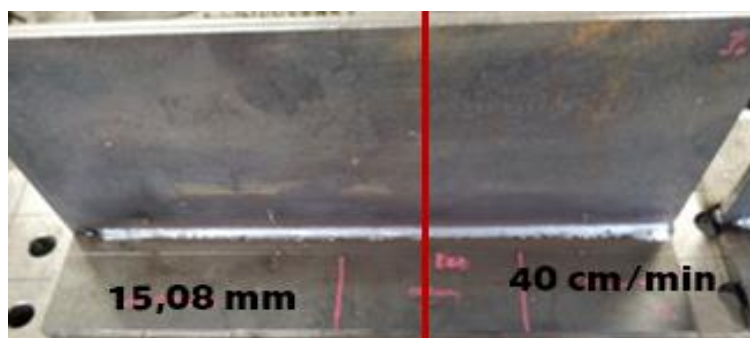
V první části měření docházelo k nastavení, naprogramování svařovacího robota, zvolení optimálního řešení přípravku a svařovacích parametrů. Svařování probíhalo metodou MAG (135). V tomto měření se testovaly vzorky na kolmost (uhlová deformace) a rovnoběžnost po nanesení svarové lázně se kontrolovala kvalita a velikost svarů. Ta měla odpovídat velikosti svaru a4. Kvůli těmto kritériím úhel nastavení hořáku byl změněn, takže činil na začátku svařování 45° a na konci se blížil k 50° . Vše bylo kalibrováno tak, aby výsledek měření byl, co nejpřesnější viz. Obr. 21. Správné nastavení počátečních podmínek bylo časově velmi náročné, pro vyhovující výsledky simulace je nutné mít zmapováno, co nejvíce okrajových podmínek při procesu svařování. Při zjišťování rozměrů svarové lázně byly současně měřeny tepelné cykly v různých oblastech svarového spoje. Tyto teplotní závislosti budou následně použity pro validaci výsledků MKP simulace.



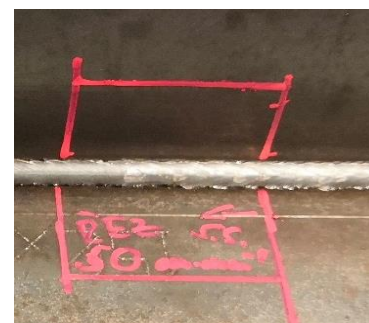
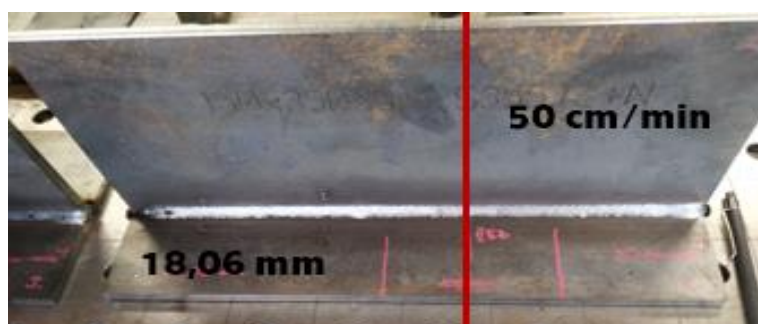
Obr. 21 Kalibrace a nastavení před měřením experimentu

3.8 Vyhodnocení pomocí makrovýbrusů

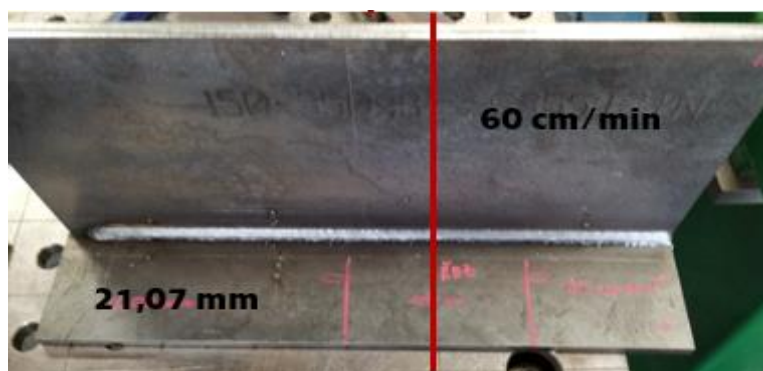
Po svaření experimentálních vzorků se určila vhodná místa pro provedení řezů k naměření hloubky a šířky svarové lázně. Značení je uvedeno na Obr. 22, Obr. 23 a Obr. 24. Každý ze vzorku byl zalit do bakelitu a po jeho vytvrzení byl proveden makro výbrus na metalografické brusce. Následovalo naleptání vzorku leptadlem Nital (5% kyselina dusičná na alkoholové bázi). Snímky makrostruktury byly pořízeny na metalografickém mikroskopu Axio Observe.



Obr. 22 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 1

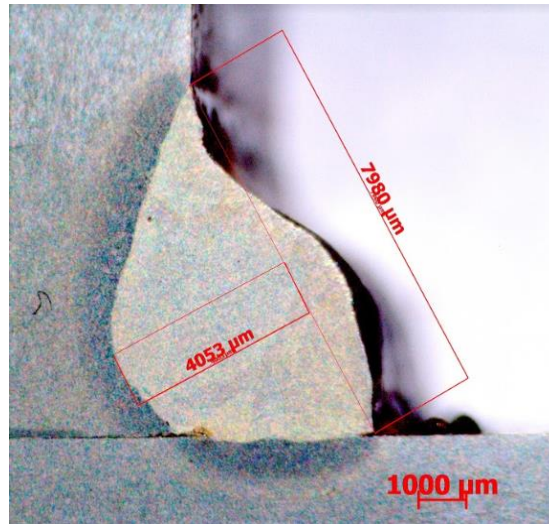


Obr. 23 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 2

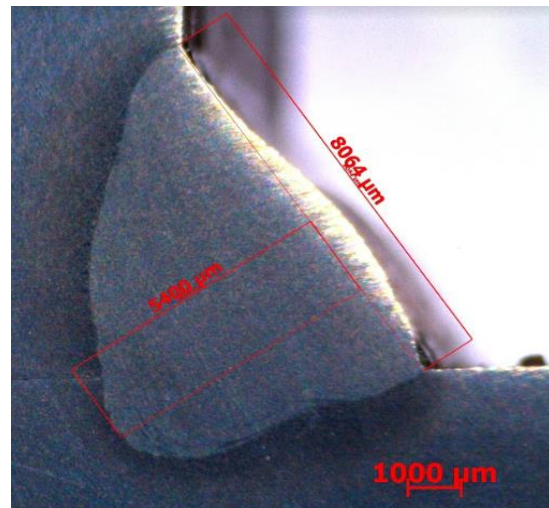


Obr. 24 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 3

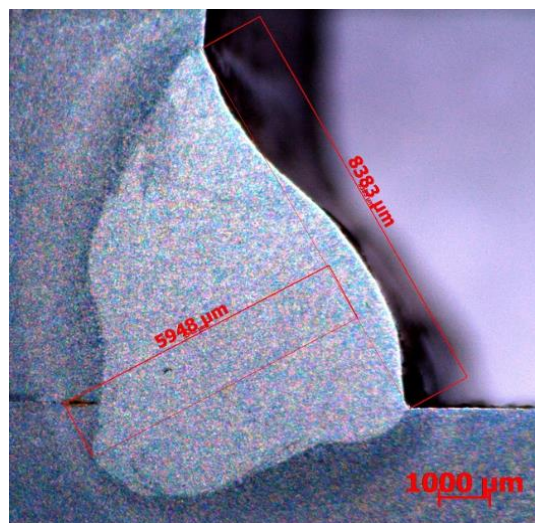
Rozměry parametrů b a d byly získány z makrovýbrusu za pomoci optického mikroskopu Axio Observer. K naměření těchto hodnot byl použit program AxioVision V tomto softwaru bylo provedeno měření rozměrů svarů d = hloubky a b = šířky svarové lázně, viz Obr. 25, Obr 26, Obr. 27 a Tab. 7.



Obr. 25 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 1



Obr. 26 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 2

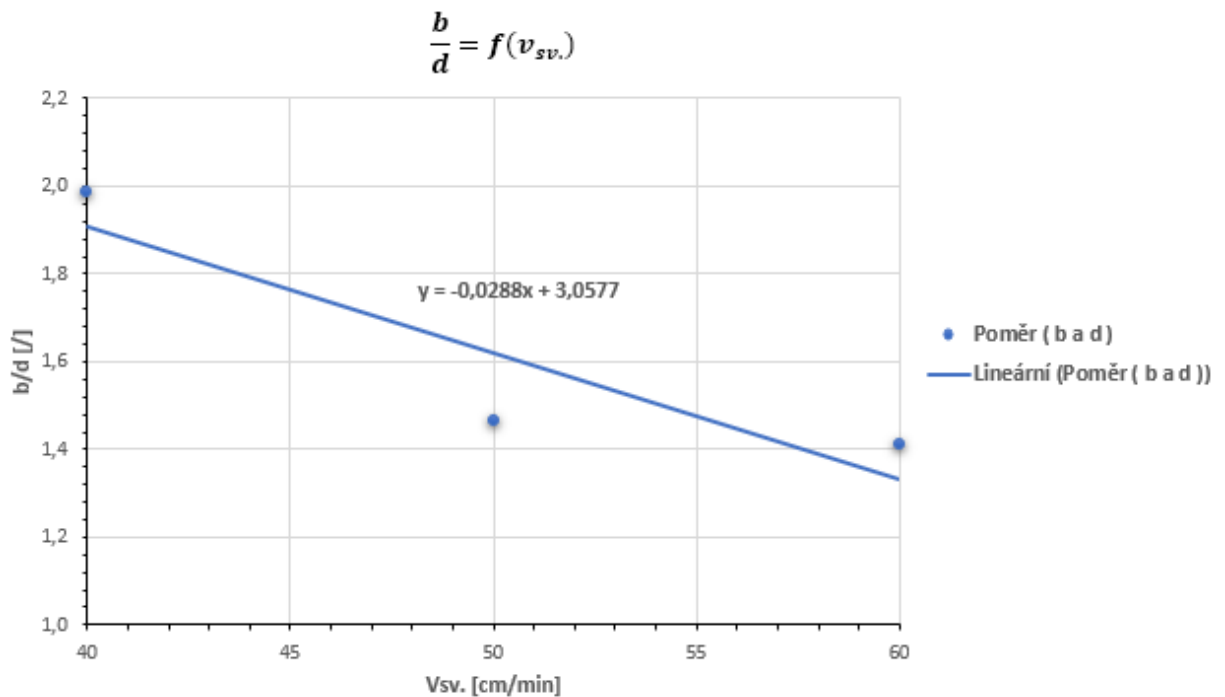


Obr. 27 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 3

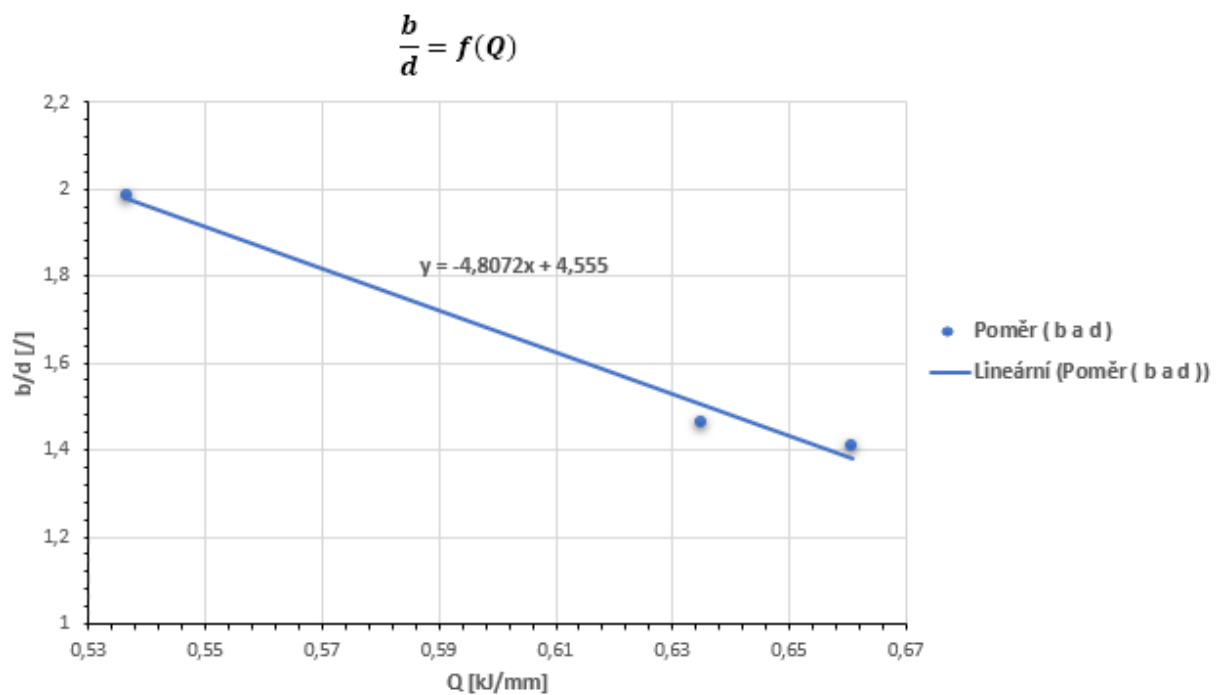
Tab. 7 Rozměry parametrů b a d

Vzorek č. 1: rychlost svařování 40 cm.min⁻¹		
Počet měření:	b [mm]	d [mm]
1	8,0	4,0
2	8,1	4,0
3	8,0	4,0
4	8,1	4,1
5	8,0	4,1
Průměr	8,0	4,0
Vzorek č. 2: rychlost svařování 50 cm.min⁻¹		
Počet měření:	b [mm]	d [mm]
1	8,1	5,5
2	8,0	5,5
3	8,1	5,6
4	8,0	5,5
5	8,1	5,4
Průměr	8,1	5,5
Vzorek č. 3: rychlost svařování 60 cm.min⁻¹		
Počet měření:	b [mm]	d [mm]
1	8,4	5,9
2	8,5	5,9
3	8,4	5,9
4	8,4	6,0
5	8,4	5,9
Průměr	8,4	6,0

Dále následovalo dopočítání poměrů b a d , což je hodnota součinitele formy svaru podle vzorce (16) a vytvoření požadovaných grafů pro zjištění změny hloubky a šířky svarů viz Graf 1.0 a Graf 1.1.



Graf 1.0



Graf 1.1

Ze získaných hodnot b došlo k teoretickému výpočtu velikosti svarové lázně a_r , a_f dle vztahu (5) a (6). Kde a_r a a_f pro rychlost $40 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ byl zvolen koeficient 2, rychlost $50 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ byl zvolen koeficient 2,25 a pro rychlost $60 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ byl zvolen koeficient 2,5, viz Tab. 8.

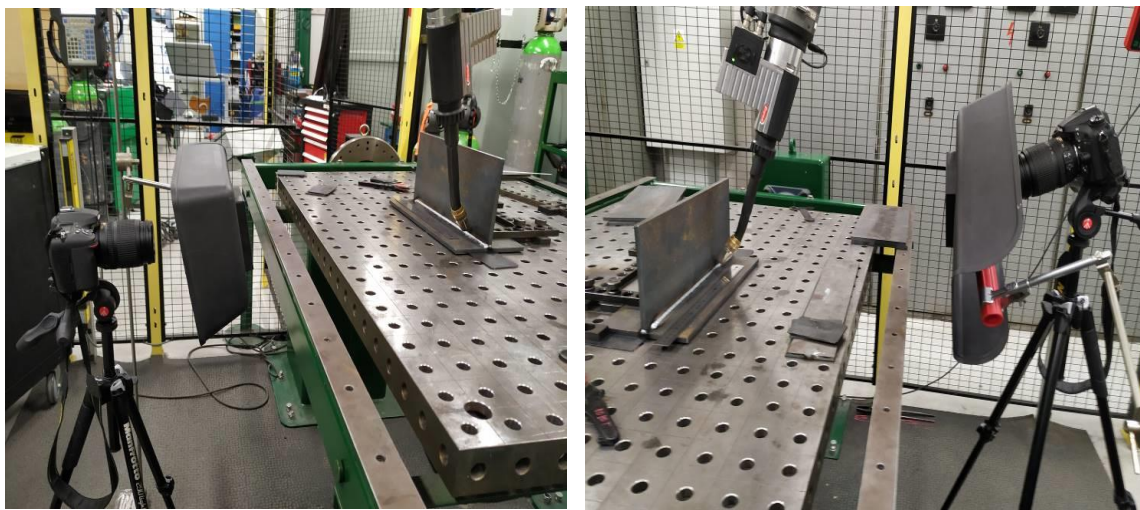
Tab. 8 Vypočtená délka svarové lázně

Vzorek č.	b [mm]	S koeficientem [mm]	a_f [mm]	a_r [mm]
1.	8,0	2,0	2,4	8,0
2.	8,1	2,25	2,4	9,1
3.	8,4	2,5	5,4	10,5

Měření nám potvrdilo změnu šířky svarové lázně b (8-8,4 mm). Dle grafů nejvýraznější vliv měla hloubka svarové lázně, která se zvyšuje a součinitel formy tvaru se tím snižuje. Nejvyšší vliv na změnu průřezu tvaru mělo výrazně vnesené teplo Q .

3.9 Vyhodnocení dle záznamu z videa

V dalším experimentu byla použita kamera s UV filtrem, v dané situaci byla kamera přizpůsobena tak, aby svarová lázeň byla viditelná i přes projíždějící hořák, viz Obr.28. Cílem bylo přímé měření velikosti svarové lázně. Kamera přes velmi silný UV filtr, nedokázala zaznamenat snímek svarové lázně, kvůli nedostatečné možnosti nastavení hloubky kontrastu. Kvůli tomu snímky svarové lázně neodpovídali reálnému stavu viz. Obr. 29, Obr. 30 a Obr. 31.



Obr. 28 Nastavení kamery s UV filtrem

Níže lze pozorovat výsledné fotky velikosti svarové lázně zaznamenané kamerou. Je patrné, že ze snímku z videa nelze přesně určit délku svarové lázně.



Obr. 29 Snímek svarové lázně vzorku č. 1



Obr. 30 Snímek svarové lázně vzorku č. 2

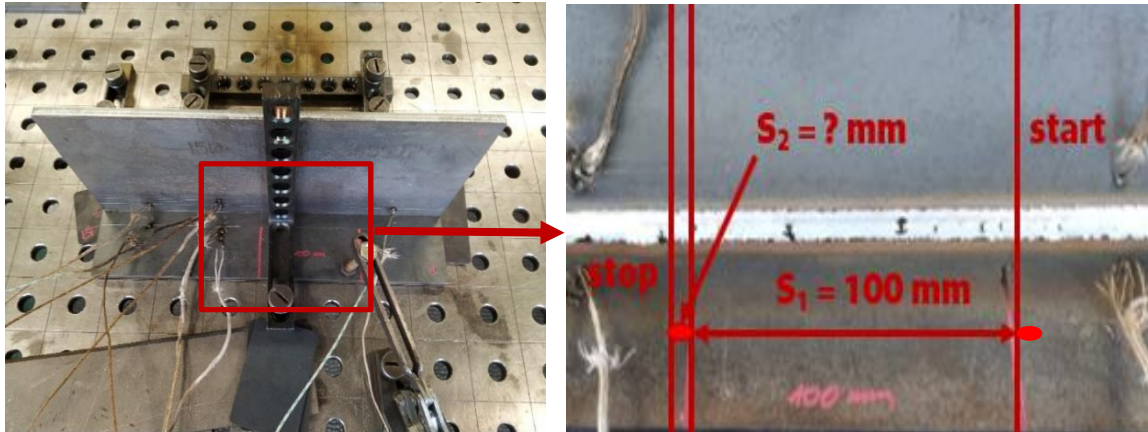


Obr. 31 Snímek svarové lázně vzorku č. 3

3.10 Měření délky svarové lázně vizuálně na zvolené trajektorii

V této části experimentu, byla dle naměřeného času průchodu svarové lázně na stanovené délce, dopočítána délka svarové lázně. Princip měření spočíval, že jsme

zvýraznili 100 mm délky na svařovaném dílu a když počátek svarové lázně dojel k označenému místu v té chvíli jsme začali měřit čas a po vyjetí svarové lázně z určeného intervalu bylo měření času ukončeno, viz Obr. 32. Obr. 32 z levé části je stav před svařováním včetně označeného místa měření. V pravé části snímku je označená část měření po svaření.



Obr. 32 Na tomto vzorku jsou označená místa měření (start/stop)

Na základě znalosti rychlosti svařování a doby průchodu svarové lázně intervalem tj. 100 mm. Následoval dopočet uvedený níže.

$$v = \frac{S_1 + S_2}{t} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$v = \frac{S_1}{t} + \frac{S_2}{t} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$S_2 = v \cdot t - S_1 [m]$$

$$S_2 = v \cdot t - S_1 [m]$$

Volím $S_1 = 100 [mm] = 0,1 [m]$ z měřené části

Nevýhoda této metody je, že při svařování nelze jasně určit okraje intervalu a tím přesně určit, kde má začínat a končit měření (start/stop). Měření času pro všechny rychlosti bylo obtížné a výsledky měření byli velmi nepřesné, viz Tab. 9.

Další příčina nepřesností byl problém s měřidlem času při vyšších proudech v blízkosti svařování, technika přestávala reagovat na pokyny. Kvůli vysokým teplotám, v daném případě smartphone přestal reagovat na pokyny při měření času. Z důvodu nepřesnosti výsledků následovalo jiný typ experimentu.

Tab. 9 Porovnání naměřených a dopočítaných délek svarové lázně

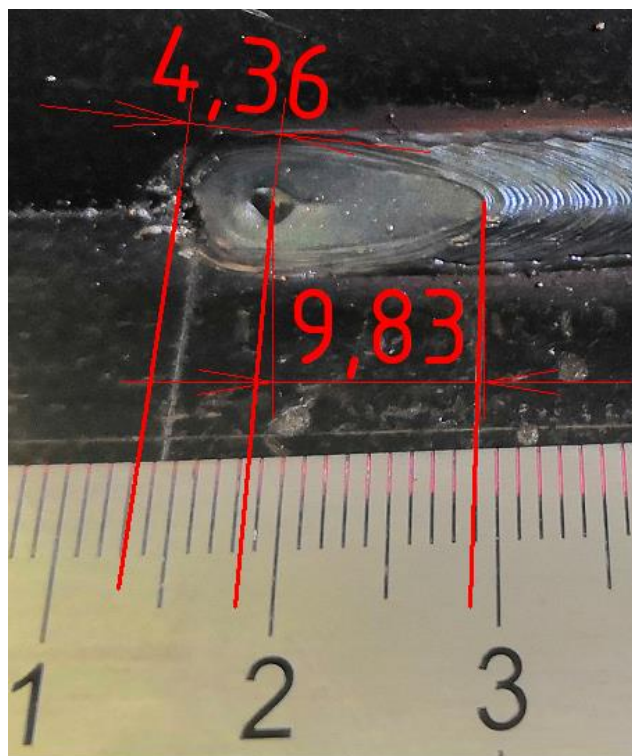
Vzorek č.	Rychlost svařování [cm.min ⁻¹]	Čas svařování t _{100+svarová lázeň} [s]	Vypočítaná délka S ₂ [mm]	Výpočet dle vztahu (7), (8) a _r + a _r [mm]
1.	40	13:79	5,2	10,4
2.	50	12:95	7,9	11,5
3.	60	11:61	16,1	13,0

3.11 Vyhodnocení dle koncového kráteru

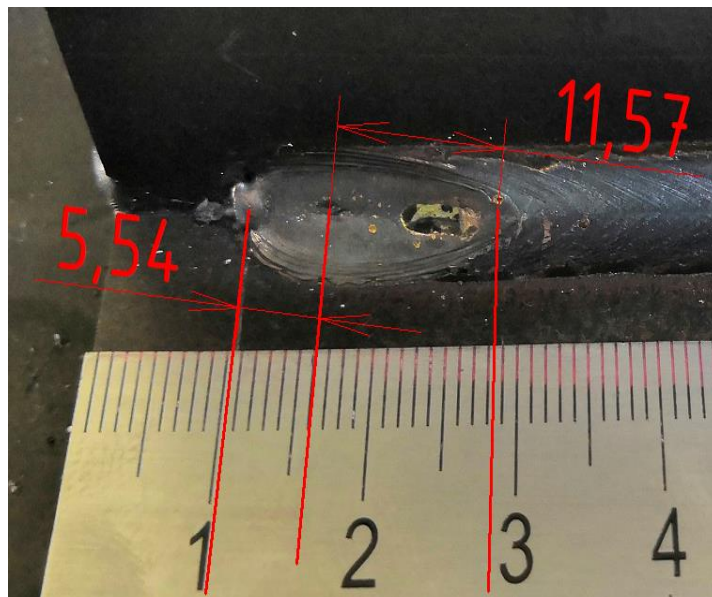
Pro naměření délky svarové lázně byl použit program SolidEdge (SE), kam byl snímek s přiloženým pravítek vložen a provedlo se 5 měření pro zjištění průměrné veličiny a_f a a_r , viz Obr.33, Obr. 34, Obr.35, Obr. 36 a Tab. 10.



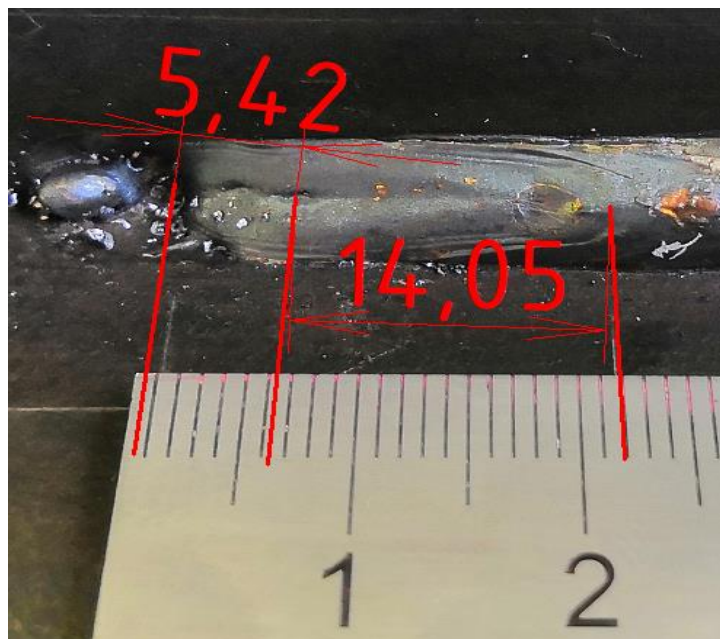
Obr. 33 Parametry délky svarové lázně, nastavené oblasti a_f , a_r



Obr. 34 Rozměrová analýza vzorku č. 1



Obr. 35 Rozměrová analýza vzorku č. 2



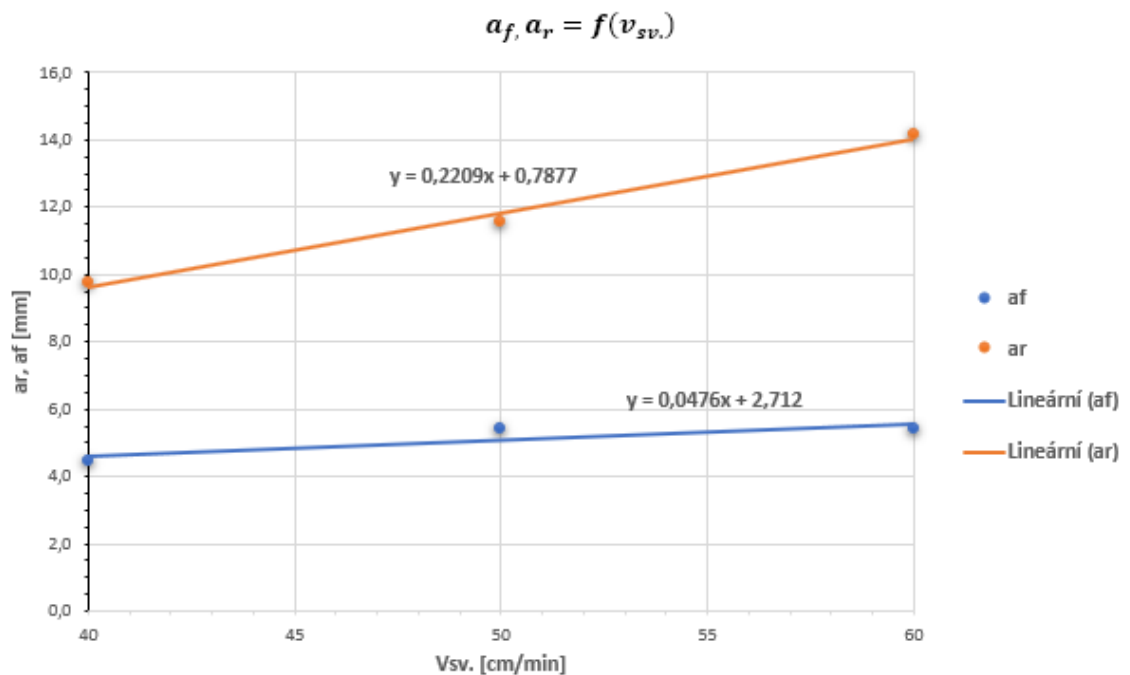
Obr. 36 Rozměrová analýza vzorku č. 3

Tab. 10 Naměřené parametry geometrie svarové lázně a_f , a_r

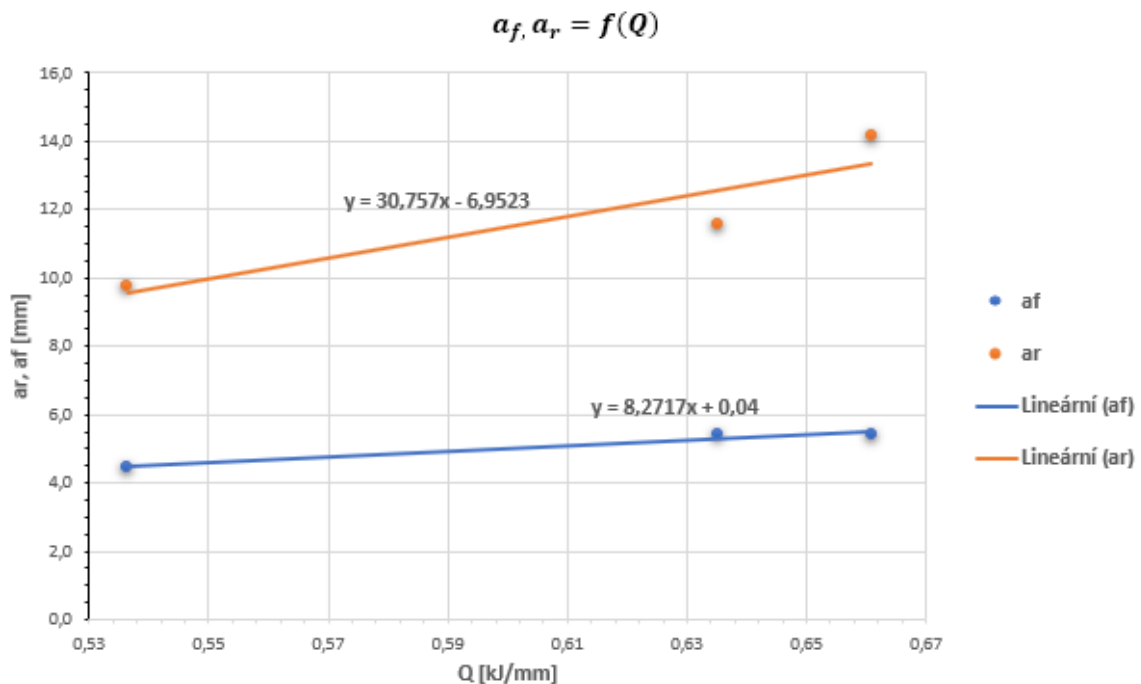
Vzorek č. 1: rychlost svařování 40 cm.min⁻¹		
Počet měření:	a_f [mm]	a_r [mm]
1	4,3	9,7
2	4,4	9,8
3	4,4	9,6
4	4,6	9,8
5	4,6	9,8
Průměr	4,5	9,8

Vzorek č. 2: rychlost svařování 50 cm.min ⁻¹		
Počet měření:	a _f [mm]	a _r [mm]
1	5,4	11,6
2	5,5	11,6
3	5,4	11,6
4	5,3	11,4
5	5,5	11,6
Průměr	5,4	11,6
Vzorek č. 3: rychlost svařování 60 cm.min ⁻¹		
Počet měření:	a _f [mm]	a _r [mm]
1	5,4	14,4
2	5,5	14,1
3	5,3	14,1
4	5,5	14,1
5	5,4	14,2
Průměr	5,4	14,2

Z výše uvedené tabulky byly vytvořeny závislosti délky a_f a a_r, která popisuje změny při zvýšení rychlosti svařování a celkovému výkonu zdroje Q, viz Graf 1.2 a Graf 1.3.



Graf 1.2



Graf 1.3

Délka tavné lázně rostla se zvyšující se příkonem a rychlosti svařování, co odpovídá z teorie. Z uvedených grafů lze vyčíst, že nárůst a_r je výraznější než u a_f .

4 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo vyhodnocení vlivu rychlosti svařování $v_{sv.}$ na geometrii svarové lázně. Geometrie svarové lázně byla popsána následujícími parametry: přední délkou svaru a_f a zadní délkou svaru a_r , hloubkou svaru d a šířkou housenky b .

Dosažením prvního cíle v této bakalářské práci byl návrh experimentů pro měření rozměrů svarové lázně. Tyto experimentální vyhodnocení poslouží ke zpřesnění výsledků MKP simulací.

Druhým cílem bylo naměření parametrů popisující svarovou lázeň. Změny rozměrů svarové lázně, které ovlivňuje rychlost svařování byly naměřeny na metalografických výbrusech a také odměřeny na jednotlivých vzorcích.

Výsledkem bylo sestavení grafů závislosti rychlosti svařování a vneseného tepla (Q) na parametrech popisující geometrii svarové lázně. Byly sestaveny grafy se závislostmi rychlosti svařování na délkách svarové lázně (a_r , a_f) a součinitele formy svaru (θ) na rychlosti svařování $v_{sv.}$ a vneseném teple Q . Získanými hodnotami byla proložena lineární závislost a získaná rovnice regrese je uvedena ve výsledných grafech, viz Graf 1.0, Graf 1.1, Graf 1.2 a Graf 1.3.

V Tab. 11 jsou zobrazeny výsledky rozměrů tavné lázně získané z každého z experimentů.

Tab. 11 Výsledky délek svarové lázně z experimentů

Vzorek č.	Makrovýbrusy [mm]		Vyhodnocení dle koncového kráteru z SE [mm]			Výpočet dle Goldaka ze vztahu (7), (8) [mm]			Měření délky svarové lázně vizuálně na zvolené trajektorii [mm]
	b	d	a _f	a _r	Celkem a _f + a _r	a _f	a _r	Celkem a _f + a _r	Celkem a _f + a _r
1.	8,0	4,0	4,5	9,8	14,3	2,4	8,0	10,4	5,2
2.	8,1	5,5	5,4	11,6	17,0	2,4	9,1	11,5	7,9
3.	8,4	6,0	5,4	14,2	19,6	2,5	10,5	13,0	16,1

Z výsledků je patrné, že s rostoucí rychlostí a zvyšujícím se vneseným teplem rostou parametry velikosti svarové lázně dle předpokladů. Tyto proměnné se dále použijí pro simulaci, které budou aplikovány pro ověření vzorku a k porovnání je s reálným stavem těchto svařenců.

Pomocí tři metod bylo dosaženo třech různých rozměrů délky, pro přesnější určení délky svarové lázně je třeba rozšířit pole experimentu.

5 Zdroje

- [1] ZDENĚK, F. *Vysokovýkonné svařování MAG drátem 1,4 mm*. Diplomová práce. TU v Liberci 2016.
- [2] *Technologie svařování a zařízení*. 1. VUT v Brně: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] *Ruční svařování elektrickým obloukem* [online]. [cit. 2019-07-19]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33447&instance=2>
- [4] VRATISLAV, U. *VLIV VELIKOSTI VNESENÉHO TEPLA NA VYBRANÉ VLASTNOSTI SVARU JEMNOZRNNÉ OCELI*. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VUT v Brně 2011.
- [5] BŘETISLAV, S. *VLASTNOSTI KONSTRUKČNÍCH OCELÍ V SYSTÉMU JAKOSTI PODLE EN A ČSN* [online]. 2003 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/mattech/Znaceni_oceli_Skrbek.pdf. TU v Liberci.
- [6] ROSENBERG, P. *Metody svařování legovaných ocelí*. Brno, 2008. Bakalářská práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [7] *Heat-treatable Plate Steel* [online]. United Kingdom London: International Molybdenum Association, 2008 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <https://www.imoa.info/IMOA/copyright.php>
- [8] HAVELKA, P. *Predikce tvaru a velikosti svarové lázně u metody svařování MAG*. LIBEREC, 2010. DIPLOMOVÁ PRÁCE. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI.
- [9] *Materiály a jejich chování při svařování*. Česká svářečská společnost ANB. Ostrava, 2016.
- [10] CRLA, T. *VLIV PARAMETRŮ SVAŘOVÁNÍ NA ÚHLOVÉ DEFORMACE SVARU*. Brno, 2015. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VUT v Brně.
- [11] Heat Source Geometry. *Simufact.welding*. 2016, 1–5.

- [12] LANGR, M. *Svařování a jeho modelování v simulačním softwaru*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT FS.
- [13] Modern software for welding robots and complexes [online]. St. Petersburg : Roboweld, 2013 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: http://roboweld.com/technology/welding_method/sovremennoe_programmnoe_obespechenie_dly_a_svarochnyh_robotov_i_kompleksov.html
- [14] *OK AristoRod 12.63* [online]. ESAB [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: http://www.okweld.cz/PDF/draty-mig-mag/nelegovane/OK_AristoRod_12_63.pdf
- [15] *Volba konstrukčních ocelí pro stavební svařované konstrukce podle významu označení* [online]. 2017 [cit. 2019-07-18]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/volba-konstrukcnich-oceli-pro-stavebni-svarovane-konstrukce-podle-vyznamu-oznaceni/>
- [16] Němec M., Suchánek J., Šanovec J., 2006: *Základy technologie I*. ČVUT, Praha, 136 s., ISBN: 80-01-03530-1.
- [17] ŽÁK, J. a NOVÁK, M. *Teorie tvárni..* 1. vyd. Brno: VUT Brno. 1988. 142s
- [18] *ČSN EN 10025-2: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [19] *FANUC* [online]. Praha: FANUC Europe Corporation, 2017 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/stránka-filtru-robotů/svařování-elektrickým-obloukem/arcmate-100ic-12>
- [20] *TransPuls Synergic 3200 CMT* [online]. České Budějovice: HBT Weld, 2006 [cit. 2019-07-30]. Dostupné z: <http://www.hbt-weld.cz/katalog/transpuls-synergic-3200-2/>

6 Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Princip svařování metodou MAG [2]</i>	10
<i>Obr. 2 Základní rozdělení přenosu kovu při svařování [8]</i>	11
<i>Obr. 3 Robotická buňka s dvoustupňovým polohováním [2]</i>	13
<i>Obr. 4 Nejčastější koncepce průmyslových svařovacích robotů [2]</i>	14
<i>Obr. 5 Teplotní pole, teplotní cykly, doby a rychlosti chladnutí [17]</i>	17
<i>Obr. 6 Svarová lázeň [2]</i>	18
<i>Obr. 7 Model dvouelipsoidního zdroje tepla dle Goldaka [11]</i>	18
<i>Obr. 8 Definice svarové lázně dle Goldaka [11]</i>	20
<i>Obr. 9 Velikost koutového svaru [11]</i>	20
<i>Obr. 10 Geometrie svarové lázně [8]</i>	21
<i>Obr. 11 Charakteristické rozměry svaru [10]</i>	23
<i>Obr. 12 Vliv velikosti svařovacího proudu na změnu formy svaru [10]</i>	23
<i>Obr. 13 Vlivu napětí $U [V]$ na tvar svarové housenky [2]</i>	24
<i>Obr. 14 Vliv rychlosti na součinitel formy svaru [10]</i>	24
<i>Obr. 15 Vliv typu ochranné atmosféry na geometrii závaru při svařování metodou MAG s porovnáním čistým ochranným plynem Ar [8]</i>	25
<i>Obr. 16 Vliv polohy elektrody a svařovací techniky na geometrii svarové lázně [8]</i>	26
<i>Obr. 17 Výlet drátu [8]</i>	27
<i>Obr. 18 Rozměry svařence s naznačeným místem svaru</i>	28
<i>Obr. 19 Svařovací zdroj TransPuls Synergic 3200 CMT [20]</i>	30
<i>Obr. 20 Svařovací robot ARC Mate 100iC [19]</i>	30
<i>Obr. 21 Kalibrace a nastavení před měřením experimentu</i>	31
<i>Obr. 22 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 1</i>	32
<i>Obr. 23 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 2</i>	32
<i>Obr. 24 Červená čára označuje místo řezu, kde se následně provede makrovýbrus pro vzorek č. 3</i>	32
<i>Obr. 25 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 1</i>	33
<i>Obr. 26 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 2</i>	33
<i>Obr. 27 Rozměrová analýza šířky a hloubky vzorku č. 3</i>	33
<i>Obr. 28 Nastavení kamery s UV filtrem</i>	36
<i>Obr. 29 Snímek svarové lázně vzorku č. 1</i>	37
<i>Obr. 30 Snímek svarové lázně vzorku č. 2</i>	37
<i>Obr. 31 Snímek svarové lázně vzorku č. 3</i>	37
<i>Obr. 32 Na tomto vzorku jsou označená místa měření (start/stop)</i>	38
<i>Obr. 33 Parametry délky svarové lázně, nastavené oblasti af, ar</i>	39
<i>Obr. 34 Rozměrová analýza vzorku č. 1</i>	39
<i>Obr. 35 Rozměrová analýza vzorku č. 2</i>	40
<i>Obr. 36 Rozměrová analýza vzorku č. 3</i>	40

7 Seznam tabulek

Tab. 1 Nejčastěji používané nelegované konstrukční oceli válcované za tepla [15]	15
Tab. 2 Zvolené rychlosti svařování a jejich parametry	28
Tab. 3 Chemické složení nelegované konstrukční oceli S355J2+N [18]	29
Tab. 4 Mechanické vlastnosti pro ploché a dlouhé výrobky ocelí [18]	29
Tab. 5 Chemické složení drátu [14]	29
Tab. 6 Mechanické hodnoty čistého svarového kovu [14]	29
Tab. 7 Rozměry parametrů b a d	34
Tab. 8 Vypočtená délka svarové lázně.....	36
Tab. 9 Porovnání naměřených a dopočítaných délek svarové lázně.....	38
Tab. 10 Naměřené parametry geometrie svarové lázně a_f , a_r	40
Tab. 11 Výsledky délek svarové lázně z experimentů	43

8 Přílohy

- CD