



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

FAKULTA STROJNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

Využití pulzního režimu při robotizovaném svařování niklových slitin metodou TIG

Pulse Mode in Robotic TIG Welding of Nickel Alloys

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Ondřej Dudáš
Author

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

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2343 Výroba a ekonomika ve strojírenství
Study program

STUDIJNÍ OBOR: 2303R014 Technologie, materiály a ekonomika
strojírenství

Praha 2021

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dudáš** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **475081**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající 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:

Využití pulzního režimu při robotizovaném svařování niklových slitin metodou TIG

Název bakalářské práce anglicky:

Pulse Mode in Robotic TIG Welding of Nickel Alloys

Pokyny pro vypracování:

1. Niklové slitiny a jejich využití v technické praxi.
2. Svařitelnost niklových slitin.
3. Technologie TIG a její možnosti (stejnoseměrný a střídavý proud, pulzní režim).
4. Návrh experimentální činnosti - technologický postup, parametry, ochranné plyny, NDT a DT kontrola.
5. Zhodnocení dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

1. Influence of magnetically constricted arc traverse speed (MCATS) on tensile properties and microstructural characteristics of welded Inconel 718 alloy sheets.
2. Solidification Cracking of IN 718 TIG Welds.
3. Investigation on the Pulsed TIG Welding of Nickel-Base Alloy for Improved Microstructure and Weld Penetration.
4. Informační bulletiny od výrobců svařovací techniky.

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:

Datum zadání bakalářské práce: **15.04.2021**

Termín odevzdání bakalářské práce: **13.08.2021**

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. Karla Kovandy, 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

Velmi rád bych tímto poděkoval panu Ing. Karlu Kovandovi Ph.D. za obětavou pomoc při zpracovávání této práce a všechny odborné rady, a také Ing. Marii Kolaříkové Ph.D. za velkou pomoc při provedení metalografické zkoušky. Dále bych chtěl poděkovat i své rodině a nejbližším za podporu během celého studia.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá problematikou navařování niklových slitin metodou TIG a změnou parametrů pulzního režimu. Teoretická část je zaměřena na niklové slitiny, jejich svařitelnost a na metodu svařování TIG. V experimentální je hodnocen vliv parametrů pulzního režimu při navařování niklových slitin. V první části je zkoumán vliv změny impulsních/základních proudů, v druhé pak změna frekvence v rozsahu od 24-500 Hz, v třetí je hodnocen vliv doby pulsu/doby prodlevy v rozsahu od 0,01 do 1 s. V závěrečné části experimentu jsou na základě předem vyzkoušených parametrů vyhotoveny návrhy.

Název diplomové práce:	Využití pulzního režimu při robotizovaném svařování niklových slitin metodou TIG
Autor práce:	Ondřej Dudáš
Vedoucí práce:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
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:	49 stránek, 10 tabulek, 44 obrázků
Klíčová slova:	svařování, TIG, slitiny, nikl, korozivzdornost, inconel, superslitiny, pulzace, impulsní přenos

Annotation

The bachelor's thesis deals with the issue of welding of nickel alloys by TIG and changing the parameters of the pulse mode. The theoretical part is focused on nickel alloys, their weldability and the method of TIG welding. The experimental evaluates the influence of pulse mode parameters during welding of nickel alloys. The first part examines the effect of changes in pulse / fundamental currents, the second changes the frequency in the range from 24-500 Hz, the third evaluates the effect of pulse time / delay time in the range from 0.01 to 1 s. In the final part of the experiment welds are made on the basis of pre-tested parameters.

Title of the final thesis:	Pulse Mode in Robotic TIG Welding of Nickel Alloys
Author:	Ondřej Dudáš
Supervisor:	Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE
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:	49 pages, 10 tables, 44 pictures
Keywords:	welding, TIG, tungsten, alloy, pulse, mode, nickel, stainless, steel, Inconel

Obsah

1. Úvod a cíl práce	10
2. Korozivzdorné materiály	11
2.1 Korozivzdornost a koroze.....	11
2.2 Korozivzdorné oceli.....	12
2.3 Korozivzdorné slitiny na bázi niklu a kobaltu – superslitiny	13
3. Niklové slitiny	13
3.1 Mechanické vlastnosti	14
3.2 Chemické složení.....	14
3.3 Využití Inconelu.....	14
3.4 Precipitace niklových slitin-zpevnění.....	15
3.5 Svařitelnost niklových slitin	15
4. Svařování slitin na bázi niklu a kobaltu	16
4.1 Obloukové svařování	17
4.2 Svařování metodou TIG/WIG.....	18
4.3 Impulsní přenos-pulzace.....	20
5. Technologie svařování Inconelových slitin metodou TIG	21
6. Experimentální část.....	22
6.1 Použitá zařízení	22
6.2 Vstupní data a parametry	23
6.3 1.část experimentu	26
6.4 2.část experimentu	29
6.5 3.část experimentu	32
6.6 4.část experimentu	34
6.6.1 Návar č.1.....	36

6.6.2	Návar č.2	38
6.6.3	Návar č.3	40
6.6.4	Metalografická zkouška – mikroskopie	42
7.	Závěr a zhodnocení	44
	Seznam použitých zdrojů	45
	Seznam obrázků	47
	Seznam tabulek	49

Seznam použitých zkratek a symbolů

TIG	Tungsten Inert Gas
WIG	Wolfram Inert Gas
MIG	Metal Inert Gas
MMA	Manual Metal Arc
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
SAW	Submerged Arc Welding

1. Úvod a cíl práce

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním a posouzením vlivu impulzního přenosu a jeho parametrů při svařování metodou TIG niklových slitin. Cílem experimentální části je vytvoření vrstveného návaru na základní materiál a optimální volbu parametrů robotizovaného svařování pro provedení tohoto návaru. V teoretické části se nejdříve zaměřuje na vlastnosti korozivzdorných materiálů a osvětlení pojmů jako je koroze či korozivzdornost. Následně pak na základní materiál, který je podkladem pro experimentální část, což je chrom-niklová korozivzdorná ocel. Dalším materiálem, tentokrát přídatným, je superslitina Inconel. Superslitiny jsou velmi důležitým druhem materiálu, který nachází nemalé uplatnění v průmyslu, zejména pak díky své schopnosti zachovávat si mechanickou odolnost a chemickou stálost i při vysokých teplotách a v agresivních prostředích. V následující části teoretického rozboru je rozbor problematiky svařování niklových slitin, jejich svařitelnosti a metody svařování vhodné pro tento druh materiálu.

Experimentální řešení je rozděleno do 4 částí. V první z nich je řešeno zkoumání vlivu různých hodnot základního a pulzního proudu při dané frekvenci proudu na robotizované svařování metodou TIG. V druhé části byly vyhotoveny jednotlivé návary při různých frekvencích a ve třetí části byly měněny parametry doby prodlevy/doby pulzu při ostatních konstantních parametrech. Čtvrtá část je pak výstupem předchozích tří částí, kdy z již získaných poznatků a vyzkoušených parametrů je vyhotoven samotný vrstvený návar. Výsledný návar je pak podroben vizuální i metalografické zkoušce.

2. Korozivzdorné materiály

Ve většině odvětví, které mají souvislost se strojními zařízeními a konstrukcemi, se používají různé materiály. Hlavními kritérii pro rozdělení těchto materiálů je jejich chemické složení, způsob zpracování, oblast použití daného materiálu či skupina jakosti. Tato práce se bude zabývat korozivzdornými materiály, především pak korozivzdornými ocelmi. [1]

2.1 Korozivzdornost a koroze

Korozivzdornost je schopnost materiálu se pasivovat. Díky pasivaci pak dochází ke zpomalení korozních dějů a brání či omezuje chemickou a elektrochemickou reaktivitu. Pro zjednodušení, víceméně se jedná o tvorbu tenkých oxidických vrstev na povrchu kovu reakcí s okolním prostředím. Při reakci materiál-korozní prostředí je nutné zhodnotit jak faktory vnější (tlak, teplotu, mechanické namáhání, korozní aktivitu prostředí), tak i faktory vnitřní, které jsou dány fyzikálně metalurgickými vlastnostmi daného materiálu. Koroze jako taková je definována jako znehodnocení chemickým či fyzikálně chemickými ději, při kterém dochází k částečnému či úplnému rozrušení materiálu.

Dle podstaty procesu koroze lze rozlišit následující druhy:

- a) Koroze v elektricky nevodivých prostředích-chemická

Jedná se především o korozi v horkých suchých plynech a nevodivých kapalinách.

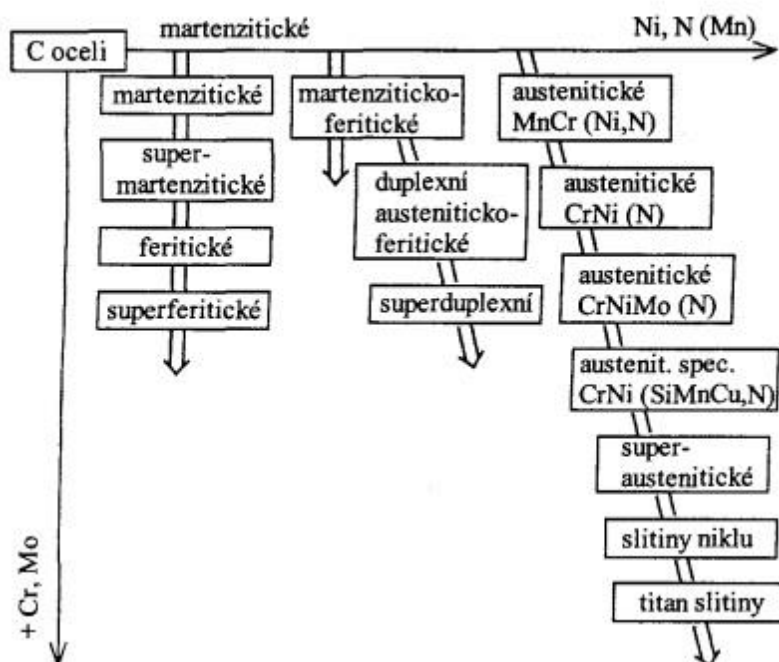
- b) Koroze v elektricky vodivých prostředích-elektrochemická

Zde jde především o elektrochemickou reakci. Dochází k ní zejména v elektrolytech jako jsou kyseliny, zásady, sole či přírodní a technické vody.

Chemickou korozi rozumíme rozrušení kovových materiálů vlivem chemického působení vnějšího prostředí. Klasickým příkladem může být oxidace povrchu daného kovu, kdy se na něm vytvoří vrstva oxidů. Naopak při styku materiálu s elektricky vodivým prostředím dochází ke korozi, která má odlišný mechanismus než ta chemická. Elektrochemická koroze je charakterizována určitými změnami spojené s přenosem elektrického náboje, zatímco chemické korozní děje jsou vysvětlovány chemickými reakcemi. [1] [2]

2.2 Korozi vzdorné oceli

Mezi korozi vzdorné oceli lze zařadit oceli, které jsou schopné pasivace a odolávají korozi v oxidačních prostředích. Podmínkou pro schopnost pasivace je obsah chromu v tuhém roztoku minimálně nad 12 hm. % v závislosti na obsahu uhlíku a dalších legujících prvků. Tato podmínka zabezpečí skokovou změnu standartního elektrochemického potenciálu. Druhým nejvýznamnějším legujícím prvkem v korozi vzdorných ocelích je nikl, který nejenže dokáže příznivě ovlivnit mechanické vlastnosti dané oceli, ale je i elektrochemicky ušlechtilý (=kov s kladným elektrochemickým potenciálem). Jako hlavní garanti korozi vzdornosti tedy jsou feritotvorný Cr a austenitotvorný Ni. Nejvyšší hodnoty korozi vzdornosti mají materiály, kde obsah legujících prvků (Ni, Co, Mo) přesáhne obsah železa, tzv. superslitiny. Ty jsou schopny odolat i nejagresivnějším prostředí. V závislosti na mikrostruktuře lze korozi vzdorné oceli rozdělit do čtyř skupin. Na oceli feritické, martenzitické, austenitické a dvoufázové či tzv. duplexní. Ty mohou být feriticko-austenitické nebo martenziticko-austenitické nebo i martenziticko-feritické. [1] [2] [3] [4]



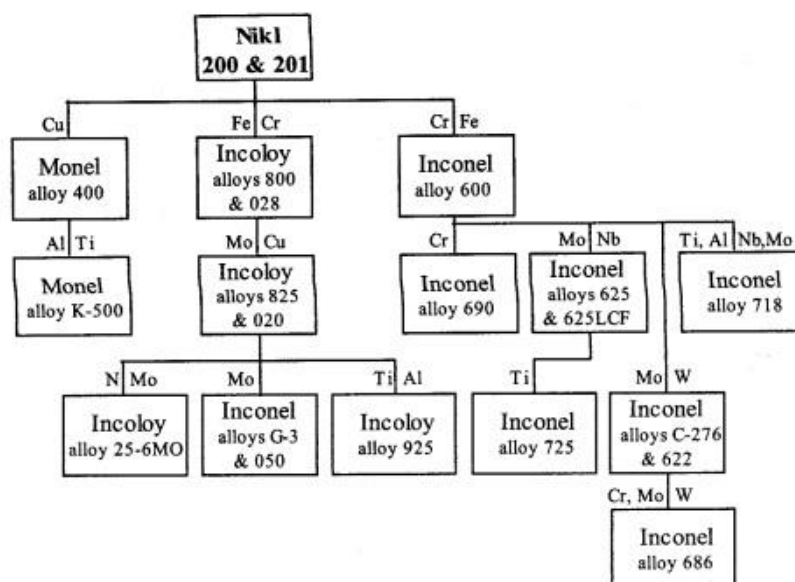
Obrázek 1.-Strukturální rozdělení korozi vzdorných ocelí [4]

2.3 Korozivzdorné slitiny na bázi niklu a kobaltu – superslitiny

Jedná se především o slitiny, které mají společný jmenovatel, a to austenitickou strukturu. Dalším rysem těchto slitin je plošně centrovaná kubická matrice. Vyznačují se skvělou korozní odolností a dobrými mechanickými vlastnostmi za vysokých teplot. Použití nalézají především v oblastech, kde dochází k provozní teplotě nad 540 °C. Lze je rozdělit na niklové, železo-niklové a kobaltové slitiny. [4] [5]

3. Niklové slitiny

Niklovými slitinami se rozumí slitiny na bázi niklu, které díky své výborné korozní odolnosti a mechanickým vlastnostem odolávají prostředí zředěných i koncentrovaných anorganických a organických kyselin lépe než slitiny na bázi železa. Nikl ve svých slitinách zajišťuje především metalurgickou stabilitu a zvyšuje tepelnou stabilitu. Dále jsou schopné odolávat vysokoteplotnímu creepu. Jedná se o slitiny niklu (nad 50 %), chromu (16-29 %) a železa (6-19,5 %), s případným dolegováním molybdenem, niobem, titanem či wolframem. [4] [1] [11]



Obrázek 2. Rozdělení slitin niklu [4]

3.1 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti jednotlivých inconelových slitin jsou závislé od jejich chemického složení. V případě dolegování prvky jako je Ti, Al, Nb či Mo se jedná o precipitačně vytvrditelné inconely např. INCONEL 751. Ten vyniká vysokou tvrdostí a otěruvzdorností. Mezi další zástupce patří rovněž INCONEL 600, který je charakteristický dobrou korozní odolností vůči praskání, má vysokou žáruvzdornost a disponuje velmi vysokou odolností vůči kyselým prostředím. Slitina INCONEL 718 vyniká zejména skvělou odolností proti praskání po svařování a dobrou kombinací všech mechanických vlastností. INCONEL 622, 625, 686 a C-276 mají naopak velmi dobrou odolnost vůči redukčním prostředím. Také je u těchto slitin snížena náchylnost k mezikrystalové korozi, díky snížení obsahu uhlíku pod hodnotu 0,01 % C. [1] [11] [9]

3.2 Chemické složení

Tabulka 1.- Chemické složení vybraných Inconelů [6][7][8][9][10]

Slitina	Ni	Cr	Fe	C	Mn	S	Cu	Nb	Mo	Al	Ti	Co
INCONEL 600	min.72%	14-17%	6-10%	max.0,15%	1%	0,02%	0,50%	-	-	-	-	-
INCONEL 625	min.58%	20-23%	max.5%	max.0,1%	0,50%	0,02%		3,15-4,15%	8-10%	0,40%	0,40%	1%
INCONEL 751	min.70%	14-17%	5-9%	max.0,1%	1%	0,01%	0,50%	0,7-1,2%	-	0,9-1,5%	2-2,6%	-
INCONEL 686	min.57%	19-23%	2%	max.0,01%	0,75%	0,02%	-	-	15-17%	-	0,2-0,25%	-
INCONEL C-276	min 58%	14,5-16,5%	4-7%	max.0,01%	1%	0,03%	-	-	15-17%	-	-	2,50%
INCONEL 718	min. 50%	17-21%	% zbytek	0,08%	0,35%	0,02%	0,30%	4,75-5,50%	2,8-3,3%	0,2-0,8%	0,65-1,15%	1%

3.3 Využití Inconelu

- INCONEL 600–v chemickém průmyslu, v tepelném zpracování – ohřívače, destilační zařízení-součásti pecí, koše do průmyslových pecí, v letectví-součásti motoru, výfukové těsnění, konstrukce jaderných reaktorů
- INCONEL 718- součásti pro rakety a letadla, nádrže pro kapalná paliva, spojovací materiál, části strojů
- INCONEL 686–v chemickém průmyslu v agresivních prostředích
- INCONEL C-276–v chemickém průmyslu-výparníky, výměníky tepla, potrubí

3.4 Precipitace niklových slitin-zpevnění

Precipitace je fázová přeměna s tepelně aktivovaným růstem a přenosem hmoty na dlouhou vzdálenost. Významně se při tomto procesu mění vlastnosti slitin. Tato přeměna je založena na rozpadu přesyceného tuhého roztoku. K samotnému precipitačnímu zpevnění dochází při zušlechťování, vytvrzování či tepelně-mechanickém zpevnění. Příčinou samotného zpevnění slitin je přesycení tuhého roztoku nějakým prvkem, který následně zapříčiní jeho rozpad. Tepelné zpracování slitin se skládá z rozpouštěcího žhání, ochlazení a následného umělého stárnutí. Mezi nejběžnější přísadové prvky, sloužící ke zpevnění patří Cr, Al, Ti, V či například Cu. Rozpad může probíhat za nízkých teplot při prudkém ochlazení či za vyšších teplot pomalejším ochlazováním. Rozpouštěcí žhání se obvykle provádí v teplotách od 1080-1220 °C, s ohřevem na dobu 2-12 hod. Následuje ochlazení, nejčastěji na vzduchu. K precipitačnímu zpevnění (stárnutí) dochází v rozsahu teplot od 700-950 °C, při teplotě vyšší, než je teplota funkce součásti. [16] [17] [19]

3.5 Svařitelnost niklových slitin

Svařitelnost slitin na bázi niklu, mezi které patří i Inconely, je významně ovlivněna zejména nečistotami, které obsahuje technický nikl. Tyto prvky jsou v niklu víceméně nerozpustné, jedná se především o síru, uhlík a olovo. Nepříznivý vliv síry je dán zejména velmi nízkou teplotou tavení vzniklého eutektika, které je 644 °C. Tomuto jevu lze do jisté míry zabránit dolegováním hořčíkem, který vytvoří vazbu se sírou za vzniku MgS, který má vyšší teplotu tavení než výše zmiňované eutektikum. Síra pak způsobuje, vlivem malé rozpustnosti síry v tuhém stavu, vznik tzv. horkých trhlin. Hlavní příčinou vzniku horkých trhlin je segregace fází prvků (S, O, P) na hranicích zrn. Trhliny mají téměř vždy interkrystalový charakter. Rovněž špatný vliv na svařitelnost niklových slitin má uhlík. To souvisí především s jeho rozpustností v niklu, proto se snažíme obsah uhlíku snižovat. U svařování slitin s obsahem uhlíku nad 0,2 %hm. při rychlém ochlazování svarové lázně dochází při vyšších teplotách (500-750 °C) k precipitaci uhlíku ve formě grafitu. Tato změna může vyvolat ve svarových spojích studené trhliny. Svařitelnost niklových slitin a jejich vhodnost pro svařování je jen do určité míry ovlivněna legurami. Prvky jako měď a železo prakticky neovlivňují svařitelnost dané slitiny. Výjimku tvoří chrom. Ten vytváří na povrchu svaru oxidickou vrstvu, která má nepříznivý vliv

na stabilitu hoření oblouku. Velmi dobrou svařitelnost obloukovými metodami vykazují především slitiny INCONEL 718 či INCONEL C-276. [2] [10] [11] [18]

4. Svařování slitin na bázi niklu a kobaltu

Svařování je technologická operace kovů a jejich slitin, kdy dochází ke spojování materiálů a vzniká nerozebíratelný svarový spoj. Toto spojení může vznikat soustředěným působením tlaku, tepla či jejich kombinací. Cílem je spojení určitých částí a zabezpečení požadovaných vlastností, které budou splňovat normy a podmínky jeho provozu. Další operací je navařování. Navařování je proces, kdy se v určitém prostoru dané součásti nanáší přídatný materiál za účelem navýšení či doplnění objemu, například z důvodu zvýšení odolnosti v daném místě.

Dle fyzikálního procesu probíhající při svařování můžeme rozlišit svařování tavné, svařování tlakem a svařování tlakem za studena. Práce se zabývá především metodami tavného svařování, a to konkrétně metodou obloukového svařování. Svařování slitin na bázi niklu a kobaltu je možné prakticky všemi metodami jako například oceli. Obtížnější je svařování precipitačně zpevněných slitin. Ty vyžadují přesnější kontrolu a dodržování parametrů svařování. Pro svařování nikl-chromových slitin jsou vhodné metody obloukového svařování WIG a MIG, svařování obalenou elektrodou, pod tavidlem, elektronovým paprskem, elektrickým odporem, třením a pro malé tloušťky i laserem. Tato práce se zabývá především navařováním metodou WIG/TIG. [2]

Označení metod obloukového svařování vhodné pro svařování Cr-Ni slitin:

- **MIG** (Metal Inert Gas-131) - svařování v inertní atmosféře tavící se elektrodou
- **MMA** (Manual Metal Arc-111) - ruční svařování obalenou elektrodou
- **TIG/WIG** (Tungsten/Wolfram Inert Gas-141) - svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertní atmosféře
- **SAW** (Submerged Arc Welding-135) -automatické svařování pod tavidlem

4.1 Obloukové svařování

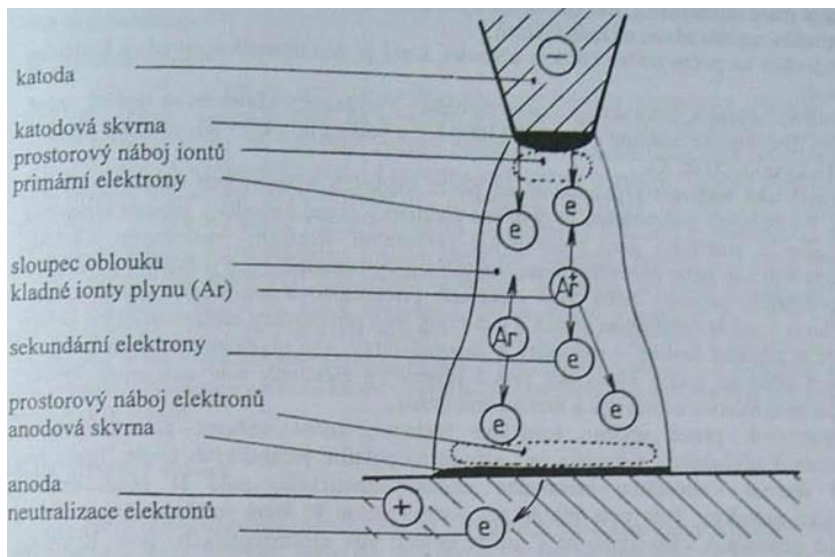
Historie využití elektrického oblouku jakožto zdroje vysokých teplot sahá do roku 1808, kdy byl objeven Angličanem Humphrym Davem. Elektrický oblouk je nízkonapěťový vysokotlaký elektrický výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Výboj vzniká mezi elektrodou a základním materiálem. Jeho výkon, tvar a teplotu lze měnit dle technologických požadavků.

Za předpokladu dostatečného napětí pro ionizaci a proudu pro udržení plazmatu oblouku lze docílit stabilního hoření oblouku. Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku za vysokých teplot a v krátkém čase a jsou ovlivňovány několika faktory: chemickým složením plazmatu, materiálem elektrod, geometrickým uspořádáním systému anoda-katoda, tvarem elektrod, tepelnou vodivostí plazmatu, elektrody a základního materiálu či okolní atmosférou.

Mezi základní části elektrického oblouku patří katodová skvrna, sloupec oblouku a anodová skvrna. Na katodovou vrstvu elektrody dopadají kladné ionty, které se vlivem elektrostatických sil pohybují ve směru záporného pólu. Teploty v této části oblouku rostou se zvyšujícím se proudem a pohybují se se běžně kolem 2 400-3 000 °C.

Sloupec oblouku se jeví jako zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu mezi elektrodami. Má tvar mírně se rozšiřujícího se kužele směrem od katody k anodě. V té oblasti se dosahuje velmi vysokých teplot, ta závisí na více faktorech, jako například intenzitou proudu, hodnotami napětí a také prostředí oblouku. Maximální teploty se nacházejí ve středu oblouku a směrem ke kraji oblouku klesají. Teploty oblouku při ručním svařování jsou v rozmezí 4 200-5 700 °C, při svařování v ochranných atmosférách metodou TIG/WIG 6 200-7 800 °C a u svařování MIG a MAG při vysoké proudové hustotě v rozmezí 8 000-1 500 °C.

Na anodové skvrně jsou neutralizovány a emitovány záporné částice. Teplota anodové vrstvy se pohybuje přibližně mezi 2 700-3 600 °C. [18] [12] [13]

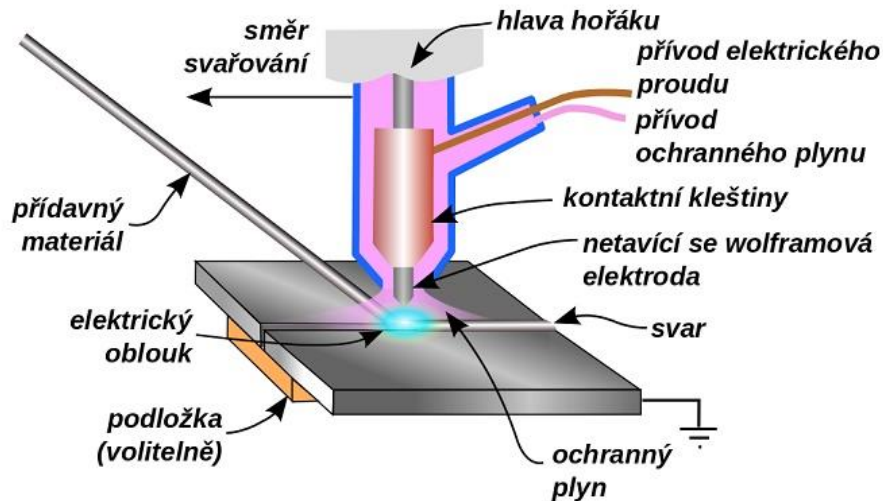


Obrázek 3.-Hlavní části elektrického oblouku při svařování [13]

Při přenosu nataveného materiálu elektrody či přídavného materiálu do svarové lázně dochází ke složitému silovému působení. Toto působení je ovlivněno podmínkami svařování a jejich parametry jako je proudová hustota, průměr elektrody či polarita. Mezi základní druhy přenosu kovu do svarové lázně patří zkratový(kapkový) přenos, sprchový přenos, impulsní přenos, rotující přenos či v současně době modifikovaný zkratový přenos. [12][2] [13]

4.2 Svařování metodou TIG/WIG

Zkratka TIG (Tungsten Inert Gas) popř. WIG (Wolfram Inert Gas) označuje metodu svařování wolframovou neodtavující se elektrodou v inertním plynu. Metoda TIG spadá do skupiny svařování v ochranné atmosféře. Při tomto způsobu svařování je svarová lázeň chráněna před nepříznivými účinky okolního prostředí a plynů jako je vodík či dusík. Inertní atmosféry nevstupují do chemických reakcí se svarovou lázní. Nejběžnější plyny, které se používají při svařování v inertní atmosféře jsou argon (Ar) a helium (He) nebo jejich směs. Metoda TIG je poměrně univerzální a lze ji provádět v uspořádání pro ruční i automatické svařování či navařování. Lze ji realizovat s přídavným materiálem ve formě drátu ručním způsobem nebo automaticky podávacím mechanismem. [12] [13]



Obrázek 4.-Schéma ručního způsobu svařování metodou TIG [14]

Rozdělit metodu TIG na základě druhu proudu lze na svařování stejnosměrným a střídavým proudem. Stejnosměrný proud je vhodný pro svařování středně a vysokolegovaných ocelí, mědi, niklu, titanu, zirkonu, molybdenu a jiných. Naopak střídavý proud najde své uplatnění při svařování hliníku či hořčíku a jejich slitin. Metoda TIG je rovněž vhodná pro spojování obtížně svažitelných materiálů či spojování různorodých materiálů, jako například ocel s mědí a jiné.

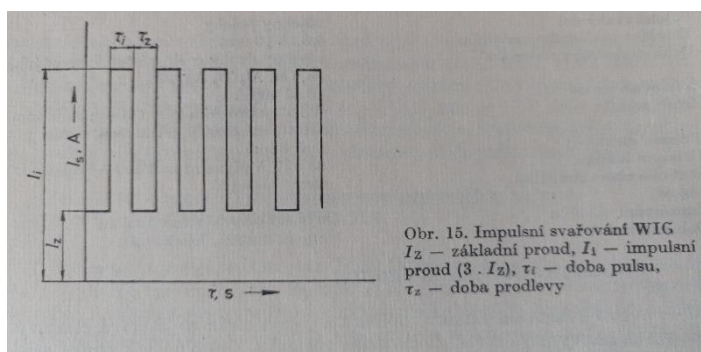
Největší přednosti metody TIG v porovnání s jinými metodami tavného svařování jsou:

- Efektivní ochrana svarové lázně před účinky vzdušného kyslíku díky inertnímu plynu
- Velmi čistý povrch svaru díky potlačení vzniku strusky
- Dobré tvarování svarové housenky
- Vysoce stabilní elektrický oblouk v širokém rozsahu svařovacích proudů
- Možnost vytvoření velmi celistvých svarů i u materiálů, kde dochází k oxidaci na povrchu při zvýšených teplotách
- Přesná regulace svařovacích parametrů a dobrá operativnost při svařování v polohách
- Vzniká menší tepelně ovlivněná oblast (TOO) a dochází jen k malým deformacím

Použití této metody je velice široké především vzhledem k výše popsaným vlastnostem. Svařované vysokolegované ocelové materiály najdou využití v chemickém, farmaceutickém průmyslu či potravinářském průmyslu. Rovněž svařování žáruvzdorných či žárupevných ocelí při výrobě kotlů a tepelných výměníků. V kosmickém a leteckém průmyslu se metodou TIG svařují titanové slitiny. A díky tzv. čistícímu účinku oblouku i svařování hliníku a jeho slitin především v dopravní technice. [13] [18] [5]

4.3 Impulsní přenos-pulzace

Při svařování metodou TIG se čím dál více uplatňuje impulsní přenos svarového kovu do svarové lázně. Při impulsním přenosu se používá stejnosměrný proud, který se mění mezi dvěma hladinami v závislosti na čase. Proud se označuje jako základní a impulsní. Funkcí základního proudu je udržení ionizace sloupce oblouku a vedení proudu. Naopak během amplitudy pulsu v oblasti impulsního proudu dochází k intenzivnímu ohřívání oblouku, natavení přídavného materiálu a odtavování kapky do svarové lázně. Během celé amplitudy se intenzivně ohřívá oblouk a dochází k natavení přídavného materiálu a vzniká svarová lázeň. Díky pulznímu přenosu můžeme dosáhnout zlepšení formování svarové lázně a kresby svaru, snížení spotřeby energie či zvýšení svařovací rychlosti. Dnes vyráběná svařovací zařízení umožňují nastavovat a měnit nejen hodnoty základních a impulsních proudů, ale i frekvenci pulsů či doby pulsu a prodlevy. Vhodnou volbou těchto parametrů lze docílit i menšího tenzotermického účinku na základní materiál a tím snížit jeho deformaci a tepelné ovlivnění. Proto lze takto svařovat i materiály, které jsou citlivé právě na tepelné ovlivnění. Největší uplatnění má tato metoda při svařování hliníku, nezelezných kovů či vysokolegovaných ocelí. [18] [12] [13]



Obrázek 5.- Průběh impulsního přenosu při svařování metodou TIG. [12]

5. Technologie svařování Inconelových slitin metodou TIG

Svařování slitin se provádí zásadně bez předchozího předehřevu. Je doporučeno svařovat s teplotou interpass menší než 150 °C. Jak už bylo výše zmíněno, tyto slitiny vynikají poměrně dobrou svařitelností. Při výběru přídatného materiálu je důležité vzít v potaz, že chemické složení tohoto materiálu by mělo být co nejvíce podobné základnímu materiálu. Přídatný materiál obvykle obsahuje prvky Ti a Si, které mají dezoxidační funkci a prvky Mg, které přispívají k redukci síry. Tyto prvky pak zabezpečí následné vlastnosti, jako je odolnost proti korozi, žáruvzdornost či žárupevnost. Při svařování precipitačně zpevněných slitin je potřeba nezapomenout na tepelné zpracování.

Při svařování niklových slitin metodou TIG je nezbytně nutné věnovat pozornost čistotě ochranného plynu. Efektivnost ochrany svarové lázně inertním plynem u metody TIG je větší než u metody MIG, proto se tato metoda hodí i na sváření tenkých plechů. U svařování nikl-chromových slitin se využívá i tzv. sekundární ochrany na ochranu kořene svaru, která spočívá v přivádění argonu na podložku.

Slitiny niklu se svařují metodou TIG se stejnosměrným proudem a s přímou polaritou, krátkým obloukem a poměrně vysokou rychlostí. Svarové plochy by měli být dokonale čisté a lehce zdrsňelé. [2] [5]

Process Parameter	Values
Voltage	12 V
Current	120A
Electrode diameter	1.5 mm
Electrode tip angle	60°
Shielding gas	Argon
Flow Rate	15 L
Welding speed	80 mm/min

Obrázek 6.-Navržené parametry pro navařování metodou TIG s INCONELEM 718 viz [15].

6. Experimentální část

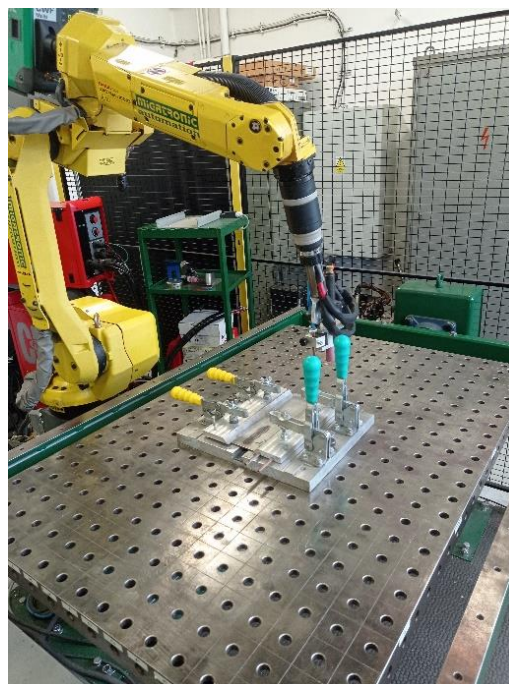
Cílem experimentální části je provedení samotných vrstvených návarů z Inconelu 718 na korozivzdornou ocel a nalezení optimálních svařovacích parametrů na základě předchozích zkušebních vzorků. Je složená ze čtyř na sebe navazujících částí, přičemž v každé došlo ke změně jednotlivých parametrů (viz níže) a následnému vyhodnocení jejich vlivu. V první části byly měněny parametry impulsního a základního proudu při zachování konstantních ostatních parametrů. Ve druhé byly pak na základě zvolených proudů z předchozí části měněny hodnoty frekvence a ve třetí hodnoty doby pulsu, resp. doby prodlevy. Finální návar byl pak vytvořen z nejlépe vyhodnocených parametrů a byla u něj provedena vizuální a metalografická zkouška.

6.1 Použitá zařízení

Jako svařovací zdroj byl využit svařovací invertor Migatronik PI 320 TIG AC/DC. Součástí pracoviště bylo rovněž robotické rameno Fanuc ArcMate 100iC.



Obrázek 7.-Svařovací zdroj Migatronik PI 320.



Obrázek 8.-Uspořádání robotizovaného pracoviště.

Pro přípravu vzorků byly použity dílenské nůžky pro stříhání. Jako měřící zařízení nám sloužila měřící stanice ALMEMO 5690-2 od firmy Ahlborn. Kalibrace termočlánků pak proběhla ve speciální kalibrační peci Isotech Jupiter 4852, která má rozsah teplot od 35-660 °C a stabilitu $\pm 0,03$ °C.



Obrázek 9.-Měřící stanice ALMEMO.



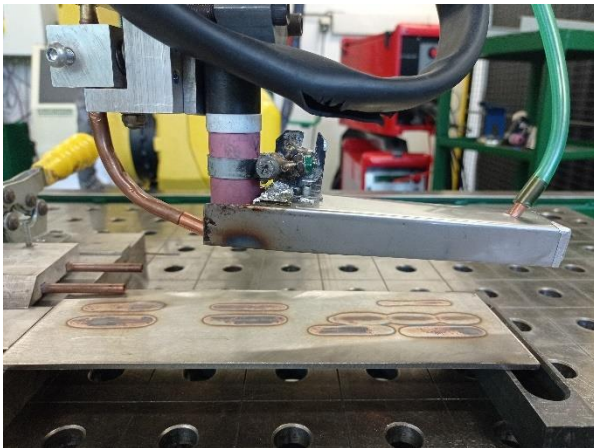
Obrázek 10.-Kalibrační pec.

6.2 Vstupní data a parametry

Pro zvolenou metodu TIG se svařovalo stejnosměrným proudem a jako ochranná atmosféra byla použita směs argonu a helia v poměru 70:30. Dále bylo využito tzv. vlečné ochrany, pro kterou byl vybrán nejdříve čistý argon a následně i stejná směs plynů, jako v případě ochrany v místě svařování. Průtok při ochraně svarového kořene byl 12 l/min a u vlečné ochrany 8-9 l/min.

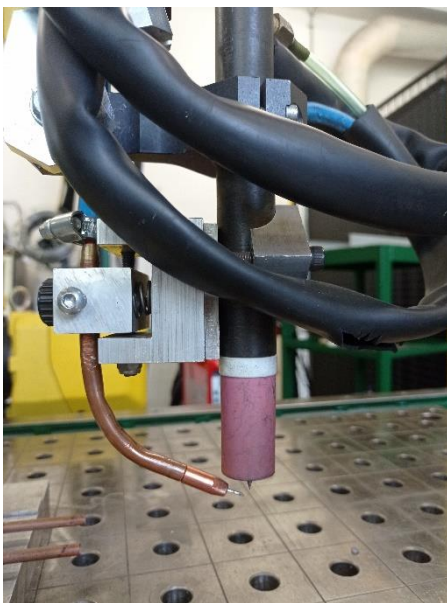


Obrázek 11.-Tlaková láhev Linde 4.6- Argon



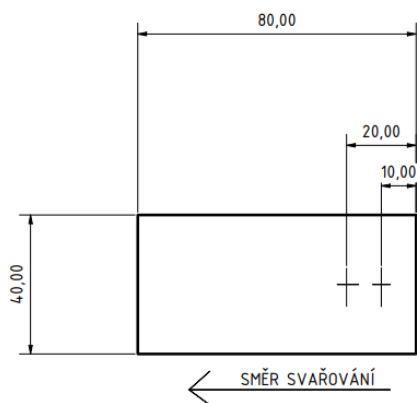
Obrázek 12.-Použití vlečné ochrany

Wolframová elektroda s 2 % příměsí lanthanu WL 20 o průměru 2,4 mm a byla zbrošena pod vrcholovým úhlem 30°. Přičemž vzdálenost vrcholu elektrody od základního materiálu byla 2,5 mm a vysunutí elektrody z hubice 7,8 mm. Vzdálenost elektrody od vysunutí přídavného materiálu byla 1,5 mm.

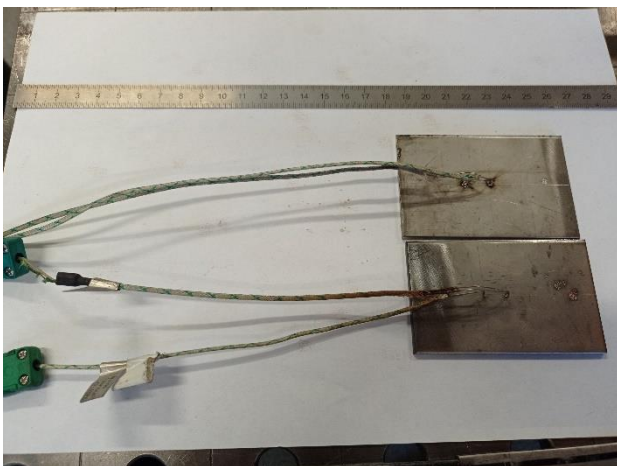


Obrázek 13.-Vzájemná poloha elektrody a hubice pro přídavný materiál.

Součástí experimentu bylo rovněž měření teploty v místě svařování a následné posouzení vlivu parametrů na tepelné ovlivnění či rychlost chladnutí tavné lázně. K zajištění měření se používaly termočlánky typu K, které byly vzhledem k přesnosti měření podrobeny kalibraci. Umístění termočlánků se nacházelo ze spodní strany základního materiálu, přesně nad budoucí svarovou housenkou.



Obrázek 14.-Umístění termočlánků na základní materiál.



Obrázek 15.-Umístění termočlánků na základní materiál (2).

Základním materiálem pak byla zvolena austenitická chrom-niklová korozivzdorná ocel 1.4301. Polotovar, na který bylo navařováno byl plech o rozměrech 80x50 mm a tloušťce 3 mm. Přídavný drát byl z materiálu Inconel 718, měl průměr 1,2 mm a označoval se jako 3Dprint AM 718.



Obrázek 16.-Přídavný drát z Inconelu 718.

6.3 1.část experimentu

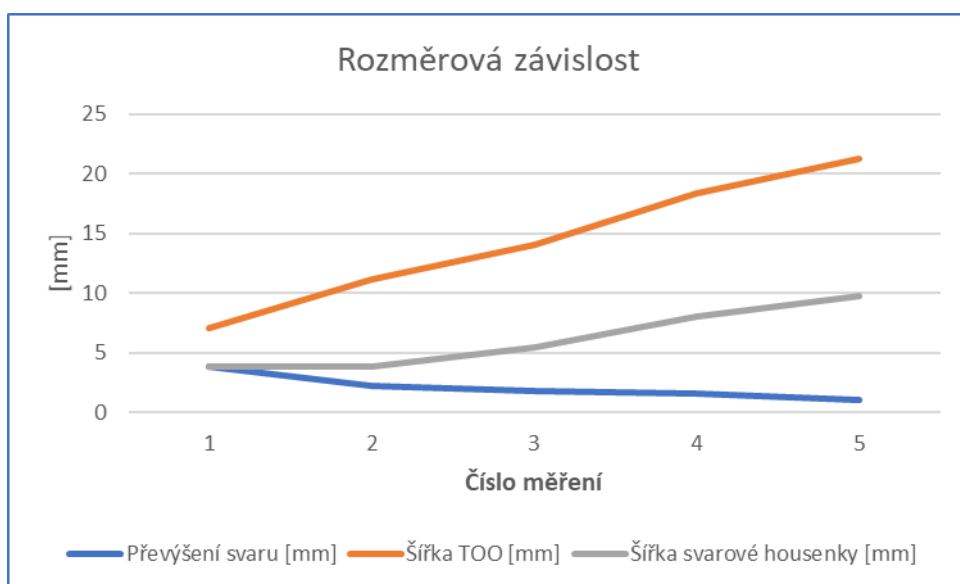
Cílem první části experimentu bylo nalezení vhodných parametrů impulsního a základního proudu. Na základě odborné literatury byla jako vhodná hodnota frekvence zvolena co nejbližší 100 Hz, v našem případě 98 Hz. Tato hodnota vycházela z již nastavených rozsahů na svařovacím zdroji, proto nebylo možné nastavit hodnotu 100 Hz. Dále byla nastavena rychlost posuvu drátu na 1 m/min a svařovací rychlost na 20 cm/min, tyto parametry vycházeli ze zkušeností a z vyzkoušení na několika vzorcích. Poměr mezi základním a impulsním proudem byl v poměru 1:3. Na zdroji se nastavovaly parametry impulsního proudu po 10 A v rozsahu 90-210 A. Následně si pak zdroj, po zadání procentuálního snížení, v tomto případě o 30 %, dopočítal hodnoty základního proudu. Během svařování byla měřena teplota pomocí termočlánků. Následně byly hodnoceny vizuální podoby jednotlivých svarů, velikost tepelně ovlivněné oblasti (dále TOO), maximální teplota v daném místě při svařování a rozměry dané housenky.

Tabulka 2.-Naměřené hodnoty pro 1.část experimentu

	I_z	I_l	Teplota [° C]	Šířka svarové housenky [mm]	Převýšení svaru [mm]	Šířka TOO [mm]
1	30	90	716	3,8	3,8	7,1
2	40	120	904	3,8	2,2	11,1
3	50	150	1021	5,4	1,8	14,0
4	60	180	1202	8,0	1,6	18,3
5	70	210	1298	9,7	1,0	21,3



Obrázek 17.- Graf závislosti maximální naměřené teploty při daných parametrech viz tabulka 2.



Obrázek 18.- Graf závislostí rozměrů svarové housenky a velikosti TOO na zvolených proudech.

Z naměřených dat a grafů vyplývá, že s rostoucími parametry obou proudů, roste jak teplota v místě svaru, tak i vnesené teplo. Přičemž pouze hodnoty převýšení svarové housenky klesají s rostoucím proudem. Tyto závěry nám potvrdily předchozí teoretické poznatky a domněnky. Na základě všech dat vyplynulo, že nejlepší poměr napříč všemi parametry byl u třetího měření. Proto byly pro další část experimentu vybrány parametry 150/50 A.



Obrázek 19.- Jednotlivé návary při změně velikosti proudů.

Z vizuálního posouzení navařených housenek je rovněž na první pohled vidět (viz obr. č.19), že v prvním případě, kdy byl proud v poměru 30/90 A se z důvodu malého proudu nedostatečně odtavoval drát a byla i malá svarová lázeň. Naopak při proudu 70/210 A je již patrná velká tepelně ovlivněná oblast, návar je na povrchu značně zoxidován a je daleko širší než předchozí. Na tomto vytipovaném vzorku byla rovněž provedena kapilární zkouška, která prokázala přítomnost trhliny v části tzv. koncového kráteru, kde je konec svařování a probíhá dofuk viz obr. 21. Jako opatření proti tvorbě koncového kráteru lze zpomalit posuv elektrody v tomto místě nebo použít zpětný pohyb elektrody, kdy dojde k překrytí tohoto kráteru.



Obrázek 20.- Vzorek podrobený kapilární zkoušce.



Obrázek 21.-Foto z průběhu kapilární zkoušky.

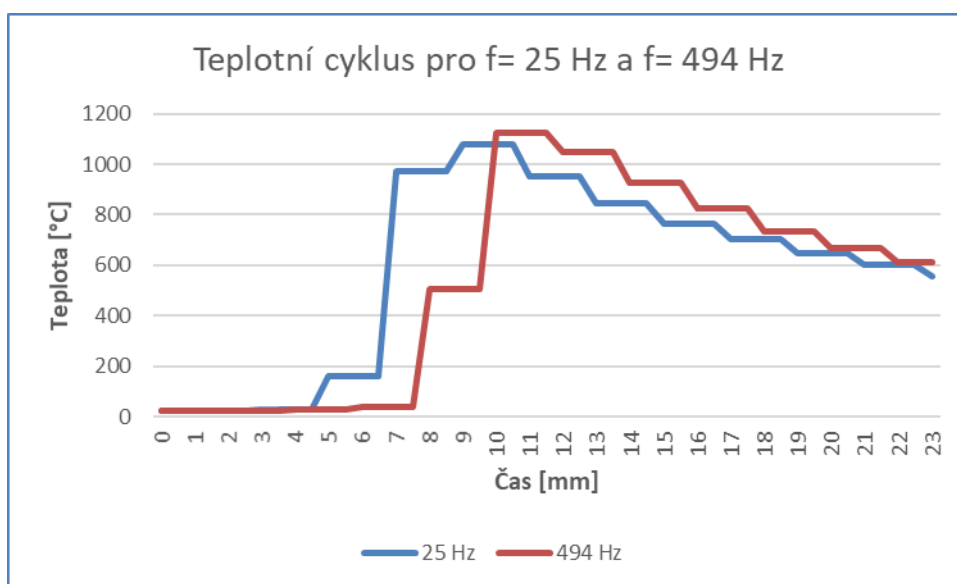
6.4 2.část experimentu

Druhá část experimentu byla zaměřena zejména na srovnání vlivu změn frekvence pulzního svařování na kvalitu návaru a na teplotní průběh během svařování. Pro tento pokus byly zvoleny parametry impulsního a základního proudu na základě předchozí části, tedy 150/50 A. Ostatní parametry zůstaly stejné, rovněž pak i ochrana svarové lázně. Hodnoty frekvence na svařovacím zdroji byly nastavitelné v rozsahu 24-500 Hz. Přesné hodnoty však nebylo možné volit libovolně, ale pouze na předem nastavených úrovních. Rovněž probíhalo

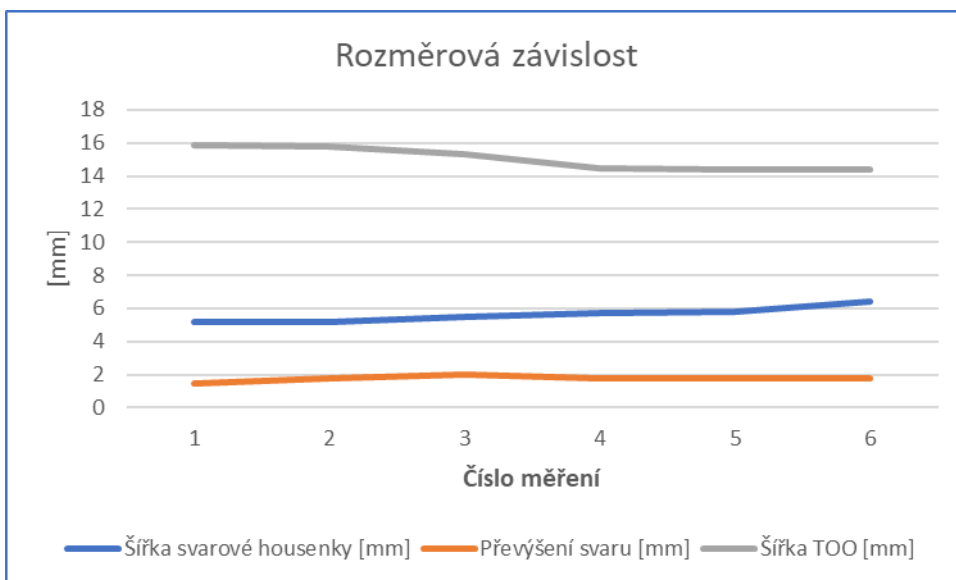
měření teploty pomocí termočlánků, které jsou výstupem pro porovnání teplotního cyklu celého navařování při různých frekvencích.

Tabulka 3.-Naměřené hodnoty pro 2.část experimentu

	Frekvence [Hz]	Teplota [°C]	Šířka svarové housenky [mm]	Převýšení svaru [mm]	Šířka TOO [mm]
1	25	1076	5,2	1,5	15,9
2	49	957	5,2	1,8	15,8
3	98	1021	5,5	2	15,3
4	196	1102	5,7	1,8	14,5
5	330	915	5,8	1,8	14,4
6	494	1126	6,4	1,8	14,4



Obrázek 22.-Teplotní cyklus během navařování s různými hodnotami frekvence.



Obrázek 23.- Graf závislosti rozměrů svarové housenky na změně frekvence.

Z naměřených hodnot lze usoudit, že vliv změny frekvence na maximální teplotu v místě svařování je velmi malý či zanedbatelný. Rozměry svarové housenky i tepelně ovlivněné oblasti se se změnou parametrů frekvence prakticky nemění (viz obr.25). Patrný je ale vliv na kvalitu a vizuální stav navařovaných vzorků. Pro větší porovnání změn by bylo zapotřebí zvětšení rozsahu frekvence nastavitelné na svařovacím zdroji. Z důvodu nemožnosti provedení tohoto úkolu lze obtížněji posoudit vlivy frekvence na různé aspekty.



Obrázek 24.-Jednotlivé vzorky návarů se změnou parametru frekvence.

6.5 3.část experimentu

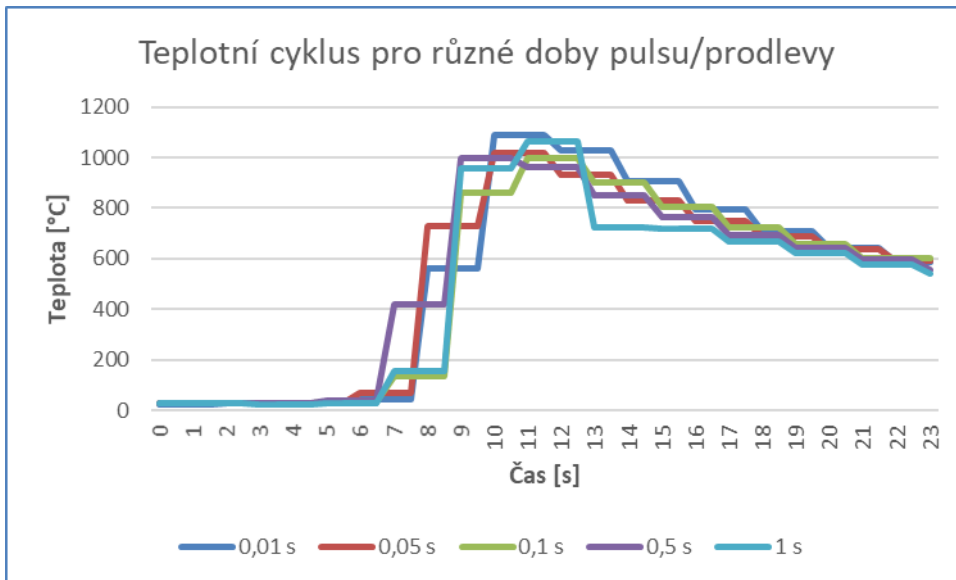
Během třetí části byly měněny parametry doby pulsu, resp. doby prodlevy. Poměr mezi nimi byl 1:1. Změnou těchto parametrů lze částečně kompenzovat malý rozsah nastavení frekvence (24-500 Hz). Dle vztahu $f=1/T_P$, kde T_P je perioda pulsu, lze vyjádřit vztah mezi těmito dvěma parametry. Bylo navrženo pět různých dob od 0,01 s až po 1 s. Parametry proudu vycházeli z 1.části (150/50 A) a parametry rychlosti podávání drátu i svařování zůstaly konstantní. U navařených vzorků byl zkoumán především vliv na celkovou kresbu návaru, jeho kvalitu a v neposlední řadě i na jeho rozměry.

Tabulka 4.-Naměřené hodnoty pro 3.část experimentu

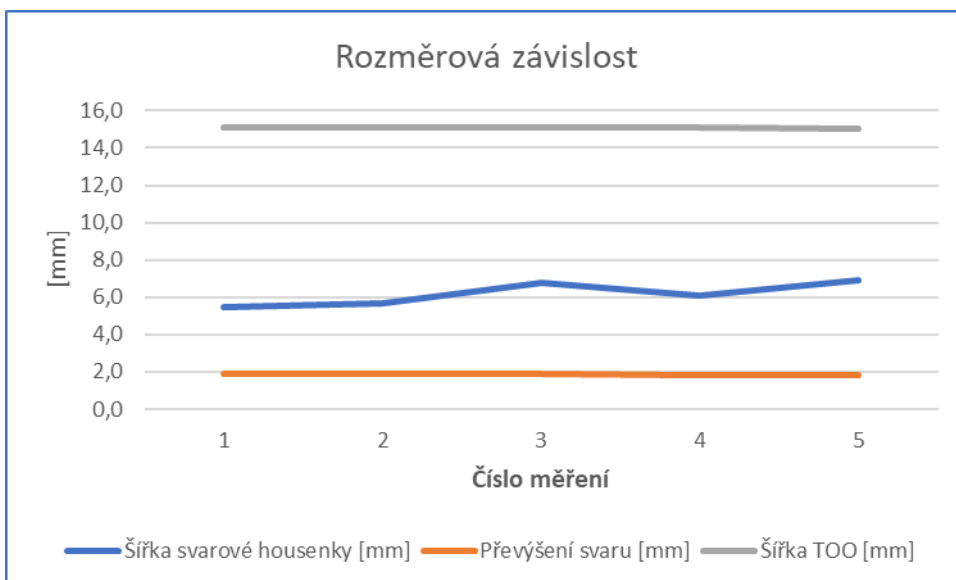
	I_z	I_i	t_i	t_P	Teplota [°C]	Šířka svarové housenky [mm]	Převýšení svaru [mm]	Šířka TOO [mm]
1	50	150	0,01 s	0,01 s	1090	5,5	1,9	15,1
2	50	150	0,05 s	0,05 s	1017	5,7	1,9	15,1
3	50	150	0,1 s	0,1 s	997	6,8	1,9	15,1
4	50	150	0,5 s	0,5 s	997	6,1	1,8	15,1
5	50	150	1 s	2 s	1063	6,9	1,8	15,0



Obrázek 25.-Navařené vzorky pro jednotlivé doby pulsu/prodlevy.



Obrázek 26.- Teplotní cyklus pro 3.část experimentu.



Obrázek 27.-Rozměrová závislost 3.části experimentu.

Z výše uvedeného a na základě získaných dat lze říct, že výrazný vliv změny parametrů doby pulsu či prodlevy je převážně pouze na vizuální stránku daného návaru, kde je patrné, že s prodlužujícím se dobou pulsu je svarová housenka necelistvá a jsou na ní vidět „šupinky“ (především vzorek č. 35). Mírný vliv je pak pozorován na rozměrech daného návaru, kde se zdá, že v prodloužení doby pulsu roste i jeho šířka.

6.6 4.část experimentu

Poslední a nejdůležitější část experimentu se skládá z poznatků a zkušeností z předchozích tří částí a jejich aplikací na finálním vytvoření vícevrstevých návarů (v tomto případě 6 vrstev). Pro tuto část bylo zapotřebí vybrat tři nejvhodnější kombinace parametrů z předchozích návarů a ty potom, při dodržení teploty interpass, vrstvit na sebe. Průběžná rozměrová kontrola byla prováděna pomocí posuvného měřítka a speciální měrky na měření převýšení svaru. Během navařování housenek byla zaznamenávána jak teplota pomocí termočlánků upevněných z dolní části na základní materiál, tak i pomocí ručního termočlánku, kterým byla měřena teplota na povrchu housenky bezprostředně po skončení navaření housenky z důvodu dodržení teploty interpass, či maximální změřená teplota na povrchu (v tabulce T_{MAX}). Při povrchovém měření teploty byla měřena i doba ochlazení právě na teplotu interpass. Ta byla zvolena na základě odborné literatury okolo 130 °C. Oproti předchozím částem byla zvolena tloušťka základního plechu 4mm, především kvůli větším tepelným deformacím. Jako ochranný plyn byl použit argon a hélium v poměru 70:30 s průtokem 12 a následně i 18 l/min. Nastavení hořáku i elektrody zůstalo neměnné jako u předchozích částí.

Zvolené nejvhodnější varianty pro vytvoření vrstvených návarů jsou v tabulce níže.

Tabulka 5.-Varianta č.1-vzorek č.33

Housenka	I_z	I_i	$t_p = t_I$
1	50	150	0,1 s
2	50	150	0,1 s
3	50	150	0,1 s
4	50	150	0,1 s
5	50	150	0,1 s
6	50	150	0,1 s

Tabulka 6.-Varianta č.2-vzorek č.13

Housenka	I_z	I_i	Frekvence [Hz]
1	50	150	98
2	50	150	98
3	50	150	98
4	50	150	98
5	50	150	98
6	50	150	98

Tabulka 7.-Varianta č.3-vzorek č.13+22

Housenka	I_z	I_i	Frekvence [Hz]
1	50	150	98
2	50	150	98
3	120	40	98
4	120	40	98
5	120	40	98
6	120	40	98

Zvolené parametry byly vybrány na základě kombinace vhodných vlastností návarů provedených v předchozí části. V potaz se braly především vizuální a rozměrové vlastnosti jako je převýšení svarové housenky či její šířka.



Obrázek 21.-Vzorek č.13



Obrázek 22.Vzorek č.33

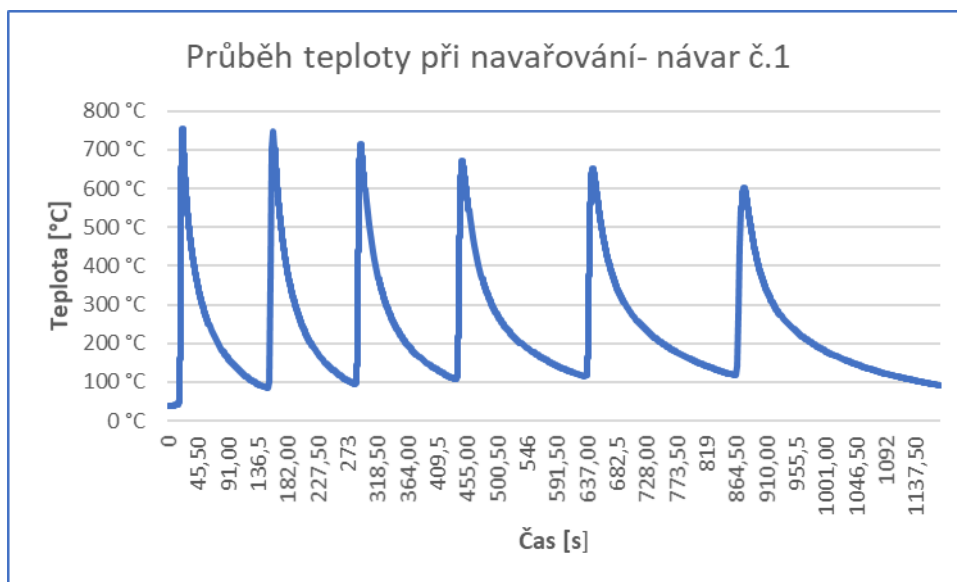
Po provedení návarů byla následovala vizuální a metalografická zkouška, při kterých byly hodnoceny rozměry výsledného návaru, šířka tepelně ovlivněné oblasti, teplotní

závislost a v neposlední řadě mikrostruktura či přítomnost případných vad. Zajímavá a důležitá byla rovněž závislost přírůstku navařeného materiálu či změna šířky.

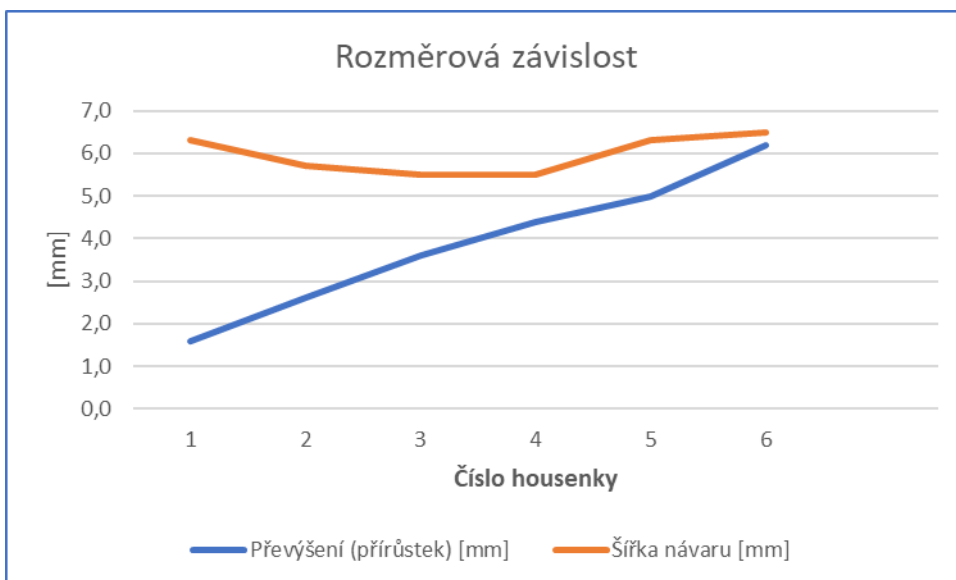
6.6.1 Návar č.1

Tabulka 8.-Naměřené hodnoty pro návar č.1

Varianta 1				
Housenka	Prodeleva [s]	Převýšení (přírůstek) [mm]	Šířka návaru [mm]	T_{MAX} na povrchu [°C]
1	68	1,6	6,3	200
2	79	2,6	5,7	245
3	97	3,6	5,5	244
4	150	4,4	5,5	283
5	168	5,0	6,3	304
6	165	6,2	6,5	285



Obrázek 29.-Průběh teploty při variantě č.1- měřeno zespolu základního materiálu



Obrázek 30.-Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru.



Obrázek 32.-Výsledný návar č.1



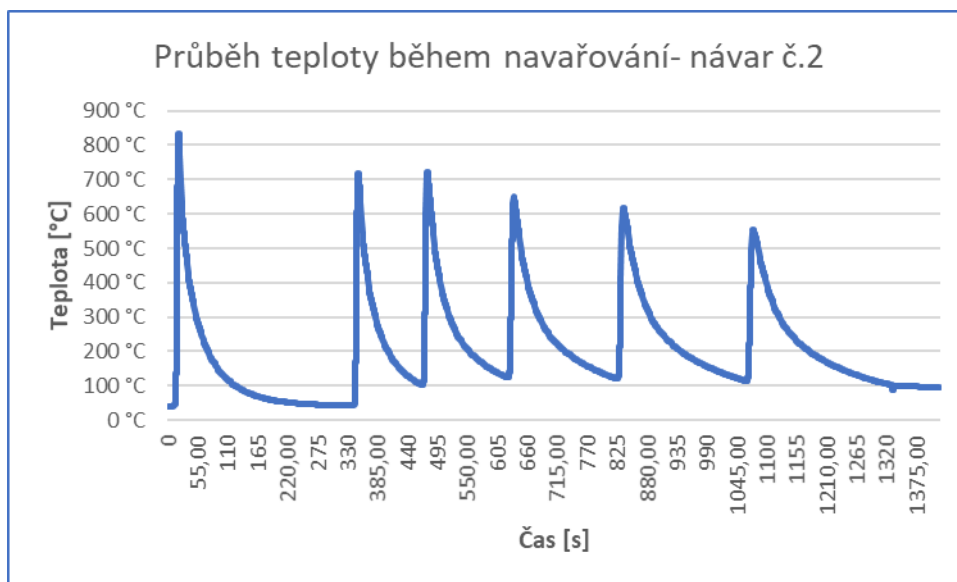
Obrázek 31.-Pohled na rovinnost návaru.

Z vizuálního hlediska byl výsledný návar poměrně nerovný a na povrchu značně zoxidovaný v porovnání s navařovaným vzorkem z předchozí části. Tento problém mohl zapříčinit fakt, že při provedení 4.části experimentu byl použit celý obsah tlakové láhev pro vlečnou ochranu v podobě čistého argonu a muselo se použít dvoucestného redukčního ventilu, který byl připojen na láhev se směsí Ar+He, kde byla již připojena ochrana svarové lázně přímo z hubice. To mohlo zapříčinit snížení tlaku při průtoku plynu a tím i zapříčinit vyšší míru oxidace na povrchu a nedokonalou ochranu během navařování. Výsledná hodnota šířky návaru, zjištěná na základě makroskopických snímků z metalografické zkoušky je 6,4 mm a výška návaru je 6,5 mm. Maximální změřená teplota na povrchu housenky byla 304 °C. Tepelně ovlivněná oblast má šířku 12,4 mm.

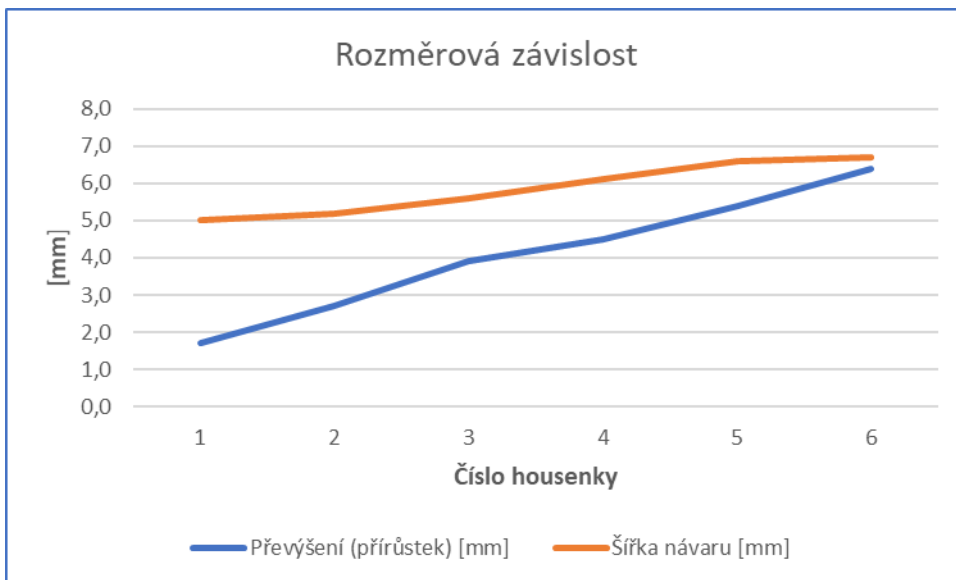
6.6.2 Návar č.2

Tabulka 9.-Naměřené hodnoty pro návar č.2

Varianta 2				
Housenka	Prodleva [s]	Převýšení (přírůstek) [mm]	Šířka návaru [mm]	T_{MAX} na povrchu [°C]
1	69	1,7	5,0	285
2	64	2,7	5,2	195
3	105	3,9	5,6	265
4	134	4,5	6,1	258
5	165	5,4	6,6	268
6	164	6,4	6,7	269



Obrázek 33.-Průběh teploty při variantě č.2- měřeno zespolu základního materiálu.



Obrázek 34.- Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru.



Obrázek 36.-Výsledný návar č.2



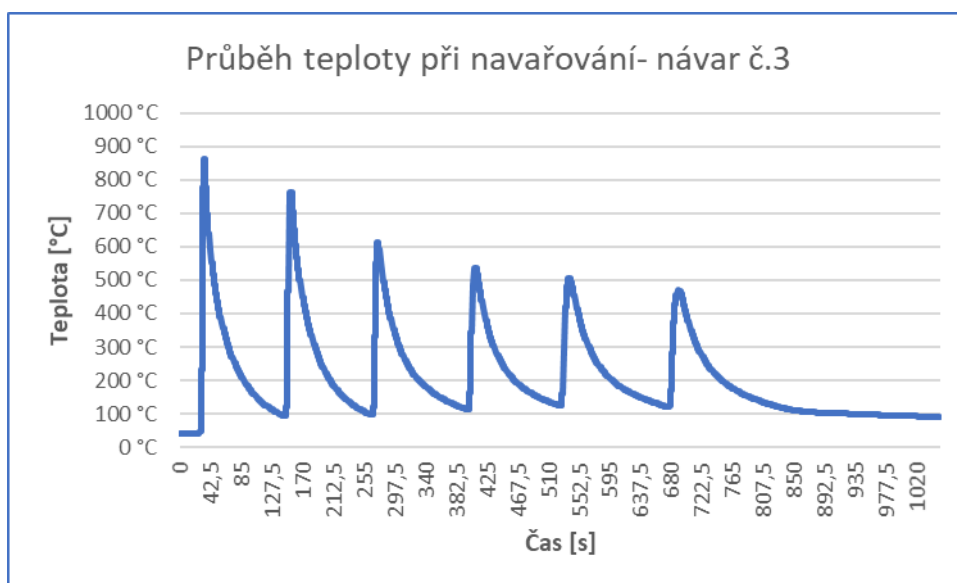
Obrázek 35.-Rovinnost návaru č.2

Návar č.2 byl z pohledu jeho rovinnosti výrazně lepší než předchozí. Došlo rovněž ke stejné a výrazné oxidaci na povrchu housenky. Zajímavým faktem je, že výrazně matný povrch se začal tvořit až u třetí vrstvy, u předchozích byl povrch lesklý a připomínal návary, které byly provedeny jako vzorky. Šířka návaru byla odměřena z makroskopických snímků, a to hodnotu 6,5 mm. Výška návaru činila 6,8 mm. Šířka tepelně ovlivněné oblasti byla 14,6 mm. Maximální naměřená teplota na povrchu housenky pak 285 °C.

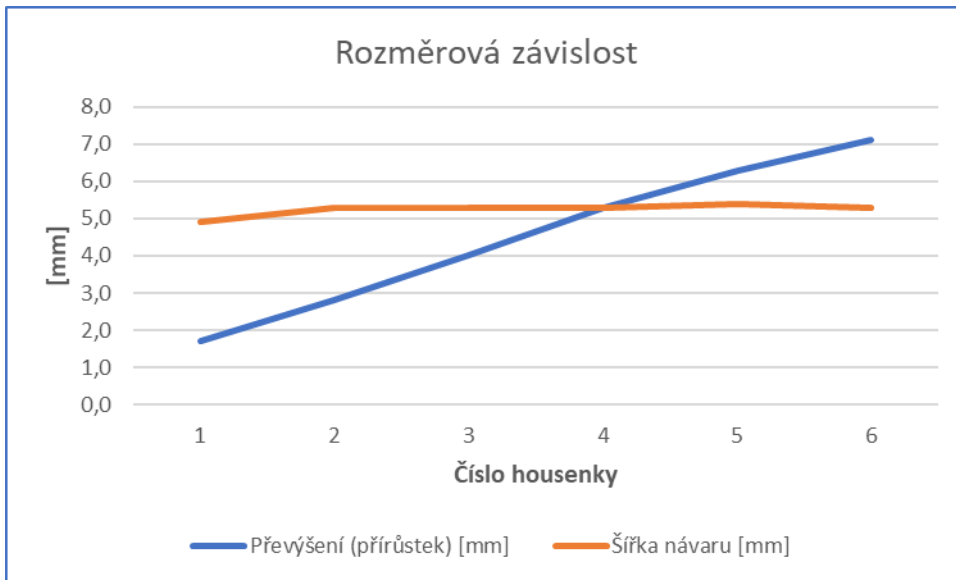
6.6.3 Návar č.3

Tabulka 10.-Naměřené hodnoty pro návar č.3

Varianta 3				
Housenka	Prodleva [s]	Převýšení (přírůstek) [mm]	Šířka návaru [mm]	T_{MAX} na povrchu [°C]
1	65	1,7	4,9	265
2	62	2,8	5,3	203
3	110	4,0	5,3	207
4	78	5,3	5,3	185
5	93	6,3	5,4	210
6	110	7,1	5,3	218



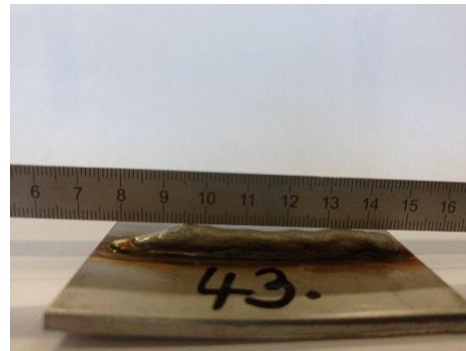
Obrázek 37.-Průběh teploty při variantě č.3- měřeno zespodu základního materiálu



Obrázek 38.-Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru



Obrázek 40.-Výsledný návar č.3

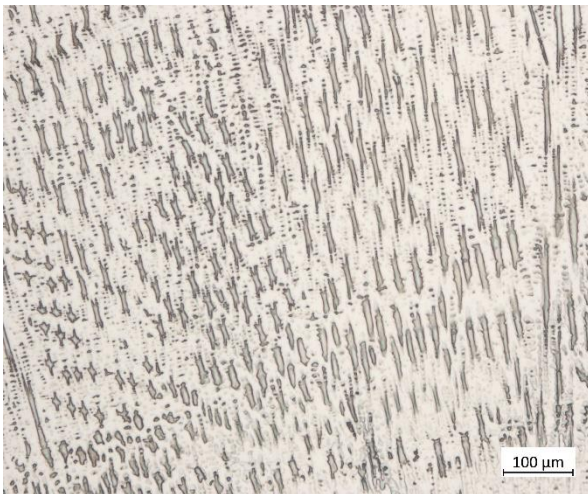


Obrázek 39.-Rovinnost návaru č.3

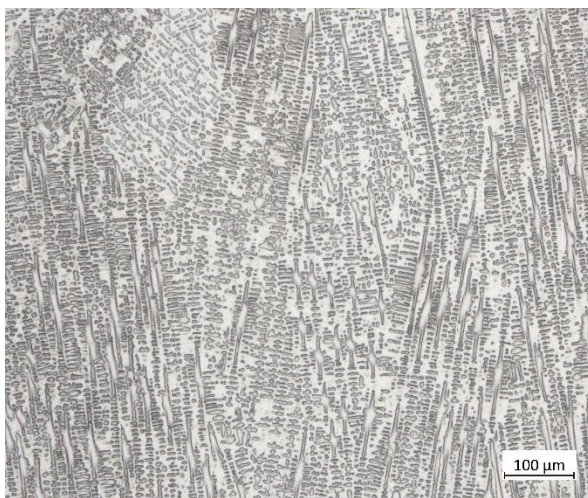
U třetího návaru je patrná výrazná změna svařovacích parametrů po druhé vrstvě, kdy byly změněny proudy v poměru 120/40 A při zachování stejné frekvence (98 Hz). Touto změnou došlo k významnému snížení dodaného tepla vlivem snížení proudu a docílili jsme tím mnohem menší „rozlití“ svarové housenky, a naopak většího převýšení. Snížení proudu mělo jednoznačný vliv například na maximální naměřenou teplotu na povrchu, která činila pouze 265 °C. Více patrný je i pokles teploty (viz obr.47), měřený na základním materiálu, oproti předchozím návarům, a s tím související šířka tepelně ovlivněné oblasti, která byla jen 9,3 mm. Šířka návaru dle makroskopických snímků dosáhla 5,2 mm a výška 7,6 mm.

6.6.4 Metalografická zkouška – mikroskopie

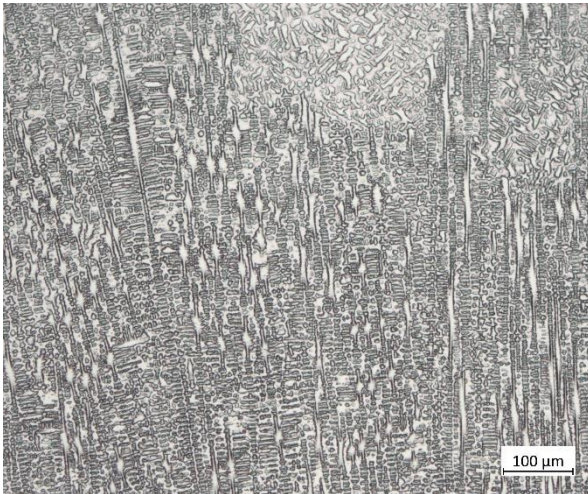
Metalografická zkouška byla provedena pod odborným dohledem Ing. Marie Kolaříkové Ph.D. v metalografické laboratoři a následně vyhodnocena pomocí speciálních mikroskopů firmy Zeiss. Analyzována byla makrostruktura, ve které byly zjištěny přesné rozměry návaru dle měřítka. Důležitější částí však bylo zkoumání mikrostruktury výsledných návarů a zjištění případných vad. Byly pořízeny dvě verze snímků od každého návaru, a to ve zvětšení 25x a 100x.



Obrázek 41.-Mikroskopický snímek návar č.1-zvětšení 100x

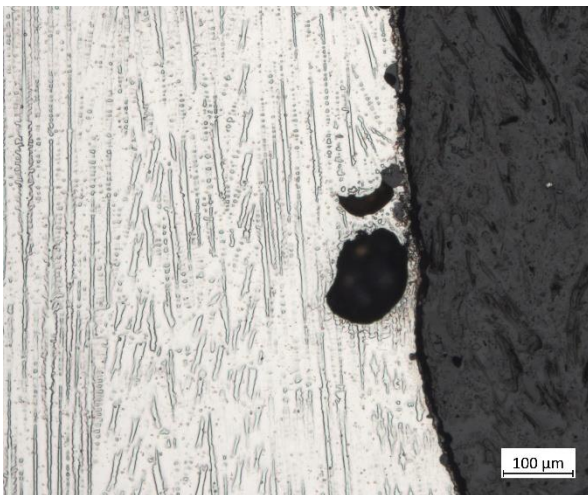


Obrázek 42.-Mikroskopický návar č.2-zvětšení 100x



Obrázek 43.-Mikroskopický snímek návar č.3-zvětšení 100x

Ze pořízených snímků se stonásobným zvětšením lze rozpoznat poměrně jednolitou a celistvou strukturu. Je také možné vidět hranice zrn, zejména na obr.52 a obr.53. Na první pohled lze ale usoudit, že je zde zřejmý vliv frekvence na mikrostrukturu výsledného návaru. U prvního návaru je viditelná hrubší mikrostruktura nežli u dalších dvou variant. Je zde tedy potvrzen fakt, že se změnou frekvence dochází i ke změně struktury. Během celého zkoumání byla objevena pouze jedna přítomnost vady, konkrétně póru u návaru č.2, vadu je možné vidět na obr.54. Vada se vyskytla v pravé dolní části, pravděpodobně během první navařování první housenky.



Obrázek 44.-Vada u návaru č.2-zvětšení 100x

7. Závěr a zhodnocení

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat a prozkoumat využití pulzního režimu při robotizovaném svařování metodou TIG a vliv změny jeho parametrů na kvalitu návaru. V teoretické rešerši byla nejprve zpracována problematika niklových slitin, jejich složení a využití v praxi. Následně se pak rešerše zaměřila na téma svařitelnosti těchto slitin a samotné svařování metodou TIG, zejména při využití pulzního režimu.

Primárním cílem provedeným v experimentální části bylo vytvoření vrstvených návarů a zkoumání vlivu změny parametrů na jejich kvalitu, rozměry a mikrostrukturu.

Během prvních tří částí se vyzkoušeli parametry na několik vzorků, ze kterých byly pak vybrány tři vhodné varianty ke zpracování čtvrté části experimentu. Ve čtvrté části proběhlo zhotovení tří návarů, každý s jinými parametry, a na základě vizuální a metalografické zkoušky byly vyhodnoceny. Jako jednoznačně nejvhodnější varianta byl vyhodnocen vzorek č.3, kde bylo dosaženo optimálního poměru šířky a výšky návaru, kde výška činila 7,6 mm a šířka 5,2 mm. Zároveň nebyla prokázána přítomnost vad a došlo zároveň i k nejmenšímu tepelnému ovlivnění základního materiálu (šířka TOO byla 9,3 mm) a tím i zmenšení deformace základního materiálu. Zároveň byl prokázán vliv změny frekvence na mikrostrukturu výsledných návarů (viz metalografická zkouška), kde bylo dosaženo jemnější struktury při navařování vyšší frekvencí. Změny parametrů proudů měli vliv na velikost TOO, maximální teplotu a rozměry navařených vzorků, kde s narůstajícími hodnotami proudu se zvětšovala šířka TOO a svarové housenky, zvyšovala se také maximální teplota v místě svařování. Jediný parametr, který se zmenšoval, byla hodnota převýšení svaru. Vliv frekvence (vyjma mikrostruktury) byl zejména ve vizuálním porovnání návarů, rozměrové a teplotní závislosti nebyly prokázány.

Dalším zajímavým předmětem výzkumu by mohlo být porovnání vlivu pulzního režimu při navařování niklových slitin metodou MIG vůči metodě TIG.

Seznam použitých zdrojů

1. MACEK, Karel, Jiří JANOVEC, Peter JURČI a Petr ZUNA. *Kovové materiály*. 2.vydání. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03513-1.
2. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 2.vydání. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-63-2.
3. NOSEK, Ing. Vladimír. *Koroze a technologie povrchových úprav* [online]. [cit. 2020-11-24]. Dostupné z http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_KPU_PR_02_CZE_Nosek_Elektrochemicka_koroz_e.pdf. Přednáška. TUL-FS, Katedra materiálu.
4. JANOVEC, Jiří, Jiří CEJP a Josef STEIDL. *Perspektivní materiály*. Vyd. 3., přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
5. ZAJÍC, Tomáš. *Svařování Inconelu 601 metodou TIG* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2020-11-29]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/119489/ZAJ109_FMMI_B3923_3911R036_2017.pdf?sequence=1. Vysoká škola báňská.
6. *INCONEL 600* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-600.pdf>
7. *INCONEL 625* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-625.pdf>
8. *INCONEL 751* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-751.pdf>

9. *INCONEL 686* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-686.pdf>
10. *INCONEL C-276* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-c-276.pdf>
11. *INCONEL 718* [online]. [cit. 2021-01-19]. Dostupné z: <https://www.specialmetals.com/assets/smc/documents/alloys/inconel/inconel-alloy-718.pdf>
12. KUNCIPÁL, CSC., Prof. Ing. Josef. *Teorie svařování*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1986.
13. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
14. Schéma svařování netavící se elektrodou. In: *Oneindustry.one* [online]. [cit. 2021-01-24]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.one/lexikon/svarovani-netavici-se-elektrodou-v-ochranne-atmosfere-inertniho-plynu/>
15. Studies on the structural property, mechanical relationships and corrosion behaviour of Inconel 718 and SS 316L dissimilar joints by TIG welding without using activated flux [online]. 2017 [cit. 2021-01-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/320352582_Studies_on_the_structural_property_mechanical_relationships_and_corrosion_behaviour_of_Inconel_718_and_SS_316L_dissimilar_joints_by_TIG_welding_without_using_activated_flux
16. JANOVEC, doc. Ing. Jiří. *Nauka o materiálu*. Ústav strojírenské technologie-Fakulta strojní. ČVUT.
17. HEUBNER, Ulrich. *Nickel Alloys* [online]. New York/Basel, 1998 [cit. 2021-7-28]. ISBN 0-8247-0440-1.
18. KUNCIPÁL, Doc. Ing. Josef, Prof. Ing. Václav PILOUS a Ing. Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1984.
19. VOLF, Bc. Milan. *Hodnocení mikrostruktury niklových superslitin s využitím obrazové analýzy* [online]. Brno, 2011 [cit. 2021-8-11]. Bakalářská práce. VUT Brno.

Seznam obrázků

Obrázek 1.-Strukturální rozdělení korozivzdorných ocelí [4]	12
Obrázek 2. Rozdělení slitin niklu [4]	13
Obrázek 3.-Hlavní části elektrického oblouku při svařování [13]	18
Obrázek 4.-Schéma ručního způsobu svařování metodou TIG [14]	19
Obrázek 5.- Průběh impulsního přenosu při svařování metodou TIG. [12]	20
Obrázek 6.-Navržené parametry pro navařování metodou TIG s INCONELEM 718 viz [15]....	21
Obrázek 7.-Svařovací zdroj Migatronic PI 320.....	22
Obrázek 8.-Uspořádání robotizovaného pracoviště.....	22
Obrázek 9.-Měřicí stanice ALMEMO.	23
Obrázek 10.-Kalibrační pec.....	23
Obrázek 11.-Tlaková láhev Linde 4.6- Argon	23
Obrázek 12.-Použití vlečné ochrany	24
Obrázek 13.-Vzájemná poloha elektrody a hubice pro přídavný materiál.	24
Obrázek 14.-Umístění termočlánků na základní materiál.	25
Obrázek 15.-Umístění termočlánků na základní materiál (2).....	25
Obrázek 16.-Přídavný drát z Inconelu 718.	26
Obrázek 17.- Graf závislosti maximální naměřené teploty při daných parametrech viz tabulka 2.	27
Obrázek 18.- Graf závislosti rozměrů svarové housenky a velikosti TOO na zvolených proudech.	27
Obrázek 19.- Jednotlivé návary při změně velikosti proudů.	28
Obrázek 20.- Vzorek podrobený kapilární zkoušce.	29
Obrázek 21.-Foto z průběhu kapilární zkoušky.	29
Obrázek 22.-Teplotní cyklus během navařování s různými hodnotami frekvence.	30
Obrázek 23.- Graf závislosti rozměrů svarové housenky na změně frekvence.....	31
Obrázek 24.-Jednotlivé vzorky návarů se změnou parametru frekvence.....	31
Obrázek 25.-Navařené vzorky pro jednotlivé doby pulsu/prodlevy.	32
Obrázek 26.- Teplotní cyklus pro 3.část experimentu.....	33

Obrázek 27.-Rozměrová závislost 3.části experimentu.....	33
Obrázek 28.-Vzorek č.33.....	35
Obrázek 29.-Průběh teploty při variantě č.1- měřeno zespodu základního materiálu.....	36
Obrázek 30.-Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru.....	37
Obrázek 31.-Pohled na rovinnost návaru.....	37
Obrázek 32.-Výsledný návar č.1.....	37
Obrázek 33.-Průběh teploty při variantě č.2- měřeno zespodu základního materiálu.....	38
Obrázek 34.- Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru.....	39
Obrázek 35.-Rovinnost návaru č.2.....	39
Obrázek 36.-Výsledný návar č.2.....	39
Obrázek 37.-Průběh teploty při variantě č.3- měřeno zespodu základního materiálu.....	40
Obrázek 38.-Závislost přírůstku materiálu a šířky návaru.....	41
Obrázek 39.-Rovinnost návaru č.3.....	41
Obrázek 40.-Výsledný návar č.3.....	41
Obrázek 41.-Mikroskopický snímek návar č.1-zvětšení 100x.....	42
Obrázek 42.-Mikroskopický návar č.2-zvětšení 100x.....	42
Obrázek 43.-Mikroskopický snímek návar č.3-zvětšení 100x.....	43
Obrázek 44.-Vada u návaru č.2-zvětšení 100x.....	43

Seznam tabulek

Tabulka 1.- Chemické složení vybraných Inconelů [6][7][8][9][10].....	14
Tabulka 2.-Naměřené hodnoty pro 1.část experimentu	27
Tabulka 3.-Naměřené hodnoty pro 2.část experimentu	30
Tabulka 4.-Naměřené hodnoty pro 3.část experimentu	32
Tabulka 5.-Varianta č.1-vzorek č.33	35
Tabulka 6.-Varianta č.2-vzorek č.13	35
Tabulka 7.-Varianta č.3-vzorek č.13+22	35
Tabulka 8.-Naměřené hodnoty pro návar č.1	36
Tabulka 9.-Naměřené hodnoty pro návar č.2	38
Tabulka 10.-Naměřené hodnoty pro návar č.3	40

