



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Vliv ochranných plynů na robotizované navařování niklových slitin metodou TIG

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Jakub Dalík

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Karel Kovanda, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dalik** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **473705**
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 ochranných plynů na robotizované navařování niklových slitin metodou TIG

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of Shielding Gases During Robotic TIG Welding of Nickel Alloys

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod do materiálů - teoretický přehled niklových slitin.
2. Metody svařování použitelné pro niklové slitiny (elektrický oblouk a speciální metody svařování).
3. Ochranné atmosféry používané pro niklové slitiny.
4. Návrh experimentální činnosti - technologický postup, parametry, ochranné plyny, NDT a DT kontrola.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

1. Welding processes for Inconel 718 - IOPscience
2. Activated-TIG Welding of Different Steels: Influence of Various Flux and Shielding Gas
3. S. Kou: Welding metallurgy
4. ASM Handbook - Welding, Brazing and Soldering
5. Studijní materiály výrobců technických plynů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **06.08.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2021**

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

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

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

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karel Kovanda, 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 všem, kteří mi pomohli cennými radami při vypracování bakalářské práce. Především bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Karlu Kovandovi, Ph.D. a panu Ing. Pavlu Rohanovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky. Dále doc. Ing. Marii Kolaříkové, Ph.D. za její asistenci při provedení metalografické zkoušky.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá navařování niklových slitin metodou TIG konkrétně, ochrannými plyny. Teoretická část obecně popisuje problematiku svařování niklových slitin, jejich rozdělení a jejich vlastnosti. Dále popisuje metody svařování pomocí elektrického oblouku a speciální metody svařování, kde shrnuje jejich výhody a nevýhody. Experiment se v první části zabývá volbou vhodných parametrů pro vytvoření návaru. V druhé části se zabývá navařením stěny, za použití třech ochranných atmosfér (argon 4.6, argon + 30 % helia, argon + 5 % vodíku). Závěrem je porovnání vlivu ochranných atmosfér na geometrii návaru, struktury třech navařených stěn a podrobení zkouškám pro zjištění vad návaru.

Název bakalářské práce: Vliv ochranných plynů na robotizované navařování niklových slitin metodou TIG
Autor práce: Jakub Dalík
Vedoucí práce: Ing. Karel Kovanda, Ph.D.
Konzultant: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.
Akademický rok: 2020/2021
Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce: 54 stránek, 14 tabulek, 46 obrázků
Klíčová slova: TIG, nikl, Inconel 718, ochranné plyny, robotické navařování

Annotation

This bachelor thesis deals with the welding of nickel alloys by the TIG method, specifically, shielding gasses. The theoretical part generally describes the issue of welding nickel alloys, their distribution and their properties. It also describes electric arc welding methods and special welding methods, where it summarizes their advantages and disadvantages. The experiment in the first part deals with the selection of suitable parameters for the creation of the weld. The second part deals with wall welding, using three protective atmospheres (argon 4.6, argon + 30% helium, argon + 5% hydrogen. The conclusion is to compare the influence of protective atmospheres on the weld geometry, the structures of the three welded walls and to subject it to tests to determine the weld defects.

Title of the final thesis: Influence of shielding gases on robotic welding of nickel alloys by TIG method

Author: Jakub Dalík

Supervisor: Ing. Karel Kovanda, Ph.D.

Consultant: Ing. Pavel Rohan, Ph.D.

Academic year: 2020/2021

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Extent: 54 pages, 14 tables, 4 pictures

Keywords: TIG, nickel, Inconel 718, shielding gasses, robotic surfacing.

Obsah

1. Úvod a cíle práce.....	11
2. Žáruvzdorné oceli a niklové slitiny	12
2.1 Dělení žáruvzdorných ocelí a niklových slitin.....	12
2.1.1 Feritické oceli	12
2.1.2 Austenitické oceli	12
2.1.3 Slitiny na bázi niklu.....	13
3. Svařování.....	15
3.1 Svařování a svařovací problémy Inconelu 718.....	15
3.2 Teplota Interpass.....	16
4. Metody svařování použitelné pro niklové slitiny	16
4.1 Speciální metody svařování.....	16
4.1.1 Svařování elektronovým paprskem	16
4.1.2 Svařování plazmou	17
4.1.3 Svařování laserem.....	17
4.2 Svařování elektrickým obloukem.....	17
4.2.1 Svařování obalenou elektrodou MMA (Manual Metal Arc)	17
4.2.2 Svařování pod tavidlem SAW (Submerged Arc Welding)	18
4.2.3 Svařování metodou MIG (Metal Inert Gas)	18
4.2.4 Svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas).....	19
Druhy svařovacích proudů.....	20
Zapálení oblouku	22
Wolframové elektrody	22
Svařovací hořák TIG	25
5. Ochranné atmosféry pro niklové slitiny	26
5.1 Argon.....	26
5.2 Vodík	26

5.3 Helium	26
5.4 Směs argonu a helia	27
5.5 Směs argonu a vodíku	27
6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
6.1 Pracoviště	29
6.1.1 Svařovací robot FANUC ARC Mate 100iC	30
Podavač drátu Migatronic CWF Multi	30
Svařovací hořák	30
Polohovadlo Fanuc P250	31
Upínací přípravek	31
6.1.2 Zdroj Migatronic PI320	32
6.1.3 Univerzální měřicí ústředna Ahlborn Almemo 5690-2M	33
6.1.4 Výbojová svářečka BT-2	34
6.2 Návrh experimentální činnosti	34
6.2.1 Přídavný materiál	35
6.2.2 Základní materiál	35
6.2.5 Ochranné plyny	35
6.2.4 Návrh parametrů	35
6.3 Argon 4.6	37
6.4 Směs argonu 70 % s heliem 30 %	38
6.5 Směs argonu a 5 % vodíku	39
6.6 Výběr vhodných variant pro vrstvený návar	40
6.7 Vícevrstvé návary	40
6.8 Výsledky a zhodnocení	42
6.8.1 Struktura návary Ar 4.6	42
6.8.2 Struktura návary Ar70/He30	42
6.8.3 Struktura návary Ar + 3 % He	42
6.8.4 Teplotní průběh	43

6.9 Analýza.....	44
6.9.1 Kapilární zkouška	44
6.9.2 Metalografická zkouška.....	45
7. ZÁVĚR.....	49
Bibliografie.....	50
Seznam tabulek.....	52
Seznam obrázků.....	53

Seznam zkratek a symbolů

AC – Střídavý proud

DC – Stejnoseměrný proud

HF – Bezdotykové zapálení oblouku

LA – Zapálení oblouku dotykem

MIG – Svařování s odtavující se elektrodou v inertním plynu

MMA – Svařování obalovanou elektrodou

SAW – Svařování pod tavidlem

TIG – Svařování neodtavující se wolframovou elektrodou

TOO – Tepelně ovlivněná oblast

1. Úvod a cíle práce

Niklové slitiny vynikají vlastnostmi jako jsou žáruvzdornost a korozivzdornost, proto jsou velice žádané v energetickém průmyslu. Jelikož jsou v energetice dílce z niklové slitiny velice namáhány je možné, že dojde k jejich opotřebení. Pak se nabízí renovace navařením. Technologie navařování spočívá v pokládání jedné vrstvy na druhou a tím vytvořit požadovaný rozměr dílce.

Metoda TIG patří do tavného svařování elektrickým obloukem, který hoří mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Svarová lázeň je chráněna ochrannou atmosférou proti oxidaci. Tato metoda umožňuje svařovat téměř všechny kovové materiály.

Ochranné plyny mají zásadní vliv na rychlost svařování, stabilitu elektrického oblouku, mechanické vlastnosti svarů. V experimentální části se bakalářská práce zabývá právě porovnáním třech ochranných plynů při navařování souvislé stěny.

Cíle práce:

- Volba vhodného přídavného materiálu
- Volba wolframové elektrody
- Stanovení teplotního cyklu (teploty interpass)
- Výběr vhodných parametrů pro svařování
- Porovnání třech ochranných plynů na základě argonu (hloubka průvaru, geometrie, převýšení, šířka)
- Vytvoření vrstveného svaru (návaru) z niklové slitiny

2. Žáruvzdorné oceli a niklové slitiny

Žáruvzdornost je schopnost materiálu dlouhodobě odolávat vysokým teplotám. Žáruvzdorné oceli se vyznačují proti jiným druhům ocelí velkou odolností proti okujení v okysličující atmosféře při teplotách nad 550 °C. Každá žáruvzdorná ocel má svoji určitou nejvyšší pracovní teplotu, při které je její odolnost proti žáru dostatečná. Nad touto teplotou se daná ocel již nepoužívá, protože její opal probíhá vždy rychleji. Oceli musí být zpracovatelné alespoň zatepla a musí vykazovat dobrou svařitelnost.

Nejvyšší žáruvzdornosti dosahují slitiny, které již obsahují Fe méně než 50 %, popř. ve slitinách se Fe nevyskytuje vůbec. Tyto slitiny patří do neželezných kovů (např. inconel je slitina 72 hm.% Ni + 15 hm.% Cr + 10 hm.% Fe + 2,5 hm.% a 0,7 hm.% Al, nimonic obsahuje 50-80 hm.% Ni + Cr (bez Fe), který se při 80 hm.% Ni a 20 hm.% Cr používá pro teploty až 1 100°C).

Všechny žáruvzdorné oceli mají i určitou odolnost proti elektrochemické korozi, takže vyhovují i jako oceli korozivzdorné. [1]

2.1 Dělení žáruvzdorných ocelí a niklových slitin

2.1.1 Feritické oceli

Feritické oceli, které obsahují 15 až 25 hm.% Cr a až 5 hm.% Al, jsou určeny k použití za zvýšených teplot podle jednotlivých druhů od 600 do 1200 °C, výjimečně i o něco výše. Protože obsahují minimální množství C, jsou nekalitelné. Nejčastěji se využívají v automobilovém průmyslu pro výfukové systémy, nebo pro součástky uložené v těsné blízkosti u motoru. [1]

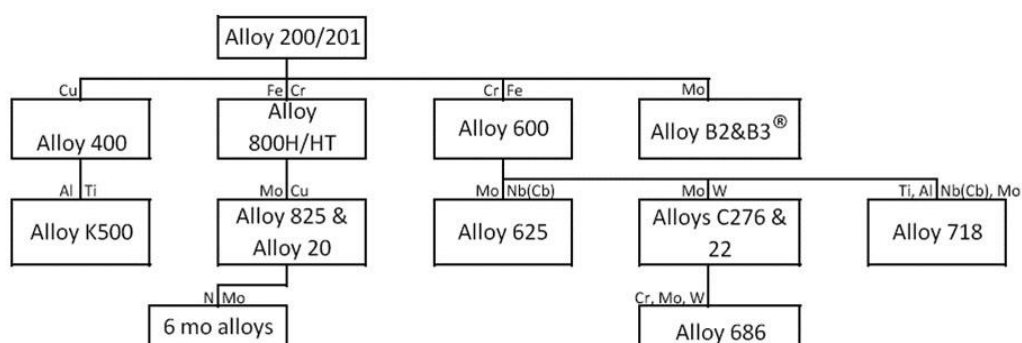
2.1.2 Austenitické oceli

Austenitické žáruvzdorné oceli jsou rovněž nekalitelné. Obsahují 15 až 20 hm.% Cr a mají vyšší obsah Si, Al, Mo. Oceli jsou odolné proti žáru do teploty 1100 °C. Jsou dobře svařitelné a jejich pevnost je za vysokých teplot vyšší než ocelí feritických, pokud se jedná o atmosféru oxidační. V redukčním prostředí jsou vhodnější oceli feritické. Protože nejsou určeny k mechanickému namáhání, nevádí že u nich nelze dosáhnout zvýšených pevnostních

vlastností tepelným zpracováním, protože jsou nekalitelné. Austenitické oceli se využívají v hutních či spalovacích pecích. [1]

2.1.3 Slitiny na bázi niklu

Inconely jsou slitiny niklu s chromem a železem, případně s dolegováním molybdenu, niobu, titanu a wolframu. Při dolegování Ti, Al, Nb a Mo se získávají precipitačně vytvrditelné inconely např. inconel 751. Jejich rozdělení je znázorněno na obrázku 1. Všechny inconely jsou charakteristické vysokým obsahem Ni, který dosahuje 50 až 70 %. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou podrobněji popsány v tab. 1 a tab. 2.



Obrázek 1: Rozdělení niklových slitin [2]

Inconel 600 (NiCr15Fe8) a 690 (NiCr29Fe9) vykazují dobrou odolnost koroznímu praskání, louhům a mají i vysokou žáruvzdornost. Používají se v jaderných parogenerátorech, petrochemii i v zařízeních na výrobu kyseliny sírové, dusičné a fluorovodíkové.

Inconel 622 (NiCr20Mo14Fe2), 625 (NiCr21Mo9Fe2), 686 (NiCr21Mo16W) i C-276 (NiCr16Mo16Fe5) vykazují díky 9 až 16 % molybdenu vysokou odolnost vůči agresivním korozním prostředí a dolegováním 16 až 20 % Cr se tyto slitiny pasivují. U těchto Ni slitin je potlačena náchylnost k mezikrytalové korozi snížením obsahu uhlíku na 0,01 % a stabilizací niobem či titanem.

Inconel 751 (NiCr16Fe8Ti3AlNb) vykazuje mez kluzu kolem 800 MPa a při teplotě 815 °C má pro 1000 hodin mez pevnosti v tečení 100 MPa. Vysoká tvrdost a ořezuvzdornost spolu s odolností proti spalinám obsahující PbO, sulfidy, Bromidy a chloridy se využívá především u ventilů spalovacích motorů. [3] [4]

Inconel 718 je vytvrditelná superslitina na bázi niklu. Vyznačuje se dobrou oxidační odolností a relativně dobrou pevností při vysoké teplotě, která dosahuje až do 700°C. Slitina je zaručeně svařitelná s vysokou odolností proti popraskání. Díky těmto vlastnostem má Inconel 718 mnoho využití a to např. v jaderných reaktorech, leteckých motorech, plynových turbínách.

Mikrostruktura Inconelu 718 zahrnuje austenitickou matici γ , ve které jsou rozpuštěny další sekundární fáze. Podstatou zpevnění je precipitace fáze γ'' . Tato fáze vytváří lamely, které jsou koherentní s austenitickou maticí. Intermetalická fáze γ'' (Ni_3Nb) má tetragonální strukturu. Fáze γ'' se vytváří procesem precipitačního vytvrzování. Tento proces zahrnuje rozpouštěcí žíhání při teplotě 970-1 175°C, po kterém následuje jeden nebo více precipitačních ohřevů při teplotách 600-815°C. Tento proces má za následek vznik mikrostruktury ve formě velkých zrn obsahujících precipitační fáze Ni_3Nb a dále četný výskyt karbidů na hranici zrn. [5] [6]

Tabulka 1 : Chemické složení žáruvzdorných slitin [4]

Chemické složení						
		Inconel 600	Inconel 625	Inconel 718	Monel 400	Hastelloy C276
Prvek [%]	Ni	72	58 min	50-55	63 min	57
	Cr	14-17	20-23	17-21	-	15,5
	Mo	-	8-10	2,8-3,3	-	16
	W	-	-	-	-	3-4,5
	Nb	-	3,15-4,15	4,75-5,5	-	-
	Fe	6-10	5,0 max	Zbytek	2,5 max	5,5
	Mn	1 max	0,5 max	0,35max	2 max	1 max
	Co	-	-	1 max	2 max	2,5 max
	Si	0,5 max	0,5 max	0,35 max	0,5 max	0,08 max
	C	0,15 max	0,1 max	0,08 max	0,3max	0,01 max
	Ti	-	0,4 max	0,65-1,15	-	-
	S	0,015 max	0,015 max	0,015	0,024 max	0,03 max
	P	-	0,015 max	0,015	-	0,04 max
	Cu	0,5 max	-	0,3 max	28-34	-

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti žáruvzdorných slitin [4]

Mechanické vlastnosti					
	Inconel 600	Inconel 625	Inconel 718	Monel 400	Hastelloy C276
Rm [MPa]	550	760	1275	550	690
Rp _{0,2} [MPa]	240	345	1034	240	283
A[%]	30	25	12	40	40
Tvrđost Rockwell	65-85	220	331	60-80	88

3. Svařování

Svařování je proces zhotovení nerozebíratelných spojů dosažením meziatomových vazeb mezi spojovanými díly při jejich ohřevu nebo plastické deformaci, případně při společném působení ohřevu a plastické deformace. V zásadě se proto jedná o následující způsoby svařování:

- 1) Svařování Tavné – vykonávané místním ztavením spojovaných částí bez použití tlaku
- 2) Svařování s použitím tlaku – k dokonalému svaření je použita kombinace teploty a tlaku, při které vznikne plastická deformace a vytvoří se spoj.

Svarový kov vzniká tavením základního a přídavného materiálu nebo pouze tavením svarových ploch základních materiálů. Podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu nazýváme promísení. Při svařování kořenové části svarového spoje promísení vyšší než při svařování výplňové části. Při ručním obloukovém svařování je stupeň promísení od 10 do 40 %. Při některých metodách svařování je svarový kov tvořen pouze základním materiálem, například při svařování elektronovým paprskem. [7] [8]

3.1 Svařování a svařovací problémy Inconelu 718

Inconel 718 vykazuje výbornou svařitelnost oproti jiným vysoce legovaným slitinám. Je však náchylný k tvorbě některým metalurgickým problémům během svařování. Svarový kov ze slitiny Inconel 718 tolik neteče jako svarové kovy z uhlíkové oceli a nerezové oceli. Proto jsou v hotovém svaru často přítomny různé vady svařování, např. Pórovitost,

praskání tuhnutím. Protože tyto vady snižují mechanickou pevnost svaru, je důležité nalézt správné procesy svařování slitiny Inconel 718, které mohou minimalizovat jejich výskyt. [5]

3.2 Teplota Interpass

Teplota vícevrstvého svaru a přiléhajícího základního materiálu se měří bezprostředně před aplikací další svarové housenky. Obvykle uvedena jako maximální teplota. Teplota Interpass musí být měřena přímo na svarovém kovu, nebo na nejbližším okraji základního materiálu. Při svařování niklových slitin se nepoužívá přehřev. Teplotu interpass je nutné hlídat z důvodu tvoření trhlin za tepla a trhlin na hranicích zrn. Doporučená teplota interpass se liší s použitým materiálem. Pohybuje se okolo teploty do 130°C. [5]

4. Metody svařování použitelné pro niklové slitiny

Pro svařování niklových slitin je možno použít téměř všechny svařovací procesy, ale je nutné limitovat vnesené teplo mezi svary. Niklové slitiny můžeme svařovat metodami MIG, TIG, pod tavidlem, laserem, elektronovým paprskem, odporem, plazmou. [9]

4.1 Speciální metody svařování

Využívání nových materiálů a slitin nás rozvíjet další metody svařování. Díky speciálním metodám je potom možné svařovat obtížně svařitelné materiály, různorodé nebo různě tlusté. Pro speciální metody svařování je charakteristická vysoká svařovací rychlost, vysoká rychlost ohřevu, nižší vnesené teplo do svaru, zmenšení TOO a snížení zbytkových napětí a deformací. V oblasti tavného svařování se pak nabízí svařování svazkem elektronů, plazmou a laserem. [9]

4.1.1 Svařování elektronovým paprskem

Svařování elektronovým paprskem patří ke skupině tavného svařování, při kterém je použita kinetická energie elektronů, která se mění na teplo důsledkem neelastické interakce paprsku s kovem. Nejčastěji se při svařování používá vysoké plošné hustoty (108 W/cm^2), tedy režim hluboké penetrace, při které dosáhneme při vysokých rychlostech hluboký závar (až desítky mm) s malou TOO. Zaručenost svaření je dána vodivostí materiálů, který musí mít stejný potenciál jako vakuová komora, jinak dojde ke vzniku elektrostatického náboje. Díky vakuové ochraně lze svařovat žáruvzdorné oceli, niklové slitiny, titan a další materiály používané v energetickém průmyslu. Trhliny se mohou objevovat v menší míře než při použití jiných metod. Nevýhodou tohoto svařování patří jeho cenová náročnost. [10]

4.1.2 Svařování plazmou

Svařování plazmou je podobné jako svařování metodou TIG s rozdílem použití kovové hubice, ve které je zastrčená wolframová elektroda, kolem které proudí plazmový plyn. Díky zastrčené elektrodě v hubici dojde ke koncentraci elektrického oblouku, což má za následek koncentrovanější oblouk s hlubším průvarem, proto není nutná příprava svaru. [9]

4.1.3 Svařování laserem

Laserové svařování se řadí k tavnému svařování, kde pomocí laseru dojde k natavení materiálu. Principem svařování laserem je zaostření laserového paprsku do jednoho místa základního materiálu, kde dojde k natavení a vytvoření svaru. Díky soustředění paprsku do jednoho místa je možné vytvořit hluboký a tenký svar nazývaný jako „klíčová dírka“. Při této metodě není třeba přídavného materiálu ani ochranné atmosféry.

Zásadní výhodou této metody je rychlost svařování, která se pohybuje v metrech až desítkách metrů za minutu. Mezi další jeho výhody patří nízké vnesené teplo – malé deformace, hladký a čistý svar – není nutné po svařování očistit. Jelikož se jedná o velice přesné svařování je nutné před svařováním precizně připravit a spasovat základní materiál. Při svařování se musí brát v potaz bezpečnost proti laserovému záření. [11]

4.2 Svařování elektrickým obloukem

Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický výboj, který hoří v okolí ionizovaného plynu. Mezi charakteristické znaky elektrického oblouku patří intenzivní UV záření, malý potenciální rozdíl na elektrodě, velká proudová hustota katodové skvrny. [9]

4.2.1 Svařování obalenou elektrodou MMA (Manual Metal Arc)

Svařování obalovanou elektrodou je velmi stará metoda svařování, ale díky její flexibilitě a jednoduchosti se stále hodně využívá.

Elektroda se skládá z kovového jádra obaleným vrstvou tavidla. Obal elektrod dodává hlavní 3 funkce a to elektrickou, fyzikální a metalurgickou. Elektrická funkce je spojená s vyvoláním a stabilizací elektrického oblouku, zatímco fyzikální působení se týká viskozity a povrchového napětí strusky, které chrání svařovací lázeň a má vliv na přenos kapek roztaveného kovu. Metalurgická funkce zahrnuje chemické změny mezi svařovací lázní a struskou.

Nejpoužívanější elektrody:

Rutilové elektrody

S rutilovými elektrodami je snadná manipulace, mají malý rozstřík a jejich svary mají hladký povrch. Struska, která se vytváří během svařování je snadno odstranitelná.

Bazické elektrody

Hlavní složkou bazických elektrod je vápenec, který má příznivé metalurgické vlastnosti a schopnost stabilizovat oblouk. Při tavení elektrody se z obalu uvolňuje kyslíčník uhličité, který poskytuje ochranný plyn. Bazické obaly absorbují vlhkost, proto je nutné před svařováním elektrody přesušit. Typický čas sušení je jedna hodina na teplotě přibližně 150°C až 250°C. [12]

4.2.2 Svařování pod tavidlem SAW (Submerged Arc Welding)

Jedná se v podstatě o svařování elektrickým obloukem holou elektrodou, kde je dodávané tavidlo ve směsi prášku, které se teplotou svařeného kovu nataví a tím chrání svarový kov proti oxidaci. Mezi největší výhodu svařování pod tavidlem patří vysoká produktivita práce, která je až 5 krát vyšší než u svařování obalenými elektrodami. Při svařování pod tavidlem se vyžaduje precizní příprava základního materiálu a jeho čistota. Metoda je vhodná kvůli gravitaci prášku pro tupé a koutové svary v poloze vodorovné shora a pro koutové svařování vodorovné šikmo shora. Zdroj proudu je obvykle stejnosměrný proud s obrácenou polaritou. [9] [12]

4.2.3 Svařování metodou MIG (Metal Inert Gas)

Při svařování metodou MIG je svařovací teplota vytvářena hořením elektrického oblouku mezi odtavující elektrodou a základním materiálem. Jako ochranu před oxidací se používají ochranné plyny většinou směs argonu. Oproti metodě MMA využívá přibližně 10krát vyšší proudovou hustotu. O přísun drátu do svarové lázně se starají podávací kladky, které je možno regulovat.

Ke svařování korozivzdorných ocelí se používá stejnosměrný proud s elektrodou na kladném pólu nebo také stejnosměrným proudem s nepřímou polaritou.

Při svařování metodou MIG rozlišujeme 3 základní přenosy kovu, a to zkratový přenos, kapkový přenos a sprchový přenos.

Zkratový přenos – drát elektrody je nataven do tvaru kuliček, jejichž průměr je často větší než průměr elektrodového drátu. Kapky na konci elektrody se dostanou do kontaktu se svarovou lázní a vytvoří zkrat s náhlým nárůstem proudu. Proudové napětí způsobí oddělení kapek od elektrody. Frekvence u tohoto přenosu je řádově 20 až 100 Hz.

Kapkový přenos – v tomto přenosu nastane také tavení elektrody do tvaru velkých kapek, které se odtrhnou, když se nahromadí dostatečně pro překonání síly povrchového napětí a v důsledku větší obloukové délky padají volně až do svarové lázně.

Sprehový přenos – elektroda se taví, aby rozproudila jemné kapky. Jak proudová hustota roste, hrot elektrody dostane kuželovitý tvar a proud ještě jemnějších kapek se uvolní ve směru osy. Proudová hustota je řádově 200 A/mm². [12]

4.2.4 Svařování metodou TIG (Tungsten Inert Gas)

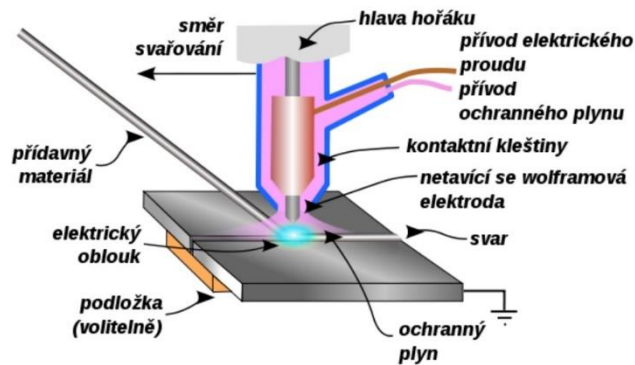
Principem svařování metodou TIG je hořící oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, přičemž je hořákem dodáván ochranný plyn, který chrání elektrodu a tavnou lázeň před okolní atmosférou (viz obr. 2) Jako ochranný plyn se používá netečný plyn o velmi vysoké čistotě minimálně 99,995 %. Nejčastěji se používá argon, helium nebo jejich směs. Přídavný materiál se dodává do svarového kovu ručním způsobem, nebo automaticky s podavačem drátu. Tato metoda je speciálně používána pro svařování slitiny Inconelu 718, jelikož poskytuje čisté a přesné spoje vysoké kvality. Má však nevýhody jako je vysoký tepelný příkon a nižší průnik svaru v důsledku širšího oblouku, což vede k nižší rychlosti svařování. [5] [9]

Výhody svařování metodou TIG oproti jiným metodám:

- Vytváří vysoce stabilní oblouk v širokém rozsahu proudu
- Svar má minimální TOO a deformace
- Oblouk je velmi flexibilní (Jeho směr a tvar lze snadno ovládat elektrickým polem)
- Dobré formování svaru na povrchu i kořenové části svaru
- Umožňuje svařovat ve všech polohách
- Dobrá ovladatelnost svařovacího procesu
- Svařování všech svařitelných materiálů

Nevýhody svařování metodou TIG:

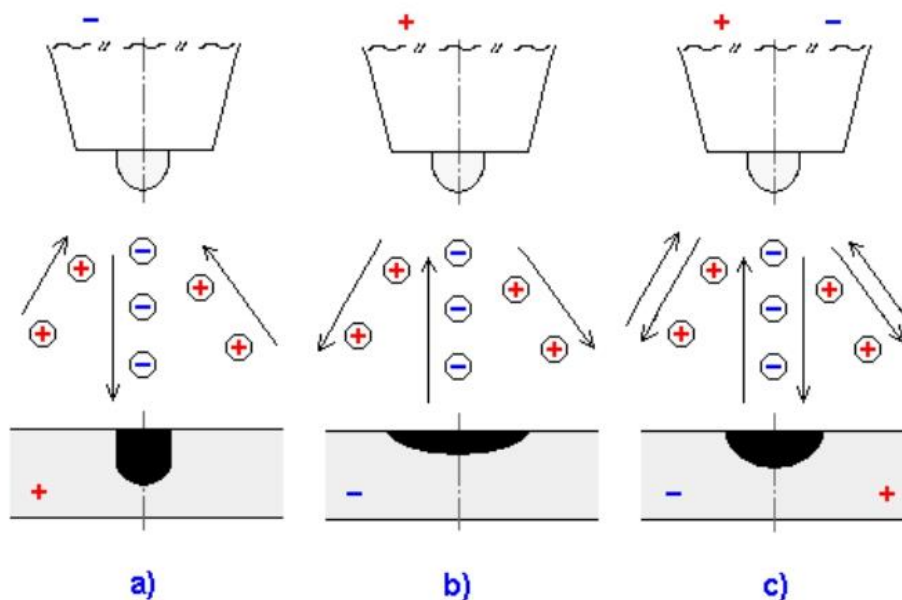
- Vysoká cenová náročnost na svařovací zařízení (Platí hlavně pro svařování střídavým proudem, které je složitější z důvodu regulačních prvků)
- Malá produktivita při ručním svařování v porovnání s metodou MIG/MAG z důvodu precizního, ale pomalého svařování. Malou produktivitu lze eliminovat automatickým svařování. Je vhodné svařovat spíše tvarově složitě konstrukce z ušlechtilých kovů a svařování v energetice. [9] [13]



Obrázek 2: Princip svařování TIG [13]

Druhy svařovacích proudů

Při svařování metodou TIG můžeme použít zdroj stejnosměrného proudu (DC) nebo střídavého proudu (AC). Při svařování stejnosměrným proudem se používá tzv. zapojení s přímou polaritou, kde je elektroda zapojená na plusovém pólu a základní materiál na minusový pól nebo nepřímou polaritou, kde je zapojení opačně. U svařování střídavým proudem se polarita mění v pravidelných intervalech. Tyto tři varianty zapojení jsou zobrazené na obrázku 3. Svařovat lze také impulsním proudem, který je popsán v následujícím odstavci. [13]



Obrázek 3: a) svařování DC proudem s nepřímou polaritou, b) svařování DC proudem s přímou polaritou, c) svařování AC proudem [13]

Střídavý proud

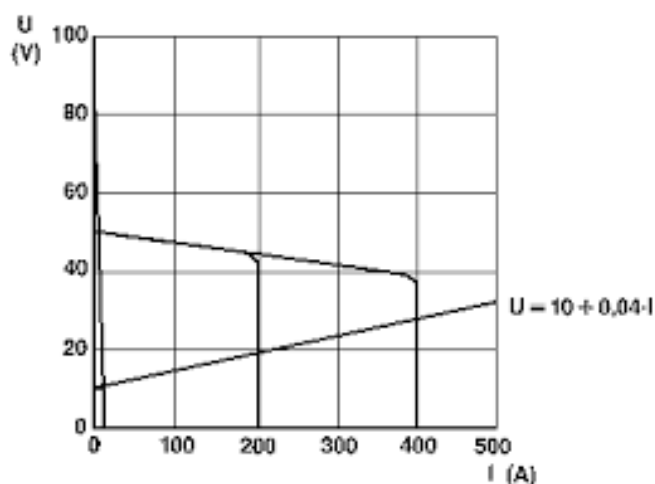
Střídavý proud se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin, má takzvaný čistící účinek při kladné polaritě elektrody. Katodová skvrna, která se vytvoří na základním materiálu není stabilní a pohybuje se na místa pokrytá oxidy. Po zasažení katodovou skvrnou se oxidy snadněji odpaří, protože mají nižší emisní energii.

Impulsní proud

Při svařování impulsním proudem se pravidelně mění intenzita proudu s časem mezi dvěma proudovými hladinami základním proudem I_z a impulsním proudem I_p . Tvar průběhu impulsů může být podle charakteristiky zdroje pravoúhlý, sinusový, lichoběžníkový. Základní proud I_z , který má hodnotu proudu nízkou (10-15 A) zajišťuje ionizaci oblouku v čase t_z . Jestliže je doba impulsního proudu dvakrát vyšší než doba pulsu, dochází k ztuhnutí svarové lázně. V opačném případě svarová lázeň neztuhne, ale zmenší svůj rozměr. Impulsní proud I_p nataví v čase t_p svarovou lázeň a přídavný materiál. Hodnota amplitudy a trvání pulsu určuje rozměr natavené lázně, proto je možná přesná regulace svařovacího režimu, dávkování hodnoty vneseného tepla a tvarování svarové lázně. Hodnota svařovacího proudu je nižší než u klasického svařování, proto mají svary malou TOO. [9]

Stejnoseměrný proud

Svařování stejnosměrným proudem se používá pro spojení všech typů ocelí, mědi, niklu, titanu a jejich slitin. Jako zdroj stejnosměrného proudu může být usměrňovač se síťovým transformátorem nebo inverter se strmou statickou charakteristikou. Strmá charakteristika zdroje je na obr. 4, kde je zobrazena standardní charakteristika oblouku. Při svařování stejnosměrným proudem je elektroda zapojená k zápornému pólu a svařovaný materiál ke kladnému pólu. Při tomto zapojení na elektrodu zhruba připadá 1/3 celkového tepla. Zbytek tepla se přenáší do materiálu, díky tomu není elektroda tolik přetěžována a svarový kov má dobrou hloubku závaru. [9] [13]



Obrázek 4: Voltampérová charakteristika zdroje pro TIG svařování [9]

Zapálení oblouku

K zapálení oblouku je možné provést dotykem elektrody základního materiálu, nebo bezdotykovým zapálení značené HF.

Při dotykovém zapalování je elektrodou naškrábnuto do základního materiálu a tím vznikne jako u obalované elektrody k zapálení oblouku. Nevýhodou naškrábnutím je kontaminace wolframové elektrody, které zhoršuje stabilitu oblouku a základního materiálu, ve kterém se mohou vytvořit nežádoucí vměstky. Při naškrabávání elektrody dochází k obroušení špičky elektrody, což je nežádoucí.

Nežádoucím vlivům naškrabávání elektrody je možné zamezit použitím metody LA, při kterém dochází pouze k doteku elektrody se základním materiálem, to má za důsledek nižší kontaminaci elektrody a základního materiálu.

Při bezdotykovém HF zapalování nedochází ke kontaktu mezi elektrodou a základním materiálem. Principem HF zapalování je vysokofrekvenční výboj, který přeskočí mezi elektrodou a základním materiálem a vytvoří svařovací oblouk. Tento druh zapalování se používá pro svařové spoje vysoké kvality, jelikož nedochází ke kontaminaci mezi elektrodou a svařovacím materiálem. [13]

Wolframové elektrody

Dělení elektrod

Pro svařování metodou TIG se používají netavící se wolframové elektrody, které se mohou dělit podle příměsí. Volba typu elektrody závisí na svařovaném materiálu. Vedle nelegované elektrody z čistého wolframu jsou legované, a to oxidy kovů thoria, lanthanu, ceru, zirkonu nebo yttria. Legované elektrody mají oproti nelegovaným elektrodám delší životnost, lepší zapalování oblouku a lepší stabilitu oblouku. V tab. 3 jsou porovnány vlastnosti

čisté wolframové elektrody s legovanými elektrodami. Elektrody se vyrábějí ze spékaného wolframu, který má teplotu tání 3 380°C a teplotu varu 5 700°C. [9] [13]

Tabulka 3: Porovnání wolframových elektrod

	Vlastnosti	Použití
WP-čistá wolframová elektroda	Dobrá stabilita oblouku Jako jediná se nebrousí do špičky	Vhodné pouze pro svařování hliníku
WT-elektroda legovaná thoriem	Delší trvanlivost, lepší zapalovací vlastnosti, lepší proudová zatížitelnost Nevýhoda: S rostoucím obsahem thoria se zvyšuje radioaktivita	Vhodné pro svařování vysoce legovaných a nerezových ocelí
WC-elektroda legovaná cérem	Podobné vlastnosti jako WT elektrody. Velmi dobré zapalovací vlastnosti (i při teplé elektrodě), dobrá trvanlivost a proudová zatížitelnost. Oproti WT méně zatěžují životní prostředí a svářeče	Pro svařování nelegovaných i legovaných ocelí, slitin hliníku, slitin titanu, niklu, mědi a hořčíku.
WL-elektroda legovaná lanthanem	Vyšší podíl lanthanu usnadňuje zapalování, lepší svařování v oblasti nízkých proudů.	Univerzální pro téměř všechna použití. Vhodné zejména pro automatizované svařování
WZ-elektroda legovaná zirkonem	Obsah zirkonu minimalizuje tvorbu wolframových vměstků. WZ elektroda slouží je náhrada za WP elektrodu	Pro svařování hliníkových materiálu.

Podle druhu legování se jednotlivé elektrody značí barevným proužkem na jednom konci elektrody. Druh a označení elektrod udává norma ČSN EN 26 848. Elektrody se také značí kódem (tab. 4). První písmeno je W, jako wolframová elektroda. Druhé písmeno značí druh legury a číslo značí desetinásobek koncentrace oxidů. [9]

Tabulka 4: Značení wolframových elektrod [14]

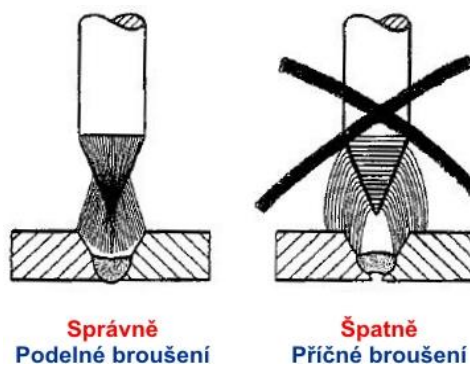
Označení	Barva	Proud	Materiál použití	Příměs
WP	Zelená	Střídavý (AC)	Hliník	Čistý wolfram
WT 10	Žlutá	Stejnoseměrný (DC)	Nerez	Thorium
WT 20	Červená	Stejnoseměrný (DC)	Nerez	Thorium
WT 30	Fialová	Stejnoseměrný (DC)	Nerez	Thorium
WC 10	Růžová	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Cerium
WC 20	Šedá	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Cerium
WL 10	Černá	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Lanthan
WL 15	Zlatá	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Lanthan
WL 20	Modrá	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Lanthan
WZ 08	Bílá	Střídavý (AC)	Univerzální	Zirkon
WZ 3	Hnědá	Střídavý (AC)	Hliník	Zirkon
WZ 4	Hnědá	Střídavý (AC)	Hliník	Zirkon
WR 2	Tyrkysová	Střídavý (AC) / Stejnoseměrný (DC)	Univerzální	Vzácné kovy

Broušení elektrod

Pro stejnosměrný proud se funkční konec elektrody brousí do kuželu, který je definován podle velikosti svařovacího proudu, hloubce a tvaru svarového úkosu a polaritě elektrod. Doporučení vhodného vrcholového úhlu v závislosti na proudu nalezneme v tab. 5. Elektrody se brousí tak, aby rýhy od broušení byly v podélném směru, což zajišťuje stabilní hoření oblouku od konce elektrod (obr. 5). Pro broušení se již převážně používají speciální brusky (viz obr. 6 a obr. 7) na wolframové elektrody, které chrání od nebezpečného brusného prachu. [9] [13]

Tabulka 5: Doporučené hodnoty vrcholového úhlu [9]

Svařovací proud	Vrcholový úhel
Do 20 A	30°
20 až 100 A	60°-90°
100 až 200 A	90°-120°
Nad 200 A	120°



Obrázek 5: Vliv směru broušení špičky [13]



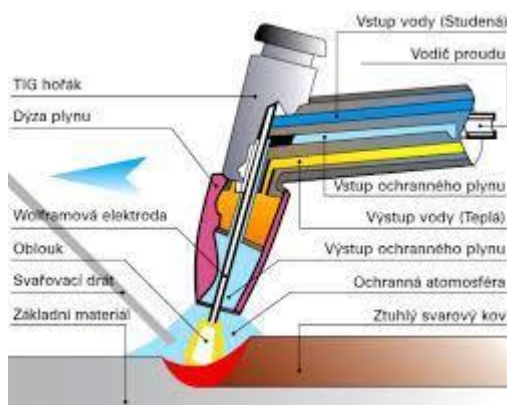
Obrázek 7: Bruska wolframových elektrod [15]



Obrázek 6: Bruska elektrod pro broušení pod vodou [15]

Svařovací hořák TIG

Svařovací hořák (obr. 8) patří k nejvíce namáhané části svařovacího celku. Hořák musí snášet přívod elektrického proudu na elektrodu, který je přiveden přes výměnnou kleštinu zajišťující pevné upnutí wolframové elektrody. Pevné upnutí wolframové elektrody je velice důležité z důvodu snížení přechodového odporu. Hořákem se také přivádí ochranný plyn do svarové lázně. Pro usměrnění ochranného plynu musí být na konci hořáku tryska, které se volí podle způsobu svařování. Keramické hubice se používají pro ruční svařování. Kovové pochromované nebo poměděné trysky se používají pro strojní hořáky chlazené vodou. K prodloužení laminárního proudění se používá plynová čočka, tím pádem můžeme více vysunout elektrodu a dostat se i do méně dostupnějších míst. Do proudu přibližně 150 A se hořák chladí proudícím ochranným plynem. Při svařování nad 150 A hořák chladí voda, která cirkuluje chladícím okruhem svařovacího zařízení. [9] [13]



Obrázek 8: hořák pro ruční svařování [13]

5. Ochranné atmosféry pro niklové slitiny

Ochranné plyny při svařování mají jako hlavní úkol zamezit přístup nežádoucích prvků okolní atmosféry do místa svaru. Především chrání elektrodu, správné hoření elektrického oblouku, tavnou lázeň a její okolí před vzdušným kyslíkem, který způsobuje oxidaci, tvorbu pórů nebo naplynění. Ochranné plyny mají také vliv na rychlosti svařování, přenos tepelné energie do svaru, průvar a geometrii svarového spoje. V následujícím odstavci jsou uvedené vlastnosti jednotlivých ochranných plynů pro svařování TIG. Následně jsou v tabulce 6 porovnány fyzikální vlastnosti ochranných plynů. [16]

5.1 Argon

Argon je bezbarvý, nehořlavý a netoxický vzácný plyn bez zápachu a je těžší než vzduch. Má malou tepelnou vodivost a relativně malý ionizační potenciál 15,8 eV. Hustota argonu je přibližně 1,4krát větší než vzduch, proto se nejlépe svařuje v poloze PA. Výroba argonu se provádí destilací kapalného vzduchu po odstranění dusíku a kyslíku. Jedná se o nejpoužívanější plyn pro svařování metodou TIG. Čistota plynu je značena pomocí tzv. devítkového kódu. První číslo určuje počet devítek ve stupni čistoty a druhé číslo za tečkou poslední hodnotu čísla. Například argon 4.6 značí, že je použit argon s čistotou 99,996 %. [9] [16] [17]

5.2 Vodík

Vodík je molekulární plyn nejčastěji používaný pro svařování austenitických ocelí, jelikož není vodík vhodné používat pro svařování martenzitických a feritických CrNi ocelí, poněvadž způsobuje praskavost za studena. Použití také není vhodné pro svařování hliníku a mědi z důvodu nebezpečí výskytu pórů. Jedná se o nejlehčí prvek plynu, který je přibližně 14krát lehčí než vzduch. Ionizační potenciál vodíku je 13,5eV. Příměs vodíku díky vysoké tepelné vodivosti zvyšuje teplotu oblouku a tekutost svarové lázně. Díky větší tekutosti je možné svařovat rychleji, což zvyšuje efektivitu procesu. Má větší průvar a snižuje převýšení housenky. Čistý vodík se při svařování nepoužívá jako ochranný plyn. [9] [16] [18]

5.3 Helium

Helium je velmi lehký, bezbarvý inertní plyn. Jelikož má helium nízkou hmotnost oproti vzduchu, musí být použit vyšší průtok plynu. V kontrastu s argonem má helium podstatně vyšší tepelnou vodivost a ionizační potenciál 24,6eV, díky tomu helium poskytuje široký profil závaru, lepší smáčivost na okrajích housenky, ale zhoršuje zapalování oblouku a má nízkou stabilitu při vyšší délce svařování. Svařování s heliem dostáváme do svařovací lázně vyšší teplotu než při svařování s čistým argonem, proto je možné svařovat vyšší rychlostí. Požívaná

čistota helia je min. 99,996 (4.6). Nevýhodou použití helia je jeho cena, která je zhruba 7krát vyšší oproti argonu. [17]

Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti [17]

	Hustota plynu [$\frac{kg}{m^3}$]	Tepelná vodivost [W/m*K]	Ionizační energie [eV]	Bod varu [m^3]	Specifický objem [$\frac{m^3}{kg}$]	Specifická hmotnost (vzduch=1)
Argon	1,66	17,72x10 ⁻³	15,8	-189,4	0,604	1,378
Helium	0,16	0,1513	24,6	-268,9	6,031	0,138
Vodík	0,08	0,1815	13,5	-252,8	11,968	0,0696

5.4 Směs argonu a helia

Smísení argonu a helia získáme lepší tekutost svarové lázně, díky které dostaneme lepší kvalitu a průvar. S rostoucím obsahem helia se zvyšuje napětí na oblouku a tepelný výkon, což má za důsledek pozitivní vliv na tvar a rozměr svaru. Oproti čistému argonu se zvyšuje rychlost svařování. Nejčastěji se používá směs v poměru 70 % Ar + 30 % He, 50 % Ar + 50 % He a 30 % Ar + 70 % He. [9] [19]

Výhody:

- 1) Snížená pórovitost svaru => vyšší kvalita a lepší mechanické vlastnosti
- 2) Dobré vyplnění mezery
- 3) Snížení spotřeby přídavného materiálu

Nevýhody:

- 1) Vysoká cena helia

5.5 Směs argonu a vodíku

Po smísení argonu a vodíku získáme vyšší tepelnou vodivost a tím tekutější svarovou lázeň, která snižuje poréznost ve svaru. Díky tekutější lázni je možné svařovat rychleji, a to až o 30 % oproti čistému argonu. Energie uvolněná vodíkem zlepšuje tvar a hloubku závaru. Při vyšší koncentraci vodíku je možné svařovat i větší tloušťky materiálu. [9] [19]

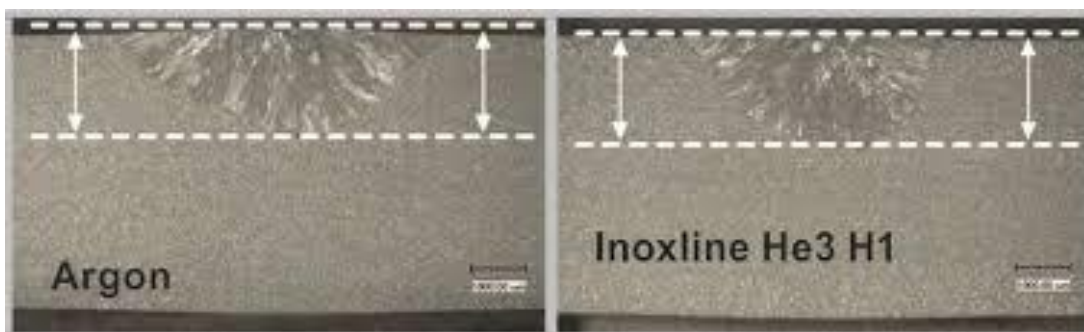
Výhody:

- 1) Větší hloubka závaru
- 2) Zlepšené vlastnosti tavení a svařování, menší míra vadných výrobků.
- 3) Vyšší svařovací rychlost
- 4) Vhodné do automatizované výroby

Nevýhody:

- 1) Možnost použití pouze pro svařování vysoce legovaných austenitických a austeniticko-feritických CrNi ocelí nebo niklu a slitin niklu, jelikož při použití martenzitických a feritických CrNi ocelí dochází k praskavosti za studena. Nevhodné je také použití pro svařování hliníku a mědi z důvodu vysokého nebezpečí tvorby pórů. [9] [19]

Z obrázku 9 je patrné, že při použití plynu Inonline s příměsí vodíku můžeme díky vyššímu vnesenému teplu použít vyšší rychlost svařování. Tím se zvýší efektivita celého procesu. [20]



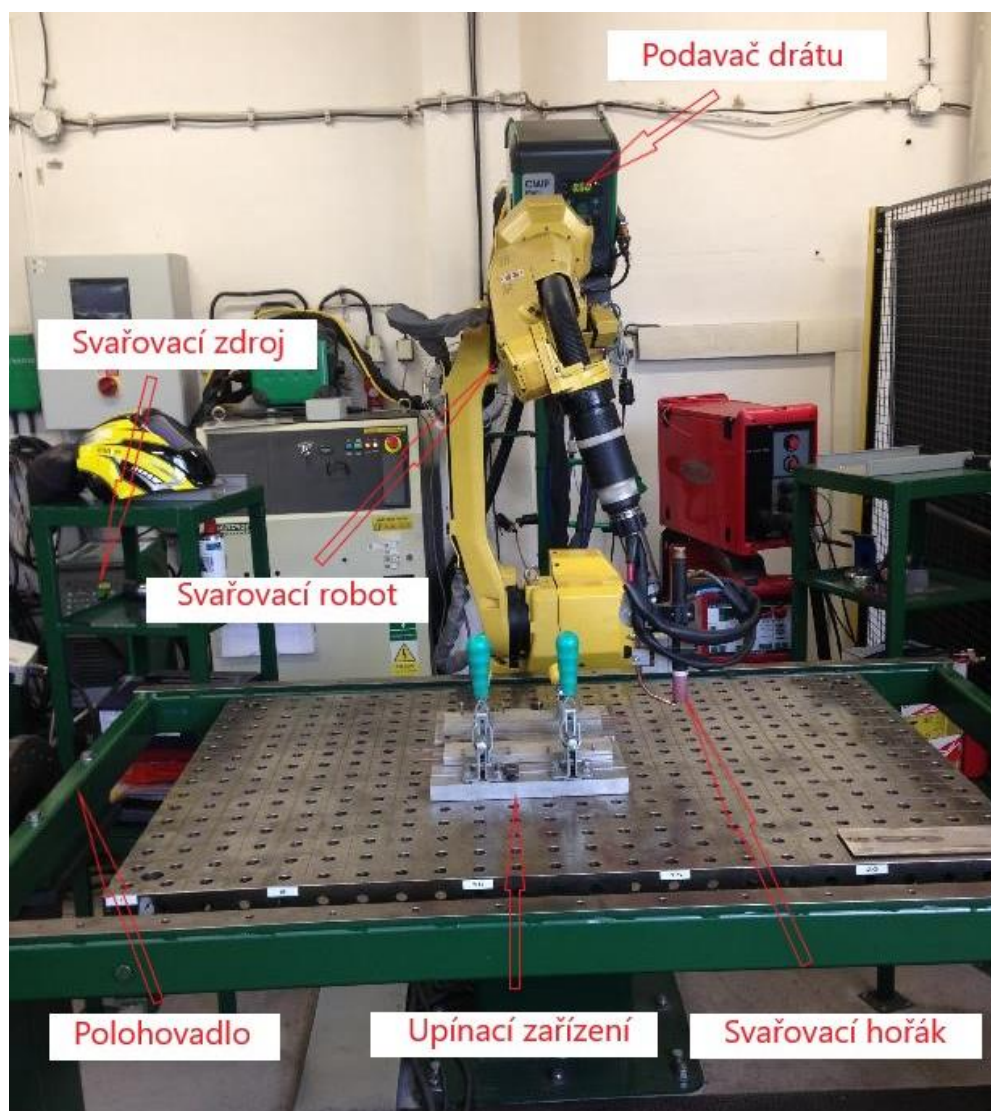
Obrázek 9: Porovnání průvaru plynu při stejném proudu (150 A) a) Rychlost svařování argon 21 cm/min, b) Rychlost svařování Inonline 29 cm/min

6. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zabývá navařením niklové slitiny metodou TIG na korozivzdorný plech a pozorování vlastností třech ochranných plynů. První část obsahuje navaření jednotlivých housenek a výběru svařovacích parametrů. Druhá část se zabývá navařením 6ti housenek na sebe a tím vytvoření souvislé stěny. Výsledkem experimentu bude technologické doporučení pro praxi.

6.1 Pracoviště

Experiment se prováděl v laboratoři výuky svářečských technologií nacházející se na ČVUT v Praze, Fakultě strojní, Ústavu strojírenské technologie. Uspořádání pracoviště je zobrazeno na obrázku 10.



Obrázek 10: Laboratoř výuky svářečských technologií

6.1.1 Svařovací robot FANUC ARC Mate 100iC

Pro automatické svařování je použit 6-ti osý svařovací robot FANUC ARC Mate 100iC viz obr. 10. Tento robot je kompatibilní s různými značkami svařovacích zařízení a lze ho propojit s většinou typů servopohonů nebo polohovadel. Robustní rameno robota lze zatížit maximálně 10 kilogramy. K robotu je připojeno příslušenství, které je popsáno dále.

Podavač drátu Migatronic CWF Multi

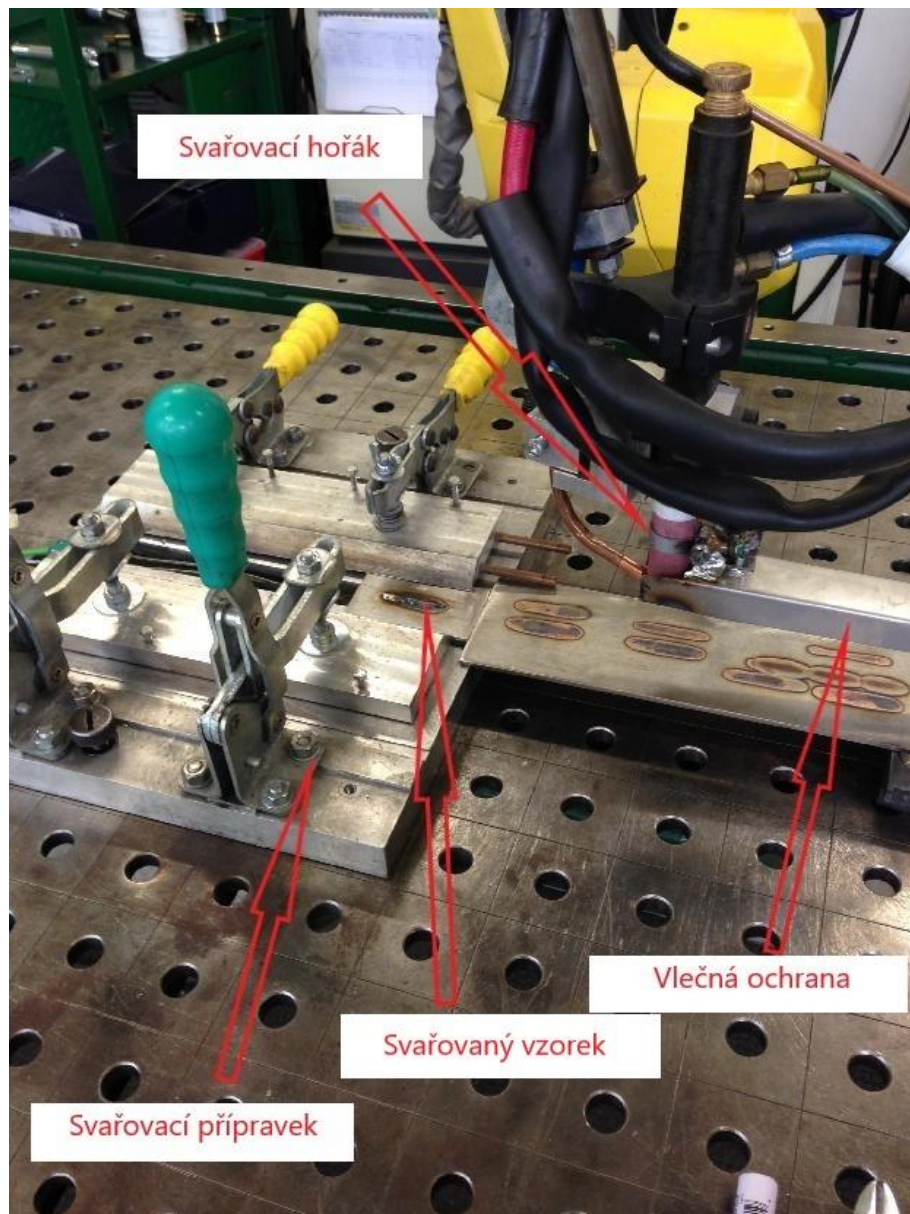
Migatronic CWF Multi (obr. 11) je samostatný podavač studeného drátu určený pro mechanizované a robotizované svařování metodou TIG. Tento podávací stroj disponuje rychlostí podávání drátu od 0,2 až 5 m/min. Kladky pro podávání drátu jsou lichoběžníkové s výřezem do tvaru V. Připojení je řešené pomocí interface (CAN BUS), která odstraňuje složité připojení různými kabely.



Obrázek 11: Podavač drátu Migatronic CWF Multi

Svařovací hořák

Ke svařovacímu hořáku, který je chlazený kapalinou je připojena vlečná ochrana pro lepší ochranu svarového kovu. Hubice hořáku je zvolena s označením č.16. Celá sestava hořáku je zobrazena na obrázku 12.



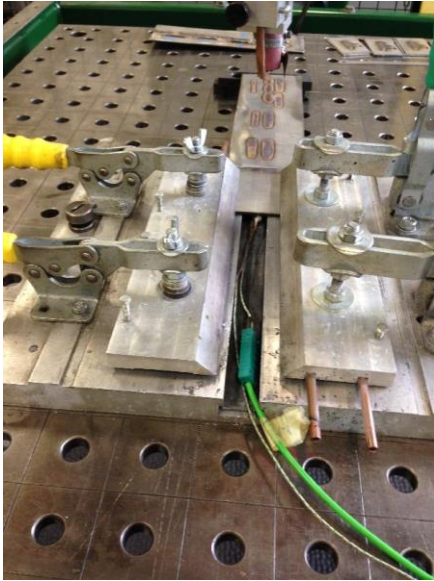
Obrázek 12: Hořák TIG

Polohovadlo Fanuc P250

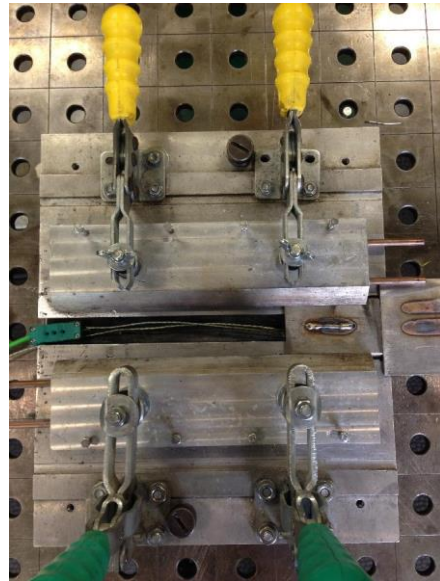
Polohovadlo Fanuc typ P250 (obr. 10) s dírami o rozměru 16 mm je použito pouze v jedné poloze, tudíž je použito pouze jako upínací stůl o nosnosti až 250 kg.

Upínací přípravek

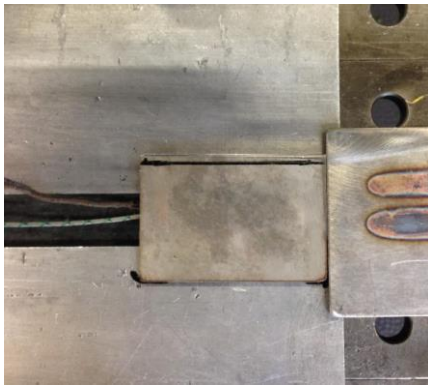
Upínací přípravek se skládá z hliníkového podstavce s vyfrézovaným žlabem pro odvod tepla a možností vložení kořenové podložky pro sekundární ochranu kořene. Na podstavci jsou upevněny dva páry upínek s nastavitelnou vzdáleností přidržovací desky. Upínací zařízení je zobrazeno na obrázku 13 a 14. Na obrázku 15 je zobrazeno uložení zkušební vzorku na přípravek. Díky drážce v přípravku je možné použití termočlánků pod návarem (obr. 16).



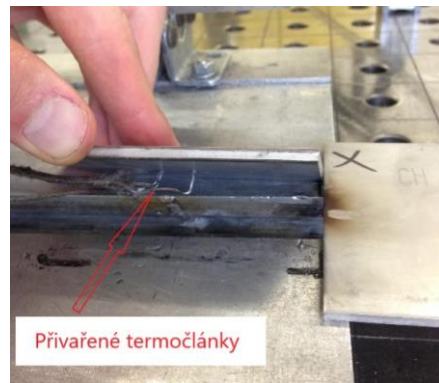
Obrázek 14: Upínací zařízení



Obrázek 13: Upínací zařízení



Obrázek 16: Uložení vzorku v přípravku



Obrázek 15: Uložení termočlánků do přípravku

Pro měření převýšení návaru byla použita měřka od společnosti G.A.L. GAGE, která je zobrazena na obrázku 35. Měření šířky svaru je realizováno digitálním posuvným měřidlem.



Obrázek 17: Měřidlo převýšení

6.1.2 Zdroj Migatronik PI320

Svařovací zdroj od firmy Migatronik (obr. 18) je třífázový stroj vhodný pro ruční i robotické svařování. Díky chlazenému hořáku je vhodný pro použití i při svařování vysokými proudy. V tabulce č.7 jsou uvedeny parametry svařovacího zdroje.

Tabulka 7: Parametry svařovacího zdroje

Migatronic PI320

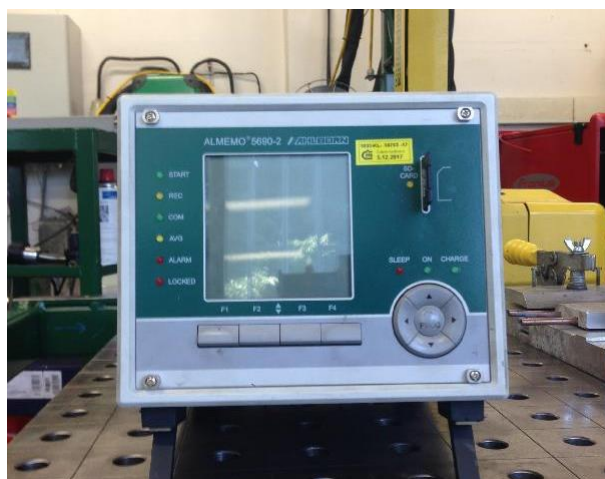
Zdroj	PI320
Napájecí napětí	3x400V
Jištění	16 A
Proudový rozsah	5-320 A
Zatěžovatel 100 % při 40 °C	265 A
Zatěžovatel 60 % při 40 °C	290 A
Zatěžovatel 100 % při 20 °C	305 A
Zatěžovatel 60 % při 20 °C	320 A
Hmotnost	71 kg
Rozměry šxvxh	54x98x109



Obrázek 18 Svařovací zdroj Migatronic PI320

6.1.3 Univerzální měřící ústředna Ahlborn Almemo 5690-2M

Pro měření teplotního pole na dvou místech svaru byla použita měřící ústředna Almemo 5690-2M (viz obr. 19). Tato stanice se vyznačuje svou rychlostí měření a malými rozměry při značném počtu měřících vstupů. Almemo 5690-2M je možné programovat v přehledném menu, nebo pomocí softwaru AMR-Control. Připojit stanici k PC je možné pomocí kabelu, Bluetooth nebo internetu. Měření probíhá pomocí připojení dvou termočlánků typu K, které jsou přivařeny výbojem zespu na základní materiál. Stanice Almemo 5690-2M může nyní zaznamenávat až 20 veličin, např. 20 termočlánků. Data jsou ukládána přímo do připojeného počítače.



Obrázek 19: Univerzální měřící ústředna Almemo 5690-2

6.1.4 Výbojová svářečka BT-2

Výbojová svářečka (obr. 20) je použita pro navaření termočlánků na jednotlivé plechy. Svářečka obsahuje kleště pro uchycení termočlánku jako jeden pól a přiložený zemnicí kabel jako druhý pól. Termočlánky jsou vždy navařeny uprostřed vzorku a vzdáleny 40 mm a 50 mm od kraje. Ukázka navaření termočlánku k plechu je zobrazena na obrázku 21. Umístění termočlánků je vidět na obrázku 22. Rozměry umístění termočlánku jsou na obrázku 23.



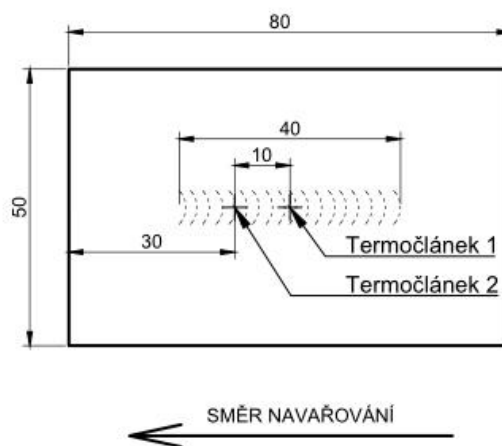
Obrázek 210: Výbojová svářečka



Obrázek 201: Ukázka použití výbojové svářečky



Obrázek 232: Umístění termočlánků



Obrázek 223: Rozložení termočlánků

6.2 Návrh experimentální činnosti

Technologický postup:

- 1) Příprava základního materiálu (stříhání, odmaštění, navaření termočlánků)
- 2) Nastavení svařovacích parametrů pro jednotlivé ochranné plyny viz. Parametry svařování (Tabulka 8)

- 3) Robotické navařování jednotlivých housenek metodou TIG ve třech ochranných atmosférách: - Čistý argon 4.6
 - Směs argonu s heliem (70 %/ 30 %)
 - Směs argonu s vodíkem 5 %
- 4) Robotické navaření 6 vrstev na sebe pro vytvoření souvislé stěny za použití totožných ochranných plynů
- 5) Očištění lihem
- 6) Kapilární zkouška
- 7) Metalografická zkouška
- 8) Zhodnocení výsledků

6.2.1 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál je zvolen drát o průměru 1,2 od společnosti Böhler Welding s označením 3D print AM 718. Tento materiál lze také označit jako Inconel 718, 2.4668 nebo NiCr19Fe19Nb5Mo3 ze kterého lze vyčíst chemické složení. Chemické složení je uvedeno v kapitole 2.1.3

6.2.2 Základní materiál

Jako základní materiál je zvolen austenitický CrNi korozivzdorný plech s označením 1.4301. Rozměry základního materiálu pro jednovrstvý návar jsou nastříhány na rozměr 3x50x80 mm. Pro navařování více vrstev na sebe je z důvodu deformace základního materiálu zvolen tlustší plech o rozměrech 4x50x80 mm.

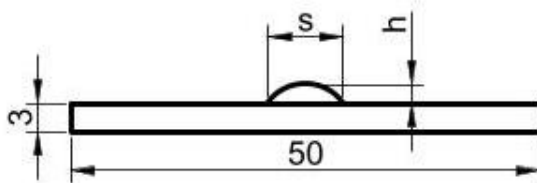
6.2.5 Ochranné plyny

Při svařování jsou zkoumány vlastnosti třech ochranných plynů. Jako první je zvolen argon 4.6 od společnosti Linde Gas a.s. Jako druhá ochranná atmosféra je zvolena směs argonu s heliem v poměru Ar70/He30 pod názvem Alumaxx Plus od firmy Air Products. Jako třetí plyn je směs argonu s 5 % vodíku od společnosti Air Products.

6.2.4 Návrh parametrů

Pro nalezení vhodných svařovacích parametrů je předem zvoleno 10 jednovrstvých návarů s měnicími se parametry proudu, rychlosti svařování a rychlosti podávání drátu. Hodnoty 10 návarů jsou uvedeny v tabulce 8. Měření parametrů na oblouk napětí, proud je provedeno pomocí systému WeldMonitor, který slouží pro monitorování a dokumentaci svarů. Pro navařování niklových slitin je zvolena wolframová elektroda WL20 o průměru 2,4 mm.

Úhel špičky elektrody je 30°. Vzdálenost elektrody od základního materiálu je 2,5 mm. Počáteční výběr parametrů byl řešen pro čistý argon. Na obrázku 24 je zobrazeno měření převýšení h a šířky s .



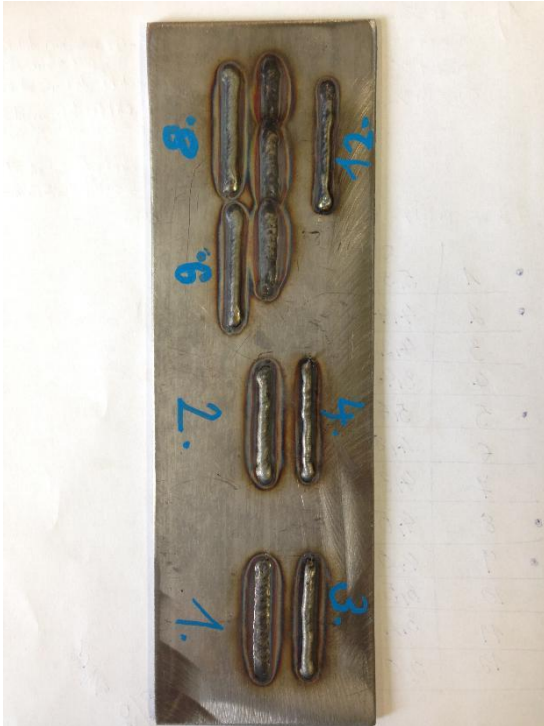
Obrázek 24: Převýšení h a šířka s

Tabulka 8: Návrh parametrů

	I [A]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	U [V]	T [°C]	s [mm]	h [mm]	S [mm ²]
1	100	20	0,5	15,9	295	5,3	0,9	2,83
2	100	20	1,0	15,9	225	4,4	1,5	5,65
3	100	20	1,5	15,9	224	4,2	2,5	8,48
4	80	20	1,0	13,2	305	3,4	2,0	5,65
5	120	20	1,0	14,8	490	5,3	1,6	5,65
6	80	10	1,0	13,2	434	4,8	3,1	11,3
7	80	15	1,0	13,2	338	4,3	2,6	7,57
8	120	25	1,5	14,8	361	4,5	2,0	6,78
9	120	30	1,5	14,8	344	4,0	2,0	5,65
10	120	35	1,5	14,8	283	3,5	1,9	4,85
11	120	40	1,5	14,8	259	3,2	1,6	4,24
12	120	45	1,5	14,8	252	3,0	1,5	3,77

Poznámka: s = šířka návaru, h = převýšení návaru, S = průřez návaru

Z prvních dvanácti návarů (obr. 25 a obr. 26) je zvoleno podle převýšení a šířky svaru pět parametrů, které jsou zvýrazněny v tabulce 8.



Obrázek 265: Návrh parametrů



Obrázek 256: Návrh parametrů

6.3 Argon 4.6

Jako první ochranný plyn je zvolen čistý argon 4.6. Do vlečné ochrany je přiváděna směs argonu s heliem v poměru 70/30. Průtok ochranného plynu z hubice je 9,7 l/min a vlečného plynu je 6 l/min. Měření TOO je uskutečněno posuvným měřidlem.

Tabulka 9: Parametry navařování argon 4.6

Vzorek	I [A]	U [V]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	Q [kJ/mm]	s [mm]	h [mm]	TOO [mm]
11	101,2	12,3	20	0,5	1116	0,32	5,0	1	13,1
12	101,2	10,8	20	1,0	980	0,28	3,7	1,9	11,4
15	121,1	11,9	20	1,0	1000	0,37	5,2	1,6	15,9
18	121,0	11,6	25	1,5	978	0,30	3,5	2,4	9,9
19	121,1	12,2	30	1,5	850	0,27	3,2	2	9,7



Obrázek 27: Návary argon 4.6

Z obrázku 27 je vidět, že při větším vnesení tepla má svarový kov tmavší barvu. Z tabulky 9 je patrné, že při v případě vyššího vneseného tepla se zvětšuje TOO, snižuje převýšení a rozšiřuje se šířka návaru. Pro navařování stěny se jeví jako vhodné použití vzorku 11, jelikož má větší průvar a šířku. Pro následné stavění stěny je vhodné použít návar s menší šířkou a větší výškou, aby vznikla optimální struktura. Vzorek 18 je vhodný pro toto použití.

6.4 Směs argonu 70 % s heliem 30 %

Jako druhý ochranný plyn je vybrána směs argonu s heliem v poměru 70/30. Vlečná ochrana je v tomto případě čistý argon 4.6. Průtok ochranného plynu z hubice je 10 l/min a vlečného plynu je 8 l/min

Tabulka 10: Parametry navařování argon s heliem

Vzorek	I [A]	U [V]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	Q [kJ/mm]	s [mm]	h [mm]	TOO [mm]
21	101,1	12,9	20	0,5	1095	0,35	6,8	1,1	15,7
22	101,1	12,2	20	1,0	1005	0,32	4,7	1,7	15,2
25	121,0	12,9	20	1,0	1119	0,4	7,8	1,1	17,4
28	121,0	12,6	25	1,5	985	0,32	5,8	1,6	14,3
29	121,0	12,6	30	1,5	912	0,29	4,3	1,7	11,6

Při porovnání hodnot z tabulky 9 a 10 je patrné, že při směsi argonu s heliem je do svarové lázně vneseno více tepla, což má za důsledek větší rozlití návaru a širší oblast TOO. Pro navařování stěny se jeví jako vhodné použití vzorku 21 (obr.28) pro základní návar a vzorku 28 jako vrstvicí návar. Na vzorku 22 je patrné nedokonalé rozlití svarového kovu, to může mít způsobeno nestabilním obloukem při zvětšené vzdálenosti elektrody od základního materiálu.



Obrázek 28: Návary směs Ar70/He30

6.5 Směs argonu a 5 % vodíku

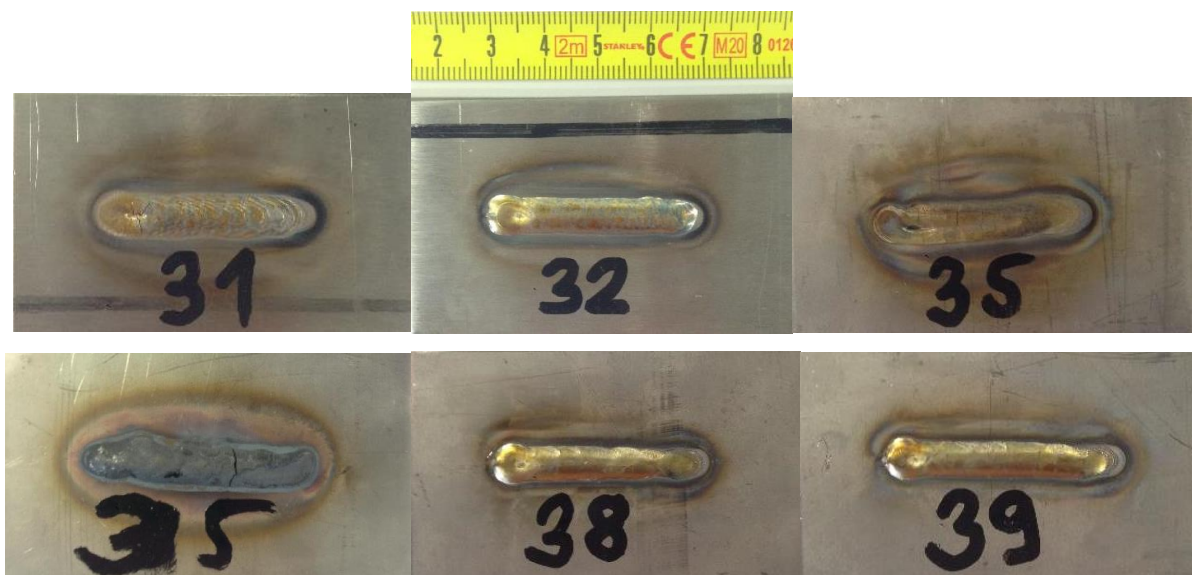
Jako třetí ochranný plyn je vybrán argonu s 5 % vodíku. Vlečná ochrana je v tomto případě směs argonu s heliem (70/30). Průtok ochranného plynu z hubice je 10 l/min a vlečného plynu je 8 l/min.

Tabulka 11: Parametry navařování argon s vodíkem

Vzorek	I [A]	U [V]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	Q [kJ/mm]	s [mm]	h [mm]	TOO [mm]
31	100,9	14,1	20	0,5	1360	0,37	8,2	0,4	14,6
32	100,9	13,2	20	1,0	1180	0,35	7,3	1,0	16,4
35	120,9	13,6	20	1,0	1370	0,43	7,5	-0,1	20,3
38	120,8	12,6	25	1,5	1165	0,33	6,6	1,1	12,5
39	120,8	12,6	30	1,5	1035	0,29	6,4	1,2	11,8

Při použití směsi argonu a vodíku je z tabulky 11 patrné, že je v některých případech vnesené teplo tak velké, že dochází k propadnutí svarové lázně. Pro navařování stěny se jeví jako vhodné použití vzorku 32 pro základní návar a vzorek 38 jako vrstvicí návar. Na vzorku

31 a 35 jsou viditelné velké trhliny na konci návaru. Na vzorku 35 obrázku 29 je také dobře vidět provaření skrz základní materiál a přítomnost trhliny.



Obrázek 29: Návary Ar+5 % H

6.6 Výběr vhodných variant pro vrstvený návar

Po zhodnocení zkušebních vzorků jsem dospěl k volbě základního návaru řady 2, což znamená použití parametrů ze vzorků s označením 12, 22, 32. Pro následné návary jsem zvolil řadu 8, což znamená použití parametrů ze vzorků s označením 18, 28, 38.

6.7 Vícevrstvé návary

Cílem je postupné navaření 6 housenek na sebe ve třech daných atmosférách a tím vytvoření nízké stěny. Mezi každou vrstvou je prodleva na vychladnutí teploty svaru na teplotu interpass 130 °C. První dva návary jsou zvoleny s vyšším vneseným teplem, tedy vyšším průvarem. Následné návary jsou zvolené s nižším průvarem, aby nedocházelo k roztékání stěny. Teplota, šířka a převýšení housenky je měřena uprostřed návaru. Vlečná ochrana je v tomto případě totožná s ochranným plynem z hubice, liší se pouze v průtoku plynu, který je u plynu Ar 4.6 a Ar70/He30 8 l/min a u plynu Ar + 5 % H₂ 5 l/min. Naměřené parametry návaru pro jednotlivé plyny jsou uvedeny v tabulkách 12, 13 a 14. Na obrázku 23 je zobrazeno měření převýšení h a šířky s .

Tabulka 12: Parametry pro návar stěny Ar 4.6

Návar	I [A]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	s [mm]	h [mm]	Průtok plynu [l/min]
1	100	20	1,0	172	4,3	2,1	14
2	100	20	1,0	168	4,3	3,2	14
3	120	25	1,5	196	4,6	3,8	14
4	120	25	1,5	220	5,0	5,0	14
5	120	25	1,5	257	4,9	5,9	14
6	120	25	1,5	245	5,0	6,5	14

Tabulka 13: Parametry pro návar stěny Ar70 + He30

Návar	I [A]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	s [mm]	h [mm]	Průtok plynu [l/min]
1	100	20	1,0	201	4,9	1,8	14
2	100	20	1,0	185	5,3	2,8	14
3	120	25	1,5	209	5,5	3,6	14
4	120	25	1,5	260	6,0	4,4	14
5	120	25	1,5	264	5,6	5,9	14
6	120	25	1,5	299	5,5	6,9	14

Tabulka 14: Parametry pro návar stěny Ar + 5 % H2

Návar	I [A]	Posuv hořáku [cm/min]	Posuv drátu [m/min]	T_{MAX} [°C]	s [mm]	h [mm]	Průtok plynu [l/min]
1	100	20	1,0	208	7,4	1,2	14
2	100	20	1,0	215	7,4	2,5	14
3	120	25	1,5	250	7,6	3,2	14
4	120	25	1,5	256	7,8	4,0	14
5	120	25	1,5	264	7,8	4,9	14
6	120	25	1,5	281	7,9	5,9	14

6.8 Výsledky a zhodnocení

Z naměřených parametrů z tabulek 12, 13 a 14 jsou vidět patrné rozdíly v převýšení a šířce návarů. V následujících odstavcích jsou popsány jednotlivé návary.

6.8.1 Struktura návaru Ar 4.6

Tato stěna (obr.30) je složena z šesti návarů. Na obrázku 31 má stěna velký průhyb, to je způsobeno oddálením elektrického oblouku od předchozího návaru. Pravá část návaru je prudce klesající.



Obrázek 310: Návar argon 4.6



Obrázek 301: Průhyb argon 4.6

6.8.2 Struktura návaru Ar70/He30

Navářená stěna je nejvyšší a má nejnižší průhyb. Kresba návaru nemá tendenci se naklánět na žádnou stranu, to je patrné z obrázku 32. Mezi vrstvami se šířka návaru téměř nemění. Na obrázku 33 je vidět, že je bok stěny téměř hladký.



Obrázek 332: Návar Ar70/He30



Obrázek 323: Průhyb Ar70/He30

6.8.3 Struktura návaru Ar + 3 % He

Při použití směsi argonu s vodíkem jsme došli k nejvíce vnesenému teplu, proto je stěna celkově nízká a široká. Struktura návaru nemá tendenci se naklánět na žádnou stranu (viz obr. 34). Bok stěny je téměř hladký. Průhyb u tohoto návaru (obr. 35) je nejvyšší oproti ostatním vzorkům, to je také způsobeno nesením tepla a následnou deformací.



Obrázek 354: Návar Ar+5 %H2

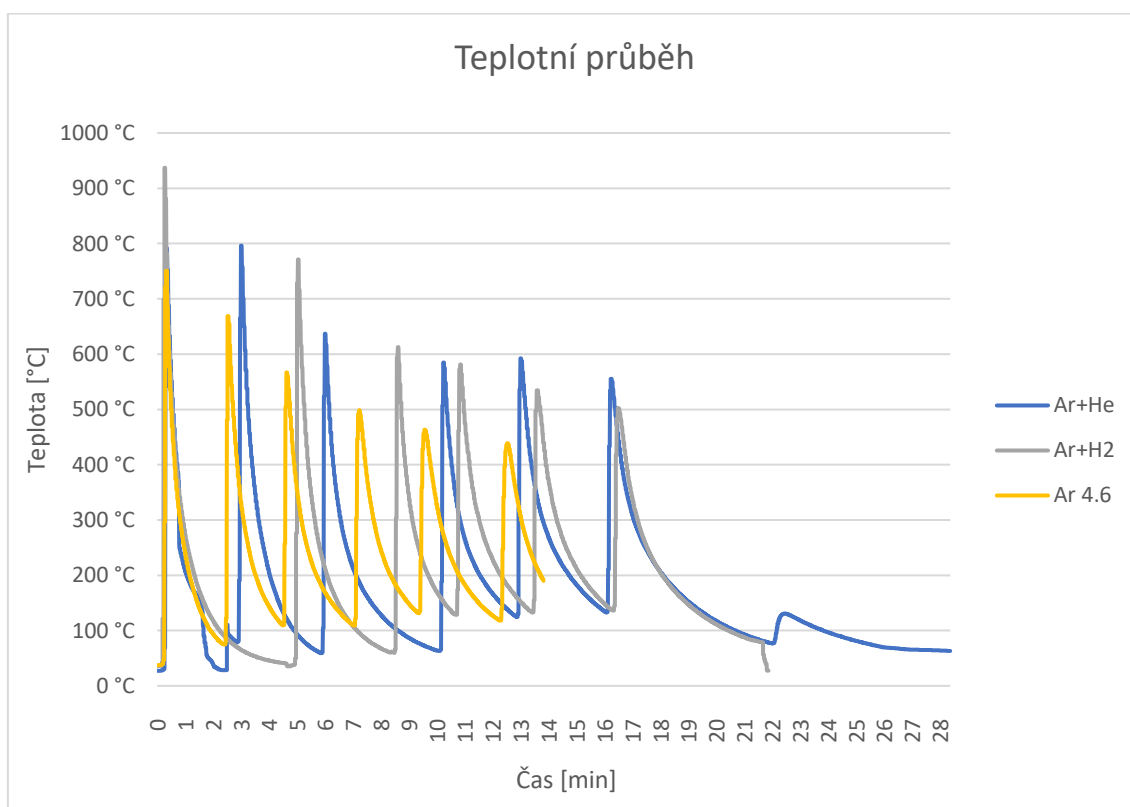


Obrázek 345: Prohnutí Ar+5 %H2

6.8.4 Teplotní průběh

Měření teplotního průběhu bylo prováděno pomocí termočlánků po celou dobu navařování. Z grafu 1 je vidět teplotní pokles mezi zvyšujícím se počtem navařených housenek. To je ovlivněno zvyšující se vzdáleností od základního materiálu, tudíž dochází k výraznému uvolňování tepla do okolí. V grafu 1 jsou znázorněny časové prodlevy pro jednotlivé plyny mezi následujícími housenkami, ve kterých je vidět rozdílný čas pro další navaření. Nejnižší čas mezi dalšími vrstvami návaru vykazuje Ar 4.6. Naopak nejvyšší čas vykazuje Ar + H2.

Graf 1: Teplotní průběh návarů



6.9 Analýza

6.9.1 Kapilární zkouška

Cílem kapilární zkoušky bylo nalézt možné trhliny, které jsou specifické pro tento materiál. Pro kapilární zkoušku byly zvoleny 2 vzorky pro vrstvení návarů a jeden vzorek pro základový návar. Na obrázku 36 je zobrazeno nanesení penetrantu. Následně proběhlo očištění a nanesení vývojky (viz obr. 37).



Obrázek 36: Kapilární zkouška-Nanesení penetrantu



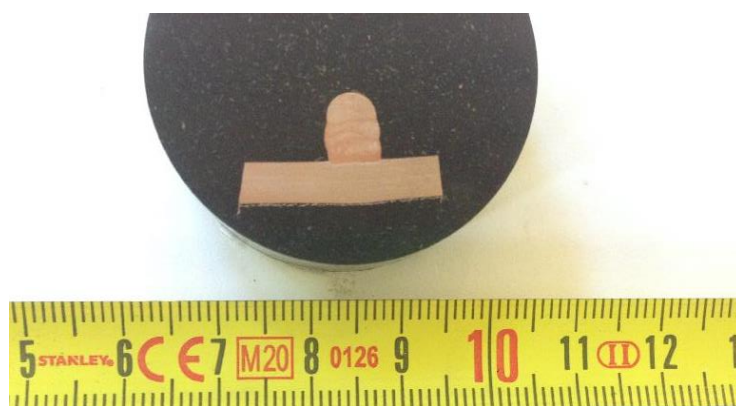
Obrázek 37: Výsledky kapilární zkoušky

Cílem kapilární zkoušky dle normy ČSN EN ISO 5817 / 23277 je najít na zkoušené ploše nespojitosti, které ovlivní funkčnost dílu. V návarech je nepřijatelné najít lineární indikaci mezní hodnoty $D \leq 3 \cdot b$. Na vzorku 28 byla objevena indikace o rozměrech $a = 0,8 \text{ mm}$ a $b = 0,9 \text{ mm}$. Na vzorku 38 byla objevena indikace o rozměrech $a = 1,5 \text{ mm}$ a $b = 1,0 \text{ mm}$. Na vzorku 32 byla také objevena indikace o rozměrech $a = 1,8 \text{ mm}$ a $b = 1,2 \text{ mm}$. Výsledek kapilární zkoušky ukázal na všech vzorcích indikaci nelineární, tudíž vyhovující pro následné navařování. Na vzorku 28 z obrázku 37 je viditelná červená čára, ta je způsobena nekvalitním otřením penetrantu.

6.9.2 Metalografická zkouška

Pro zkoumání struktury a vad návarů byl použit mikroskop od firmy Zeiss s označením Stemi 508, pod který byly vloženy metalografické výbrusy a pořízeny fotografie mikrostruktury a makrostruktury. Metalografie byla vyhodnocena pouze pro část navařování stěny.

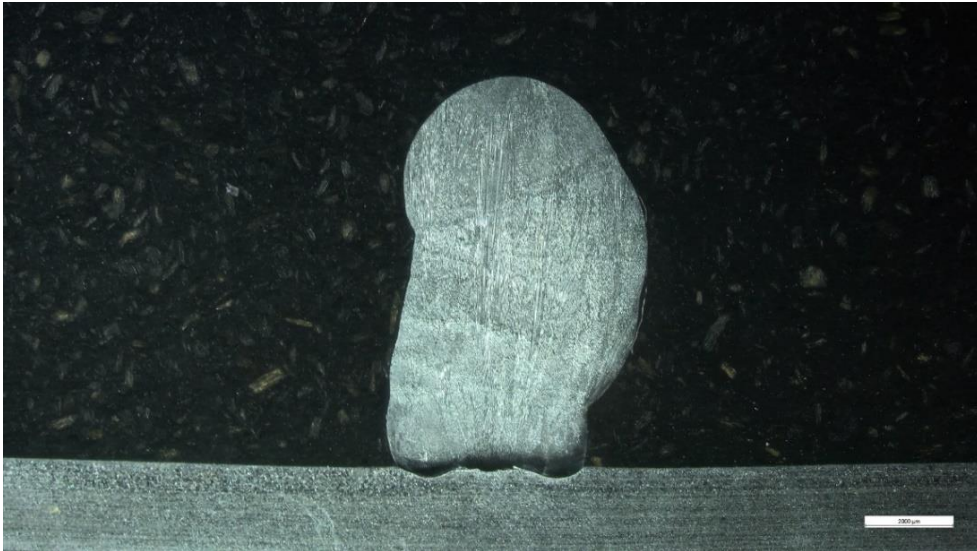
Pro zjištění mikrostruktury a makrostruktury bylo třeba připravení metalografických výbrusů (obr. 38). Ke zkoumání byly použity 3 vzorky, které byly uříznuty 30 mm od počátku návaru. Následně byly vzorky zasypány termosetovým granulátem a zalisovány při teplotě 180 °C a tlaku 250 barů po dobu 5 minut. Poté následovalo broušení a leštění, po kterém se výbrus naleptal kyselinou dusičnou pro zvýraznění struktury.



Obrázek 38: Metalografický výbrus

Makrostruktura

Nejprve byly zkoumány makroskopické snímky. První makroskopický snímek (obr. 39) zobrazuje naklání návaru na pravou stranu. Při navařování je žádoucí mít návar co nejvíce kolmý k základnímu materiálu. Šířka návaru v tomto řezu je 4,3 mm a výška 9,1 mm. Na obrázku 40 došlo k navaření bez náklonu housenky, ale většímu průvaru tudíž je stěna nižší (7,2 mm) a širší (5,9 mm). Stěna na obrázku 41 je viditelně nejnižší (6,6 mm) a nejširší (6,9 mm). Z kontroly makrostruktury nejsou patrné žádné trhliny a jednotlivé vrstvy jsou propojené.



Obrázek 39: Makrostruktura Ar 4.6



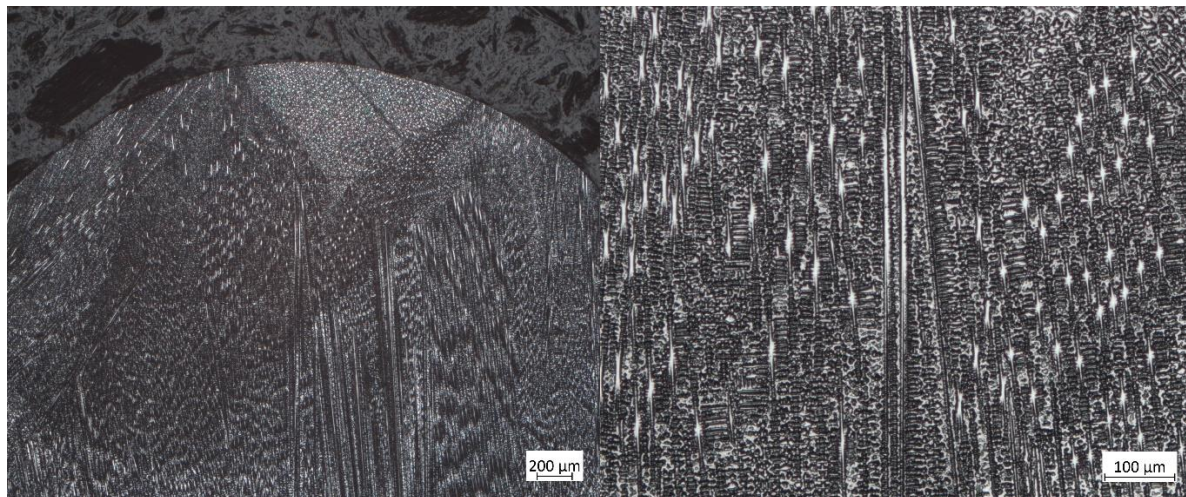
Obrázek 40: Makrostruktura Ar70/He30



Obrázek 41: Makrostruktura Ar + 5 H2

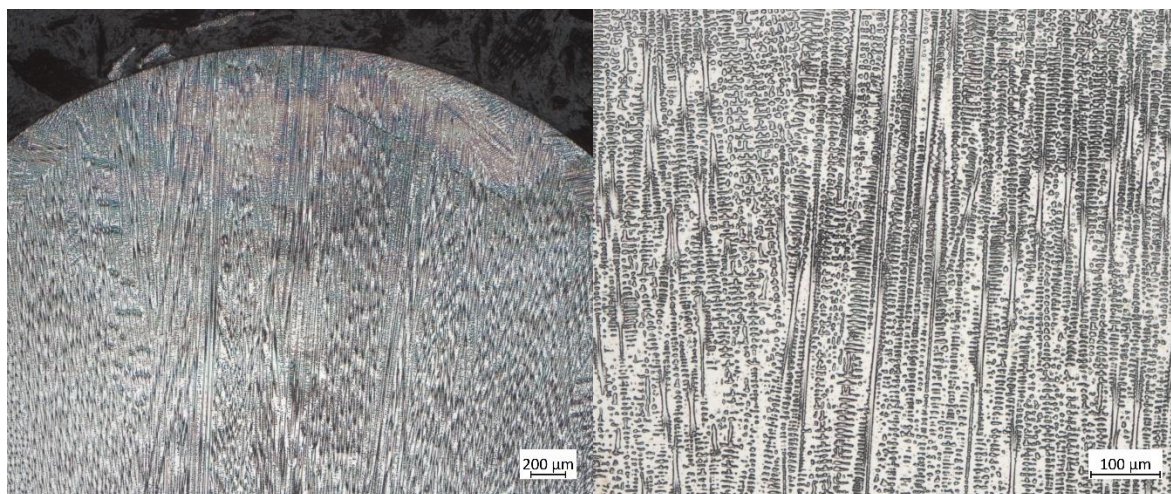
Mikrostruktura

Ve druhé části byla zkoumána mikrostruktura metalografického výbrusu. Jako první byla zkoumána struktura s plynem Ar 4.6 (obr. 42), kde na obrázku vlevo je zvětšená 25x a na pravém obrázku 100x. Z této mikrostruktury nejsou patrné žádné vady.



Obrázek 42: Mikrostruktura Ar 4.6

Jako druhá byla zkoumána mikrostruktura návaru s ochranným plynem Ar70/He30 (obr. 43), kde na obrázku vlevo je zvětšená 25x a na pravém obrázku 25x. Při navařování došlo k malé trhlině o délce 0,093 mm (obr.44). Oproti navařování s čistým argonem má Ar70/He30 o trochu jemnější strukturu.

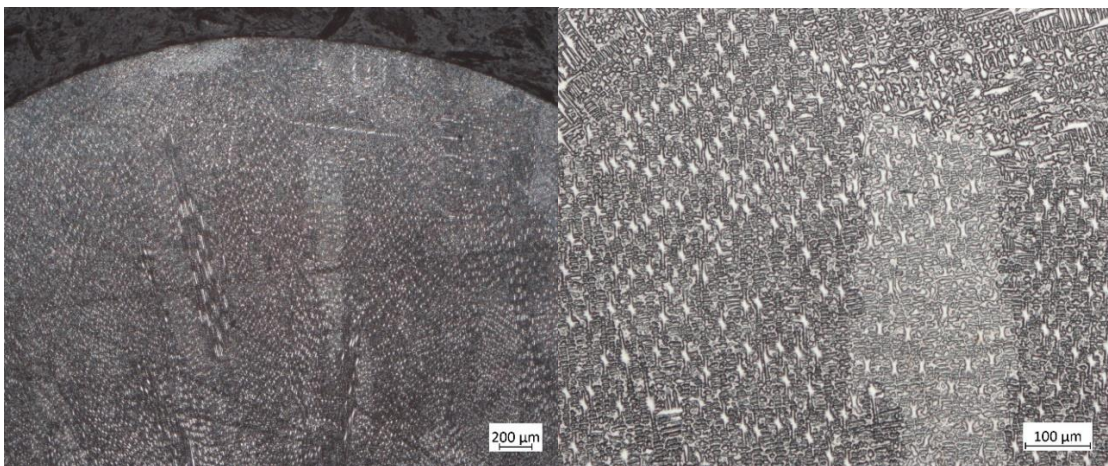


Obrázek 43: Mikrostruktura Ar70/He30



Obrázek 44: Trhlina Ar70/He30 (zvětšeno 200x)

Jako třetí byla zkoumána mikrostruktura návaru s ochranným plynem Ar + 5 % H₂ (obr.45), při zvětšení na levém obrázku 25x a na pravém obrázku 100x. Na obrázku 46 lze vidět přítomnost dvou pórů, které mohou být způsobeny nečistotou nebo oddálením oblouku od svarové lázně. Při srovnání s předešlými snímky má Ar + 5 % H₂ nejjemnější mikrostrukturu.



Obrázek 45: Mikrostruktura Ar + 5 % H₂



Obrázek 46: Póry v prvním návaru Ar + 5 % H₂ (zvětšení 200x)

7. ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce se zabývá problematikou vlivu použití ochranných plynů při svařování metodou TIG. Dále je v práci uvedeno dělení a vlastnosti niklových slitin a popis metod pro svařování elektrickým obloukem a speciálními metodami svařování, kde byla z největší části popsána metoda TIG. V poslední části jsou popsány vlastnosti ochranných atmosfér pro svařování niklových slitin.

Cílem experimentální části bylo porovnat ochranné plyny pro navaření stěny z niklové slitiny označené Inconel 718 za účelem případných oprav nebo 3D tisku pomocí obloukového navařování. V první části bylo navařeno 12 jednovrstvých návarů pro získání vhodných parametrů. Následně se ze 12 návarů vybralo 5 vhodných vzorků, na kterých se zkoumala změna ochranné atmosféry (Ar 4.6, Ar70/He60, Ar + 5 % H₂). Se změnou ochranných plynů byl potvrzen předpoklad měnicích se parametrů housenky (převýšení, šířka a průvar). Dále byly vybrány z 5 vzorků první návar stěny a následné vrstvicí návary. Po vybrání vhodných housenek byla navařena 6-ti vrstvá stěna pro každý plyn.

Základní návary stěny byly podrobeny kapilární zkoušce, kde se jednalo o vyhovující nelineární indikace. V metalografii byly porovnány tři vrstvené návary. Návar s ochranným plynem Ar 4.6 se vyznačoval nejvyšší a nejužší návar, ale byl nejméně kolmo k základnímu materiálu. Návar Ar70/He30 byl téměř kolmý k základnímu materiálu. V mikrostruktuře byla objevena malá trhlinka. Návar Ar + 5 % H₂ byl nejširší a nejnižší návar. V mikrostruktuře byly objeveny dva póry.

Dle dosažených výsledků lze doporučit navařovat při použití ochranného plynu Ar70/He30, jehož návar byl kolmý k základnímu materiálu a nedocházelo k zásadním deformacím. Tento ochranný plyn navíc umožňuje svařovat i jiné materiály. Z důvodu vysoké ceny Helia je možné zvolit Ar + 5 % H₂, při které se musí zvýšit rychlost posuvu nebo přídavného drátu, aby nedocházelo k následnému provařování a rozlévání stěny návaru. Na práci je možné navázat v navařování vysoké stěny kolmé k základnímu materiálu při změně svařovacích parametrů.

Bibliografie

- [1] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. *Speciální kovové materiály*. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04212-0.
- [2] *Effects of Alloying Elements in Nickel-Base Alloys* [online]. Corrosion materials, 2016 [cit. 2021-03-11]. Dostupné z: <https://corrosionmaterials.com/effects-of-alloying-elements-in-nickel-base-alloys/>
- [3] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: České vysoké učení technické, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
- [4] *Přehled niklových slitin* [online]. [cit. 2021-03-29]. Dostupné z: <https://www.bibusmetals.cz/materialy/nikl-a-slitiny-niklu/>
- [5] *An overview on welding of Inconel 718 alloy - Effect of welding processes on microstructural evolution and mechanical properties of joints* [online]. 2021 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1044580321001273#f0020>
- [6] *Vrtání děr se zvýšenou přesností* [online]. Plzeň: Kožmín, 2011 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vrtani-der-se-zvysenou-presnosti>
- [7] KOUKAL, Jaroslav a Tomáš ZMYDLENÝ. *Svařování I*. 2005. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita. ISBN 80-248-0870-6.
- [8] KOVAŘÍK, Rudolf. *Technologie svařování*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. ISBN 80-7082-112-4.
- [9] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [10] Elektronové svařování - perspektivní metoda pro speciální materiály. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT, 2016 [cit. 2021-07-15]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy>
- [11] Laserové svařování. *LaserTherm* [online]. Plzeň [cit. 2021-15-07]. Dostupné z: <https://www.lasertherm.cz/technologie/svarovani-navarovani-kaleni-laserem/laserove-svarovani-kovu>

- [12] *Svařování korozivzdorných ocelí* [online]. Lucembursko: Euro Inox, 2007 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/BrochureWeldability_CZ.pdf
- [13] *Svařování TIG* [online]. [cit. 2021-02-12]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-39/t-120>
- [14] *Wolframové elektrody - druhy, použití, broušení - METAWELD* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.metaweld.cz/wolframove-elektrody-druhy-pouziti-brouseni/>
- [15] Bruska wolframových elektrod. *Metaweld* [online]. [cit. 2021-03-31]. Dostupné z: <https://www.metaweld.cz/bruska-wolframovych-elektrod-alfa-in-neutrix-wag-40-230v-50hz.html>
- [16] Messer gases for life. *Messer Technogas s.r.o* [online]. [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://www.messer.cz/produkty>
- [17] Ochranné plyny pro obloukové svařování. *Technika a trh* [online]. 2009 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.technikaatrh.cz/aktuality/ochranne-plyny-pro-obloukove-svarovani>
- [18] Základní informace o vodíku. *AIR PRODUCTS* [online]. [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <http://www.airproducts.cz/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx>
- [19] *Linde Gas a.s.* [online]. 2021 [cit. 2021-10-06]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/sm%C4%9Bsi-pro-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>
- [20] *Moderní tříslužkové plyny pro svařování v ochranné atmosféře* [online]. Ostrava, 2015 [cit. 2021-07-18]. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/moderni-trislozkove-plyny-pro-svarovani-v-ochranne-atmosfere/>

Seznam tabulek

Tabulka 1 : Chemické složení žáruvzdorných slitin [3]	14
Tabulka 2: Mechanické vlastnosti žáruvzdorných slitin [3].....	15
Tabulka 3: Porovnání wolframových elektrod	23
Tabulka 4: Značení wolframových elektrod [13]	24
Tabulka 5: Doporučené hodnoty vrcholového úhlu [8].....	24
Tabulka 6: Fyzikální vlastnosti [15]	27
Tabulka 7: Parametry svařovacího zdroje	33
Tabulka 8: Návrh parametrů.....	36
Tabulka 9: Parametry navařování argon 4.6.....	37
Tabulka 10: Parametry navařování argon s heliem	38
Tabulka 11: Parametry navařování argon s vodíkem	39
Tabulka 12: Parametry pro návar stěny Ar 4.6.....	41
Tabulka 13: Parametry pro návar stěny Ar70 + He30.....	41
Tabulka 14: Parametry pro návar stěny Ar + 5 % H2.....	41

Seznam obrázků

Obrázek 1: Rozdělení niklových slitin	13
Obrázek 2: Princip svařování TIG [12]	20
Obrázek 3: a) svařování DC proudem s nepřímou polaritou, b) svařování DC proudem s přímou polaritou, c) svařování AC proudem [12].....	20
Obrázek 4: Voltampérová charakteristika zdroje pro TIG svařování [8].....	22
Obrázek 5:Vliv směru broušení špičky [12].....	24
Obrázek 6: Bruska elektrod pro broušení pod vodou [13]	25
Obrázek 7: Bruska wolframových elektrod [13]	25
Obrázek 8: hořák pro ruční svařování [12].....	25
Obrázek 9:Porovnání průvaru plynu při stejném proudu (150 A) a) Rychlost svařování argon 21 cm/min, b) Rychlost svařování Inoxline 29 cm/min [18].....	28
Obrázek 10: Laboratoř výuky svářečských technologií	29
Obrázek 11: Podavač drátu Migatronic CWF Multi	30
Obrázek 12: Hořák TIG	31
Obrázek 13: Upínací zařízení	32
Obrázek 14: Upínací zařízení	32
Obrázek 15: Uložení termočlánků do přípravku	32
Obrázek 16: Uložení vzorku v přípravku	32
Obrázek 17: Měřidlo převýšení	32
Obrázek 18 Svařovací zdroj Migatronic PI320	33
Obrázek 19: Univerzální měřící ústředna Almemo 5690-2.....	33
Obrázek 20: Výbojová svářečka.....	34
Obrázek 21: Ukázka použití výbojové svářečky	34
Obrázek 22: Rozložení termočlánků	34
Obrázek 23: Umístění termočlánků.....	34
Obrázek 24: Převýšení h a šířka s.....	36
Obrázek 25: Návrh parametrů	37
Obrázek 26: Návrh parametrů	37
Obrázek 27: Návary argon 4.6.....	38
Obrázek 28: Návary směs Ar70/He30.....	39
Obrázek 29: Návary Ar+5 % H	40
Obrázek 30: Průhyb argon 4.6.....	42
Obrázek 31: Návar argon 4.6.....	42

Obrázek 32: Průhyb Ar70/He30	42
Obrázek 33: Návar Ar70/He30.....	42
Obrázek 34: Prohnutí Ar+5 %H2	43
Obrázek 35: Návar Ar+5 %H2	43
Obrázek 36: Kapilární zkouška-Nanesení penetrantu	44
Obrázek 37: Výsledky kapilární zkoušky.....	44
Obrázek 38: Metalografický výbrus	45
Obrázek 39: Makrostruktura Ar 4.6	46
Obrázek 40: Makrostruktura Ar70/He30.....	46
Obrázek 41: Makrostruktura Ar + 5 H2	46
Obrázek 42: Mikrostruktura Ar 4.6	47
Obrázek 43: Mikrostruktura Ar70/He30	47
Obrázek 44: Trhlina Ar70/He30 (zvětšeno 200x)	48
Obrázek 45: Mikrostruktura Ar + 5 % H2	48
Obrázek 46: Póry v prvním návaru Ar + 5 % H2 (zvětšení 200x)	48