

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2024

**ŠTĚPÁN
POTŮČEK**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

**Robotické navařování 3D struktur
mikroMIG/MAG**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: ŠTĚPÁN POTŮČEK

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. PAVEL ROHAN, Ph.D.

ODBORNÝ ASISTENT: Ing. JAKUB KARMÁČEK

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojího inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Potůček** Jméno: **Štěpán** Osobní číslo: **501231**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Robotické navařování 3D struktur mikroMIG/MAG

Název bakalářské práce anglicky:

Robotic welding of 3D microMIG/MAG structures

Pokyny pro vypracování:

Provést literární rešerši na téma MIG/MAG navařování se zaměřením na tenké přídavné materiály
Seznámit se s navařováním 3D struktur metodou WAAM, seznámit se s programováním kolaborativního robota ABB.
Navařit 3D zkušební návary. Charakterizovat navařenou součást a materiál

Seznam doporučené literatury:

FRAZIER, William E. Metal Additive Manufacturing: A Review: A Review. Journal of Materials Engineering and Performance. 2014, 23(6), 1917-1928. ISSN 1544-1024. Dostupné z: doi:10.1007/s11665-014-0958-z
HOEFER, K., A. HAELSIG a P. MAYR. Arc-based additive manufacturing of steel components—comparison of wire- and powder-based variants. Welding in the World. 2018, 62(2), 243-247. ISSN 1878-6669. Dostupné z: doi:10.1007/s40194-017-0527-9
BUSACHI, Alessandro, John ERKOYUNCU, Paul COLEGROVE, Filomeno MARTINA a Jialuo DING. Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications. Procedia CIRP. 2015, 37, 48-53. ISSN 2212-8271. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.085

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Rohan, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Ing. Jakub Karmáček ústav strojírenské technologie FS

Datum zadání bakalářské práce: **05.04.2024**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2024**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2024**

Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

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

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

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat zejména svému vedoucímu práce, Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D., za vstřícné, zodpovědné a trpělivé vedení mé práce, a konzultantu Ing. Jakubu Karmáčkovi, za veškerou pomoc při práci v prostorách laboratoří a za čas, který mi věnoval. Velké díky patří i Ústavu Strojírenské Technologie za zapůjčení prostor laboratoří a vybavení potřebného pro experimentální část.

Děkuji také své rodině, za podporu a zázemí, při mém studiu a tvorbě této práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou Robotického navařování a optimalizací jeho parametrů. Teoretická část se věnuje svařování metodou MIG/MAG se zaměřením na tenké přídavné materiály, aditivní technologii WAAM a kolaborativním robotům, při této technologii využívaným. Experimentální část se zabývá volbou vhodných parametrů pro technologii WAAM takových, aby výsledný segment vykazoval co nejmenší tloušťku stěny. Během navařování jsou monitorovány hodnoty svařovacího proudu, napětí a rychlosti posuvu drátu přídavného materiálu. U vzorků je hodnocena geometrie a mikrostruktura. Poznatky jsou aplikovány při výrobě finálního segmentu.

Název diplomové práce: Robotické navařování 3D struktur mikroMIG/MAG

Autor práce: Štěpán Potůček

Vedoucí práce: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jakub Karmáček

Akademický rok: 2023/2024

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

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

Rozsah práce: 72 stránek, 7 tabulek, 55 obrázků

Klíčová slova: MIG, MAG, WAAM, Robotické navařování, Tloušťka stěny

Annotation

The bachelor's thesis deals with the issues of robotic welding and optimization of its parameters. The theoretical part is devoted to MIG/MAG welding with a focus on thin additional materials, WAAM technology and collaborative robots used in this technology. The experimental part deals with the choice of suitable parameters for the WAAM technology such that the segment has the smallest possible wall thickness. During welding, the values of the welding current, voltage and wire feed speed of the additional material are recorded. The geometry and microstructure of the samples are evaluated. The findings are used in the production of the final segment.

Title of the final thesis:	Robotic welding of 3D microMIG/MAG structures
Author:	Štěpán Potůček
Supervisor:	Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jakub Karmáček
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent:	72 pages, 7 tables, 55 pictures
Keywords:	MIG, MAG, WAAM, Robotic welding, Wall thickness

Obsah

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE	13
2. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG	14
2.1 Princip metody MIG/MAG svařování.....	14
2.1.1 MicroMIG.....	15
2.2 Zdroje svařovacího proudu.....	16
2.3 Tavné elektrody.....	17
2.4 Svařovací hořák	18
2.5 Ochranná atmosféra	20
2.5.1 Aktivní plyny.....	21
2.5.2 Inertní plyny	21
3. WAAM.....	23
3.1 Popis metody	23
3.2 Materiály	25
3.2.1 Titanové slitiny	25
3.2.2 Slitiny na bázi hliníku.....	25
3.2.3 Slitiny na bázi niklu	26
3.2.4 Korozivzdorné oceli	26
3.3 Využití.....	27
4. KOLABORATIVNÍ ROBOT	28
4.1 Konstrukce	28
4.1.1 Sériové uspořádání.....	28
4.1.2 Paralelní uspořádání.....	29
4.2 Pohon.....	29
4.2.1 Požadavky.....	30
4.3 Programování.....	31

4.4	Bezpečnost	31
4.5	Trh a Využití	33
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	35
5.1	Pracoviště	35
5.2	Použité přístroje	36
5.2.1	Svařovací zdroj Migatronic Sigma Galaxy 400	36
5.2.2	Struers Labotom-3	36
5.2.3	Struers CitoPress 1	37
5.2.4	Buehler Beta	37
5.2.5	Struers LectroPol – 5	38
5.3	Výroba vzorků	38
5.3.1	Přídavný materiál	39
5.3.2	Výchozí parametry	39
5.3.3	Parametry při zvyšování TS	39
5.3.4	Parametry při snižování svařovacího proudu I	40
5.4	Hodnocení vzorků a podmínky měření	41
5.5	Výsledky a diskuze	42
5.5.1	Vzorek č.1	42
5.5.2	Vzorek č.3	43
5.5.3	Vzorek č.4	43
5.5.4	Vzorek č.5	44
5.5.5	Vzorek č.6	46
5.5.6	Vzorek č.9	48
5.5.7	Vzorek č.10	50
5.5.8	Vzorek č.11	52
5.5.9	Vzorek č.14	54
5.6	Mikrostruktura	56

5.7 Výsledný segment.....	59
6. ZÁVĚR.....	62
Bibliografie	64
Seznam tabulek	69
Seznam obrázků	70
Seznam grafů.....	72

Seznam zkratek

<i>zkratka</i>	<i>vysvětlení</i>
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Zesilování světla stimulovanou emisí záření
MIG	Metal Inert Gas – Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře inertního plynu
MAG	Metal Active Gas – Svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře aktivního plynu
TS	Travel Speed – rychlost postupu svařování
WFS	Wire Feed speed – Rychlost podávání drátu
HDS	Heavy Duty Silver
WAAM	Wire Arc Additive Manufacturing
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Computer Numerical Control
CAD	Computer Aided Design
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
IAC	Intelligent Arc Control
s	Šířka housenky
h	Výška návaru

Seznam použité symboliky

I	[A]	elektrický proud
U	[V]	elektrické napětí
T	[°C]	teplota
t	[s]	čas

1. ÚVOD A CÍL PRÁCE

Technologie MIG/MAG svařování je dnes velmi rozšířená a hojně využívaná v řadě aplikací. Hlavní důvody jsou například nízké pořizovací náklady, spolehlivost a značná variabilita tohoto typu svařování. Své využití nenalezlo pouze u konvenčního spojování materiálů, ale také ve výrobě 3D struktur vzniklých vrstvením jednotlivých housenek na sebe. Je vhodné nejen pro ruční, ale také robotické navařování.

Typickým příkladem aplikace robotického navařování vícerozměrných struktur je technologie WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). Předností této technologie, oproti jiným aditivním technologiím pro zpracování kovů, jsou především nižší pořizovací a provozní náklady a výrazně vyšší rychlost depozice. Své využití tak našla ve zpracování svařitelných, těžko obrobitelných materiálů, nebo při výrobě velmi složitých dílů. Jednou z nevýhod této technologie je omezená přesnost vyráběných rozměrů.

Tento problém vede k neustálému vývoji technologie WAAM. Otázka zvýšení přesnosti je řešena postupným snižováním tloušťky stěn, a tudíž i přiblížením se konečným funkčním rozměrům. Použití přídavných materiálů menších průměrů usnadňuje volbu svařovacích parametrů. Jejich použitím se tak rozšiřují akceptovatelná parametrická okna.

Cílem této práce je stanovení vhodných podmínek pro technologii WAAM, za kterých bude možné vyrobit vzorek s přijatelně tenkou stěnou, bez defektů a s maximální spolehlivostí. Po optimalizaci těchto parametrů následuje, za jejich použití, výroba reprezentativního segmentu.

Teoretická část je věnována literární rešerši na téma MIG/MAG svařování se zaměřením na tenké přídavné materiály, technologii WAAM a v poslední části se zabývá tématem kolaborativních robotů.

V experimentální části jsou představena použitá pracoviště, přístroje a zařízení. Jsou zde popsány postupy úkonů vykonaných při práci v laboratořích. Nakonec jsou zde vyhodnoceny použité parametry s následným posouzením jejich použitelnosti pro technologii WAAM.

2. TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ MIG/MAG

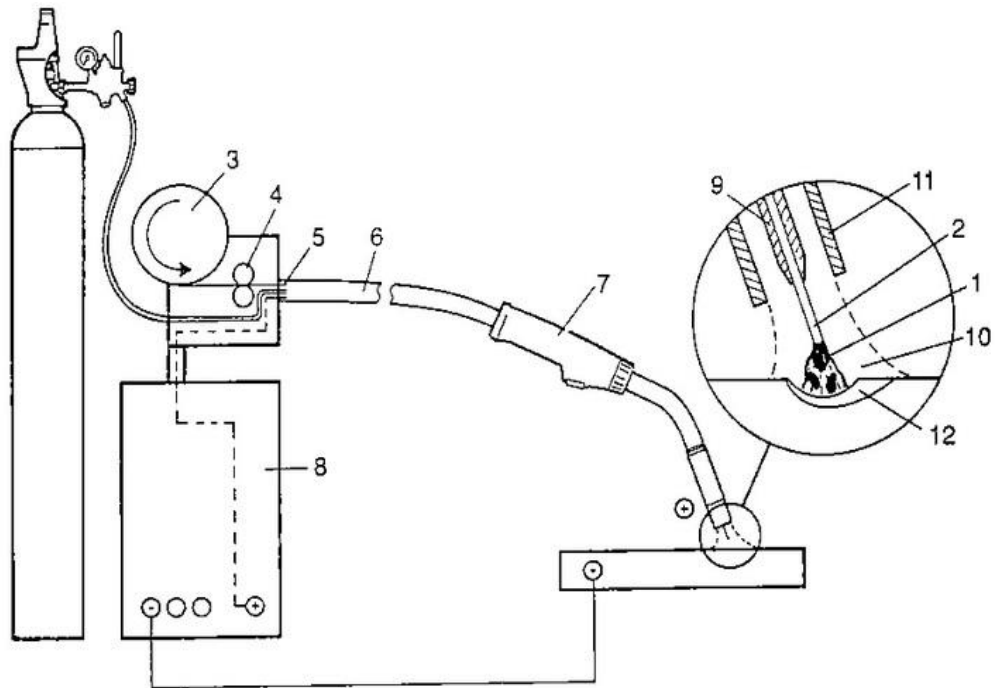
Svařování je technologie vytváření nerozebíratelných materiálových spojů. Tyto spoje se vyznačují těsností a nižší hmotností (vzhledem k použití šroubů a nýtů). Obecně se dá svařování rozdělit do dvou skupin: tavné svařování a tlakové svařování. Pro tavné svařování je při výběru zdroje tepelné energie celá řada možností. Používá se elektrický oblouk, plamen (kyslík+acetylen), LASER, či elektronový paprsek. U tlakového svařování se využívá působení tlaku, nebo tepla a tlaku k vzniku plastických deformací ve spojovaném materiálu. Využívají se metody odporového svařování, svařování třením, nebo difuzní svařování. [1] [2]

Metody MIG (Metal Inert Gas) a MAG (Metal Active Gas) se řadí mezi metody tavného svařování za použití elektrického oblouku jako zdroje tepla. U obou metod se svařování provádí za působení ochranné atmosféry, která má za úkol chránit svarovou lázeň a udržovat stabilitu elektrického oblouku. Kvalitu svaru ovlivňuje řada parametrů, jako jsou např.: Svařovací proud I, Napětí U, rychlost postupu svařování TS (Travel speed), rychlost podávání drátu WFS (Wire feed speed), Rychlost proudění plynů ochranné atmosféry a její složení a samozřejmě složení používaných materiálů. [1] [2]

2.1 Princip metody MIG/MAG svařování

Zdrojem tepla je zde elektrický oblouk, který vzniká mezi svařovaným materiálem a tavnou elektrodou. Elektroda se používá v podobě holého drátu kontinuálně dodávána do místa svaru. Rychlost podávání elektrody je důležitým parametrem zejména pro délku elektrického oblouku, a tudíž i pro kvalitu svaru. Díky tomuto automatickému podávání elektrody, která je pomocí kladek odmotávána z cívky, a často ručnímu vedení hořáku, jsou metody označovány za poloautomatické. Svarovou lázeň a spojovaný materiál je třeba chránit před přístupem kyslíku a minimalizovat tak případnou oxidaci. Z toho důvodu velkou roli hraje ochranný plyn, který je přiváděn hubicí svařovací pistole, okolo dodávané elektrody. Elektrická energie je přiváděna ze zdroje stejnosměrného proudu, pomocí kontaktní špičky ve svařovacím hořáku, kterým elektroda prochází. Špička, a tudíž i elektroda, je ve většině případů připojena ke kladnému

pólu zdroje. Svařovaný materiál je pak připojen k zápornému pólu zdroje. Výbojem elektrického oblouku je pak propojen celý obvod (Obrázek 1). [1] [2]



Obrázek 1 : Popis metody svařování MIG/MAG [3]

1. elektrický oblouk, 2. elektroda, 3. zásobník elektrody, 4. automatický podavač, 5. spojka, 6. hořákový kabel, 7. svařovací hořák, 8. zdroj svařovacího proudu, 9. kontaktní špička, 10. ochranná atmosféra, 11. plynová hubice, 12. svarová lázeň

2.1.1 MicroMIG

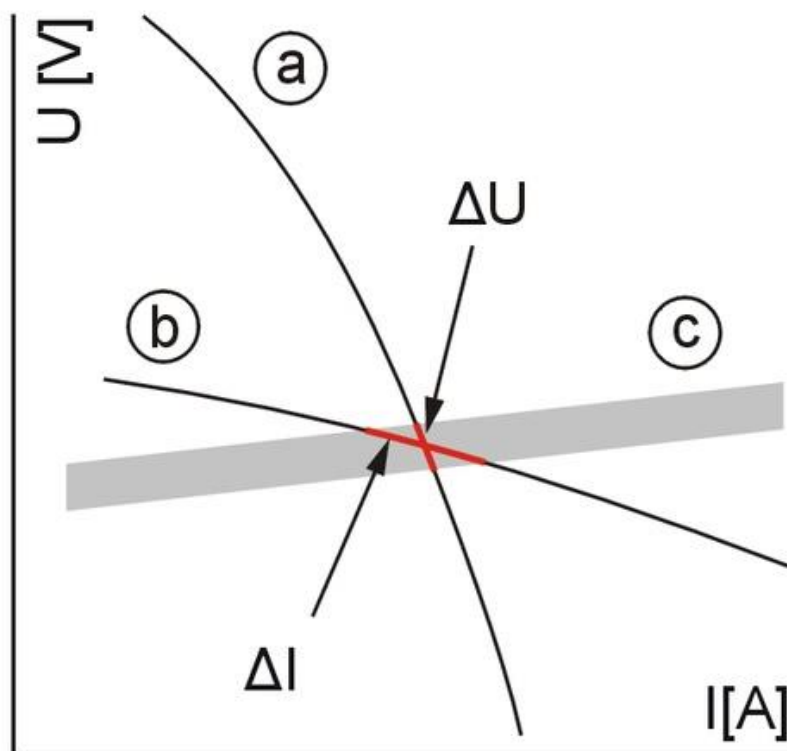
Z hlediska názvosloví se v případě této práce jedná o svařování běžnými metodami přestupu svarového kovu do tavné lázně (zkrat), ale i registrovaným způsobem IAC (Migatronic, Holandsko), při použití přídavného materiálu o průměru menším než 0,8 mm. Tato technologie bude v prezentované práci nazývána mikroMIG (s malým m). V technické praxi se lze setkat i s obchodním názvem MicroMIG (SKS, Německo), určeným pro svařování s minimální přenesenou tepelnou energií. Hlavní rozdíl mezi konvenční metodou MIG a metodou MicroMIG (SKS) je ve způsobu podávání. Z důvodu problematického přenosu dostatečného tepelného výkonu do místa svaru je teplo potřebné k roztavení základního materiálu řízeno rychlým sledem pulzů. Proces se

rozděluje na dvě fáze. Během první, horké, fáze je teplo dodáváno hořením elektrického oblouku mezi elektrodou a základním materiálem. Během této fáze je drát přiváděn do místa svaru, a dochází k výboji mezi ním a základním materiálem. Druhá fáze je fáze zkratu, během které je teplo odváděno z místa svaru do přilehlých míst (tepelně ovlivněné oblasti). V první fázi dochází k vytváření kapky roztaveného kovu přídatného materiálu, zkrat nastane ve chvíli, kdy se kapka ponoří do svarové lázně. V tento moment se obrátí směr podávání drátu a kapka se mechanicky oddělí od elektrody. Po dosažení nastavené délky oblouku se směr opět obrátí do dopředného směru a celý cyklus se opakuje. [4]

2.2 Zdroje svařovacího proudu

Při svařování metodami MIG a MAG jsou využívány zdroje stejnosměrného proudu s konstantním proudem. Dnes je síťové napětí (120 V až 400 V) ve zdroji pomocí invertoru změněno na svařovací napětí. Tyto zdroje jsou řízené tranzistory, kterými je měněna frekvence proudu. Jejich účinnost se pohybuje okolo 90 %. Historicky bylo nejstarším zdrojem dynamo, které generovalo stejnosměrný proud a disponovalo strmou statickou charakteristikou. Dalším vývojovým stupněm byla redukce zdrojového napětí v transformátoru. Ten je napájen ze zdroje střídavého napětí a funguje na principu elektromagnetické indukce mezi primárním a sekundárním vinutím. Invertorům historicky přecházely ještě usměrňovače, které jsou kombinací transformátorů s tyristory. Tyristory slouží k usměrnění napětí v sekundárním vinutí. [5]

Typicky mívají zdroje plochou statickou charakteristiku a dávají 2-5 V/100 A. V závislosti na ideální délce oblouku se nastaví velikost napětí. Rychlost posuvu drátu elektrody a velikost svařovacího proudu jsou si přímo úměrné. Pokud jsou zmíněné veličiny správně nastaveny, není potřeba žádná korekce v průběhu svařovacího procesu. Díky tomu, že metody disponují automatickým podavačem drátu jsou odchylky, vzhledem k ideální vzdálenosti mezi elektrodou a materiálem, kompenzovány automatickým okamžitým zvýšením, nebo snížením svařovacího proudu. Je tomu tak právě díky ploché statické charakteristice (Obrázek 2), která reaguje na náhlé zvýšení odporu zvýšením napětí při konstantním proudu. [1] [2] [6]



Obrázek 2 : Statické charakteristiky svařovacích proudů [7]
 strmá charakteristika, b) plochá charakteristika, c) pracovní oblast

2.3 Tavné elektrody

MIG a MAG metody jsou používány pro svařování nízkolegovaných a korozivzdorných ocelí, hliníku a jeho slitin, mědi a jejích slitin a niklu a jeho slitin. Jedním z hlavních požadavků na přídatný materiál, je podobnost chemických a mechanických vlastností se základním materiálem. Průměry používaných drátů se pohybují mezi 0,6 mm a 2,4 mm. [2] [6]

V případě použití plného drátu je přídatný materiál dodáván v podobě cívek, které váží 10 kg až 200 kg. Důležitým požadavkem na tyto materiály je kvalita povrchu, aby nedocházelo k otěru, případně přetržení drátu při svařování, nebo ucpávání svařovacího hořáku. Bývají také často potaženy tenkou vrstvou mědi, pro její dobré kluzné vlastnosti, ale opět musí být tato vrstva dobře stabilizovaná na povrchu, aby se tímto řešením ještě nezhoršil problém, ucpáváním průvlaků. [2] [6]

Je možné použít i elektrody plněné. Skládají se z konvenčního kovového obalu a výplně, v podobě prášku, která ovlivňuje prostředí při svařování nebo vlastnosti samotného svaru. Průměry těchto elektrod však začínají až na 0,8 mm. Jako náplň je používán hořčík a křemík pro snížení vlivu oxidace, legující prvky jako nikl, chrom, nebo molybden a struskotvorné a stabilizační přísady. Je také možné svařování bez použití externě přiváděných plynů, za účelem vytvoření ochranné atmosféry, lze ji totiž vytvořit opět přísadami do náplně elektrody. Pozitiva plněných elektrod jsou zejména vyšší účinnost, nižší riziko nedostatečného provaření (vztaženo k použití plného drátu jako elektrody). Mezi hlavní negativa patří vyšší cena materiálu, v případě použití struskotvorných přísad je nutné použít dokončovací procesy povrchu, nutnost použití vyšších svařovacích proudů (opět vztaženo vzhledem k použití plného drátu). [2] [6]

2.4 Svařovací hořák

Konstrukční požadavky na tuto součást (Obrázek 3) jsou poměrně vysoké. Musí vykazovat dostatečnou mechanickou odolnost pro práci v náročném prostředí a zároveň musí být lehká a menších rozměrů pro snadnou manipulaci. Důležitou roli hraje také ergonomie, aby s ní byl pracovník schopen vykonávat práci dlouhodobě. Do místa svaru přivádí, jak samotnou elektrodu a svařovací proud, tak i ochrannou atmosféru. Dala by se tedy označit za jednu z nejdůležitějších součástí procesu. [1] [6]

Tepelné namáhání hraje velkou roli, zejména při použití vyšších svařovacích proudů (300 A až 500 A). Proto je často potřebné přídavné chlazení vodou. Ta má samostatný oběh a chladí kontaktní špičku, samotný kabel a plynovou hubici. Oběh většinou obsahuje zásobník chladicí vody, čerpadlo a chladič s ventilátorem. [1] [6]

Kontaktní špičky jsou namáhané spotřební součásti MIG/MAG svařovacích hořáků. Rozdíl mezi průměrem otvoru špičky a drátovou elektrodou je od 0,2 do 0,5 mm, tudíž je kladen velký důraz na přesnost a správnou volbu materiálu. Nejčastěji používané materiály jsou:

E-Cu

Elektrolytická měď má velmi dobrou vodivost, nicméně se nevyznačuje vysokou mechanickou odolností a měkne již při 260 °C, takže se hodí pro použití nižších svařovacích proudů. Výhodou je cenová dostupnost, oproti materiálovým alternativám. [8]

CuCrZr

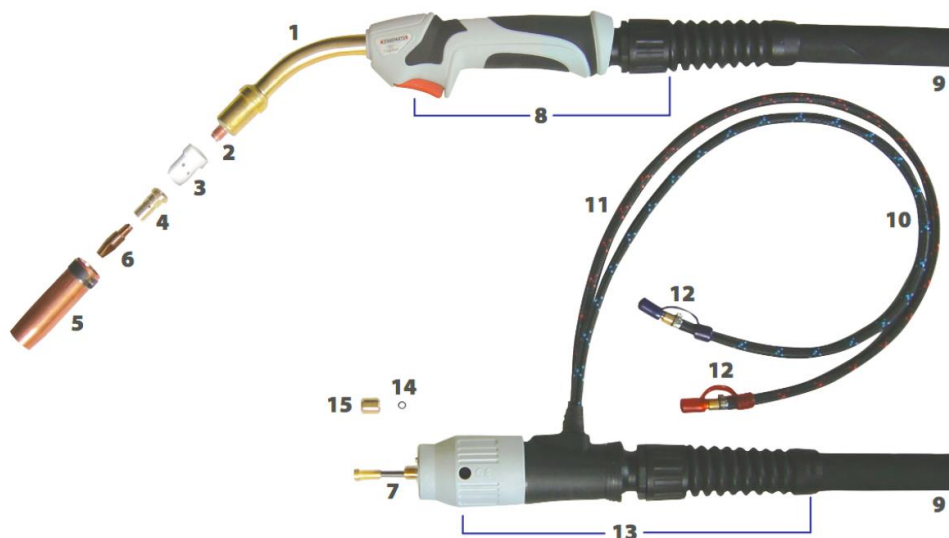
Je to měď legovaná chromem a zirkoniem, tudíž vykazuje mnohem větší mechanickou odolnost než elektrolytická měď. Vodivost je naopak nižší, ale pro většinu aplikací dostačující. Odolává teplotám až 500 °C a používá se pro aplikace s použitím středního, až vysokého svařovacího proudu, často s přídavným chlazením. Díky vyšší životnosti oproti měděným jsou špičky z tohoto materiálu využívány v aplikacích robotického svařování. [8]

HDS (Heavy duty silver)

Tyto průvlaky jsou používány pro metody s vysokým proudovým zatížením a chlazené pouze vzduchem. Vnitřní jádro tohoto průvlaku tvoří disperzně kalená měď s povrchovou úpravou stříbrem, díky které se významně sníží přilnavost rozstříku. Vyznačuje se velkou tvrdostí a odolností vůči teplotám do 800 °C. Kontaktní špičky z HDS jsou nejdražší variantou. Využívají se ve velkosériových, vysokonapěťových, robotických svařovacích procesech díky své vysoké životnosti. [8]

Korozivzdorná ocel X8CrNi18-9

Tento typ kontaktních špiček se využívá výhradně v laserové optice, v kombinaci s měděným přídavným materiálem. Ocel má nízkou vodivost, ale vysokou mechanickou odolnost a odolnost vůči opotřebení. [8]



Obrázek 3 : Popis svařovacího hořáku MIG/MAG [9]

1. nástavec, 2. izolační podložka, 3. difuzor, 4. adaptér pro různé typy průvlaků, 5. plynová tryska, 6. kontaktní průvlak, 7. vložka chlazení, 8. rukojeť se spínačem, 9. hadice ochranného plynu, 10. hadice pro přívod chladicí kapaliny, 11. hadice pro odvod chladicí kapaliny, 12. ventil chladicí kapaliny, 13. těleso chlazení, 14. O-kroužek, 15. matice pro uchycení vložky

2.5 Ochranná atmosféra

Hlavní funkcí ochranné atmosféry je ochrana místa svaru před kontaktem se vzduchem. Největším problémem je kyslík, který by při kontaktu s roztaveným kovem způsoboval oxidaci materiálu. Dalším problémem je dusík, jehož rozpustnost v roztaveném kovu je vyšší než v kovu v pevném skupenství. To vede k vyloučení dusíku při tuhnutí a následném vytvoření pórů. Dusík je příčinou tvorby nitridů a jejich vysoký obsah může mít také za následek křehkost výsledného svaru. Ochranná atmosféra má také velký vliv na hloubku průvaru a tvar kořenu svaru. Hlavním rozdílem mezi metodami MIG a MAG je v použitém typu ochranných plynů. U metody MIG se jedná o inertní plyny, které nijak neovlivňují chemické reakce při tvoření svaru (odtud zkratka Metal Inert Gas). Metoda MAG naopak využívá plynů, které se aktivně účastní reakce prvků ve svarové lázni (odtud zkratka Metal Active Gas). [6]

Objemový průtok plynu je také důležité zvolit správně. Volí se úměrně použitému svařovacímu proudu mezi 10 l a 20 l za minutu pro oceli. Při svařování například hliníku je volen ještě větší průtok. [1]

2.5.1 Aktivní plyny

CO₂

Čistý oxid uhličitý je historicky jednou z prvních ochranných atmosfér a dnes se ve výrobě již přibližně 30 let nepoužívá. Jedná se o levný plyn s vlastnostmi, které jsou akceptovatelné jen pro svařování krátkým obloukem nenáročných a pohledově nesledovaných konstrukcí. Své využití našel při svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Mezi hlavní nevýhody patří velký rozstřík a hrubá kresba při svařovacím procesu a fakt, že podporuje tvorbu karbidů a oxidů ve svařovaném materiálu, což výrazně zhoršuje mechanické vlastnosti. V ochranné atmosféře CO₂ lze také velmi obtížně dosáhnout sprchového přenosu kovu do tavné lázně. [6] [10]

Argon + CO₂

Argon je jeden z nejvíce používaných ochranných plynů. Sám o sobě je plynem inertním, a proto je vhodný pro svařování hliníku a korozivzdorné oceli. Pro MAG svařování se používá v kombinaci s CO₂. Podíl CO₂ může být až 25 %, při vyšším podílu by směs ztratila své výhody oproti čistému CO₂. Využívá se ke svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Při obsahu do 2 % CO₂ i pro vysokolegované austenitické chromniklové oceli. [6] [10]

Argon + O₂

Malý podíl kyslíku napomáhá stabilizaci elektrického oblouku, ale jeho podíl nesmí překročit 5 %. Tato směs se používá pro svařování vysokolegovaných ocelí. [6] [10]

2.5.2 Inertní plyny

Argon

Jednoatomový, bezbarvý plyn, bez chuti a zápachu. Je hustší, než vzduch a tvoří asi 1 % hmotnosti zemské atmosféry. Získává se destilací kapalného

vzduchu. Jak bylo již řečeno Argon se nejvíce využívá při svařování hliníku a korozivzdorných ocelí. Je možné ale i svařování měděných slitin a titanu. [11] [10]

Argon + Helium

Helium v kombinaci s argonem zvyšuje teplotu elektrického oblouku a napomáhá hloubce provaření. Používá se například u tlustostěnných hliníkových dílů. Touto směsí je možné svařovat díly ze stejného materiálu, jako čistým argonem. Podíl hélia ve směsi může být až 95 %, ale nejběžnější je směs s podílem 30 % hélia. Nevýhody hélia jsou jednoznačně vysoká cena a nízká hustota. [6] [10]

3. WAAM

WAAM je zkratka pro Wire Arc Additive Manufacturing, což je aditivní technologie pro výrobu kovových součástí nanášených vrstvou po vrstvě. Tato metoda se vyznačuje mimořádně vysokou produktivitou ($4-9 \text{ kg}\cdot\text{hod}^{-1}$), oproti alternativám, jako práškové slinování ($50 \text{ g}\cdot\text{hod}^{-1}$). Další výhodou jsou například nižší cena. Velikost vyráběných součástí je omezena pouze velikostí pracovního prostoru zařízení. Z hlediska složitosti je možné vyrobit značně náročné součásti. Snížená spotřeba materiálu a jeho vysoké využití z hlediska pevnostních poměrů je také mnohem lépe dosažitelné WAAM metodou oproti konvenčnímu obrábění. Mezi hlavní nevýhody patří zbytkové napětí a deformace způsobené ochladnutím materiálu, nečistota povrchu a nižší stupeň přesnosti. Větší zastoupení WAAM ve výrobním procesu, by pozitivně ovlivnilo automatizaci, a nároky na bezpečnost a fyzickou náročnost obsluhy. [12] [13] [14]

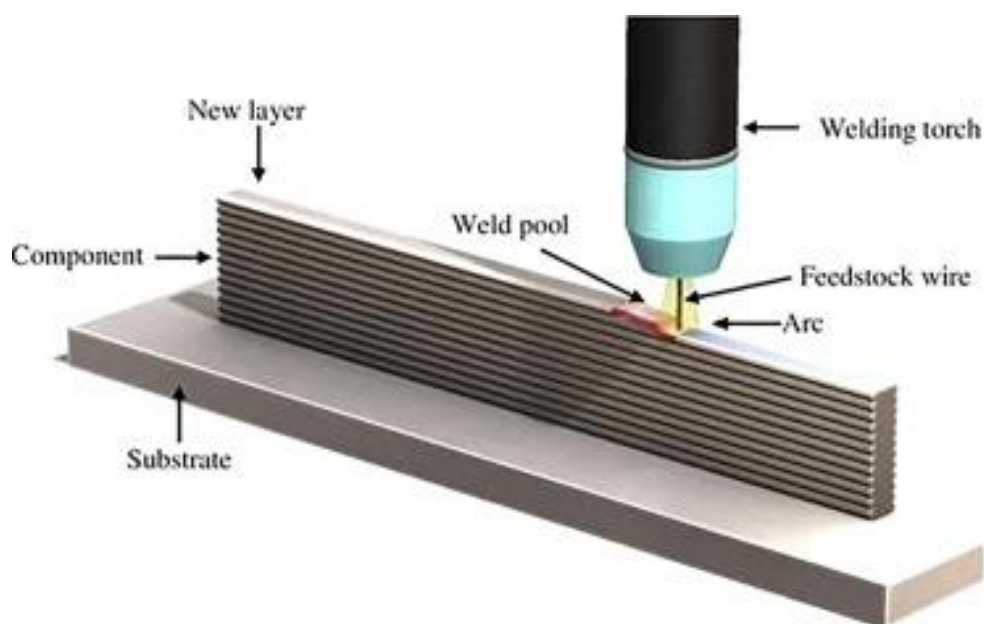
V současné době je snaha o zmenšení výrobků zhotovených metodou WAAM, známé jako μ -WAAM, která spojuje výhody WAAM technologie a práškového slinování. Používá se přídatný materiál v podobě drátu s průměrem 0,25 mm a metody microMIG (viz MicroMIG 2.1.1). Hlavní výhodou je zmenšení vyráběných součástí a zvýšení přesnosti. Potýká se ale s problémy spojenými s přenosem tepla. První je se zaručením dostatečné rychlosti chladnutí malých výrobků. A druhý je se samotným přenosem dostatečného tepelného výkonu do místa svaru, pomocí malého průměru drátu a zaručení dostatečného metalurgického spojení svarů. Dále není možné použít konvenční svařovací hořáky, protože ty pracují s elektrodami od 0,6 mm a konvenční svařovací zdroje nejsou schopny zajistit příhodnou Ampér-Voltovou charakteristiku pro takto malý výkon. [15]

3.1 Popis metody

Při robotickém navařování kovů metodou WAAM je možné využít různé druhy přenosu kovu do tavné lázně. Je možné využít například zkratový přenos, nebo přenos modifikovanou vlnou. Hardware modifikace je realizována jako technologie MicroMIG SKS (viz 2.1.1 MicroMIG) nebo CMT (Fronius).

Charakteristická pro ni je detekce zkratu s následným otočením směru podávání přídatného materiálu. Řízené vytažení drátu z tavné lázně ukončí zkratovou fází svařování a snižuje tak vnesené teplo do svaru. Při softwarovém řešení je popsán proces realizován elektronicky, tzn. zkratový proud je vypnut a znovuzapálení oblouku se děje elektronicky pulzem, nebo dotykem elektrody se základním materiálem. Díky tomuto je metoda schopná stabilnějšího, méně tepelně zatěžujícího procesu s nižším rozstříkáním oproti standardnímu obloukovému přenosu. Software modifikace je realizována monitoringem průběhu svařovacích parametrů a jejich úprava v reálném čase jako např. IAC Migatronic (viz 5.2.1) [16]

K navařování se využívá konvenčních svařovacích aparátů pro MIG a MAG svařování. Pohyb svařovacího hořáku ovšem zajišťuje CNC (Computer Numerical Control) robotické rameno. Na začátku výrobního procesu je třeba vymodelovat 3D CAD (Computer Aided Design) model vyráběné součásti. Tento model je následně rozdělen do 2D vrstev, nejčastěji pomocí externího softwaru. Následně je, také pomocí softwaru, určena optimální dráha hořáku. Je také nutné určit další veličiny, jako jsou svařovací parametry (rychlost posuvu elektrody, svařovací proud, V-A charakteristika, rychlost svařování atd.) a tloušťku vrstev. Jakmile má aparát všechny tyto potřebné informace, je připraven k výrobě. Výsledná součást je zhotovena postupným nanášením svarových housenek na sebe nebo vedle sebe. Výška a šířka jedné housenky se pohybuje mezi 1,5 a 4 mm. Po výrobě může následovat další tepelné zpracování, nebo povrchová úprava, dle aplikace a požadavků na výrobek. Obrázek 4 zachycuje schéma WAAM. [12] [14]



Obrázek 4 : Schéma WAAM [17]

3.2 Materiály

Používají se stejné přídavné materiály jako při konvenčním svařování, v podobě kovových drátů, což technologii omezuje na elektricky vodivé, dostatečně tažné materiály, ze kterých bude možno přídavný materiál zhotovit. Další výběr materiálů je ovlivněn konstrukčními požadavky a mechanickými vlastnostmi. [12] [18]

3.2.1 Titanové slitiny

Titanové slitiny jsou v oblasti WAAM hodně využívány (Obrázek 5), kvůli jejich vysokému poměru pevnosti a hmotnosti, špatné obrobiteľnosti a vysoké ceně. Titan má skvělou odolnost vůči korozi a poměr hmotnosti ku pevnosti. Je také biologicky inertní, takže se hodí i pro medicínské aplikace. Výroba titanových výrobků aditivními technologiemi by řadu těchto problémů mohla pozitivně ovlivnit. Titanové slitiny mají rychlost nanášení do $2 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$. WAAM nanesený titan odolává cyklickému zatížení o řád vyššímu než tvářená slitina. Bohužel vykazuje značnou anizotropii pevnosti v tahu a tažnosti. Lze ji odstranit válcováním a následným tepelným zpracováním. [12] [18] [19]

3.2.2 Slitiny na bázi hliníku

Ze slitin hliníku se vyrábí hlavně tenkostěnné, složité součásti, kde nanášení takových dílů vychází jako ekonomicky přijatelnější varianta oproti obrábění. Hliník má také dobrou odolnost vůči korozi, svou hustotou se řadí mezi

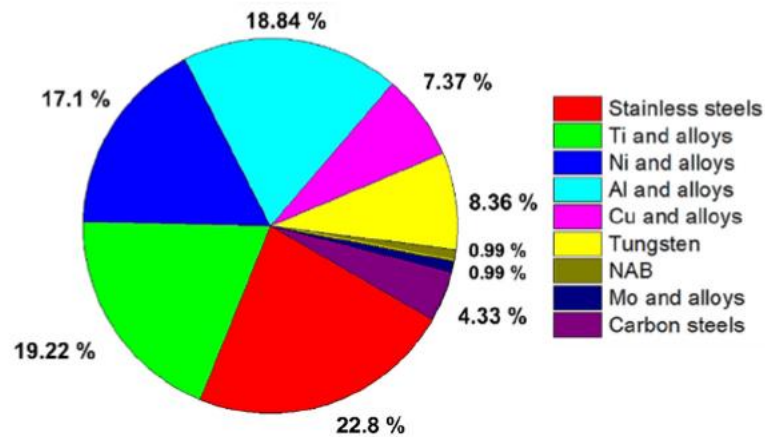
lehčí kovy a má dobrou i elektrickou a tepelnou vodivost. Mechanické vlastnosti nanášených hliníkových výrobků jsou však horší, oproti obrobeným. Je tomu tak z důvodu obtížného svařování hliníku a jeho slitin bez defektů, jako je například pórovitost. Pro zlepšení mechanických vlastností a zjemnění mikrostruktury je nutné následné tepelné zpracování. Po výrobním procesu také vykazuje velké deformace, kvůli svému relativně vysokému součiniteli tepelné roztažnosti. Tento problém by byl možný minimalizovat zmenšením tepelného výkonu použitého při výrobě na přijatelné minimum. Hlavními přísadami do slitin hliníku využívaných při WAAM je měď, hořčík a křemík. [12] [18]

3.2.3 Slitiny na bázi niklu

Slitiny niklu si udržují svou pevnost i během tepelného namáhání. Jejich použití v rámci WAAM je odůvodněno hlavně vysokými výrobními náklady, při výrobě součástí z niklu konvenčními metodami. WAAM nanášené díly mají srovnatelné mechanické vlastnosti s díly vyráběnými tvářením nebo litím slitin niklu. Po výrobě jsou ale přítomna zbytková napětí, která také vedou k deformacím. Lze je snížit tepelným zpracováním. [12] [18] [19]

3.2.4 Korozivzdorné oceli

Tyto oceli disponují zejména tažností a korozní odolností, navíc se ukazuje, že je možné pomocí WAAM vyrobit ocelové díly s příznivou mikrostrukturou a mechanickými vlastnostmi. Hlavními faktory ovlivňujícími kvalitu výrobků je průběh ohřevu a chladnutí, během procesu a chemické složení samotného materiálu. Součásti nanášené WAAM jsou mírně anizotropní, což lze napravit vhodným tepelným zpracováním a dosáhnout tak vlastností, které se vyrovnají konvenčně vyráběným dílům. [12] [18]



Obrázek 5 : Podíl využití materiálu v procesu WAAM [18]

3.3 Využití

3D tisk metodou WAAM našel uplatnění v řadě průmyslových odvětví, jak ve výrobě, tak v opravárenství. V letectví je využíváno k práci s titanem a jeho slitinami, převážně z důvodu mnohem vyššího využití materiálu, protože výroba odlehčovaných dílů konvenčními metodami je z tohoto hlediska značně neekonomická. V automobilovém průmyslu se pomocí WAAM vyrábějí ocelové díly motorů a výfukových systémů, u kterých je požadována vysoká pevnost a odolnost. V energetice své zastoupení našla ve výrobě náhradních dílů pro ropné rafinerie a větrné elektrárny. Slitiny niklu jsou pak využívány například v plynových turbínách a proudových motorech. [20]

Mezi hlavní výhody se řadí možnost výroby složitých i rozměrných součástí s velkou variabilitou např. tloušťky stěn. Toto je velká výhoda zejména z ekonomického hlediska, kde se pomocí konstrukčního řešení dílů šetří čas potřebný k montáži a hospodárnost, což se týče využití materiálu je také vysoká. To má příznivý dopad zejména na životní prostředí. Nabízí také širokou škálu vlastností materiálu používaných při WAAM, které jsou omezeny v podstatě jen svažitelností. [21]

I přes tyto výhody se vyskytuje řada nevýhod. Díly jsou vyráběny se širokým tolerančním polem a nemožností výroby funkčních povrchů. Je tedy nutný nějaký dokončovací proces pro získání funkčních povrchů s požadovanými tolerancemi a drsnostmi. Jedná se také o relativně složitý proces, náročný na kvalifikaci obsluhy, zejména ve znalostech svařování a programování, pro získání funkčních dílů bez vad. [21]

4. KOLABORATIVNÍ ROBOT

Průmyslové roboty jsou hojně zařazovány do výrobního procesu, z důvodu automatizace a modernizace výroby, zvýšení produktivity a snížení nákladů výroby. Lze je rozdělovat podle konstrukce, funkce, aplikačních možností, úrovně řízení, atd.

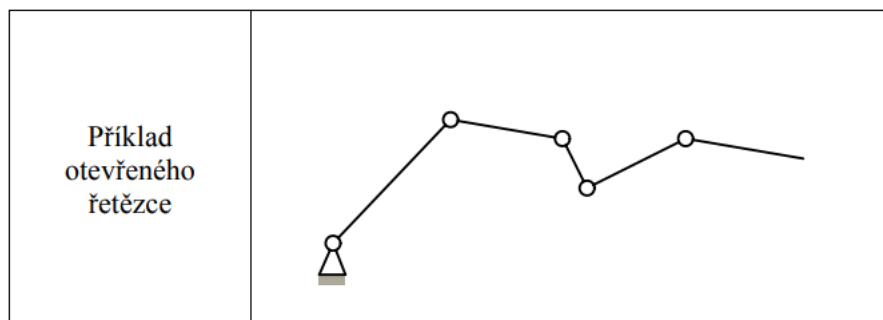
Kolaborativní robot se vyznačuje zejména tím, že je vhodný k přímé spolupráci s člověkem a ve většině případů není třeba ochranná klec, která by vymezovala jeho pracovní prostor. Tímto má mnohem menší zástavbovou plochu než běžný průmyslový robot. [22]

4.1 Konstrukce

Průmyslové roboty jsou realizovány pomocí kinematických řetězců rotačních a translačních kinematických dvojic. Řetězce se pak skládají z jednotlivých členů a kloubů a jsou řazeny do dvou základních uspořádání:

4.1.1 Sériové uspořádání

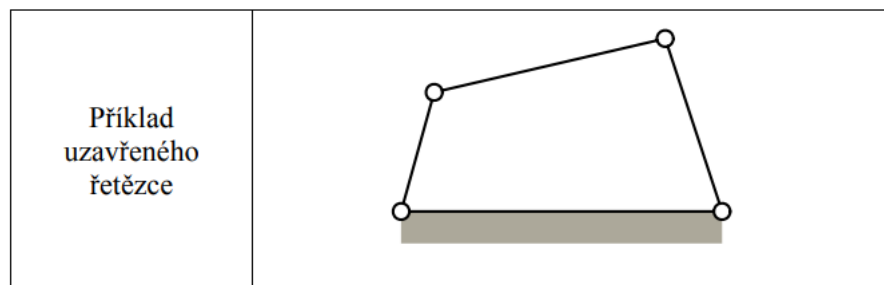
Kinematické dvojice jsou řazeny do otevřeného řetězce za sebou (Obrázek 6). Je častěji používáno než paralelní, z důvodu jednodušší konstrukce a relativně snadné modifikace. Má také větší pracovní prostor ve srovnání se stejně velkým, paralelně uspořádaným robotem. Sériové uspořádání má ovšem i řadu nevýhod. Ve srovnání s paralelním má nižší tuhost, není možné docílit tak vysokých rychlostí pohybu, jsou náchylné na dynamické kmitání a jejich nepřesnost roste s délkou ramene a jeho vyložení. Otázka přesnosti je v prezentované práci zanedbatelná, protože se jedná o chyby v řádu setin mm. [23] [24]



Obrázek 6 : Kinematické schéma sériového uspořádání [24]

4.1.2 Paralelní uspořádání

Pro tuto strukturu uspořádání je typický zejména uzavřený kinematický řetězec (Obrázek 7). Používá se konstrukce se třemi, nebo šesti vzpěrami. Tímto dosáhneme vyšší tuhosti a přesnosti polohování robotu. Je možné uskutečnit konstrukci velmi lehkou a dosáhnout tak velmi vysokých posuvů, protože se nepotýkáme se setrvačnými silami a problémy s vyložení, jako u sériového uspořádání. Navzdory těmto benefitům, které získáme použitím více vzpěr, vzniká i řada nevýhod. V porovnání se sériovou strukturou je manipulační prostor robota menší, má menší i nosnost a programování a plánování pohybů je mnohem komplexnější, z důvodu i možné kolize mezi vzpěrami. Toto uspořádání tudíž není přímým konkurentem sériového a jde spíše o vhodnější řešení u některých aplikací. Obě konstrukce se tak doplňují při použití v průmyslu. [23] [24]



Obrázek 7 : Kinematické schéma paralelního uspořádání [24]

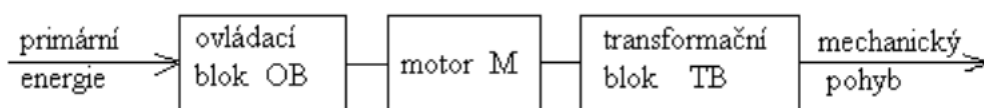
4.2 Pohon

Účelem pohonu u průmyslových robotů je přeměna dodávané energie na mechanický pohyb samotného robotu. Pohon se skládá z ovládacího bloku, motoru a transformačního bloku (Obrázek 8). Ovládací blok má za úkol distribuci energie do motoru v ideálním množství. [22] [24]

Motor je nejdůležitější částí celého řetězce, protože zajišťuje samotnou přeměnu energie. Dle druhu energie přiváděného na vstup motoru rozlišujeme elektrické, tekutinové a kombinované motory. Elektrické motory mají v dnešních robotech nejširší zastoupení, díky nástupu nových typů kinematických převodů (např. speciální typy ozubení), které se hodily pro jejich formu výstupní energie (točivá). Tekutinové motory se dělí na hydromotory a pneumomotory. Hydraulické motory našli své uplatnění v aplikacích s vysokými pracovními tlaky. Pneumatické jsou využívány u manipulátorů s nižší nosností a aplikací

s požadavkem zdravotní nezávadnosti (např. potravinářství). Z počátku byly více využívány právě tekutinové motory, díky jednodušší konstrukci a nepotřebnosti transformačního bloku, protože jejich výstup může být přímočarý pohyb. Kombinované motory jsou chápány jako aplikace, kde jsou využívány oba typy motorů v rámci jednoho manipulátoru. [22] [24]

Transformační blok je zařízení, které upravuje výstupní energii z motoru tak, aby měla požadovaný charakter, pro daný výstup pohybové jednotky. Tyto převody mají buď mechanický, magnetický, nebo elektrický charakter. Nejrozšířenější je mechanický druh převodu a je realizován pomocí ozubení, vaček, řetězů apod. V tomto případě má velký význam využití ozubení v harmonických převodovkách, které jsou ideální pro transformaci rotačních parametrů elektrických motorů. Další dva typy jsou využívány zejména pro speciální aplikace v nebezpečných prostředích, vakuu, prostředích s vysokými tlaky apod. [22] [24]



Obrázek 8 : Blokové schéma pohonu průmyslového robota [22]

4.2.1 Požadavky

Cílem pohonné jednotky robota je zajistit plynulý a klidný průběh výkonu a zajištění vysoké přesnosti při polohování segmentů. Z těchto důvodů jsou na pohon kladeny tyto požadavky:

Plynulý pohyb

Hlavním důvodem tohoto požadavku je docílit minimalizace rázů, které negativně ovlivňují namáhání celé konstrukce a její přesnost. Dalším je bezpečnost. Při manipulaci s břemenem pohybujícím se plynule je robot schopen zajistit jeho bezpečné uchopení i při nižší úchopné síle. [22] [24]

Přesnost polohování

Tento požadavek je otázkou zejména tuhosti kinematického uspořádání. Pokud je tato skutečnost zanedbána, pak je kladen přímo na pohon. Ovládání

polohy úzce souvisí s řízením pohybu. Toto řízení probíhá většinou se zpětnou vazbou tudíž se jedná o tzv. uzavřený systém. [22] [24]

Tuhost

Tuhost pohonu je charakterizována, jako vlastnost udržení si koncové polohy do určitého zatížení. Je to velice důležitá vlastnost pro relaci mezi výstupem motoru a výstupem pohybové jednotky. [22] [24]

Minimální hmotnost a rozměry

Hmotnost pohonu výrazně ovlivňuje hmotnost celé konstrukce. U realizace sériového kinematického schématu, který je častější variantou, jsou pohonné jednotky součástí jednotlivých segmentů, a tudíž jejich váha výrazně ovlivňuje dynamické vlastnosti soustavy. Požadavek minimálních rozměrů pak souvisí zejména s jednodušší manipulací. Dalším důvodem pro zajištění minimálních rozměrů pohonu je překrývání jeho manipulačního prostoru s jeho vlastní konstrukcí. [22] [24]

Prostorové uspořádání pohonu ovlivňuje celkové uspořádání konstrukce, tudíž je nutné na něj klást důraz. [22] [24]

4.3 Programování

Kolaborativní roboty se vyznačují specifickým způsobem programování. Mají možnost získat potřebné informace o svém úkolu z demonstrace obsluhou. Tyto informace získávají řadou způsobů od snímání polohy manipulátoru, po senzory a skenery, díky kterým získají bližší informace o svém pracovním prostředí. V řadě případů je použita kombinace demonstrace a programování ve vizuálním rozhraní pomocí blokových schémat, které je také možnost použít i u kolaborativních robotů. [25]

4.4 Bezpečnost

U konvenčních robotických pracovišť je bezpečnost pro obsluhu zajištěna nejčastěji fyzickými zábranami, nebo čidly, které detekují přítomnost člověka a případně zastaví program. U kolaborativních robotů je tato otázka ale výrazně složitější, protože zde dochází buď k přímé spolupráci s člověkem, nebo jeho přítomnosti v pracovním prostoru robota. V roce 2011 byla zavedena norma ISO 10218-1 a ISO 10218-2, pro regulaci výroby průmyslových robotů a jejich bezpečnosti. Od této chvíle musejí mít roboti certifikaci, a být tak způsobilí

splňovat všechny bezpečnostní požadavky v těchto normách. Tyto normy byly v roce 2016 rozšířeny o technickou specifikaci ISO/TS 15066, pro upřesnění požadavků týkajících se případů kolaborativních robotů. ISO/TS 15066 vysvětluje 4 funkce, které musí kolaborativní robot mít k certifikaci pro kolaborativní aplikace (Obrázek 9). Z níže uvedených bezpečnostních opatření musí kolaborativní robot splňovat alespoň jedno. [26] [27] [28]

Bezpečné zastavení

Tato funkce je realizována několika možnými způsoby. Může to být pomocí laserového skeneru, chytrého vidění, nebo pomocí nouzového STOP tlačítka na ovládacím panelu. Tato funkce je základem bezpečnosti a je navržena tak, aby zastavila činnost před kolizí. [27] [28]

Manuální navádění

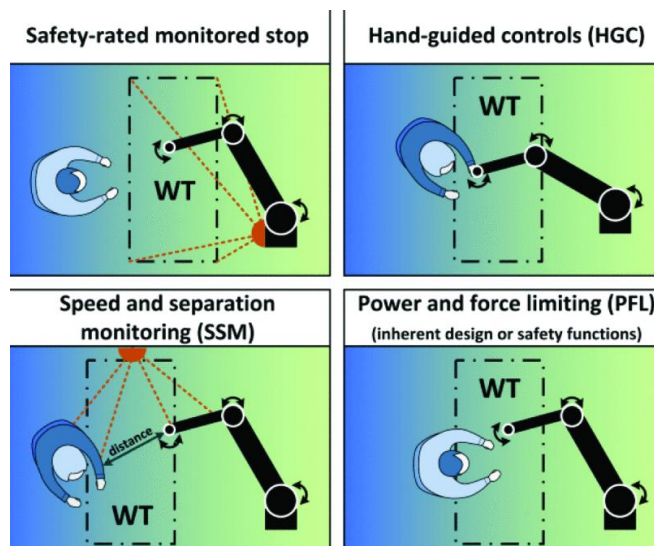
Kolaborativní robot má možnost ručního navádění obsluhou. Je schopen si pak zapamatovat dráhu, rychlost a další parametry pohybu. Je schopen snímat i tlak a sílu, kterou na něj obsluha vyvíjí. Bezpečnost je v tomto případě dána tím, že obsluha manipuluje s robotem pouze vlastní silou. [27] [28]

Sledování rychlosti a vzdálenosti

Kolaborativní roboti mohou mít pracovní prostor rozdělený do zón. V těchto zónách má kolaborativní robot předepsanou maximální rychlost a sílu, se kterou se může pohybovat. Pokud není v žádné z jeho zón detekován člověk, nebo cizí objekt, pohybuje se maximální rychlostí. Ty se pak snižují v zónách blíže k němu, až do úplného zastavení. Tímto opatřením je možno zachovat bezpečnost pro obsluhu s maximální možnou efektivitou práce. [27] [28]

Omezení síly

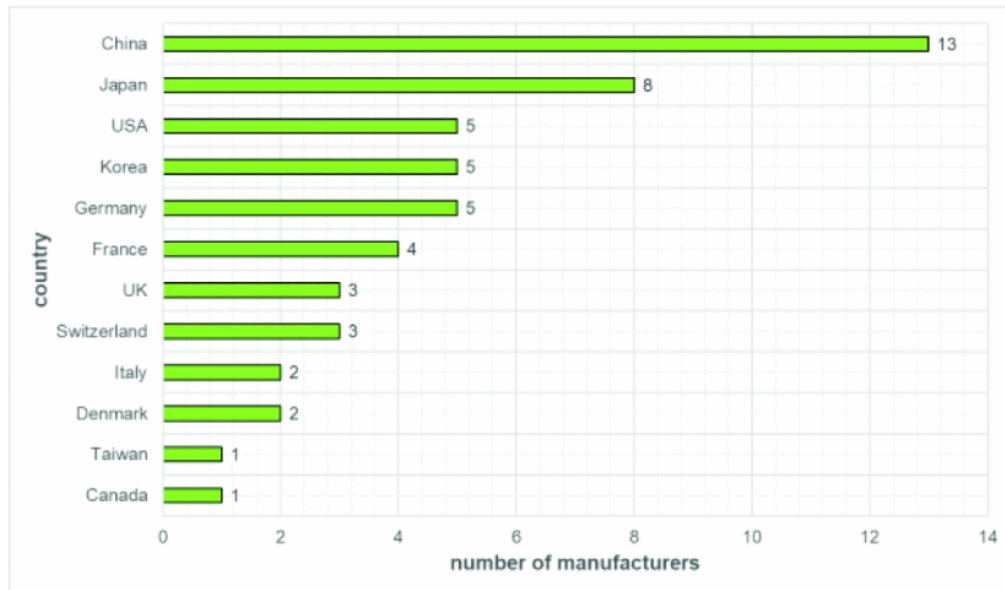
Kolaborativní robot by měl být navržen tak, aby svou silou nebyl schopen poranit člověka ani zásahem do zranitelných míst, jako je třeba krk. Navíc je schopen vnímat sílu a moment, který vyvozuje, při jednotlivých pohybech. Pokud je mu tedy kladen větší odpor, než by měl být, pro daný úkon, robot to pomocí zpětné vazby vyhodnotí a zastaví. Samozřejmě se pomocí výše uvedených vlastností snažíme kolizím předcházet, ale jsou touto funkcí vybaveni, pro případ selhání. [27] [28]



Obrázek 9 : Vyobrazení bezpečnostních požadavků [27]

4.5 Trh a Využití

Ve světě průmyslových robotů je stále na prvním místě Asie (Čína, Japonsko a Korea). Asijské státy se řadí na první příčky, co se týče výroby (Obrázek 10) i počtu ročně instalovaných jednotek robotů. Navíc, Asie takto vyniká jak ve výrobě a využití konvenčních průmyslových robotů, tak i kolaborativních robotů. K prosinci 2021 bylo celosvětově 52 výrobců kolaborativních robotů, kteří poskytovali 201 modelů. Celosvětově zaznamenávají nárůst, převážně díky rostoucímu počtu výrobců a značnému rozšiřování možností aplikace. V roce 2019 byly z celkového počtu 373 000, nainstalovaných průmyslových robotů, 4,8 % roboty kolaborativní. [27] [29]



Obrázek 10 : Počet výrobců kolaborativních robotů v jednotlivých zemích [27]

V současnosti jsou nejčastější aplikace těchto robotů manipulace, montáž a pick and place úkony. Velký rozmach zažívají v oblasti svařování, zejména z důvodu nedostatku kvalifikovaných svářečů. Efektivitu výroby zvyšují tím, že přebírají od lidí opakující se a únavné, nebo neergonomické úkony. Mohou přispívat také k bezpečnosti na pracovišti přejetím nebezpečných úkonů, nebo manipulace s těžkými objekty. Navíc pracují se stále stejnou přesností, tudíž bez chyb, bez ohledu na dobu úkonu, což se také projeví na délce jednotlivých operací. Potenciál mají kolaborativní roboty velký a řada firem investuje do jejich výzkumu a zařazení do výrobního procesu. [27] [29]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá optimalizací parametrů pro výrobu segmentů technologií WAAM s minimální tloušťkou. V první části bylo vyrobeno 16 vzorků o výšce 5 housenek. Ve druhé části byly, na základě výsledků z předchozí části experimentu, vybrány optimální parametry, kterými byl následně vytvořen segment o výšce 50 housenek.

5.1 Pracoviště

Navarování vzorků i samotného segmentu bylo provedeno v laboratoři svářečských technologií na ČVUT v Praze, nacházející se na Ústavu strojírenské technologie na Fakultě strojní. Metalografické zkoušky a procedury s ní spojené probíhaly prostorách laboratoře Metalografie nacházející se taktéž na Ústavu strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze. Rozložení pracoviště svářečských technologií je patrné z Obrázek 11. Svařovací hořák byl upnut do polohovadla, spojeného s univerzálním upínacím stolem. Posuv vykonával základní materiál upnutý na vozíku s automatickým podélným posuvem. Ten byl použit jako náhrada za kolaborativní robot. Robotické pracoviště bylo obsazeno jiným experimentem a nebylo z kapacitních důvodů možné jej přestavět na prováděná měření. Hadicový svazek hořáku byl nadlehčován.



Obrázek 11 : Pracoviště v laboratoři svářečských technologií

5.2 Použité přístroje

5.2.1 Svařovací zdroj Migatronik Sigma Galaxy 400

Svařovací zdroj (Obrázek 12) je určen pro metody MIG/MAG, a to pro svařování běžnou metodou i impulzním svařováním. Pracuje s on-line řízením oblouku Intelligent Arc Control (Zkráceně IAC), pro optimalizaci podmínek při svařování. Je vhodný pro ruční i automatické svařování. Rozsah svařovacích proudů se pohybuje od 15 A do 400 A. Parametry zdroje jsou uvedeny v Tabulka 1. [30]

Tabulka 1: Parametry svařovacího zdroje [30]

Zdroj proudu	Sigma Galaxy 400
Napájecí napětí [V]	3x400
Jištění [A]	20
Činný proud [A]	16,5
MAX proud [A]	28,2
Proudový rozsah [A]	15-400
Hmotnost [kg]	71
Rozměry v x š x d [mm]	906x524x925
MAX příkon [kVA]	19,5
Příkon na prázdko [W]	40



Obrázek 12 : Svařovací zdroj Migatronik Sigma Galaxy 400 [40]

5.2.2 Struers Labotom-3

Metalografická pila s vodním chlazením kotouče a ručním ovládáním posuvu. Maximální průměr použitého kotouče je 250 mm a příkon třífázového motoru je 3,2 kW. Pila je schopná dělit materiál až do tloušťky 90 mm. Rozměry upínacího stolu pily jsou 200 x 215 mm. (Obrázek 13) [31]



Obrázek 13 : Pila Struers Labotom-3 [31]

5.2.3 Struers CitoPress 1

Automatický lis, na kterém probíhalo lisování vybraných vzorků do pryskyřice. Vzorky byly lisovány při teplotě 180 °C a tlaku 250 bar po dobu 7,5 min. Průměry válců, do kterých se vkládají vzorky, jsou od 25 do 50 mm. Vyhřívací jednotka má výkon až 1000 W. (Obrázek 14) [32]



Obrázek 14 : Struers CitoPress 1 [33]

5.2.4 Buehler Beta

Na tomto zařízení bylo provedeno broušení a leštění metalografických vzorků, zalitých do pryskyřice. Má nastavitelné otáčky v rozmezí od 30 do 600 ot·min⁻¹ a přítlačnou sílu do 75 N na vzorek. Pojme až 4 vzorky na jednou. (Obrázek 15) [34]



Obrázek 15 : Buehler Beta [35]

5.2.5 Struers LectroPol – 5

Přístroj pro automatické elektrolytické leštění a leptání vzorků. Vyvodí napětí až 100 V a proud 6 A. Disponuje také displejem, který zobrazuje časový průběh proudu při procesu. (Obrázek 16) [36]



Obrázek 16 : Struers LectroPol – 5 [36]

5.3 Výroba vzorků

Cílem této části experimentu bylo zjistit mezní hodnoty pro výrobu nejtenčí možné stěny, při přijatelné kvalitě návaru. Každý vzorek byl vyroben z 5 housenek na sobě o délce svaru 90 mm.

Při volbě proměnných svařovacího procesu byly zvoleny dva přístupy:

1. změna rychlosti posuvu hořáku (T_s – travel speed), až do mezního stavu – tj vytvoření nekontinuální housenky.

2. Změna velikosti svařovacího proudu I , s čímž je v přímé souvislosti snížení rychlosti posuvu tavné elektrody (WFS – wire feeding speed), opět do situace tvorby nekontinuální housenky.

Výsledky těchto zkoušek vytvořily obálku teoreticky použitelných hodnot, ze kterých byly vybrány extrémní hodnoty, na mezi možností svařovacího zdroje. Po výrobě těchto vzorků byly zvoleny nejpříznivější hodnoty, které budou použity při výrobě segmentu ve druhé části experimentu.

5.3.1 Přídavný materiál

Použitý přídavný materiál byl ve formě tenkého drátu (průměr 0,6mm) z austenitické, chromnikové oceli AISI 316L. Vykazuje dobrou odolnost vůči kyselinám a velmi dobrou svažitelnost. Využívá se v chemickém a automobilovém průmyslu a přístrojové technice. Podíl legujících prvků uvádí Tabulka 2. [37]

Tabulka 2 : Chemické složení přídavného materiálu [37]

Legující prvek	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N
Hmotnost [%]	0,03	0,75	2	0,015	0,045	16,5-18,5	10,0-13,0	2-2,5	0,1

5.3.2 Výchozí parametry

Svařovací parametry byly zvoleny z tabulky programů Migatronic. Byl použit program č.185 (Tabulka 3) s funkcí inteligentního řízení oblouku IAC™. Průtok ochranné atmosféry byl nastaven na 8 l·min⁻¹. Tabulka 4 ukazuje výchozí hodnoty. Výchozí parametry navařování navazují na DP Bc. Jakuba Dalíka [38]

Tabulka 3: Použitý program zdroje

Číslo programu	Průměr elektrody [mm]	Označení	Ochranný plyn
185	0,8	Fe SG2 ER70S6 IAC™	Ar/O2 (92/8)

Tabulka 4 : Výchozí parametry svařování [38]

I [A]	U [V]	WFS [m·min ⁻¹]	TS [cm·min ⁻¹]
70	17,1	5,3	26

5.3.3 Parametry při zvyšování TS

Návar podle výchozích hodnot byl zhotoven pouze u této části experimentu s označením vzorku č.1. Tabulka 5 zobrazuje použité hodnoty při zhotovení vzorků.

Tabulka 5 : Parametry při zvyšování TS

číslo návaru	I [A]	U [V]	WFS [m·min ⁻¹]	TS [cm·min ⁻¹]
1	70	17,1	5,3	26
2	70	17,1	5,3	31
3	70	17,1	5,3	36
4	70	17,1	5,3	41

Hodnota TS byla zvýšena vždy o 5 cm·min⁻¹ vzhledem k předchozímu měření. Vzorek č.4. byl vyhodnocen, jako nevyhovující, tudíž byla tato část experimentu zde ukončena.

5.3.4 Parametry při snižování svařovacího proudu I

Tabulka 6:Parametry při snižování I

číslo návaru	I [A]	U [V]	WFS [m·min ⁻¹]	TS [cm·min ⁻¹]
5	65	17,1	5,3	26
6	60	16,5	5	26
7	55	15,9	4,6	26
8	50	15,5	4,3	26
9	45	15,2	3,9	26
10	40	14,8	3,2	26
11	35	14,5	2,8	26
12	30	14,3	2,3	26
13	25	14,1	2	26

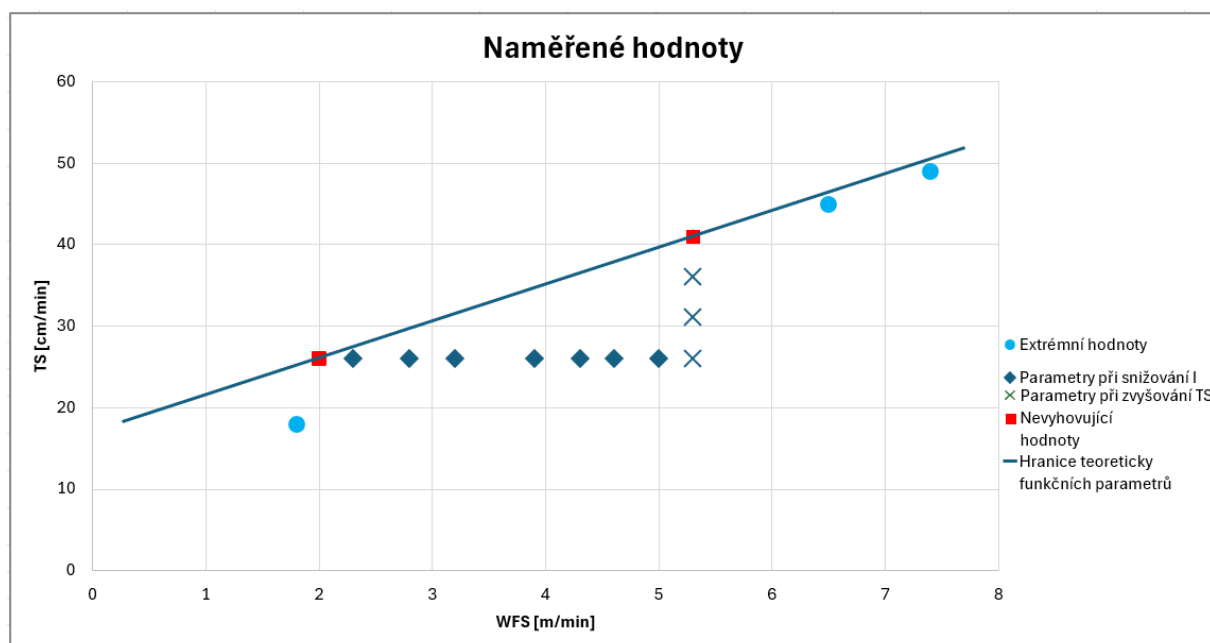
Postupně byl snižován svařovací proud až do hodnoty 25 A (vzorek č.13), kde byly parametry vyhodnoceny, jako nevyhovující. (Tabulka 6)

Tímto vznikla hranice teoreticky funkčních hodnot, které lze použít pro vytvoření výsledného segmentu. Nevyhovující parametry byly proloženy lineární funkcí, která je hranicí funkčních parametrů (Graf 1). Díky tomuto poznatku byly vytvořeny ještě 3 vzorky hodnot na hranici možností zdroje, pro porovnání tloušťky stěny (Tabulka 7).

Tabulka 7 : Použité extrémní hodnoty

číslo návaru	I [A]	U [V]	WFS [m·min ⁻¹]	TS [cm·min ⁻¹]
14	23	14	1,8	18
15	110	20,1	7,4	49
16	90	17,6	6,5	45

Dále vyhodnocen byl pouze vzorek č.14, z důvodu neprůkaznosti vzorků č.15 a 16 (neměřitelné)



Graf 1 : Naměřené hodnoty

5.4 Hodnocení vzorků a podmínky měření

Průběh svařovacích parametrů při přípravě vybraných vzorků byl sledován a nahráván programem Weld Monitor. Byl zobrazen vždy průběh proudu I, napětí U a rychlost podávání elektrody WFS, vždy u 4. housenky segmentu z důvodu použití její šířky, jako jedno z kritérií rozhodování. Po navaření byly vzorky rozřezány na metalografické pile Struers Labotom 3. Vzorek byl odebrán ze středu návaru. Ihned po dělení byly vzorky umístěny do lisu Struers Citopress 1 a zakonzervovány do pryskyřice MultiFast do metalografických vzorků. Výška a šířka hodnocených vzorků byla měřena na metalografickém mikroskopu Neophot 21 (ZEISS, Německo). Použité zvětšení bylo voleno 10x. Fotky metalografických vzorků byly pořízeny zrcadlovým fotoaparátem Canon EOS

1300D, kterým je mikroskop opatřen. Následně byly vyhodnoceny v programu Axio Vision (ZEISS).

Pro zjištění mikrostruktury byly všechny vzorky, po měření, naleptány. Leptání probíhalo v prostorách laboratoře Metalografie v prostorách Ústavu Strojírenské technologie Fakulty Strojní ČVUT.

Pro elektrolytické leptání byla připravena 10 % kyselina šťavelová (10 g krystalické kyseliny šťavelové ve 100 ml destilované vody), která sloužila jako elektrolyt. Proces byl vykonán na přístroji Struers Lectropol – 5. Elektrolýza probíhala při napětí $U = 10 \text{ V}$ po dobu 10 s.

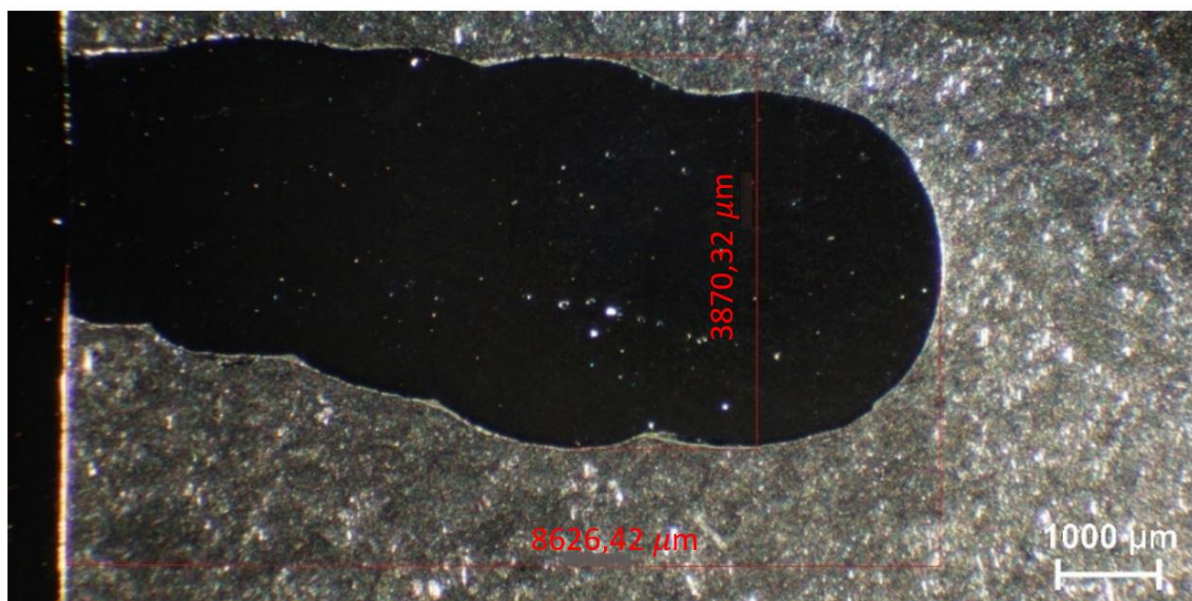
5.5 Výsledky a diskuze

5.5.1 Vzorek č.1

Referenční vzorek výchozích hodnot, které již byly otestovány při předchozích experimentech, prováděných na pracovišti robotického navařování na ČVUT. Vizually vypadá housenka dobře provařená (Obrázek 17). Naměřená výška po 5 vrstvách byla $h = 8,63 \text{ mm}$ a šířka 4. vrstvy $s = 3,87 \text{ mm}$ (Obrázek 18).



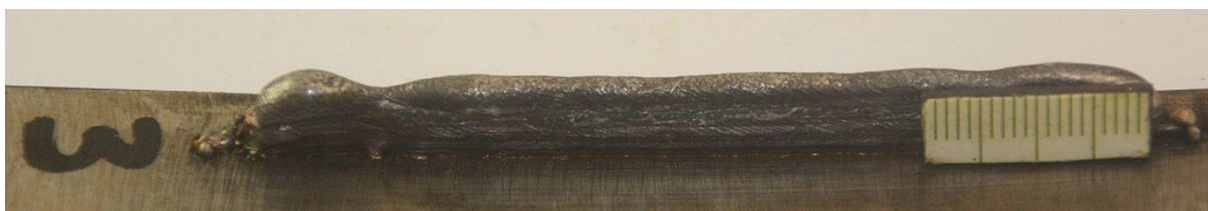
Obrázek 17 : Vzorek č.1



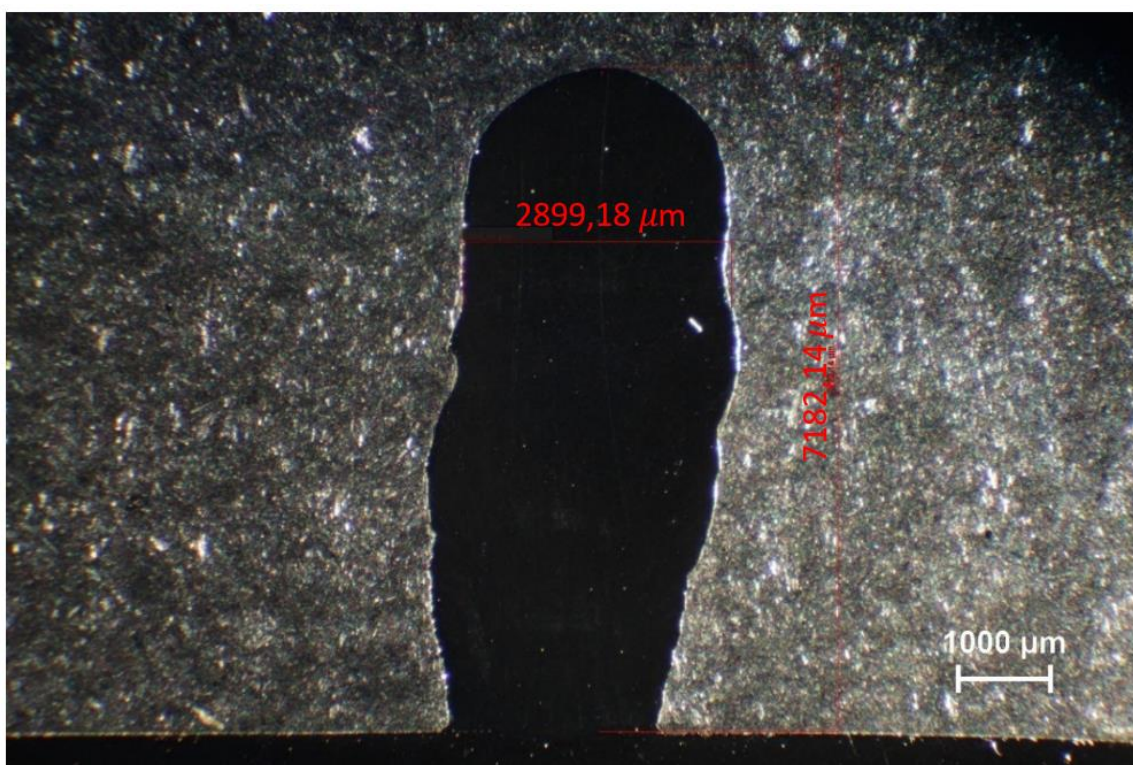
Obrázek 18 : Výsledky měření Vzorku č.1

5.5.2 Vzorek č.3

Vzorek č.3 byl vyroben za stejných parametrů na svařovacím zdroji, jako vzorek č.1. TS hořáku byla o $10 \text{ cm}\cdot\text{min}^{-1}$ vyšší než u referenčního svaru. To mělo za následek přenos nižšího objemu svarového kovu (vztaženého k jednotce délky svaru), a tudíž i snížení výšky vzorku a šířky 4. housenky. Vizuálně vypadá vzorek stále v pořádku (Obrázek 19). V porovnání s referenčním vzorkem se objevuje zvýšená vlnitost. Šířka 4. housenky byla $s = 2,90 \text{ mm}$ a výška vzorku $h = 7,18 \text{ mm}$ (Obrázek 20).



Obrázek 19 : Vzorek č.3



Obrázek 20 : Výsledky měření Vzorku č.3

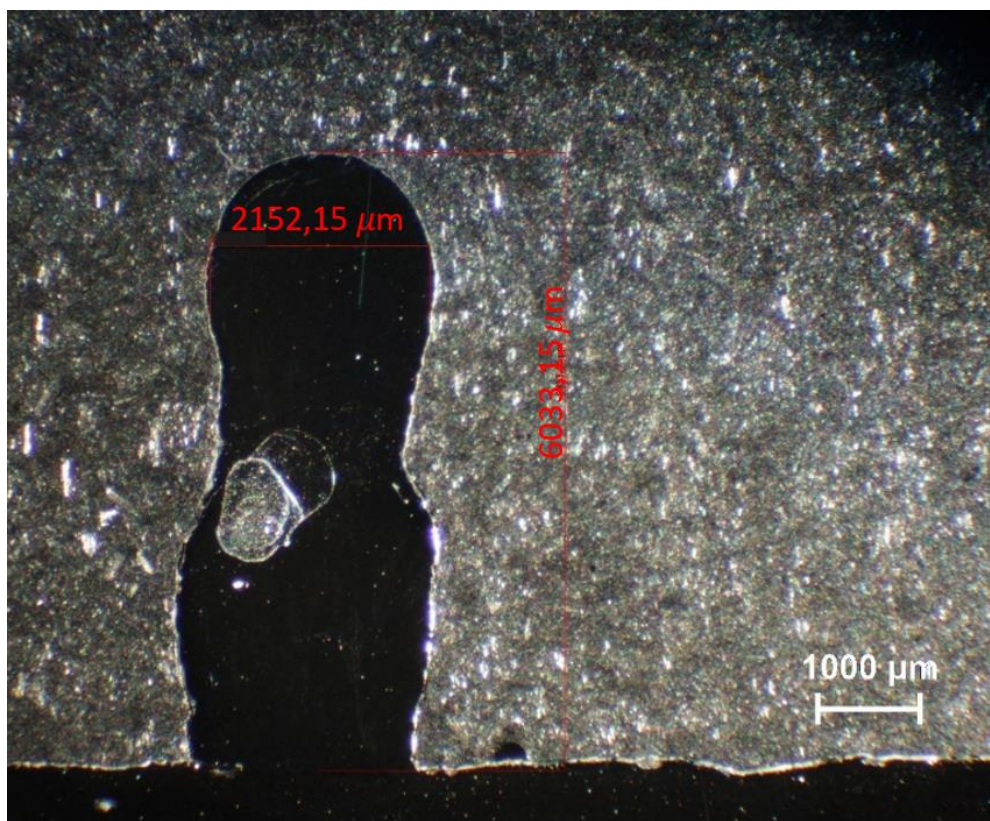
5.5.3 Vzorek č.4

Vzorek č.4. byl navařen stejnými parametry na svařovacím zdroji, jako předchozí 2 vzorky, ale opět se zvýšenou TS. Z hlediska dosažených hodnot $h = 6,03 \text{ mm}$ a $s = 2,15 \text{ mm}$ (Obrázek 22) se jeví, jako úspěšný, po vizuální kontrole, byl ale vyhodnocen jako nevyhovující z důvodu velkého nárůstu vlnitosti a

nestejnorodosti svaru (Obrázek 21). Pro použité svařovací hodnoty na hořáku byla zjevně překročena mezní rychlost TS. Testování dalších parametrů v prvním přístupu (zvyšování TS) nebylo dále prováděno.



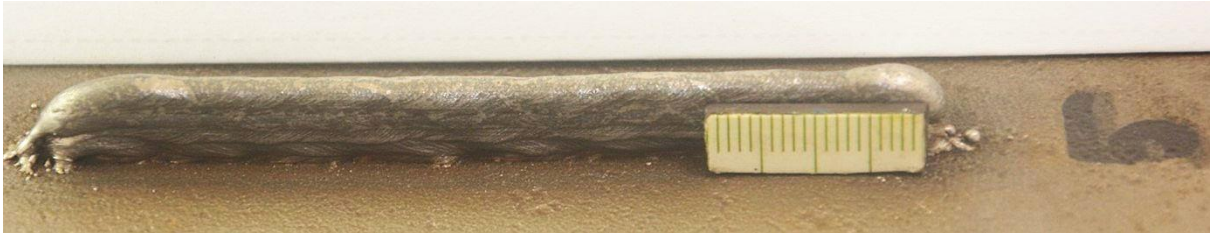
Obrázek 21 : Vzorek č.4



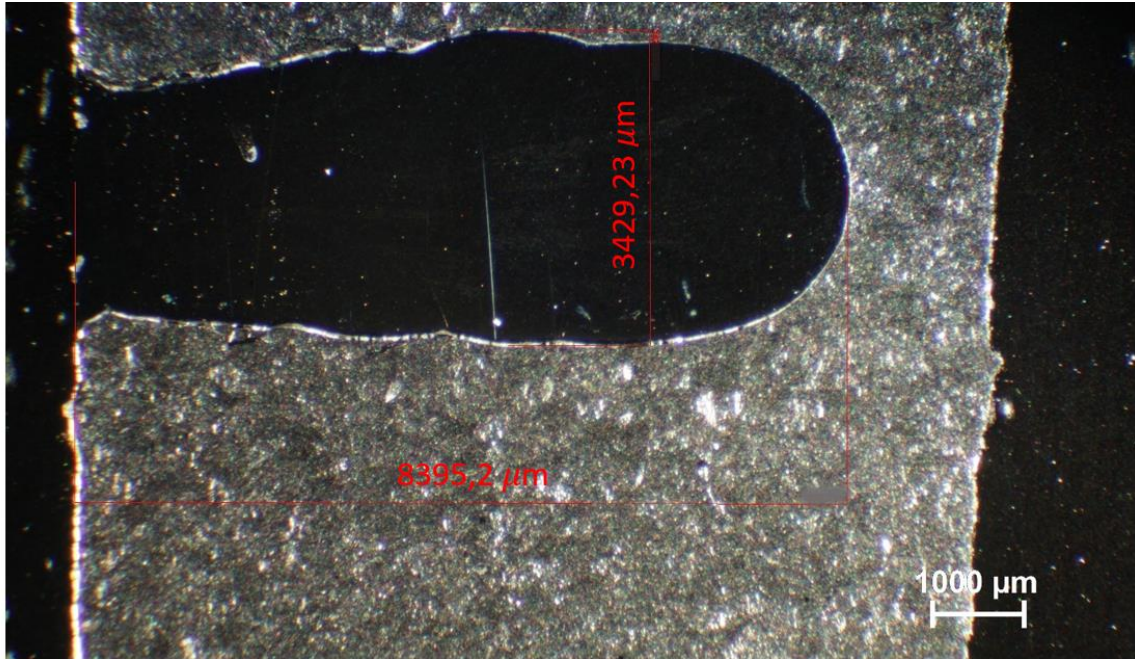
Obrázek 22 : Výsledky měření Vzorku č.4

5.5.4 Vzorek č.5

Na vzorek č.5 byly použity parametry velmi blízké referenčnímu vzorku (č.1). Housenky jsou stejnorodé a dobře provařené (Obrázek 23). Hodnoty $h = 8,40$ mm a $s = 3,43$ mm (Obrázek 24) jsou menší z důvodu nižšího přenosu tepelné energie.

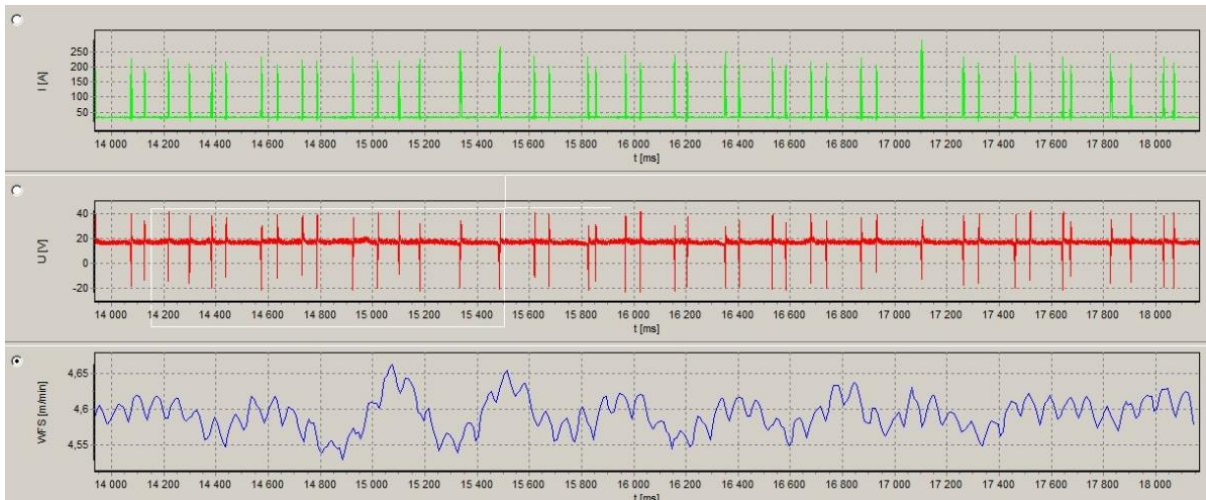


Obrázek 23 : Vzorek č.5

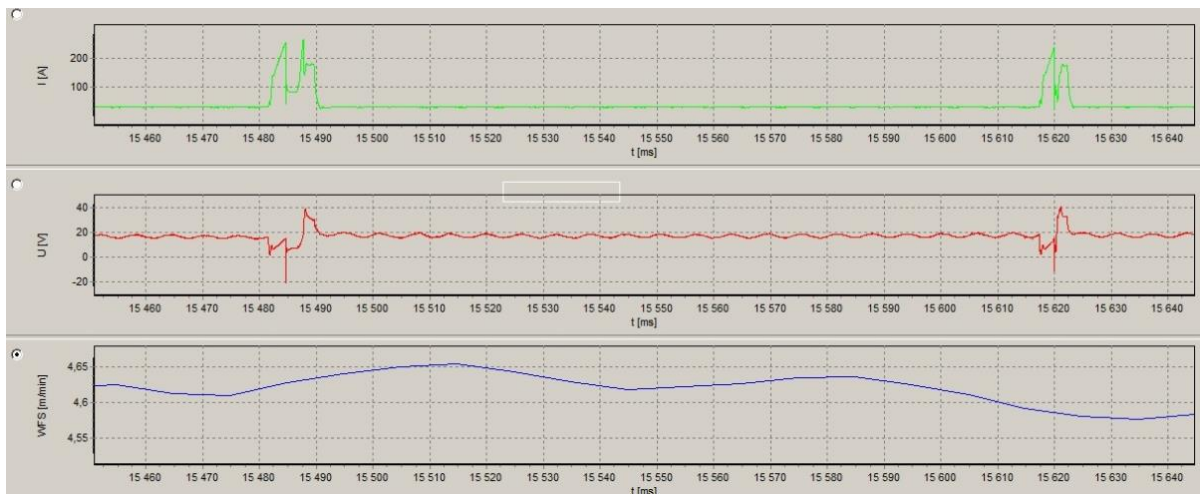


Obrázek 24 : Výsledky měření Vzorku č.5

Na Obrázek 25 je průběh svařovacího procesu z programu Weld Monitor. Probíhalo 11 zkratů za sekundu a maximum proudu se pohybovalo okolo 230 A. Údaj 11 zkratů je velmi nízký. Byl však porovnán s literaturou a dospělo se k závěru, že se, v důsledku nižšího proudového zatížení, oblouk zkrátil. Při zkratovém přenosu kovu klesá, se snižujícími se hodnotami proudů i frekvence přenášených kapek. Záznam WFS v prezentovaném 4 s záznamu kolísá okolo hodnoty $4,6 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, což je vzhledem k nastavené hodnotě na zdroji $5,3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ znatelná odchylka. Zapříčiněna byla charakterem použitého svařovacího programu. Ten je situován pro přídavný materiál o průměru 0,8 mm, ale díky využití IAC je schopen přepočítat rychlost posuvu WFS i pro jiné rozměry materiálů. Měl by tedy teoreticky z důvodu menšího průměru, pro stejný objem svarového kovu podávat rychleji, nicméně řídí se podle svařovacích podmínek v místě svaru, kde se snaží docílit synergie odtavování. Tepelný příkon je tedy tak nízký, že podává touto rychlostí. [39]



Obrázek 25 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.5



Obrázek 26 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.5

5.5.5 Vzorek č.6

Vzorek č.6 vykazuje první známky vlnitosti v podobě mírného převýšení v pravé části Obrázek 27. Provaření a vlnitost se stále jeví v únosných mezích. Šířka 4. housenky $s = 3,109$ mm je oproti předchozím vzorkům menší. Výška návaru $h = 8,22$ mm napovídá, že zatím probíhá spíše redukce rozměru do šířky, což je žádoucí efekt (Obrázek 28).

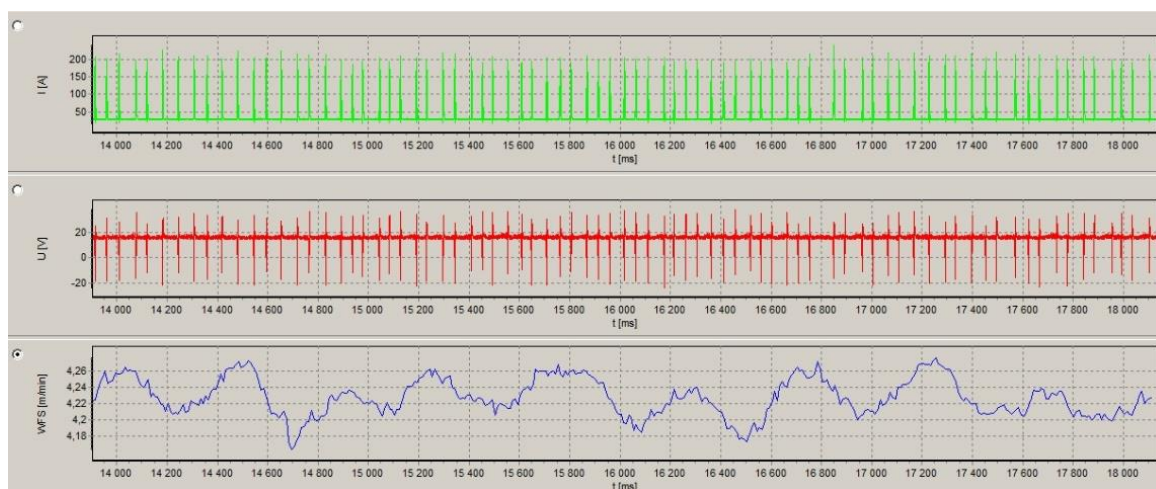


Obrázek 27 : Vzorek č.6



Obrázek 28 : Výsledky měření Vzorku č.6

Proces probíhal s 18 zkraty za sekundu, což je nárůst oproti vzorku č.5. Maximum svařovacího proudu bylo zachyceno na 205 A. Hodnota WFS byla naměřena $4,2 \pm 0,4 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (Obrázek 29). Nastavená hodnota byla $5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.



Obrázek 29 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.6



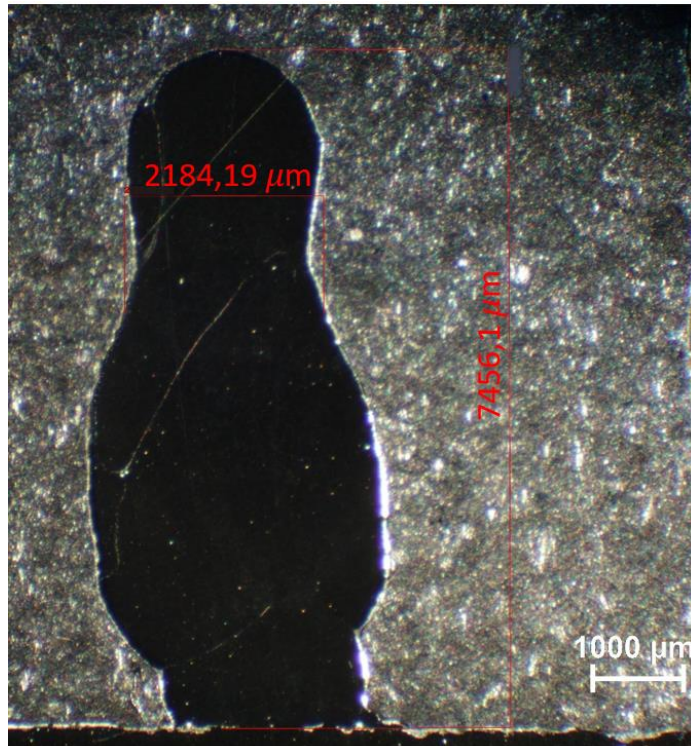
Obrázek 30 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.6

5.5.6 Vzorek č.9

Proudový příkon vzorku č.9 byl 45 A, což se pohybuje výrazně níže než u předchozích vzorků. Objevují se první známky vlnitosti v 5. návaru (Obrázek 31). Metalografický výbrus ukazuje i značnou nestejnoroďost v šířce housenek, kde zejména referenční (4.) housenka je velice tenká vzhledem k ostatním vzorkům (Obrázek 32).

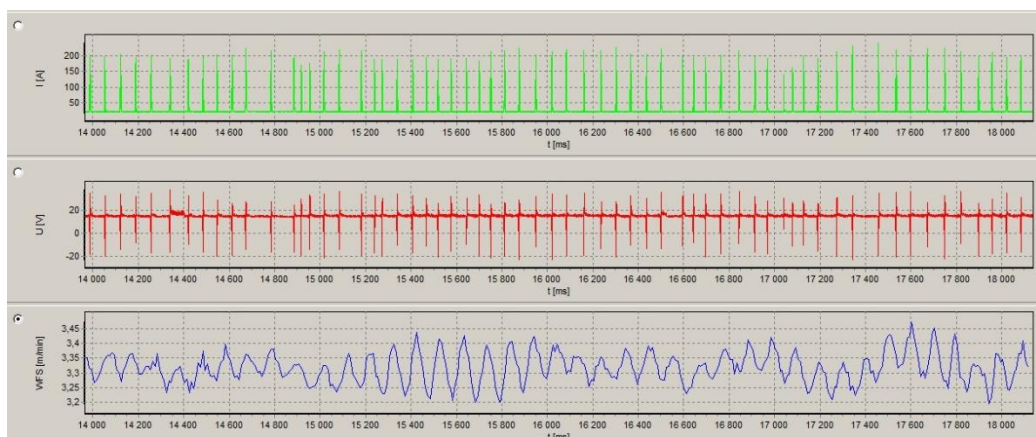


Obrázek 31 : Vzorek č.9

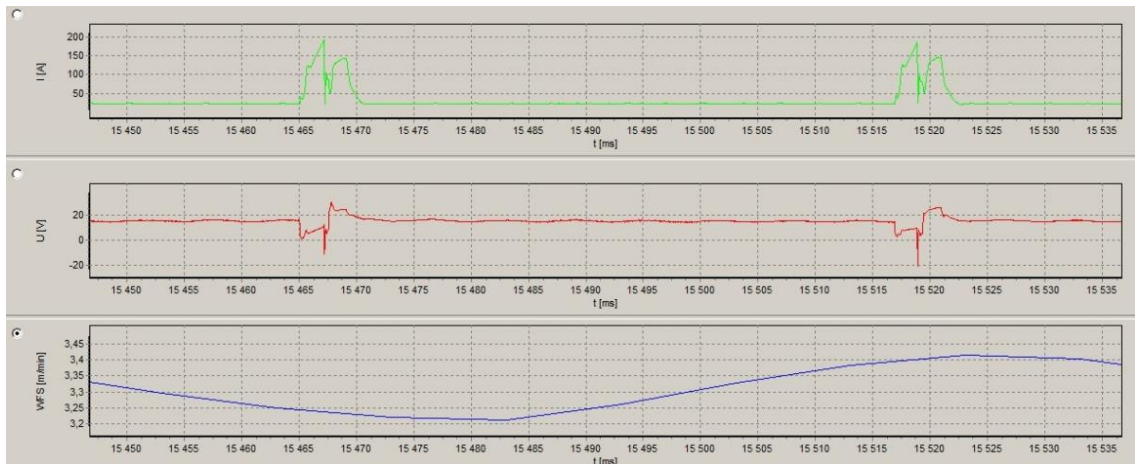


Obrázek 32 : Výsledky měření Vzorku č.9

Byla zaznamenána frekvence 15 zkratů za sekundu, což se příliš neodlišuje od přechozích pokusů, a tudíž je množství přeneseného tepla v mezích únosnosti. Maximum svařovacího proudu se pohybovalo okolo 195 A (Obrázek 33). Na podrobném záznamu z (Obrázek 34) je patrné, že časový úsek vyrovnání svařovacích podmínek, které provádí inteligentní řízení oblouku zdroje se prodlužuje.



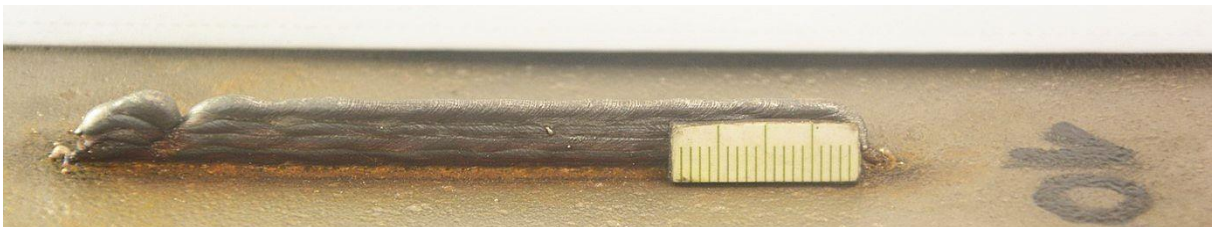
Obrázek 33 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.9



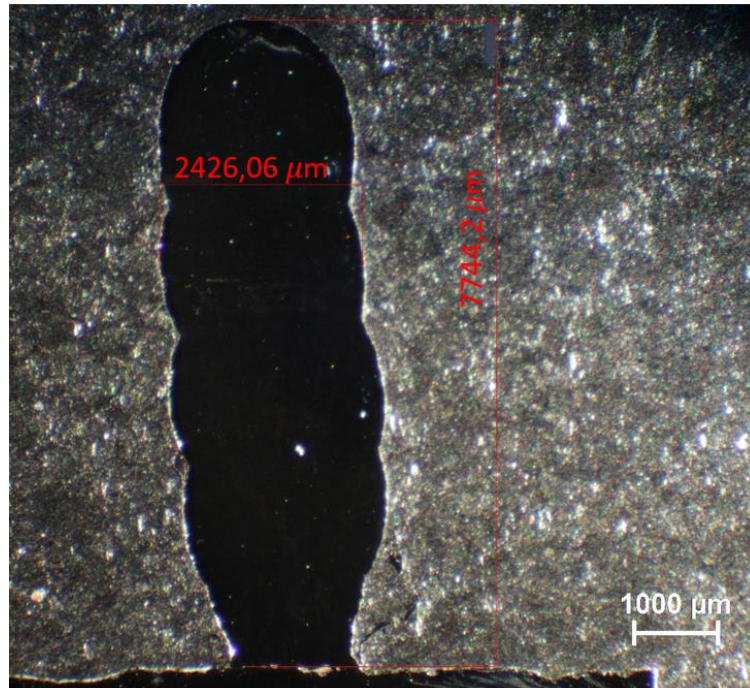
Obrázek 34 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.9

5.5.7 Vzorek č.10

I přes první náznaky defektů při vyhodnocení vzorku č.9, vzorek č. 10 (navářovaný při 40 A) vykazuje dobré vlastnosti ve velké části segmentu. Jediná nesourodost je v levé části Obrázek 35, která byla způsobena nestabilním zapálením oblouku. Z rozměrové stránky došlo ke zmenšení housenky až na $s = 2,43 \text{ mm}$ a $h = 7,74 \text{ mm}$, tudíž došlo k redukci zejména šířky (Obrázek 36).

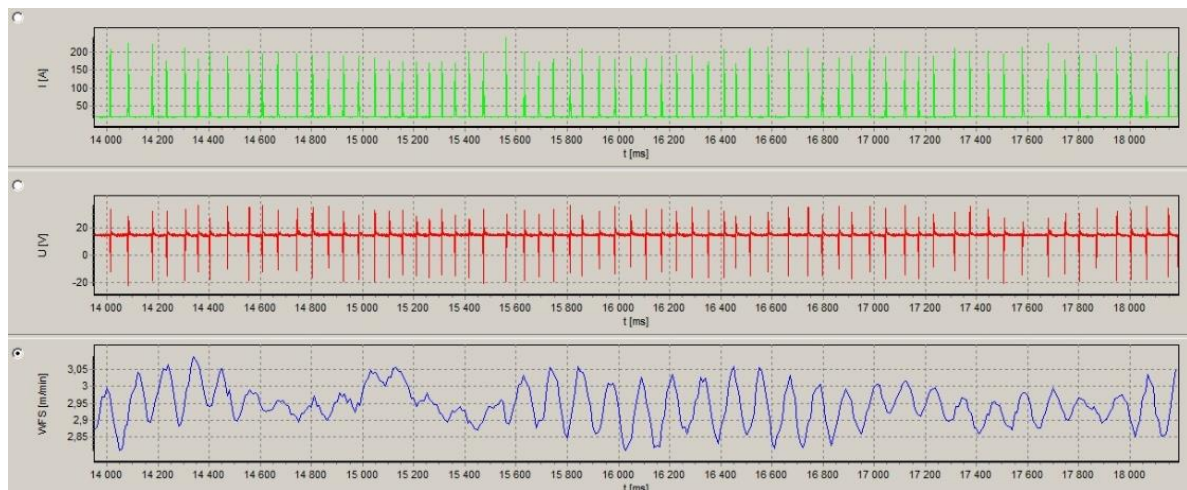


Obrázek 35 : Vzorek č.10

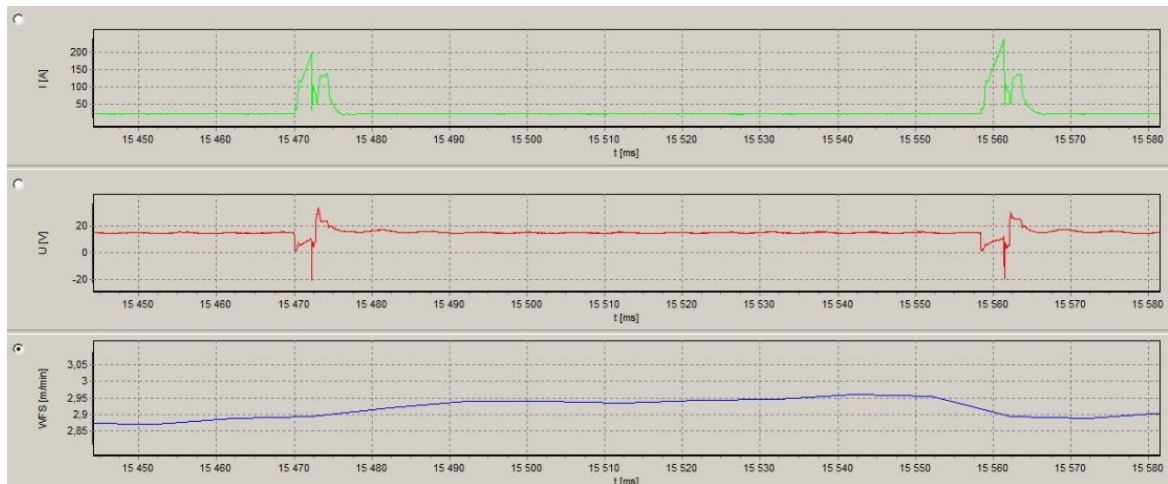


Obrázek 36 : Výsledky měření Vzorku č.10

Proudové maximum bylo naměřeno 180 A. Frekvence zkratů se pohybuje okolo 16 zkratů za sekundu. WFS byla naměřena $2,95 \pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, což je o stále $0,3 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ nižší než hodnota na zdroji. (Obrázek 37).



Obrázek 37 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.10



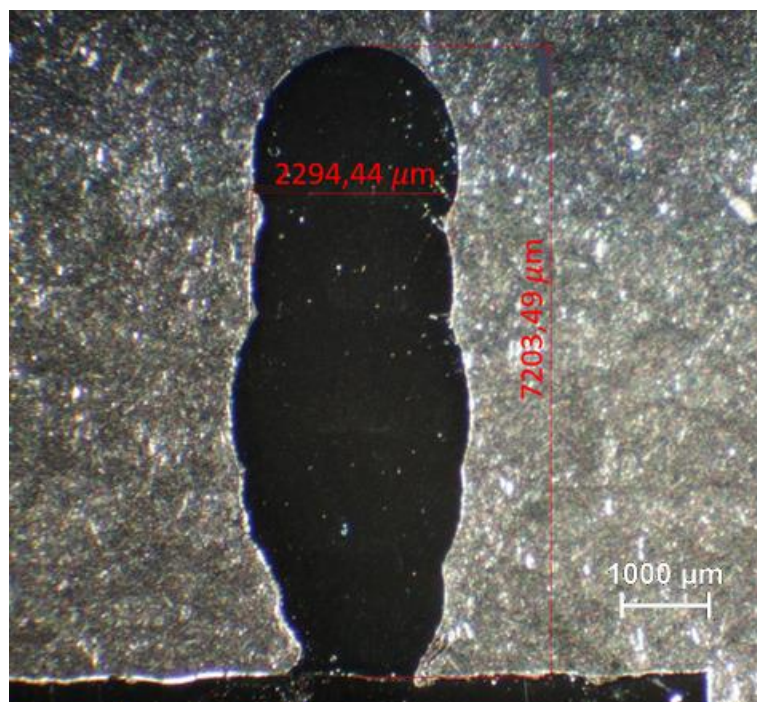
Obrázek 38 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č. 10

5.5.8 Vzorek č.11

Vizuální stránka vzorku č.11 se jeví velice blízká předchozímu vzorku č.10 (Obrázek 39). Šířka 4. housenky byla naměřena $s = 2,30$ mm a výška vzorku $h = 7,20$ mm (Obrázek 40). Z metalografického výbrusu je patrné, že provaření první vrstvy je nedostatečné a vzniká studený spoj. V experimentální části byly ale řešeny pouze parametry pro výrobu stěny. První housenka by ve výrobním procesu byla navařována jinými parametry.

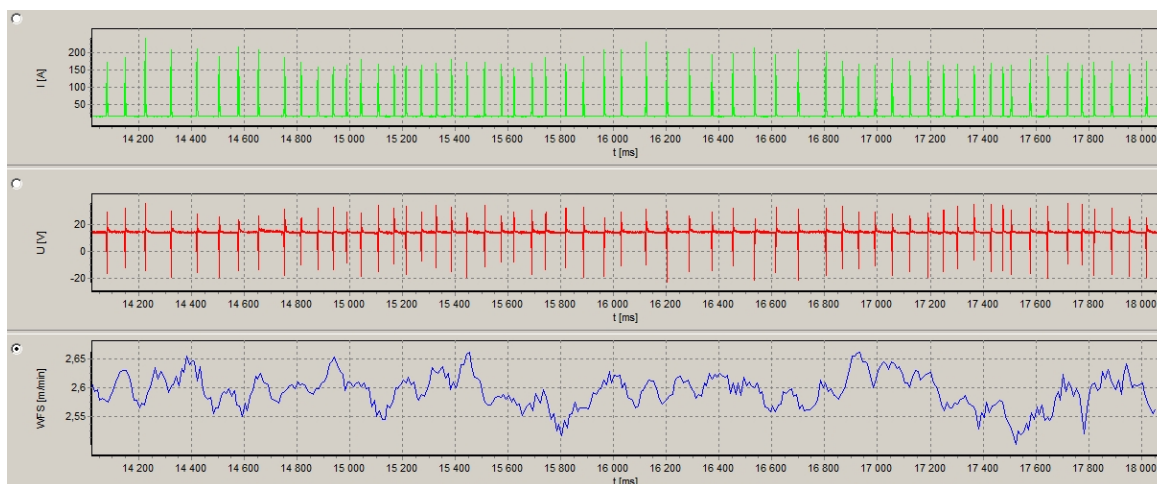


Obrázek 39 : Vzorek č.11

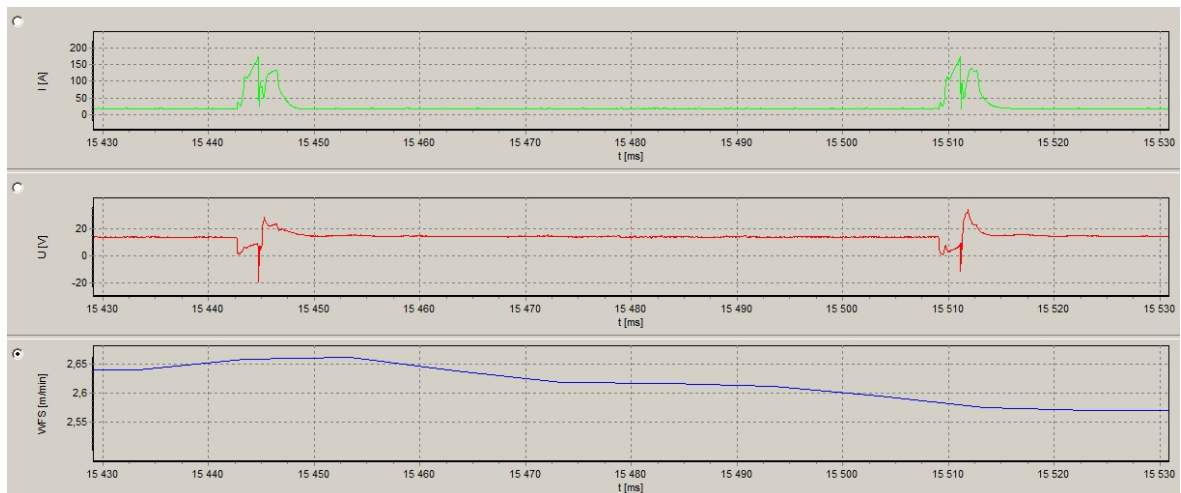


Obrázek 40 : Výsledky měření Vzorku č.11

Počet zkratů za sekundu klesl na 13 a maximální hodnota proudu byla naměřena pouze okolo 160 A. Hodnota WFS $2,6 \pm 0,1 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, což se dá označit za stabilní průběh (Obrázek 41).



Obrázek 41 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.11



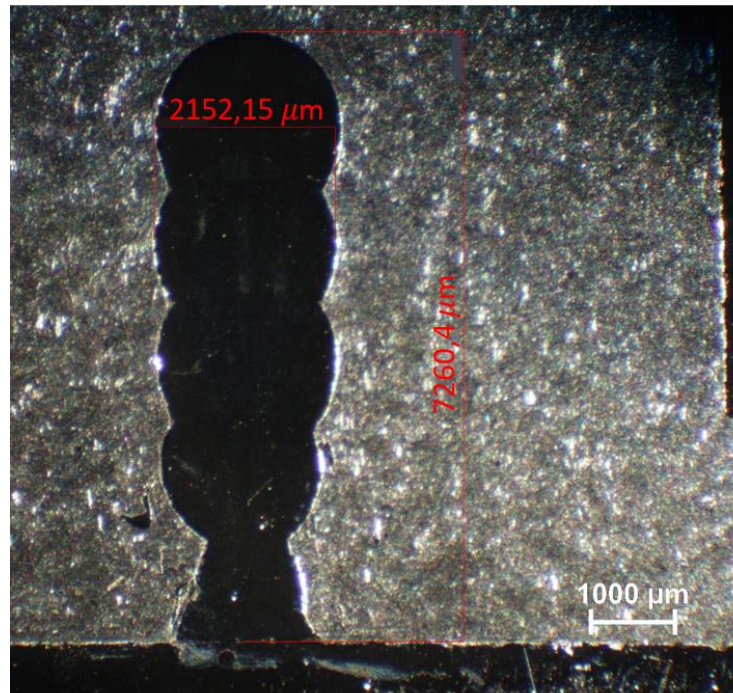
Obrázek 42 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.11

5.5.9 Vzorek č.14

Tento vzorek byl jediný průkazný, ze vzorků vytvořených za parametrů na hranici možností svařovacího zdroje. Jedná se o minimální parametry. Díky značně sníženému množství přeneseného tepla se šířka svaru snížila na $s = 2,15$ mm. Ve výšce svaru k zásadní redukci nedošlo ($h = 7,26$ mm) (Obrázek 44). Je to ale způsobeno tím, že nedochází k dostatečnému provaření jednotlivých housenek, stěna je velice členitá, a tudíž nevhodná pro použití (Obrázek 43).

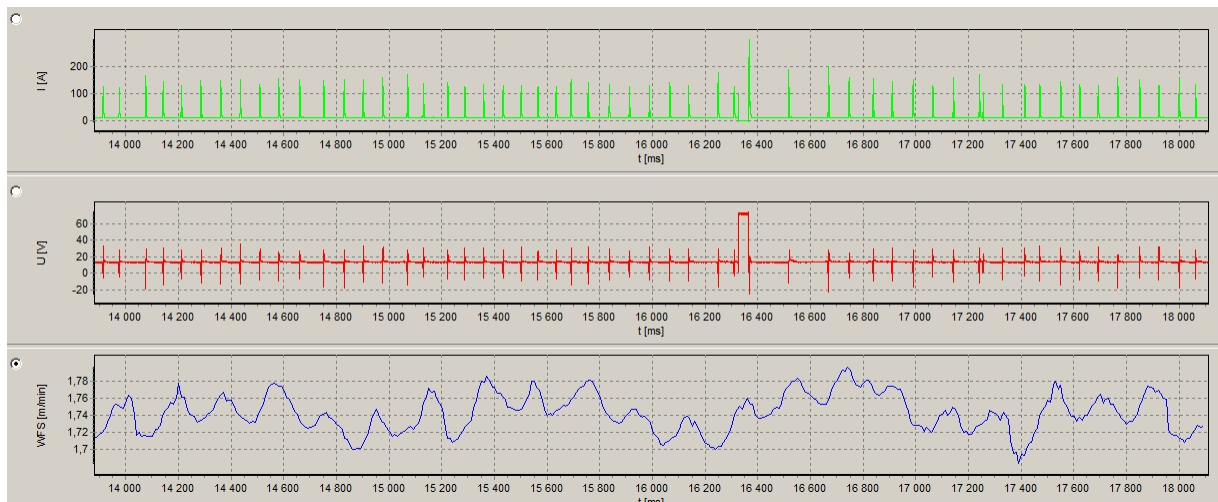


Obrázek 43 : Vzorek č.14

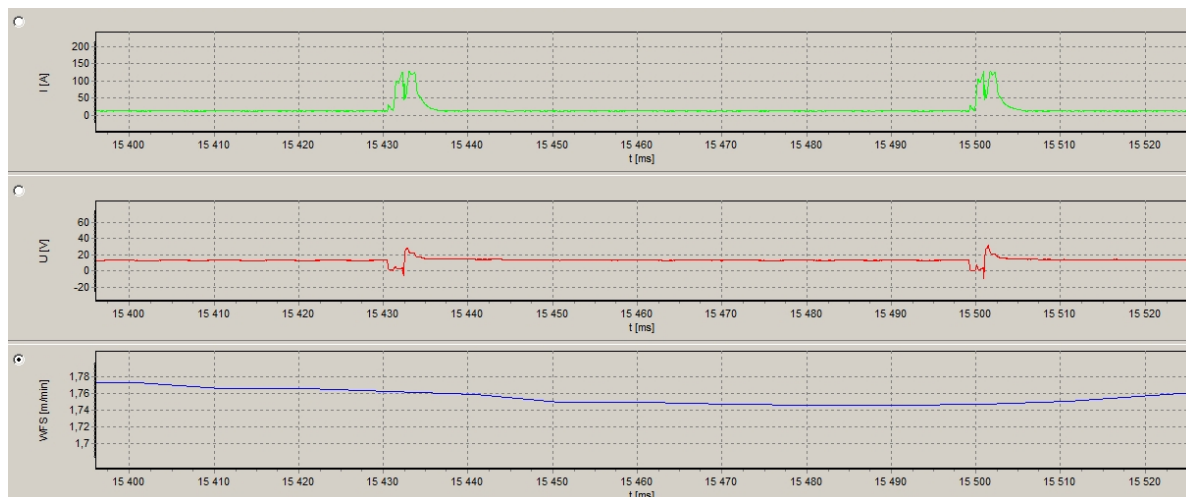


Obrázek 44 : Výsledky měření Vzorku č.14

Počet zkratů zůstává 13, jako u vzorku č.11. Velice se ale snížila maximální hodnota proudu, a to pouze na 130 A (Obrázek 45). Z Obrázek 46 je také patrné, že druhý výboj v jednotlivých zkratech už se, svou délkou a velikostí prakticky shoduje s první, což indikuje nedostatek dodávané energie, kterou takto musí IAC kompenzovat.



Obrázek 45 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.14



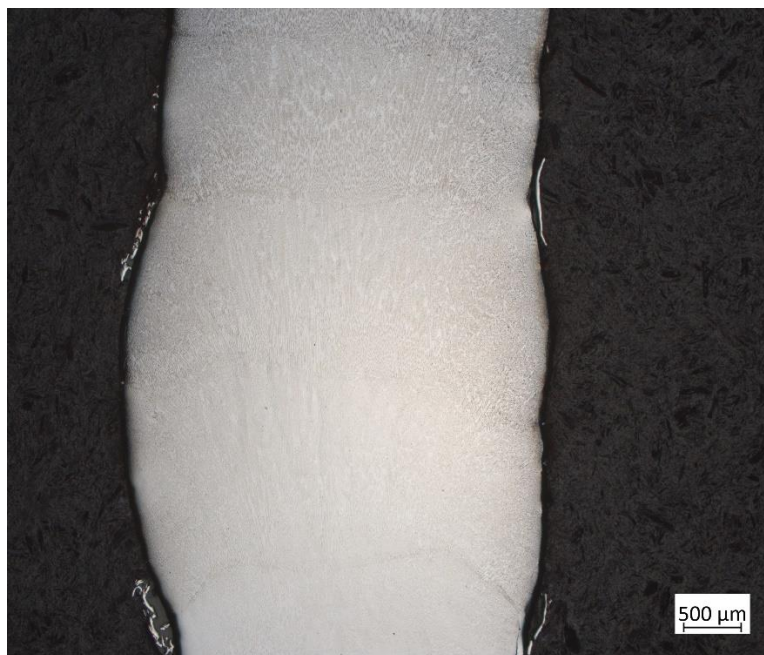
Obrázek 46 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č. 14

5.6 Mikrostruktura

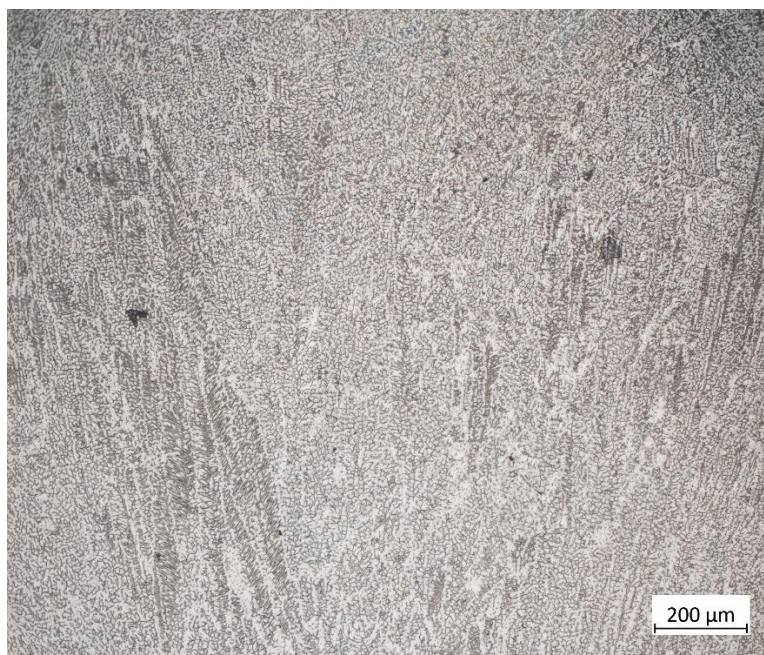
Z hlediska mikrostruktury se vzorky mezi sebou zásadně nelišily, proto jsou uvedeny příklady mikrostruktur na vybraných vzorcích. Všechny použité parametry vedly k austenitické struktuře s mírně hrubším zrnem, bez zásadních defektů, nehomogenit (Obrázek 47, Obrázek 48, Obrázek 49, Obrázek 50).



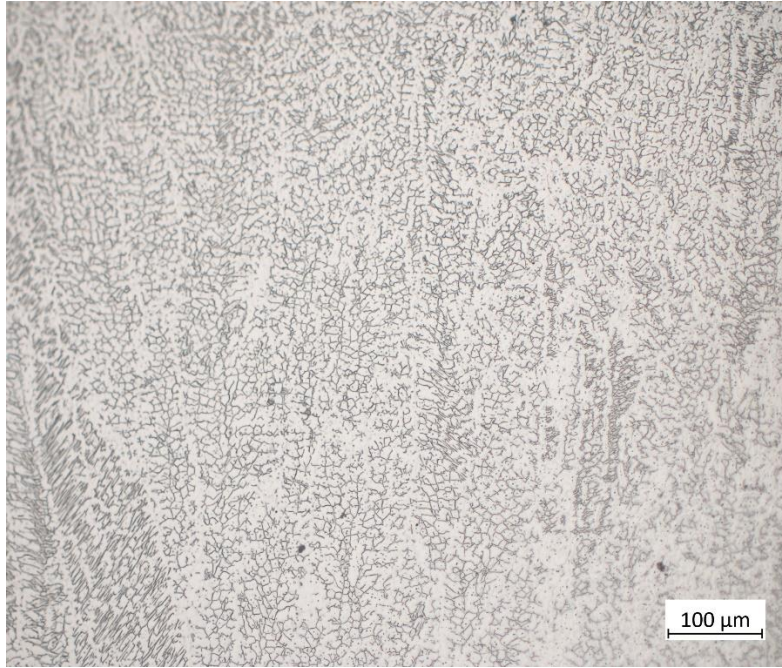
Obrázek 47 : Koncová housenka vz.č.3 25x zvětšení



Obrázek 48 : Střední část vz.č.3 25x zvětšení



Obrázek 49 : Mikrostruktura vz.č.10 100x zvětšení



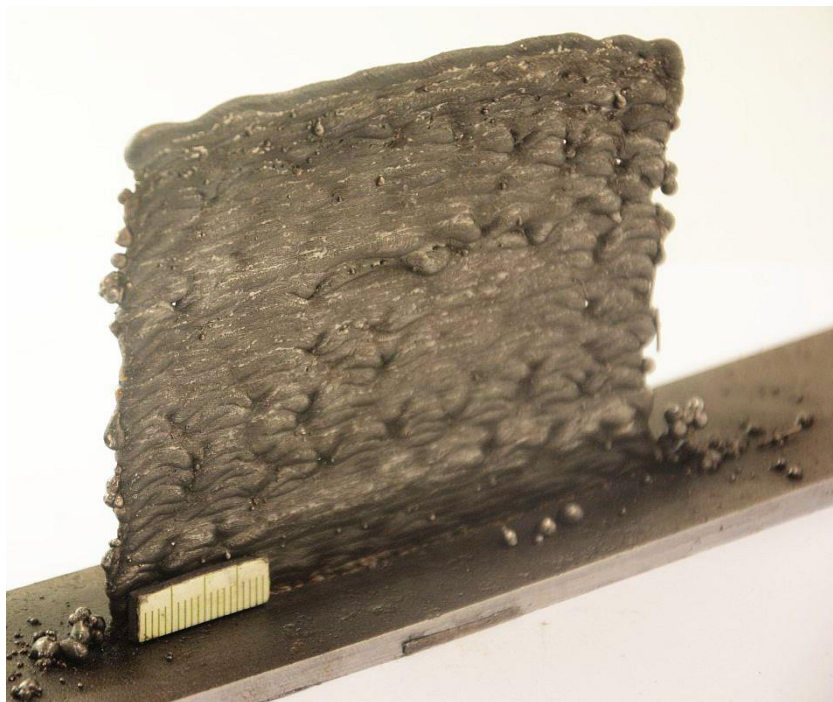
Obrázek 50 : Mikrostruktura vz.č.10 200x zvětšení

5.7 Výsledný segment

Cílem bylo vytvořit segment o 50 vrstvách (housenkách) s ideálními parametry, pro minimalizaci rozměru tloušťky. Díky poznatkům z přechodí části (5.5 Výsledky a diskuze) byly vybrány parametry použité pro výrobu vzorku č.10 (Tabulka 6). Byla zvolena strategie navařování vrstev v obou směrech, z důvodu kompenzace defektů vzniklých při zapalování oblouku.

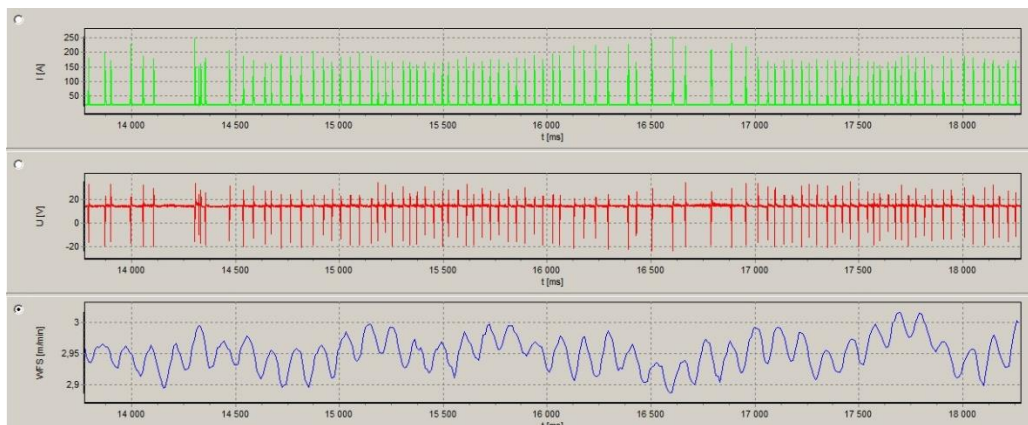
Parametry se projevily jako optimální jak z rozměrového hlediska, tak z hlediska elektrických a tepelných poměrů. Zejména ve vyšších vrstvách segmentu byly velmi stabilní (Obrázek 51).

Jediná komplikace, která se při výrobě objevila, bylo zapalování elektrického oblouku. Ve vyšších vrstvách segmentu docházelo k chybám v načasování, a to vedlo k rozstříku a následné vlnitosti okrajů.



Obrázek 51 : Výsledný segment

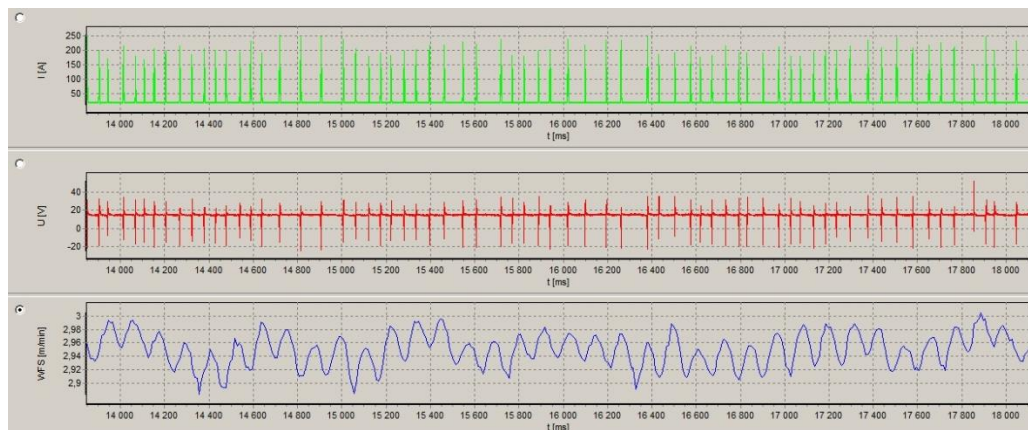
Záznamy z Weld Monitoru jsou z 15. a 40. vrstvy. Frekvence zkratů se od zkušebního vzorku prakticky neliší. V porovnání záznamů mezi sebou se jeví 40. vrstva stabilnější (Obrázek 52, Obrázek 54), co se týče frekvence výbojů. Korekce IAC™ ve 40. vrstvě se také jeví, v detailních zobrazeních (Obrázek 53, Obrázek 55) méně radikální, ve srovnání s vrstvou č.15. Záznam WFS je v obou případech stabilní.



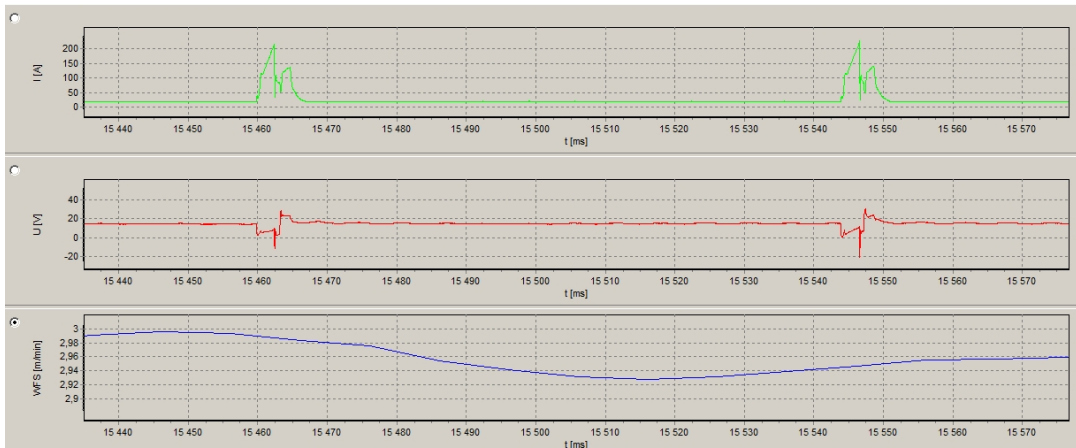
Obrázek 52 : Záznam průběhu svařování 15. housenky výsledného segmentu



Obrázek 53 : Detail záznamu průběhu svařování 15. housenky výsledného segmentu



Obrázek 54 : Záznam průběhu svařování 40. housenky výsledného segmentu



Obrázek 55 : Detail záznamu průběhu svařování 40. housenky výsledného segmentu

6. ZÁVĚR

Byl proveden literární průzkum na téma MIG/MAG svařování, kde je podrobněji rozebrán princip, ochranné plyny, konstrukce svařovacích hořáku, zdroje svařovacího proudu a problematika technologie svařování tenkým přídatným materiálem označována jako microMIG. Dále se věnuje principu technologie WAAM, jejímu využití v průmyslu a materiálům, které je možné touto technologií zpracovávat. Poslední část rešerše je věnována kolaborativním robotům, jejich konstrukci, programování, možnostem jejich aplikace a otázce jejich bezpečnosti.

Cílem experimentální části byla optimalizace parametrů pro robotické navařování WAAM pro zhotovení výrobků s tenkou stěnou. Jako výchozí parametry byly přežaty výsledky Diplomové práce Bc. Jakuba Dalíka.

Byly zvoleny dva přístupy pro minimalizaci příčného rozměru stěny. Změna rychlosti hořáku při zachování elektrických hodnot ovlivňujících tepelný příkon a změna tepelného příkonu při zachování rychlosti posuvu svařovacího hořáku. Druhý přístup se ukázal jako perspektivnější, jelikož bylo parametrické okno mnohem širší.

Po zhotovení vzorků stanovenými hodnotami, byly vybrány možné varianty, které byly dále metalograficky zkoušeny. Vzorky byly nařezány, zality do metalografických vzorků, vybroušeny a vyleštěny pro měření na metalografickém mikroskopu. Jako směrodatný rozměr šířky stěny byla zvolena šířka 4. housenky. Z hlediska maximálního zúžení stěny za akceptovatelných svařovacích podmínek byl nejúspěšnější vzorek č. 10. Ten byl navařen při proudu $I = 40 \text{ A}$ a napětí $U = 14,8 \text{ V}$, za rychlosti posuvu hořáku $TS = 26 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Pro posouzení mikrostruktury byly dále všechny vzorky připravené pro metalografii, vyleptány a prozkoumány pod mikroskopem. Všechny se vyznačovaly mírně hrubozrnnou, austenitickou strukturou, bez významných defektů.

Finální segment byl zhotoven parametry vzorku č. 10. Byla vyrobena stěna o výšce 50 svarových housenek. Šířka housenky se pohybuje okolo 2,5 mm, což je výraznou redukcí rozměru, v porovnání se šířkou 3,9 mm dosaženou výchozími parametry.

Finální výstup této práce jsou poznatky v oblasti použitelných parametrů při snižování tloušťky segmentu vyráběném WAAM. Při zjišťování ideálních parametrů byla zjištěna oblast teoreticky funkčních hodnot, a následná aplikace těchto poznatků při skutečné výrobě se shledala s úspěchem.

Bibliografie

- [1] WEMAN, Klas. *1. Introduction to Welding*. online. In: Knovel. 2012, s. 75 - 92. Dostupné z: https://app.knovel.com/web/view/khtml/show.v/rcid:kpWPHE0001/cid:kt00BT3FK1/viewerType:khtml//root_slug:welding-processes-handbook/url_slug:introduction-welding?cid=kt00BT3FI1&b-toc-cid=kpWPHE0001&b-toc-root-slug=welding-processes-handbook&b-toc-title=Welding%20Processes%20Handbook%20%282nd%20Edition%29&b-toc-url-slug=introduction-welding&kpromoter=Summon&view=collapsed&zoom=1&page=1. [cit. 2023-11-12].
- [2] WAHAB, M.A. 6.03 - Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding. In: . Oxford: Elsevier, 2014, s. 49-76. ISBN 978-0-08-096533-8. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00610-5>.
- [3] *Svařování tenkých plechů, drátů a profilů, studijní text k modulu vzdělávacího programu Profesmodul*. První. EPAVA Olomouc, 2012.
- [4] AUTOR, Nenalezený. *MicroMIG Process*. online. In: Nenalezený vydavatel. Dostupné z: <https://www.sks-welding.com/en/application/welding-processes/micromig>. [cit. 2024-04-22].
- [5] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Svařování. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-857-7181-0.
- [6] WEMAN, K a LIDÉN, G. Mig Welding Guide. online. In: *Google Books*. 1. Woodhead Publishing, 2006, s. 29-32. Dostupné z: https://books.google.com/books/about/Mig_Welding_Guide.html?hl=cs&id=mr5QAwAAQBAJ. [cit. 2023-11-15].
- [7] ONEIDUSTRY. *Svářečka, Svařovací zdroj*. online. In: Oneindustry. 2019. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/lexikon/svarecka-svarovaci-zdroj/>. [cit. 2024-04-18].

- [8] SCIANELLA, Matthew. *Guide to Welding Contact Tips*. online. In: Earlbeck Gases. 2018. Dostupné z: <http://www.earlbeck.com/1/post/2018/06/what-is-a-welding-contact-tip.html>. [cit. 2024-04-22].
- [9] JASIC. *Parts of a MIG Welding Gun*. online. In: JASIC. JASIC. Dostupné z: <https://www.jasic.co.uk/post/parts-of-a-mig-welding-gun>. [cit. 2024-04-18].
- [10] *Metoda MIG/MAG - základní seznámení*. online. In: Svarecky-elektrody.cz. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/radce-svarece/metoda-mig-mag-zakladni-seznameni/>. [cit. 2023-12-01].
- [11] ZELENKA, Petr a ZELENKA.PETR@GMAIL.COM, E-mail:. *Periodická video tabulka prvků*. online. In: Nenalezený vydavatel. -. Dostupné z: <https://www.chemickeprvky.cz/prvek/ar/>. [cit. 2024-05-05].
- [12] SINGH, Sudhanshu a KHANNA, Pradeep. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials: A new process to shape engineering materials. *Materials Today: Proceedings*. 2021, roč. 44, s. 118-128. ISSN 2214-7853. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>.
- [13] EVANS, Sian; WANG, Jie; QIN, Jian; HE, Yongpeng; SHEPHERD, Paul et al. A review of WAAM for steel construction – Manufacturing, material and geometric properties, design, and future directions. *Structures*. 2022, roč. 44, s. 1506-1522. ISSN 2352-0124. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.08.084>.
- [14] BUSACHI, Alessandro; ERKOYUNCU, John; COLEGROVE, Paul; MARTINA, Filomeno a DING, Jialuo. Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications. *Procedia CIRP*. 2015, roč. 37, s. 48-53. ISSN 2212-8271. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.08.085>.
- [15] OLIVEIRA, J.P.; GOUVEIA, Francisco a SANTOS, Telmo. Micro wire and arc additive manufacturing (μ -WAAM). *Additive Manufacturing Letters*. 2022,

- roč. 2, s. 100032. ISSN 2772-3690. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100032>.
- [16] HOEFER, K.; HAELSIG, A. a MAYR, P. Arc-based additive manufacturing of steel components—comparison of wire- and powder-based variants. online. *Welding in the World*. 2018, roč. 62, č. 2, s. 243-247. ISSN 0043-2288. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s40194-017-0527-9>. [cit. 2024-04-21].
- [17] XIN, Haohui; TARUS, Iulia; CHENG, Lu; VELJKOVIC, Milan; PERSEM, Nicolas et al. Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials. *Structures*. 2021, roč. 34, s. 1393-1402. ISSN 2352-0124. Dostupné z: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.08.055>.
- [18] RATHEE, Sandeep a SRIVASTAVA, Manu. *Wire Arc Additive Manufacturing: Fundamental Sciences and Advances*. online. 1. Boca Raton: CRC Press, 2024. ISBN 9781003829997. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/edit/10.1201/9781003363415/wire-arc-additive-manufacturing-sandeep-rathee-manu-srivastava>. [cit. 2024-02-13].
- [19] FRAZIER, William E. *Metal Additive Manufacturing: A Review*. online. In: SpringerLink. 2014. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-014-0958-z>. [cit. 2024-04-19].
- [20] RAMLAB. online. 2020. Dostupné z: <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/>. [cit. 2024-01-30].
- [21] AUTOR, Nenalezený. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Explained*. online. In: MakerVerse. 2021. Dostupné z: [https://resourcehub.makerverse.ai/metal-3d-printing/wire-arc-additive-manufacturing-\(waam\)-explained](https://resourcehub.makerverse.ai/metal-3d-printing/wire-arc-additive-manufacturing-(waam)-explained). [cit. 2024-01-30].
- [22] RUMÍŠEK, CSC., Doc. Ing. Pavel. *Automatizace*. online. In: https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf. 2003. Dostupné z:

https://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf. [cit. 2024-02-11].

- [23] TALÁCKO, Jaroslav a MATIČKA, Robert. *Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů*. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-010-1291-3.
- [24] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [25] HUANG, Chien-Ming. Contextual Programming of Collaborative Robots. In: . Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 321-338. ISBN 978-3-030-50334-5.
- [26] VŠE O PRŮMYSLU. *Bezpečnost robotických pracovišť*. online. In: Vše o průmyslu. 2020. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/robotizace/prumyslove-roboty/bezpecnost-robotickyh-pracovist.html>. [cit. 2024-02-29].
- [27] IEEE. *Practical Engineering Education: Use of collaborative robots in the context of Industry 5.0*. online. In: IEEE. IEEE Xplore. 2023, 12.12.2023. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10344213>. [cit. 2024-03-11].
- [28] BUCHERT, Jean-marc. *Collaborative robot risk assessment: the complete guide*. online. In: Man Machines. 2021. Dostupné z: <https://manplasmachines.com/cobot-risk-assessment/>. [cit. 2024-02-29].
- [29] IFR INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS, . *IFR presents World Robotics Report 2020*. online. In: IFR International Federation of Robotics. 2020. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>. [cit. 2024-03-11].
- [30] MIGATRONIC CZ A.S. *Sigma Galaxy*. online. In: MIGATRONIC CZ A.S. Dostupné z: <https://kjellberg-trading.com/userFile/5889>. [cit. 2024-04-19].
- [31] SPECTROGRAPHIC. *STRUERS LABOTOM 3*. online. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/products/refurbished-struers-labotom-3>. [cit. 2024-04-19].

- [32] STRUERS GMBH. *STRUERS CITO PRESS 1*. online. 2010. Dostupné z: https://www.priniotakis.gr/catalog2/manuals/CitoPress-1_brochure_English.pdf. [cit. 2024-04-19].
- [33] SPECTROGRAPHIC. *STRUERS CITO PRESS 1*. online. 2010. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/products/refurbished-struers-cito-press-1>. [cit. 2024-04-19].
- [34] BUEHLER LTD. *Alpha, Beta & Vector™ GRINDER-POLISHERS AND POWERHEAD*. online. In: BUEHLER LTD. *Horizonindia.in*. 2007. Dostupné z: <http://www.horizonindia.in/buehler/grinders-polishers/4-AlphaBetaVector.pdf>. [cit. 2024-04-19].
- [35] SPECTROGRAPHIC. *BUEHLER PHOENIX BETA*. online. Dostupné z: <https://spectrographic.co.uk/products/buehler-phoenix-beta>. [cit. 2024-04-19].
- [36] AUTOR, Nenalezený. *LectroPol*. online. In: *Struers.com*. 2023. Dostupné z: <https://www.struers.com/en/Products/Electrolytic-Preparation/Electrolytic-equipment/LectroPol>. [cit. 2024-05-05].
- [37] AUTOR, Nenalezený. *EN 1.4404 / UNS S31603 / 316L*. online. In: *Sverdrup ocel*. -. Dostupné z: <https://www.sverdrupsteel.com/cs/products/austenitic-alloys/alloy-1-4404-uns-s31603-316l>. [cit. 2024-05-05].
- [38] DALÍK, Bc. Jakub. *Robotické navařování 3D struktur mikroMIG/MAG: návrh a výroba hořáku*. Diplomová práce. Praha: České Vysoké Učení Technické v Praze, 2023.
- [39] MATHISON, Jerry. *Understanding GMAW transfer modes*. online. In: *THE WELDER. The welder*. 2008, 20.10.2023. Dostupné z: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/consumables/understanding-gmaw-transfer-modes-1>. [cit. 2024-05-07].
- [40] MIGATRONIC CZ A.S. *MIGATRONIC*. online. 2020. Dostupné z: <https://www.migatronik.com/cz/podpora/vyrobek/sigma-galaxy-400-5892>. [cit. 2024-04-19].

Seznam tabulek

Tabulka 1: Parametry svařovacího zdroje [30]	36
Tabulka 2 : Chemické složení přídavného materiálu [37]	39
Tabulka 3:Použitý program zdroje	39
Tabulka 4 : Výchozí parametry svařování [38]	39
Tabulka 5 : Parametry při zvyšování TS.....	40
Tabulka 6:Parametry při snižování I.....	40
Tabulka 7 : Použité extrémní hodnoty	41

Seznam obrázků

Obrázek 1 : Popis metody svařování MIG/MAG [3]	15
Obrázek 2 : Statické charakteristiky svařovacích proudů [7].....	17
Obrázek 3 : Popis svařovacího hořáku MIG/MAG [9]	20
Obrázek 4 : Schéma WAAM [17].....	25
Obrázek 5 : Podíl využití materiálu v procesu WAAM [18].....	27
Obrázek 6 : Kinematické schéma sériového uspořádání [24].....	28
Obrázek 7 : Kinematické schéma paralelního uspořádání [24].....	29
Obrázek 8 : Blokové schéma pohonu průmyslového robota [22]	30
Obrázek 9 : Vyobrazení bezpečnostních požadavků [27]	33
Obrázek 10 : Počet výrobců kolaborativních robotů v jednotlivých zemích [27]	34
Obrázek 11 : Pracoviště v laboratoři svářečských technologií.....	35
Obrázek 12 : Svařovací zdroj Migatronic Sigma Galaxy 400 [40].....	36
Obrázek 13 : Pila Struers Labotom-3 [31].....	37
Obrázek 14 : Struers CitoPress 1 [33].....	37
Obrázek 15 : Buehler Beta [35]	38
Obrázek 16 : Struers LectroPol – 5 [36].....	38
Obrázek 17 : Vzorek č.1	42
Obrázek 18 : Výsledky měření Vzorku č.1	42
Obrázek 19 : Vzorek č.3.....	43
Obrázek 20 : Výsledky měření Vzorku č.3	43
Obrázek 21 : Vzorek č.4.....	44
Obrázek 22 : Výsledky měření Vzorku č.4	44
Obrázek 23 : Vzorek č.5.....	45
Obrázek 24 : Výsledky měření Vzorku č.5	45
Obrázek 25 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.5	46
Obrázek 26 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.5	46
Obrázek 27 : Vzorek č.6.....	46
Obrázek 28 : Výsledky měření Vzorku č.6.....	47
Obrázek 29 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.6	47
Obrázek 30 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.6	48
Obrázek 31 : Vzorek č.9.....	48

Obrázek 32 : Výsledky měření Vzorku č.9	49
Obrázek 33 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.9	49
Obrázek 34 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.9	50
Obrázek 35 : Vzorek č.10	50
Obrázek 36 : Výsledky měření Vzorku č.10.....	51
Obrázek 37 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.10.....	51
Obrázek 38 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.10.....	52
Obrázek 39 : Vzorek č.11	52
Obrázek 40 : Výsledky měření Vzorku č.11.....	53
Obrázek 41 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.11	53
Obrázek 42 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.11	54
Obrázek 43 : Vzorek č.14	54
Obrázek 44 : Výsledky měření Vzorku č.14.....	55
Obrázek 45 : Záznam průběhu svařování Vzorku č.14.....	55
Obrázek 46 : Detail záznamu průběhu svařování Vzorku č.14	56
Obrázek 47 : Koncová housenka vz.č.3 25x zvětšení	56
Obrázek 48 : Střední část vz.č.3 25x zvětšení.....	57
Obrázek 49 : Mikrostruktura vz.č.10 100x zvětšení.....	57
Obrázek 50 : Mikrostruktura vz.č.10 200x zvětšení.....	58
Obrázek 51 : Výsledný segment	59
Obrázek 52 : Záznam průběhu svařování 15. housenky výsledného segmentu.	60
Obrázek 53 : Detail záznamu průběhu svařování 15. housenky výsledného segmentu.....	60
Obrázek 54 : Záznam průběhu svařování 40. housenky výsledného segmentu.	60
Obrázek 55 : Detail záznamu průběhu svařování 40. housenky výsledného segmentu.....	61

Seznam grafů

Graf 1 : Naměřené hodnoty	41
---------------------------------	----