

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Programově řízené svařování metodou MIG a TIG

Autor: **Bc. Petr ŠIMON**
Vedoucí práce: **prof. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ, IWE**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr ŠIMON**
Osobní číslo: **S18N0029K**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie**
Téma práce: **Programově řízené svařování metodou MIG a TIG**
Zadávající katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Principy a použití metod MIG a TIG
2. Programově řízení svařovacího procesu metodou MIG a TIG
3. Programově řízení MIG pájení pozinkovaných plechů
4. Simulace svařování pozinkovaných plechů metodou MIG a TIG
5. Provedení svarů metodou MIG a TIG
6. Porovnání kvality svarových spojů a svařovacích křivek

Rozsah diplomové práce: **50-60 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

GALVERY, William L. a Frank M. MARLOW., *Welding Essentials: Questions & Answers*. Industrial Press, 2001. ISBN 0831131517,9780831131517.

BARTÁK, Jiří, Jaroslav KUBÍČEK, Ladislav DANĚK a Bohumil KANDUS., *Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro kurzy sovětských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Plzeň: Česká svařečská společnost ANB, UNO PRAHA, spol. s r.o., Divize WELDING PLZEŇ, 2014.

KOLAŘÍK, Ladislav., *Automatizace výrobních procesů svařování*. ČVUT v Praze.

ORSZÁGH,V., ORSZÁGH,P., *Zoárание TIG ocelí a nezelezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, Vydavateľstvo vedeckej literatúry a časopisov, Slovenská akadémia vied, 1998, ISBN 80-88780-21-7

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

Konzultant diplomové práce: **Ing. Anton Florek, CSc., Ph.D.**
Centrum energetického výzkumu

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2020**

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 30. října 2019

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Šimon	Jméno Petr	
STUDIJNÍ OBOR	N2301 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUČÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Programově řízené svařování metodou MIG a TIG		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	139	TEXTOVÁ ČÁST	128	GRAFICKÁ ČÁST	4
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje návrh a řešení programově řízené technologie spojování pozinkované oceli metodami MIG a TIG. Procesy jsou řízeny WeldEye a numerickou simulací Sysweld.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	MIG tvrdé pájení, TIG tvrdé pájení, MIG svařování, TIG svařování, S235JR +AR (+Z), zinkový povlak, WeldEye programové řízení, Sysweld numerická simulace

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Šimon	Name Petr	
FIELD OF STUDY	N2301 "Materials Engineering and Engineering Metallurgy"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) prof. Dr. Ing. Kříž, IWE	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Program-controlled MIG and TIG welding		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	139	TEXT PART	128	GRAPHICAL PART	4
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The diploma thesis contains the design and solution of program-controlled technology for joining zinc coating steel by methods MIG and TIG. Processes are controlled by WeldEye and Sysweld numerical simulation.
KEY WORDS	MIG brazing, TIG brazing, MIG welding, TIG welding, S235JR +AR (+Z), zinc coating, WeldEye program-control, Sysweld numerical simulation

Poděkování

Děkuji prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE a Ing. Antonu Florkovi, CSc., Ph.D., PWT, IWE za odborné vedení práce, poskytování podnětných rad a materiálních podkladů.

Obsah

1	Vývoj elektrického obloukového svařování	4
1.1	Vývoj elektrického oblouku	4
1.2	Vývoj svařovacích metod Tungsten Inert Gas a Metal Inert Gas	4
2	Princip obloukového svařování	5
2.1	Elektrický oblouk	5
2.2	Zapálení oblouku	5
2.3	Základní části elektrického oblouku	6
2.4	Voltampérová charakteristika oblouku	9
2.5	Stabilita oblouku	10
2.6	Tepelné účinky oblouku	10
2.7	Mechanické účinky oblouku	12
2.8	Ovlivnění el. oblouku magnetickými poli	13
3	Princip a použití svařovací metody TIG	14
3.1	Svařování netavící se wolframovou elektrodou v atmosféře ochranného inertního plynu	14
3.2	Svařování metodou TIG dle druhu proudu	15
3.2.1	Svařování stejnosměrným proudem	16
3.2.2	Svařování střídavým proudem	16
3.2.3	Svařování impulsním proudem	17
3.3	Výhody metody svařování TIG v porovnání s ostatními metodami tavného svařování [7],[19]:	19
3.4	Bezpečnost a ochrana zdraví při svařování metodou TIG	19
4	Součásti svařovacího zařízení a technologie TIG svařování	19
4.1	Zdroj stejnosměrného proudu (DC)	20
4.2	Zdroj střídavého proudu (AC)	21
4.3	Baterie kondenzátorů	21
4.4	Řídící jednotka	21
4.5	Programátor	21
4.6	Zapalování obloukem (zapalovací jednotka)	22
4.7	Stabilizátor	22
4.8	Řídící systém	22
4.9	Svařovací hořák	22
4.9.1	Plynová tryska	23
4.9.2	Plynová sítko (čočky)	24
4.10	Chladicí jednotka	25
4.11	Zásobník ochranného plynu (tlaková láhev s redukčním ventilem)	25
4.12	Netavící se wolframová elektroda	25
4.13	Ochranné plyny	31
4.14	Přídavné materiály	32
4.14.1	Přídavné materiály pro TIG svařování – Ø 2 x 1000 W3Si1	33
4.14.2	Přídavné materiály pro TIG pájení – Ø 1,5 x 500 Ag 20 %	33
5	Technika ručního TIG svařování	34
6	Princip a použití MIG svařování	36
7	Součásti svařovacího zařízení a technologie MIG svařování	37
7.1	Svařovací zdroje	37
7.2	Podavače drátu	39
7.2.1	Volná délka drátu – výlet drátu – výběh drátu	39
7.3	Svařovací hořák	43

7.4	Zemnicí kabel	44
7.5	Ochranný plyn – tlaková láhev a redukční ventil	44
8	Přenos kovu.....	45
9	Technika, parametry a podmínky svařování/pájení metodou MIG.....	50
9.1	Svařovací proud.....	50
9.2	Svařovací napětí	50
9.3	Polarita a druh svařovacího proudu	51
9.4	Technika svařování MIG	51
9.5	Přídavné materiály	52
9.5.1	Přídavný materiál pro MIG pájení – impulsní bezzkratový přenos – Ø 1 CuSi3	53
9.5.2	Přídavný materiál pro MIG svařování – zkratový přenos – Ø 1 G3Si1	55
10	Popis svařovaného materiálu – Ocel S235JR + AR (+Z)	55
10.1	Žárové zinkování ponorem.....	56
10.1.1	Reakce mezi železem a zinkem u S235JR + AR (+Z)	58
10.1.2	Obloukové svařování pozinkované oceli	59
10.1.3	Katodická ochrana.....	59
10.1.4	Korozní rychlost zinku	61
11	Technologie svařování/pájení ocelových plechů se zinkovým povlakem metodou MIG a TIG	62
12	Programové řízení svařovacího/pájecího procesu MIG a TIG	63
13	Numerická simulace procesu svařování metod MIG a TIG	64
14	Uhlíkový ekvivalent pro feritické oceli dle ČSN EN 1011-2	69
15	Určení rozměru koutového svaru dle ČSN EN 1708-2.....	70
16	Použité svařovací/pájecí parametry, technika a přídavné materiály pro svarové/pájené spoje	74
17	Programově řízené svařování a pájení (WeldEye).....	76
18	Nedestruktivní a destruktivní zkoušení materiálu.....	85
18.1	Vady svarového spoje MIG a TIG dle ČSN EN ISO 5817 (6520-1).....	85
18.1.1	Nedestruktivní testování materiálu.....	85
18.1.2	Destruktivní testování materiálu	85
18.2	Vady pájeného spoje MIG a TIG	90
18.2.1	Nedestruktivní testování materiálu.....	90
18.2.2	Destruktivní testování materiálu	90
19	Vyhodnocení stavu zinkové vrstvy v místě spoje	96
20	Tepelný příkon stanovený v souladu dle ČSN EN 1011-1	103
21	Numerická simulace procesu svařování metodami TIG a MIG	105
22	Diskuse výsledků	120
	Závěr.....	124

Seznam symbolů a zkratek

HF - High Frequency
DC – Direct Current
AC – Alternating Current
DP – Diplomová práce
LA – Lift Arc
TIG – Tungsten Inert Gas
MIG – Metal Inert Gas
CO₂ – oxid uhličitý
Al₂O₃ – oxid hlinitý (umělý korund)
ZnO – oxid zinečnatý
Ar – Argon
He – Helium
O₂ – Kyslík (v plynném stavu)
H₂ – Vodík (v plynném stavu)
N₂ – Dusík (v plynném stavu)
Si – Křemík
C – Uhlík
Fe – Železo
Cu – Měď
Sn – Cín
Pb – Olovo
Mn – Mangan
Zn – Zinek
P – Fosfor
Al – Hliník
Ag – Stříbro
Ti - Titan
SHG – Special High Grade
TOO - Tepelně ovlivněná oblast
U – Svařovací napětí
I – Svařovací proud
+Z – Žárové zinkování ponorem
+AR – Válcováno

Q – Tepelný příkon

R_m – Mez pevnosti v tahu

R_e – Mez kluzu v tahu

$R_{p0,2}$ – Smluvní mez kluzu v tahu

A – Tažnost

HB – Měření tvrdosti dle Brinella

V – Volt

A – Ampér

mm – Milimetr

ml - Mililitr

s – Sekunda

m – Metr

l – Litr

g – Gram

min - Minuta

k – Koeficient tepelné účinnosti

CMT – Cold Metal Transfer

Welding – Svařování

Brazing – Tvrdé pájení

DT – Destruktivní testování materiálu

NDT – Nedestruktivní testování materiálu

VT – Vizuální testování

v – Rychlost svařování/pájení

TOO – Tepelně ovlivněná oblast

HCl – Kyselina chlorovodíková

FeCl₃ – Chlorid železitý

C₂H₅OH – Ethanol (funkční vzorec)

Teoretická část

Úvod

Spojování materiálů bylo odjakživa nedílnou součástí vývoje lidstva. Spojovaly se téměř všechny druhy materiálů, ze kterých vznikaly celé stavby nebo jen malé předměty po celá staletí. S rostoucí poptávkou po odolnějších a pevnějších konstrukcích nebo jen předmětech se umocňovala poptávka po odolných a pevných druzích materiálů. Mezi tyto materiály se řadily kovy. Z toho plyne, že bylo zapotřebí vymyslet, jak je spojovat. S rostoucí poptávkou se začala zvyšovat nabídka v průběhu staletí. V případě kovových konstrukcí se došlo k závěru, jestli je lze spojovat jejich natavením. Nejdříve se zaměřilo na natavení kovových materiálů stejného nebo podobného druhu. Poté se postupně vymyslelo, jak spojovat kovové materiály rozdílných druhů. Proces, který tu byl doposud obecně označován, se nazývá svařování. Tímto procesem spojování materiálů lze spojovat kovové materiály za podmínek splněných pro svařování. V řadě případů se taktéž využívá přídatný materiál, který bývá také nataven a vnesen do svarové lázně. Bývá často stejného nebo velice podobného chemického složení a má stejné nebo podobné mechanické vlastnosti. Tomu je tak za účelem snížení záporného mínění o svařovém spojení. Obecně je známo, že svařovaná konstrukce je nejslabší v místech svarového spojení, protože svary jsou brány jako koncentrátoři napětí. Nicméně lidstvem je tato metoda spojování kovových materiálů stále nejpoužívanější a stále více se zdokonaluje. Navíc prozatím nemá svého nástupce. Je několik typů, jak dosáhnout natavení základního svařovaného materiálu, ale tato diplomová práce je zaměřena na jeden z nejpoužívanějších. Jedná se o svařování elektrickým obloukem neboli obloukové svařování. Do této skupiny obloukového svařování patří níže popsané metody, jako jsou Metal Inert Gas (dále jen „MIG“) a Tungsten Inert Gas (dále jen „TIG“). Hlavní rozdíl mezi TIG a MIG je, že v případě TIG se jedná o netavicí se wolframovou elektrodu. Podobnost těchto metod lze najít v tom, že obě metody jsou prováděny v ochranné atmosféře netečných (inertních) plynů jako je Ar, He nebo jejich směsi. Podrobněji se lze o těchto metodách MIG a TIG svařování/pájení, co se týče vývoje, principu, použití, technice, atd. dočíst v dalších kapitolách.

Se vznikem svařování ale nebyly všechny problémy spojování kovových materiálů vyřešeny. Neboť nastaly případy, kde klasické obloukové svařování nebylo možné použít z důvodu např. naneseného povlaku na kovových materiálech, u kterých mělo dojít ke spojení. Nebo se nevyžadovalo pevné nerozebíratelné spojení kovových materiálů. Prakticky šlo pouze o spojení, které nebude náročné na odolnost, pevnost, tuhost a další mechanické vlastnosti. S tím, že nebude tolik jako svařování ovlivňovat základní spojované materiály (např. množství vnese-ného tepla) a případně nenaruší tolik jejich povlaky. Proto se v těchto případech začalo upřednostňovat pájení kovových materiálů. Jedná se o proces spojování kovových materiálů, kde nedochází k natavení základních spojovaných materiálů, ale pouze k natavení přídatného materiálu, kterým se vyplní mezera mezi spojovanými materiály. Vznikne pájený spoj, který často bývá úplně odlišného chemického složení a mechanických vlastností než jsou oba spojované materiály. Lze takto pájet stejně jako u obloukového svařování metodami MIG a TIG.

Jestli pájení nebo svařování je vhodnější metoda v oblasti spojování ocelových plechů se zinkovým povlakem, lze zjistit v této diplomové práci. Tato diplomová práce je zaměřena na spojování oceli s povlakem zinku, kde je zapotřebí dávat pozor na co nejnížší odpaření zinku. Zinkový povlak je zde jako ochrana oceli proti korozi.

1 Vývoj elektrického obloukového svařování

1.1 Vývoj elektrického oblouku

První zmínka se traduje již v roce 1782, kdy profesor G. Lichtenberg mohl spojit v Německu kovy elektrickým roztavením. Nicméně, nejprokazatelnější historická stopa svařování elektrickým obloukem byla nalezena sirem Humphrey Davy v roce 1801. Davy zjistil, že elektrický oblouk lze vytvořit vysokým napětím v elektrickém obvodu přiblížením dvou pólů blízko jeden druhému. Tento oblouk dává jasné světlo a značné teplo, které může být libovolně udržováno. Jeho délka a intenzita může být měněna v určitém omezení podle napětí a podle typu použitého zdroje. Davy prezentoval elektrický oblouk v Královském institutu v Anglii v roce 1808, kde jeho objev vzbudil velký zájem. Přesto objev zůstal jako jev pro nepraktické použití po mnoho let. [1]

První známá osoba, která účelně použila oblouk ke spojování kovů elektrickým svařování, byl Angličan jménem Henry Wilde. Roku 1860 roztavil dohromady malé kousky železa. Na základě toho mu v roce 1865 byl udělen patent na jeho postup, což byl i první patent ve vztahu ke svařování elektrickým obloukem. [1]

I přes tyto pokroky zůstává elektrický oblouk až do roku 1881 pouze ve vědeckém zájmu. V tomto roce byly představeny uhlíkové elektrické lampy a krátce poté se objevily v Anglii elektrické obloukové pece. Jedna z prvních byla uvedena do provozu v roce 1886 pro výrobu hliníkových slitin. Toto využití elektrického oblouku bylo důležitým krokem pro časný rozvoj hliníku v průmyslu. [1]

1.2 Vývoj svařovacích metod Tungsten Inert Gas a Metal Inert Gas

Jediný problém, který čekal na vyřešení, bylo spojování reaktivních kovů hliníku a hořčíku. Žádná z doposud vynalezených metod (svařování pod tavidlem a svařování obalenými elektrodami) neposkytovala dostatečnou clonu dostatečně ochránit tyto kovy před atmosférickou kontaminací. V 30. letech došlo odstranění těchto obtíží používáním stlačeného inertního plynu v lahvích jako ochranný prostředek. Celý postup s ochranným plynem byl urychlen použitím stejnosměrného proudu vycházející z potřeby leteckého průmyslu. Byl požadavek svařovat hliník, hořčík a jejich slitiny. [1], [2]

První metoda svařování pod ochranou inertního plynu používala wolframovou elektrodu. Jako ochranný plyn bylo použito helium. Celá svařovací metoda se označila jako tungsten arc nebo tungsten inert - gas proces v 30 až 40 letech 20. století. Původně byl využit stejnosměrný proud a plus pól na elektrodě. Bylo objeveno, že wolframová elektroda má tendenci k přehřívání a přenosu částic wolframu do svaru. Jen v případě pokud nebude použit nízký proud. Výzkum eliminoval přehřátí, tím že použil záporný pól na elektrodě. To se ukázalo prospěšně při svařování nerez ocelí, ale stále to nebylo vhodné pro svařování hliníku a hořčíku. [1], [2]

Další vývoj ke stabilizaci oblouku směřoval k použití střídavého proudu vysoké frekvence, vysokého napětí a proudu superponovaného nad základní svařovací proud. To se projevilo jako řešení problému pro provádění velmi dobrých svarových spojů hliníku a hořčíku. [1]

Po 2. světové válce se metoda obloukového svařování netavící se wolframovou elektrodou ukázala být neúspěšnou pro svařování velkých průřezů vysoce vodivých materiálů. Svařence měly tendenci odvádět velké množství tepla. K překonání těchto obtíží byly netavící se wolframové elektrody nahrazeny tavícími se kovovými elektrodami. Výsledný proces se stal známým jako gas metal - arc welding, metal – inert - gas nebo MIG welding v roce 1948. Tato metoda

se ukázala být úspěšnou pro svařování hliníku a byla následně aplikována při svařování jiných neželezných materiálů, nerez ocelí a běžných konstrukčních ocelí. V té době se zjistilo, že stabilnější oblouk může být získán užitím směsi plynů místo čistého helia nebo argonu. [1]

V roce 1953 metoda obloukové svařování wolframovou elektrodou byla zlepšena řízením oblouku přes trysku a výslednou metodou se stala jako plasma-arc proces. [1]

2 Princip obloukového svařování

2.1 Elektrický oblouk

Jedná se o výboj v plynech. U svařování se používá k přeměně elektrické energie na tepelnou energii. Vzniká mezi elektrodou a základním materiálem při určité intenzitě proudu (10 až 2000 A) a při nízkém napětí (10 až 50 V). [7]

Vzniká za splnění podmínky, že napětí mezi elektrodou a materiálem je vyšší než ionizační napětí plynu. To vše musí být podpořeno dostatečnou proudovou hustotou. Trvalým elektrický výboje nastane, pokud vznikající teplo zajistí ohřátí plynu na potřebnou teplotu, která vytvoří tepelnou izolaci obklopující atmosféry. V elektrickém oblouku probíhají fyzikální a metalurgické děje za vysokých teplot, velmi rychle a jsou ovlivněny těmito faktory:

- Geometrické uspořádání, tvar elektrod a polarita
- Tepelná vodivost plazmatu, základního materiálu a elektrody
- Chemické složení plazmatu, okolní atmosféry a elektrody

Vzhledem k faktu, že výkon, geometrický tvar a teplotu elektrického oblouku lze měnit podle potřeby v závislosti na technologickém požadavku, je díky těmto variabilitám vytvořena řada metod obloukového svařování. Mezi které patří např. svařovací metoda TIG, která dále bude probírána podrobněji a je prostředkem pro vypracování praktické části této diplomové práce. [7]

2.2 Zapálení oblouku

Probíhá při napětí zdroje naprázdno, což je zpravidla vyšší než při ustáleném hoření oblouku. Velikost zápalného napětí je $U = 60$ až 70 V a závisí [7]:

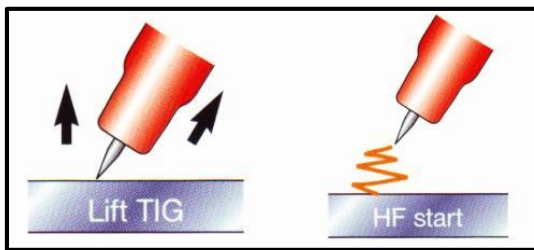
- 1) Geometrii elektrod
- 2) Materiálu
- 3) Ionizační schopnosti okolní plynné atmosféry

Počáteční zapálení oblouku lze provést [5], [6], [7]:

- Krátkodobým spojením (dotykem) elektrody se základním materiálem a následným oddálením. Používá se u MIG/MAG a u automatického svařování pod tavidlem.
- Vytvořením vysokoionizačním prostředím mezi základním materiálem a elektrodou pomocí přivedeného vysokonapětového impulsu na elektrodu (vysokofrekvenční zapalování oblouku).

Dochází k zapálení elektrické jiskry => výbojem ionizuje plynné prostředí (ochranný plyn) => vytvoří se podmínky pro vedení elektrického proudu => rozvoj disociace a ionizace okolního

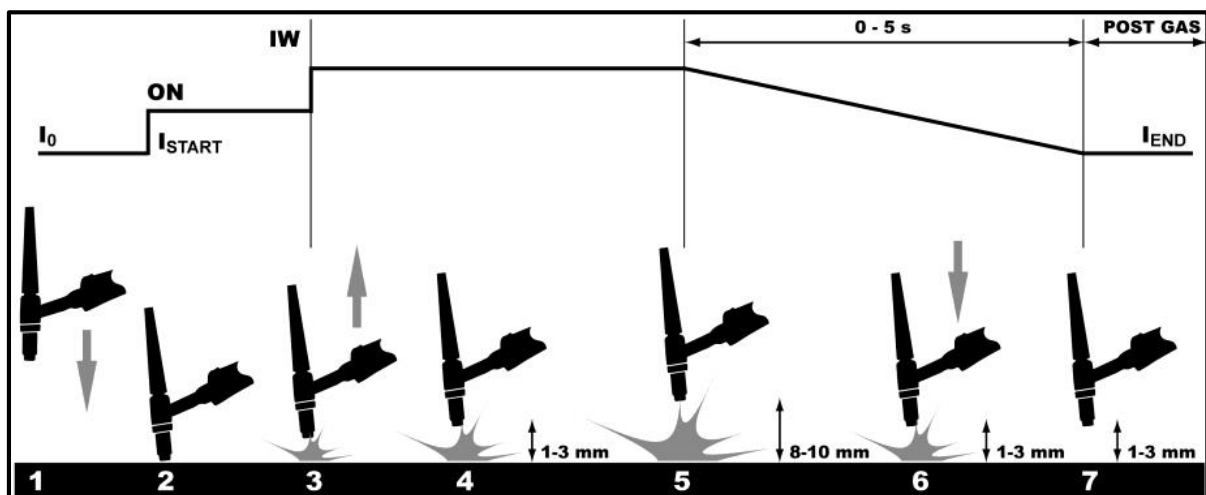
ochranného plynného prostředí a zapálení oblouku. Ionizace lze provést jen za pomoci termoemise elektronů z katodové skvrny na elektrodě. Používá se pro svařovací metodu TIG HF - toto zapálení oblouku bylo použito v experimentální části (High frequency – bezdotykové zapalování viz obr. č. 1). [5], [6], [7]



Obr. č. 1: Lift Arc zapalování a HF zapalování oblouku [6]

- Startovacím proudem při dotykovém zapalování (dotykové zapalování). To je umožněno řízením a kontrolou svařovacích parametrů. Používá se u svařovací metody TIG LA (lift arc viz obr. č. 1 a 2) nebo u TIG (škrtnutí).

Startovací proud díky své nízké intenzitě (max. 10 A) ohřeje pouze hrot wolframové elektrody. Takto to může trvat i delší dobu a při oddalování elektrody se zvýší proud řízený na svařovací hodnotu a dojde k zapálení oblouku. Výhodou je možnost přesného umístění začátku svaru na svařovaném materiálu. [6], [7]

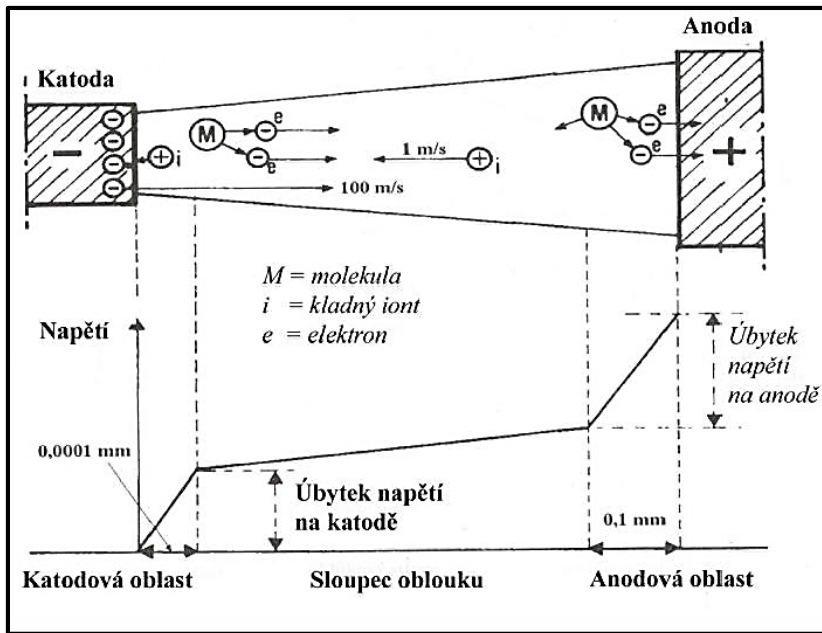


Obr. č. 2: Průběh svařovacího procesu u TIG LA (lift arc) [8]

2.3 Základní části elektrického oblouku

Každý elektrický oblouk má 3 základní část (viz obr. č. 3) [9]:

1. Sloupec oblouku
2. Katodová část
3. Anodová část

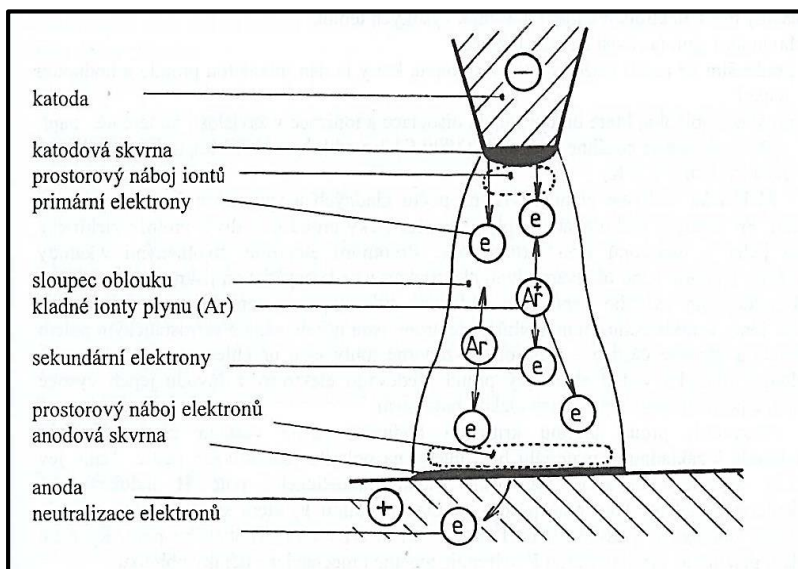


Obr. č. 3: Úbytek napětí elektrického oblouku v závislosti na vzdálenosti elektrody od svařovaného materiálu [9]

1) Sloupec oblouku

Je to zářivá svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot 4000 až 7000 °C a závisí především na složení plynu (stupeň ionizace a disociace), na hodnotě napětí a intenzitě proudu. Je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Za předpokladu, že disponuje dostatečným napětím pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku, může stabilně hořet v ionizovaném stavu. [5], [7], [12]

Má tvar mírně rozšířeného komolého kužele, viz obr. č. 4. Od elektrody k základnímu materiálu se rozšiřuje a vypadá, jako zvon viz obr. č. 5 a 6. Snižuje se tím proudová hustota na jednotku plochy a je obtížné zvyšovat výkon elektrického oblouku. [5], [7], [12]



Obr. č. 4: Schéma elektrického oblouku u svařovací metody TIG [6]



Obr. č. 5: Svařování metodou TIG v ochranném plynu (viditelné zvonovité rozšíření oblouku) [10]



Obr. č. 6: Tvar volně hořícího oblouku svařovací metody TIG [11]

2) Katodová část (skvrna)

Je ohraničená oblast, která termickou emisí emituje primární elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci plynného prostředí. Tyto elektrony získávají v oblasti katodového úbytku napětí tak velkou kinetickou energii, že jsou schopny při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty a sekundární elektrony. Teplota skvrny je přibližně 2600 °C (viz obr. č. 4). [5], [7], [12]

3) Anodová část (skvrna)

Neutralizuje a odvádí dopadající záporné částice (elektrony). Kinetická energie těchto částic se mění na tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Teplota anodové skvrny je přibližně 3000 °C (viz obr. č. 4). [5], [7], [12]

Přibližné teploty pro TIG/MIG svařování lze vidět i na snímcích z numerické simulace softwaru Sysweld v experimentální části DP.

Vlastnosti el. oblouku [5]:

- a) malý úbytek napětí na anodě
- b) malý potenciální rozdíl na elektrodách
- c) velká proudová hustota katodové skvrny
- d) proud řádově ampéry až tisíce ampér
- e) intenzivní vyzařování UV záření.
- f) intenzivní vyzařování světelného záření z elektrod i sloupce oblouku.

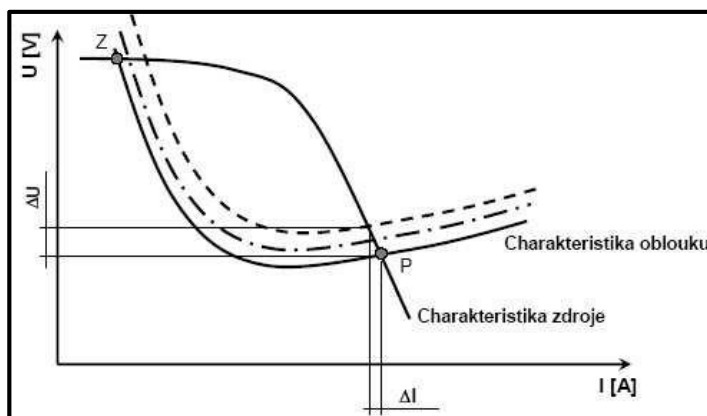
2.4 Voltampérová charakteristika oblouku

Vyjadřuje závislost proudu na napětí oblouku při konstantní délce oblouku, viz obr. č. 7 a 8. Tvar a poloha charakteristiky oblouku se liší v závislosti na metodě obloukového svařování a na parametrech svařování a svařovacího prostředí. Také závisí na chemickém složení elektrody, geometrii hrotu elektrody, složení plazmy oblouku a průměru elektrody. [5], [7], [12]

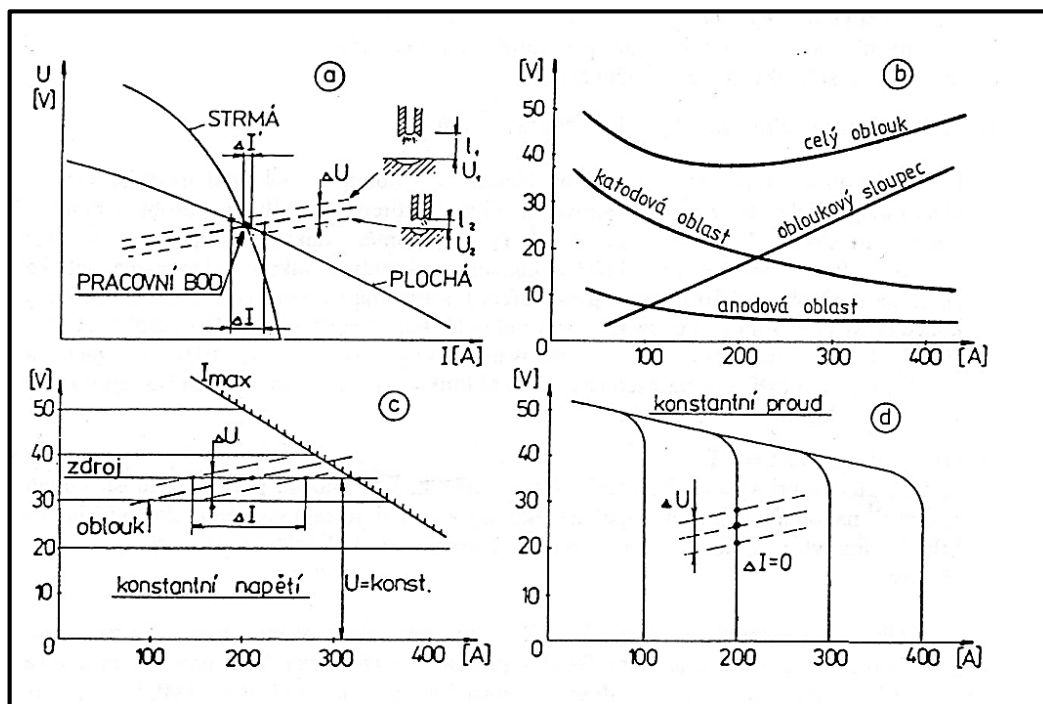
Na základě předešlých informací se používá tzv. standardní statická charakteristika oblouku, která lze vypočítat viz rovnice (1). [5], [7], [12]

$$\text{TIG (141)} U = 10 + 0,04 * I \text{ [V]} \quad (1)$$

Vypočtené hodnoty svařovacího napětí při TIG svařování/pájení lze vidět v experimentální části DP, kde tyto hodnoty byly zaznamenány a upraveny po konzultaci se zkušeným svářecím personálem.



Obr. č. 7: Voltampérová charakteristika oblouku a zdroje (P = pracovní bod, Z = zápalný bod) [12]



Obr. č. 8: Statické charakteristiky zdrojů, oblouků a jeho částí

- a) vliv strmé a ploché charakteristiky na kolísání proudu
- b) statické charakteristiky jednotlivých částí oblouku
- c) vliv svařovacího zdroje s konstantním napětím
- d) vliv svařovacího zdroje s konstantním proudem

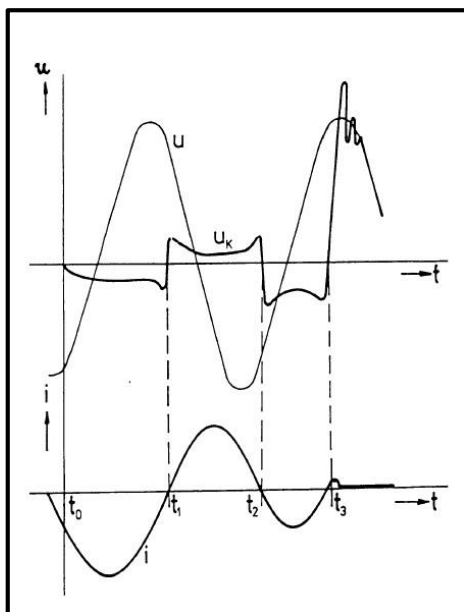
[13]

2.5 Stabilita oblouku

Je základním pilířem stability procesu svařování, která je závislá hlavně na metodě obloukového svařování, jejich ochranných plynech, chemickém složení elektrod, svařovacích parametrech a na vlastnostech svařovacích zdrojů. Stabilita svařovacího procesu ovlivněná stabilitou svařovacího oblouku se projeví především na kvalitě housenky a velikosti nežádoucího rozstříku. [7]

Stabilita oblouku u zdroje střídavého proudu

Na začátek je nutné říct, že se snadněji udržuje stabilita hoření oblouku při svařování stejnosměrným proudem než střídavým. Je to ovlivněno tím, že oblouk napájený zdrojem střídavého proudu zhasíná v dobu, kdy napětí na oblouku klesne pod ionizační napětí a znovu jej lze zapálit až při podstatně vyšším napětí. To je ovšem zapříčiněno intenzitou proudu, která periodicky mění směr a velikost (viz obr. č. 9). [7]



Obr. č. 9: Průběh napětí a proudu na oblouku při svařování střídavým proudem v závislosti na čase [14]

2.6 Tepelné účinky oblouku

Tepelné účinky se produkují intenzivním zdrojem tepla, což je elektrický oblouk. Jsou koncentrovány na poměrně malou plochu a účinnost přenosu energie do základního svařovaného materiálu je dostatečná. [7]

Tepelnými účinky, prostřednictvím parametrů svařování, lze ovlivňovat velikost napětí a

deformace ve svařovaném materiálu a hlavně geometrii svaru (hloubka a šířka průvaru, šířka tepelně ovlivněné oblasti). [7]

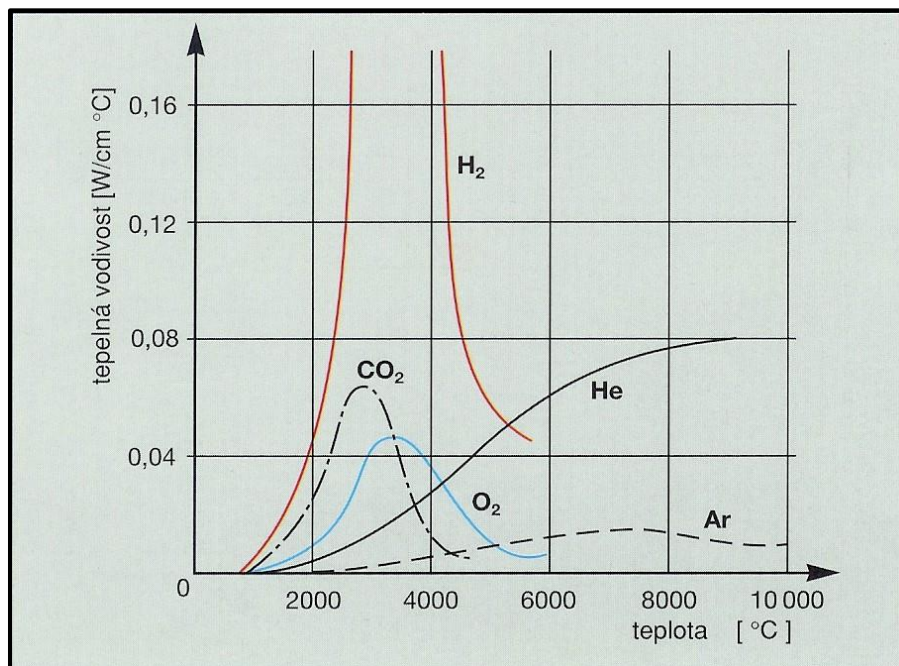
Tepelná bilance oblouku je především ovlivněna směrem proudění plazmy a přenosem tepla prostřednictvím vedení mezi plazmou a roztavenou svarovou lázní. [7]

Velikost tepla, které vzniká při svařování v jednotlivých oblastech oblouku (viz obr. č. 11), je zpravidla přímo úměrné určitému množství úbytku napětí a časovému účinku proudu viz příklad: na anodě $Q_A = U_A \cdot I_S \cdot t$. Největší množství tepla je v anodové části (anodová část a katodová část viz kapitola 2.3). To je z důvodu dopadu elektronů, které při dopadu přeměňují pohybovou energii na teplo. V katodové části je méně tepla, protože je ochlazována termoemisí elektronů. Teplota katody je o 200 °C až 500 °C nižší než teplota anody. V obloukovém sloupci je nejméně tepla a je závislé na jak na tepelném příkonu, tak i na tepelné vodivosti ochranného plynu, ve které oblouk vzniká. Čím vyšší tepelnou vodivost ochranný plyn má, tím nižší je teplota a je lepší odvod tepla (viz obr. č. 10). Z ochranných plynů má nejmenší tepelnou vodivost Argon. Naopak oxid uhličitý má nejvyšší tepelnou vodivost. Z toho lze usoudit, že Argon při stejném tepelném příkonu a stejné délce oblouku, tvoří nejširší sloupec (komolý kužel) a tvoří nejvyšší teplotu sloupce. Naopak oxid uhličitý bude tvořit při stejných podmínkách nejužší sloupec a nejnižší teplotu. Teplotní maximum oblouku se nachází ve středu a směrem k okraji klesá. Pro zajímavost teplota oblouku při svařování obalenou elektrodou 4200 – 6400 °C, při svařování pod tavidlem je od 6200 do 7800 °C a při svařování MIG/MAG v ochranné atmosféře se pohybuje teplota oblouku od 8000 až 15000 °C. V praktické části diplomové práce bude využita svařovací metoda TIG ochranné atmosféře, která dosahuje teploty oblouku 6500 až 9000 °C. S tím souvisí výpočet celkové tepelné účinnosti, viz rovnice (2) a tepelné ztráty viz rovnice (3). [7]

$$\text{Celková tepelná účinnost } \eta = \frac{Q_{sv}}{Q_{obl}} \quad (2)$$

Q_{sv} – energie vnesená do svaru

Q_{obl} – celková energie oblouku



Obr. č. 10: Tepelná vodivost ochranných plynů v závislosti na teplotě [15]

$$\text{Tepelné ztráty} \quad Q_{ztr} = Q_{obl} - Q_{sv} \quad (3)$$

Q_{sv} – energie vnesená do svaru

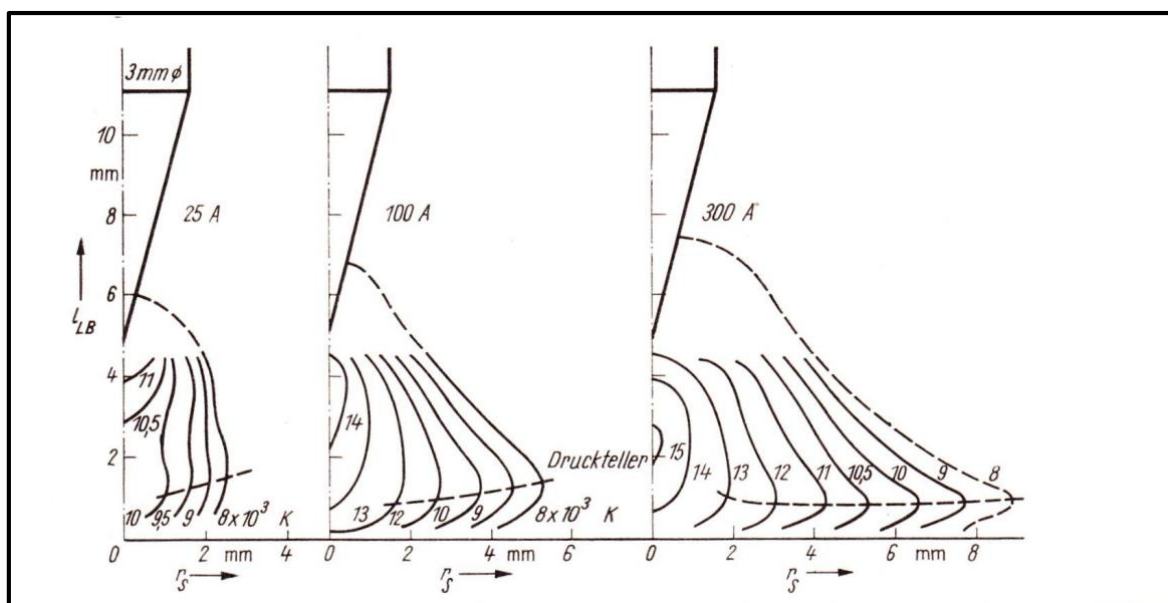
Q_{obl} – celková energie oblouku

[7]

Tepelné ztráty [7]:

- odvodem tepla vedením elektrody
- odvodem tepla tokem plynu ve sloupci oblouku do okolí
- odvodem tepla základním materiálem
- zářením z oblouku a z materiálu

Svařování tavící se elektrodou (např. MIG/MAG) bude mít zpravidla větší tepelnou účinnost svařovacího procesu než svařování netavící se wolframovou elektrodou (TIG), protože vzniklé teplo na elektrodě se neztrácí, ale použije se k roztavení elektrody (přídavného materiálu). Ve formě kapek kovu přechází do svarové lázně. [7]



Obr. č. 11: Izotermy (teplotní pole) oblouku při svařování metodou TIG v závislosti na změně hodnoty el. proudu [11]

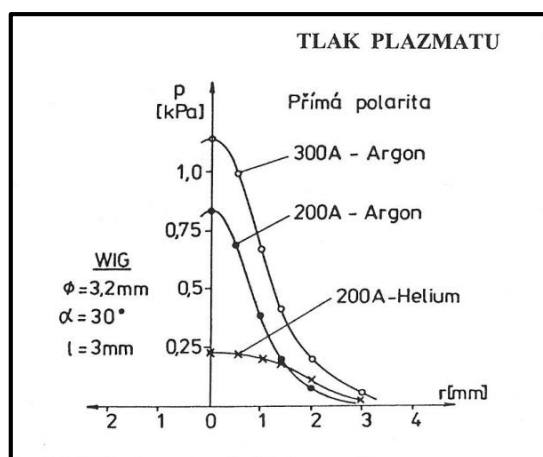
2.7 Mechanické účinky oblouku

Mezi faktory, které ovlivňují mechanické účinky, patří [7]:

- Síla proudu sloupce oblouku, který vytváří tlak směřující kolmo na povrch svarové lázně. Tím stlačuje její střed a přispívá ke zvyšování poměru hloubky a šířky svarové housenky (nejnižšího tlaku se dosahuje u svařování v ochranném plynu He, viz obr. č. 12, naopak v případě argonu se dosahuje většího tlaku)

- Pohybová energie kapek roztaveného přídavného materiálu, která je přenášena a urychlována proudem plazmy
- Reaktivní tlak par, které unikají z aktivní oblasti svarové lázně
- Tlak proudu kovových par z elektrody (přehřátý povrch)
- Elektromagnetické síly způsobené el. proudem, který prochází svarovou lázní
- Síly povrchového napětí
- Síly vztahové (souvisí s rozdílnou hustotou tekutého kovu)

Všechny zmíněné faktory ovlivňují proudění tekutého kovu ve svarové lázni a vytváří mechanické účinky oblouku, které silově působí na svarovou lázeň. Tím dávají předpoklad pro dosažení dostatečně hlubokého závaru. [7]



Obr. č. 12: Tlak plazmatu, který působí na anodu. Je zde naznačený vliv tlaku plazmatu na anodu u přímé polarity u TIG svařování. Průměr wolframové elektrody 3,2 mm, úhel broušení 30° a délka oblouku 3 mm [13]

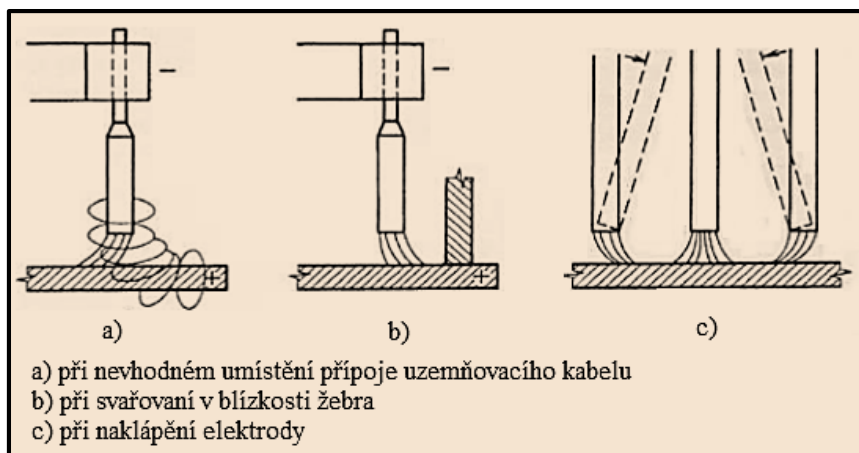
2.8 Ovlivnění el. oblouku magnetickými poli

Obecně platí, že kolem každého vodiče proudu (a tedy i oblouku), kterým protéká el. proud, se vytváří magnetické pole. Projevuje se silovými účinky hlavně v oblasti elektrické oblouku. S tím souvisí jev, který se nazývá „foukání oblouku“. [7]

Foukání oblouku – vychylování el. oblouku od směru osy elektrody v rozsahu, který má negativní vliv na tvorbu svarové housenky (vzniká nevzhledný a nekvalitní svar). Je to způsobeno magnetickými silami (řádově 1 mN na 1mm délky oblouku), které vznikají kolem každého vodiče, kterým protéká proud. Je to určeno malou tuhostí oblouku (lehce ho lze vychýlit magnetickými silami – i slabými). Nejen magnetické síly nepříznivě ovlivňují svařování, ale nerovnoměrné rozdělení proudu ve svařenci a jeho tvarová složitost (členitost). [7]

Snížit tento jev lze vhodným umístěním přívodní svěrky, co nejbližší k místu svařování nebo nakloněním směru elektrody proti směru „foukání oblouku“. [7]

V případě svařování střídavým proudem jsou problémy s foukáním oblouku mnohem menší než při svařování stejnosměrným proudem. [7]

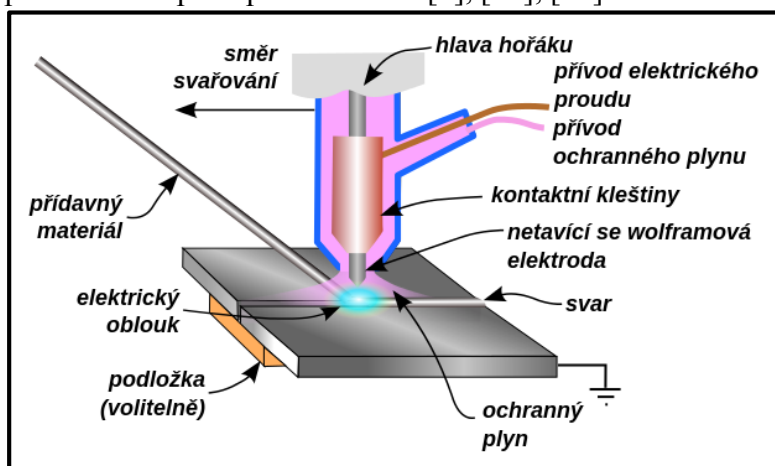


Obr. č. 13: Foukání oblouku [16]

3 Princip a použití svařovací metody TIG

3.1 Svařování netavící se wolframovou elektrodou v atmosféře ochranného inertního plynu

Při svařovací metodě TIG vzniká oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem viz obr. č. 14 a 15. Ochranu svarové lázně a elektrody před okolní atmosférou zabezpečuje netečný (inertní) plyn o vysoké čistotě (minimálně 99,995 %). Používá se nejčastěji argon, helium nebo jejich směsí. V experimentální část DP byl použit Argon 4.6 (99,996 %). Svařování lze realizovat s přídavným materiálem ve formě drátu ručním způsobem, mechanizované (strojní) nebo automatické (robotické) svařování s podavačem drátu s proměnnou rychlostí jeho podávání dle postupu svařování. [7], [12], [19]



Obr. č. 14: Princip TIG svařování [17]



Obr. č. 15: Svařování metodou TIG v ochranném plynu [10]

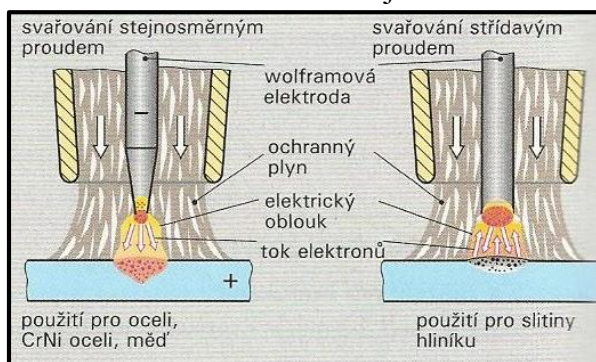
3.2 Svařování metodou TIG dle druhu proudu

- svařování střídavým proudem pro hliník, hořčík a jejich slitiny (viz obr. č. 16) [12]
- svařování stejnosměrným proudem pro středně a vysokolegovanou ocel, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další (viz obr. č. 16) [12]

Metoda TIG se pro svařování uhlíkových ocelí používá méně z důvodu nebezpečí vzniku pórů ve svaru a z ekonomického hlediska. Svařování netavicí se wolframovou elektrodou se používá i pro spojování obtížně svařitelných materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku např. titan a zirkon. [12]

Je možné svařovat i různorodé materiály – ocel s mědí, bronzem nebo niklovými slitinami a návary v oblasti renovací např. nástrojové oceli, niklové a kobaltové tvrdonávary. [12]

TIG má výrazný vliv na objem svářečských aplikací, což se připisuje vysoké kvalitě spojů, operativností řízení procesu svařování a vysokému stupni automatizace a robotizace. Základní shrnutí svařování metodou TIG je v tabulce č. 1. [12]



Obr. č. 16: Svařování stejnosměrným a střídavým proudem [18]

Poloha svařování	Všechny
Tloušťka základního materiálu	0,5 – 10 mm
Druh svařovacího proudu	Stejnoseměrný (polarita přímá i nepřímá) a střídavý
Rozsah svařovacího proudu	10 – 500 A
Průměr wolframových elektrod	1 – 8 mm (většinou od 2 do 4 mm)
Průměr přídavného materiálu	0,8 – 4 mm (délka 1 m plné), plněné 0,6 – 2,4 mm (cívky)
Používané ochranné plyny	Inertní (nejčastěji Ar, He nebo jejich směs)
Statická voltampérová charak. zdroje	Strmá
Zdroje svařovacího proudu	Pro střídavý proud - transformátory
	Pro stejnosměrný proud – usměrňovače a inver-tory

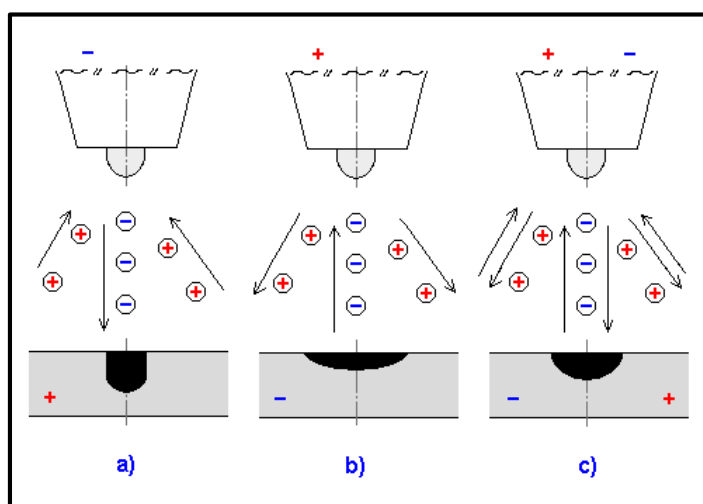
Tabulka č. 1: Shrnutí základních informací o svařovací metodě TIG [9]

3.2.1 Svařování stejnosměrným proudem

Je základním způsobem zapojení při svařování metodou TIG. Elektroda je připojena k zápornému pólu zdroje a svařovaný materiál na kladný pól zdroje (přímé zapojení viz obr. č. 17). Rozdělení tepla oblouku je nerovnoměrné a přibližně třetina celkového tepla připadá na elektrodu a dvě třetiny tepla se přenáší do základního materiálu. Tím pádem není elektroda tepelně přetěžovaná a naopak svarová lázeň se vyznačuje velkou hloubkou závaru. Nicméně, na velkou hloubku závaru má vliv i dopad elektronů, protože svoji kinetickou energii přeměňují na tepelnou. Toto zapojení bylo použito v experimentální části diplomové části. [6], [12]

Svařování stejnosměrným proudem s přímou polaritou lze použít pro spojování všech typů ocelí, mědi, titanu, niklu a jejich slitin. Tento způsob zapojení taktéž lze využít i pro svařování hliníku v ochranné atmosféře směsi argonu a nejméně 75 % helia. Při svařování hliníku se vlivem vysoké vodivosti helia předává do svarové lázně velké množství tepla, které umožňuje roztavení i povrchových oxidů. Oxidy se působením povrchových sil stahují na okraj taveniny a střed tavné lázně je čistý. Tento způsob svařování se používá pro renovace a opravy rozměrných a silnostěnných hliníkových odlitků nebo svařenců. Lze takto spojovat i silnostěnné a tenkostěnné součásti především koutovým svarem. [6], [12]

Nepřímá polarita = zapojení, které není z důvodu vysokého tepelného zatížení elektrody využíváno a výjimečně se používá pro svařování tenkostěnných svařenců z hliníku nízkým svařovacím proudem. Lze ho využít pro čistící efekt, neboli odstranění odolných oxidů především při svařování hliníkových (Al_2O_3) a hořčíkových slitin. [6], [12]



Obr. č. 17: TIG svařování DC (nepřímá a přímá polarita) a AC

- (TIG DC-) Přímá polarita - stejnosměrný proud – použito v experimentální části
- (TIG DC+) Nepřímá polarita - stejnosměrný proud
- Přímá i nepřímá polarita - střídavý proud

[6]

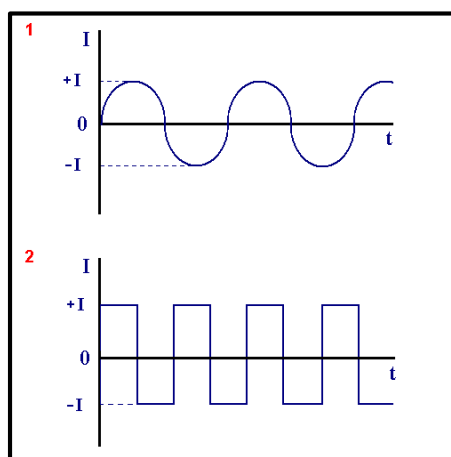
3.2.2 Svařování střídavým proudem

Používá se především kvůli jeho čistícímu účinku, který vzniká při zapojení elektrody na kladný pól zdroje (viz předchozí obr. č. 17). Celý proces probíhá následovně: Na základním materiálu se vytvoří katodová skvrna, která není stabilní a pohybuje se na místa pokrytá oxidy. Tato místa jsou nabitá nižší emisní energií pro emisi elektronů a tak po zasažení katodovou

skvrnou se oxidy snadněji odpaří. [12]

Druhá forma čistícího účinku se projevuje v případě rozložení argonu na kladné ionty a elektrony. Argonové ionty o relativně vysoké hmotnosti jsou urychlené směrem k tavné lázni a působí na oxidy mechanickým účinkem. Ke stažení vrstvy oxidu k okraji svarové lázně dochází dynamickým účinkem tohoto proudu. Při kladném zapojení elektrody vzniká pouze malý závar. Vysoká hloubka závaru se dosahuje při zapojení elektrody na záporném pólu zdroje, kdy a do tavné lázně dopadají urychlené elektrony. [12]

Používá se na svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Problémem při svařování hliníku je vrstva oxidu hlinitého, která chrání za běžných podmínek hliník proti další oxidaci. Tato vrstva má vysokou teplotu tavení cca 2050 °C a při použití stejnosměrného proudu v argonu zabraňuje metalurgickému spojení, neboť pokrývá povrch roztaveného hliníku (teplota tavení je cca 660 °C). [12]



Obr. č. 18: AC proud

1...sinusový průběh

2...obdélníkový průběh

[6]

3.2.3 Svařování impulsním proudem

Impulsní svařování je nejnovější variantou TIG svařování. Spočívá v tom, že intenzita proudu mění pravidelně s časem mezi dvěma proudovými hladinami. Jednou proudovou hladinou je základní proud I_z a druhou je impulsní proud I_p . Podle charakteru zdroje může být tvar průběhu impulsní proudu [6], [7], [12]:

- a) Pravoúhlý
- b) Sinusový
- c) Lichoběžníkový
- d) Nebo jiný

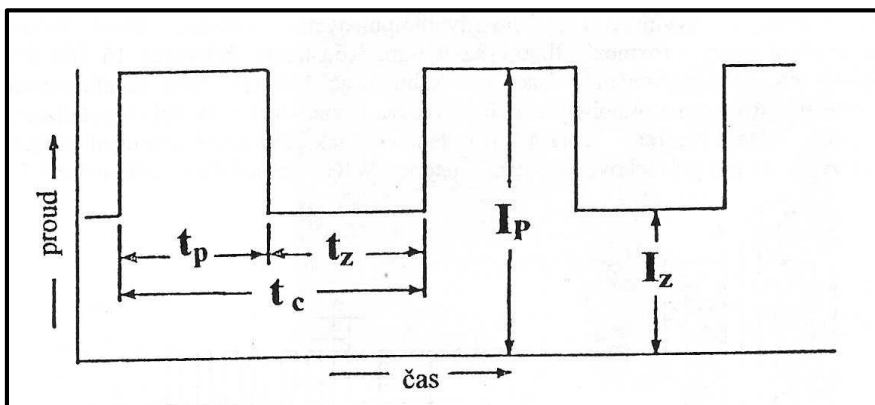
Základní proud I_z , se vyznačuje nízkou hodnotou (cca 10 – 15 A) a zajišťuje pouze ionizaci oblasti oblouku v čase t_z . Pokud je t_z (doba základního proudu) delší než dvojnásobek doby pulsu, lze očekávat úplné ztuhnutí svarové lázně, což je vhodné pro svařování vysokolegovaných ocelí. V opačném případě, tedy pokud je t_z kratší než t_p , lázeň neztuhne, ale zmenší svůj

rozměr. Toho lze využít při požadavku zvláště hladkého svaru s plynulým přechodem do základního materiálu. [6], [12]

Impulsní proud I_p v čase t_p natavuje základní materiál a přídavný materiál a vytváří svarovou lázeň. Rozměry svarové lázně jsou definovány hlavně hodnotou amplitudy impulsního proudu a dobou trvání pulsu. Takto lze regulovat velice přesně svařovací režim, tvarování svarové lázně a dávkování hodnoty vneseného tepla do svaru. [6], [12]

Průměrná hodnota svařovacího proudu je u impulsního svařování nižší než u klasického způsobu svařování s konstantním proudem => tvorba svarových spojů s malou TOO (tepelně ovlivněná oblast), výborné mechanické vlastnosti, nižší náchylnost na praskání a menší deformace. [6], [12]

Celkový čas cyklu t_c určující frekvenci pulsního svařování se rovná součtu času pulsního proudu a času základního proudu viz obr. č. 19. [6], [12]



Obr. č. 19: Průběh pravoúhlého impulsního proudu [7]

Výhody impulsního svařování [12]:

- mechanické a plastické vlastnosti svaru, lepší celistvost
- snížení TOO => menší deformace
- velmi dobrý vzhled svarové housenky
- snížení náchylnosti svaru na vznik mezikrystalické koroze v případě vysokolegovaných ocelí
- možnost svařování plechu tloušťek 0,5 až 5 mm bez použití podložek
- rozsáhlá oblast regulace svařovacího proudu

Výše zmíněné výhody impulsního svařování TIG se používají v těchto oblastech [2], [12]:

- a) svařování tenkých legovaných ocelových plechů, mědi a měděných slitin
- b) svařování různých tloušťek materiálu
- c) svary přístupné z jedné strany
- d) svařování materiálů, které jsou citlivé na přehřátí
- e) svařování kořene u trubek větších tloušťek

3.3 Výhody metody svařování TIG v porovnání s ostatními metodami tavného svařování [7], [19]:

- inertní plyn zajišťuje účinnou ochranu svarové lázně a přehřáté oblasti základního materiálu před účinky okolního prostředí
- inertní plyn brání propalu prvků => nevzniká struska => čistý povrch svaru
- pozitivně formuje tvar svarové housenky na straně povrchu i kořenové části svaru
- není potřeba použití přídavných materiálů, ale je možné je použít
- tvoří vysoce stabilní elektrický oblouk (v širokém rozsahu svařovacích proudů)
- zabezpečuje vysokou operativnost při svařování v různých polohách
- vytváří svary vysoké celistvosti dokonce i na materiálech náchylných na naplynění a oxidaci při zvýšených teplotách
- přesná regulace parametrů svařování
- svarové spoje mají malou TOO a minimální deformace
- svarová lázeň je díky své viditelnosti snadno ovladatelná
- lze velmi přesně dávkovat množství tepla vneseného do svaru
- svařovací oblouk se vyznačuje velkou flexibilitou (jeho směr a tvar je možné ovládat magnetickým polem)

3.4 Bezpečnost a ochrana zdraví při svařování metodou TIG

Při svařování metodou TIG se vytváří velmi intenzivní UV záření, které vychází ze stabilně hořícího oblouku, který není stíněn (cloněn) jako u jiných svařovacích metod např. svařování pod tavidlem (clonou je struska z obalu). [7], [19]

Nutností při ručním svařování metodou TIG je zakrýt všechny části těla. Dalším možným rizikem je vznik ozónu, především při svařování nerezavějících ocelí. Množství ozónu lze redukovat přidáním NO (přibližně 0,03%). Ten se sloučí s ozónem (O₃) na oxid dusičitý (NO₂) viz rovnice (4). [7], [19]



Další riziko vzniká při svařování vysokolegovaných ocelí, protože se do atmosféry uvolňují oxidy legujících kovů. Hlavně tedy chrom (karcinogenní) a nikl (karcinogenní). Pro oba platí nízké hodnoty PEL (přípustný expoziční limit). Ke snížení tohoto rizika se používají odsávací zařízení nebo sami svářeči mají svářecí kukly s filtrací. [7], [19]

4 Součásti svařovacího zařízení a technologie TIG svařování

Základním způsobem zapojení TIG metody je svařování stejnosměrným proudem. Teplu elektrického oblouku je nerovnoměrně rozděleno (cca 1/3 tepla připadá na elektrodu a 2/3 celkového tepla je přeneseno do základního materiálu). Z toho plyne, že elektroda není tepelně přetěžovaná. Naopak svarová lázeň má velkou hloubku závaru. [19]

Základní zařízení pro svařování stejnosměrným proudem [19]:

- a) zdroj stejnosměrného proudu
- b) řídicí jednotka svařovacího obvodu
- c) zapalovací jednotka
- d) programátor
- e) svařovací hořák
- f) chladicí jednotka
- g) redukční ventil
- h) zásobník plynu

Zařízení pro svařování střídavým proudem je v porovnání s předchozím typem složitější, přestože většina komponentů je stejných. Starší zařízení jsou odlišná především zdrojem. Všechna zařízení jsou navíc doplněna o stabilizátor oblouku a baterie kondenzátorů. [19]

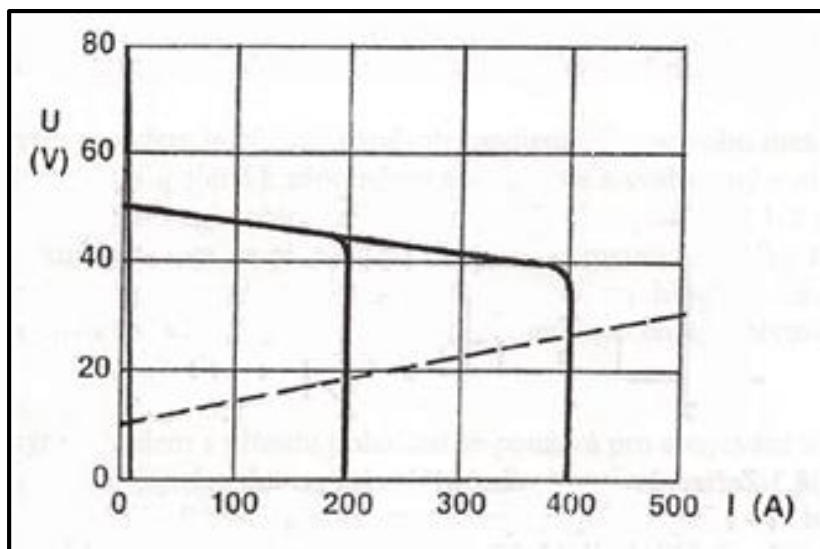
Základní zařízení pro svařování střídavým proudem [2], [19]:

- a) zdroj střídavého proudu
- b) řídicí jednotka svařovacího obvodu
- c) stabilizátor oblouku
- d) programátor
- e) zapalovací jednotka
- f) baterie kondenzátorů
- g) svařovací hořák
- h) chladicí jednotka
- i) redukční ventil
- j) zásobník plynu

4.1 Zdroj stejnosměrného proudu (DC)

Je usměrňovač se síťovým transformátorem nebo invertor, který má strmou statickou charakteristiku (s konstantním proudem) viz obr. č. 20, nebo přehledněji a srozumitelněji na obr. č. 8 na str. č. 9 pod písmenem „d“. To lze taktéž vidět na svařovacích a pájecích křivkách ze software WeldEye v experimentální části (kapitola č. 17). Napětí naprázdno není zpravidla vyšší než 75 V. [2], [19]

Lze si to vysvětlit i tak, že i při velké změně délky elektrického oblouku, což může být zapříčiněno vlivem nedokonalosti držení hořáku svářečem v ruce, se svařovací proud mění jen minimálně. [6]



Obr. č. 20: Strmá voltampérová charakteristika zdroje s vyznačenou standartní charakteristikou – TIG svařování [19]

4.2 Zdroj střídavého proudu (AC)

Jedná se o nejčastější transformátor upravený pro svařování TIG pomocí výkonových elektronických prvků, které zajišťují vyšší strmou statickou charakteristiku (totožná voltampérová charakteristika jako stejnosměrného zdroje proudu viz obr. č. 20). U moderních invertorových zdrojů je střídavé napětí odebráno za VF transformátorem. [6], [7], [19]

4.3 Baterie kondenzátorů

Při svařování plní důležitou úlohu (hlavně při svařování hliníku a hliníkových slitin). Vyrovnává deformovaný sinusový průběh způsobený rozdílným ionizačním potenciálem wolframu a hliníku. Tím se zlepšuje čistící efekt svařovacího oblouku. Moderní svařovací zařízení mají obdélníkový průběh střídavého proudu a jsou vybaveny funkcí „balance“, která umožňuje rozšíření nebo zúžení kladné, případně záporné periody proudu. S touto funkcí je možno posílit buď při kladné periodě čistící efekt v případě zoxidovaného povrchu, nebo zvýraznit hloubku závaru při záporné periodě. [19]

4.4 Řídící jednotka

Skládá se z prvků, které řídí svařovací procesy (začátek a ukončení svařování, náběh na začátku a sestup proudu na konci procesu, řízení úrovně proudu při svařování svařenců s různou tloušťkou materiálu, zapnutí a přerušení proudu, pulzní jednotku). [7], [19]

4.5 Programátor

Zajišťuje (v návaznosti na řídicí jednotku) nastavení předfuku a dofuku plynu. Mezi další jeho funkce patří regulace okruhu chladicí vody a aktivace činnosti ionizátoru. V případě mechanizovaného způsobu svařování ovládá pohyb svařovacího hořáku (případně celé svařovací hlavy). V robotizovaném svařování je připojen přímo na řídicí systém robota. Těmito propojovací prvky mezi jednotlivými částmi se myslí vodiče a hadice o různých délkách a průměrech. [7], [19]

4.6 Zapalování obloukem (zapalovací jednotka)

Je provedeno vysokonapětovým vysokofrekvenčním ionizátorem, který na vzdálenost několik milimetrů vybudí elektrickou jiskru, která ionizuje plynné prostředí výbojem => splní se podmínky pro vedení elektrického proudu, dochází k rozvoji disociace a ionizace okolního ochranného plynu a zapálení vlastního oblouku. Dotykové zapalování viz kapitola č. 2.2. [6], [7], [19]

4.7 Stabilizátor

Je zdrojem vysokonapětových impulsů s vysokou frekvencí, které působí pouze, když má svařovací proud nulovou hodnotu. Plní funkci pomocné zapalovací jednotky (ionizátoru). [6], [7], [19]

Je důležitý především při svařování střídavým proudem. [6], [7], [19]

Stabilizátory indukují svařovací proud do svařovacího obvodu o napětí 2500 – 6000V a o frekvenci 2 až 5 MHz. Nicméně, v dnešní době je častěji využíván impulsní generátor s nízkou frekvencí, které způsobují nižší rušení telekomunikací. [6], [7], [19]

4.8 Řídicí systém

Zastává významnou roli při svařování, neboť vyrovnává deformovaný sinusový průběh, který je způsoben odlišným ionizačním potenciálem prvků např. se používá při svařování hliníku a hliníkových slitin (rozdílný ionizační potenciál wolframu a hliníku) => zlepšuje čistící efekt svařovacího oblouku. [7], [19]

4.9 Svařovací hořák

Zajišťují přívod el. proudu k elektrodě, usměrnění a přívod ochranného plynu, přívod a odvod chladicí vody a fixování polohy netavící se wolframové elektrody. [2], [7], [19]

Svařovací hořáky disponují vyměnitelnými kleštinami, které zajišťují pevné upnutí a proudové napájení wolframových elektrod. Další částí je plynová tryska, která usměrňuje proudění plynu do svařovacího místa. [2], [7], [19]

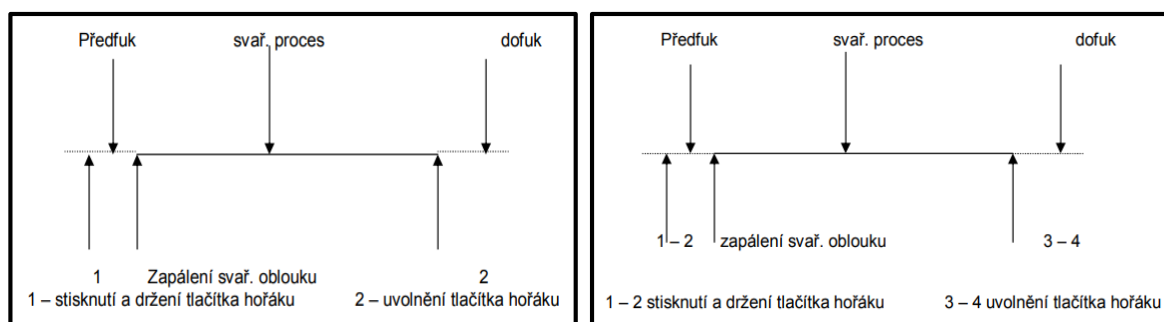
Všechny svařovací hořáky jsou vybavené spínačem elektrického proudu, díky němuž lze vybrat buď 2 – taktní viz obr. č. 21, nebo 4 - taktní funkci spínání svařovacího proudu viz obr. č. 21. V experimentální části byl použit 2 – taktní funkce spínání svař. proudu z důvodu délky svaru (krátká) a zvyku svářečského personálu. U nových svařovacích zdrojů umožňuje v průběhu svařování měnit svařovací proud skokově nebo plynule na dopředu nastavené hodnoty proudu. [2], [7], [19]

Jednotlivé části svařovacího hořáku metody TIG lze vidět na obrázku č. 22. [2], [7], [19]

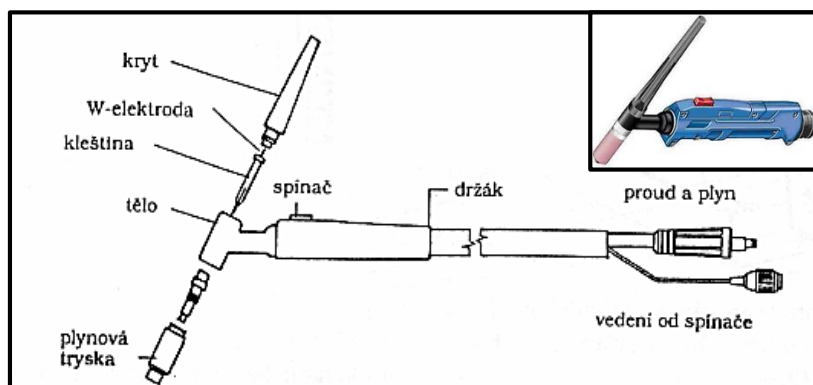
Hořáky lze rozdělit [19]:

- a) chlazené vodou (do 350 až 500A) – použití při ručním, ale hlavně při strojním svařování

b) chlazené procházejícím plynem (do cca 150A)



Obr. č. 21: Vlevo je 2-taktní funkce spínání svař. hořáku a vpravo je 4-taktní funkce spínání svař. hořáku [50]



Obr. č. 22: Svařovací hořák pro svařování metodou TIG [5]

4.9.1 Plynová tryska

Usměrňuje proudění plynu do svařovacího místa a její průměr se vybírá podle proudového rozsahu, viz tabulka č. 2. [7]

Lze je rozdělit [7]:

- keramické – použití pro ruční hořáky chlazené procházejícím plynem
- kovové – použití pro strojní hořáky chlazené vodou

Proudový rozsah [A]	Průměr plynové trysky [mm]
Do 70	6 - 9
70 - 150	9 - 11
150 - 250	11 - 13
250 - 300	13 - 15
300 - 500	15 - 18

Tabulka č. 2: Určení průměru plynové trysky v závislosti na proudovém rozsahu [7]

4.9.2 Plynová sítkta (čočky)

Prodlužují laminární proudění ochranného plynu a usnadňují přístup k místu svařování a to vysunutím elektrody => zlepšení plynové ochrany. Příklad plynové čočky lze vidět na obr. č. 23. [7]

Mohou snížit množství plynu až o $\frac{1}{2}$ a mohou vysunout elektrodu až na 20 mm. V případě svařování vysoce reaktivních kovů např. Ti, Zr atd. se k hořáku připevní boční kryt, který ochraňuje svar při chladnutí do teplot 300 – 350 °C, kdy už téměř nehrozí nebezpečí oxidace. [7]

Ke zjištění správného množství průtoku ochranného plynu na ochranné plynové trysce se používá trubkový průtokoměr s kuličkou. Dostatečné množství ochranného plynu vytvoří ochranu před účinky okolní atmosféry, tím zabrání přístupu kyslíku a dusíku do svarové lázně a také zajistí ochranu wolframové elektrodě proti oxidaci. [7]

Stanovení optimálního průtoku plynu závisí na několika parametrech [7]:

- A. Druh svařovaného materiálu
- B. Typ ochranného plynu
- C. Hodnota proudu
- D. Úhel sklonu hořáku
- E. Velikost plynové trysky
- F. Rychlost proudění okolního vzduchu
- G. Typ spoje
- H. Svařovací poloha

Je potřeba dodat, že záleží na výběru ochranného plynu. Při zvolení argonu je vhodné nastavit průtok plynu v závislosti na hodnotě svařovacího proudu a druhu svařovaného materiálu. Pro svařovací proud 150A je průtok 4 – 6 l/min (ocel), 6 – 8 l/min (hliník) a 8 – 12 l/min pro měď, nikl, hořčík, titan atd. V případě použití směsi argonu s heliem (50% podíl helia v argonu) je nezbytné zvýšit průtok plynu zhruba o 30%. [7]

Pro zajištění určité ochrany el. oblouku se používá předfuk plynu. Používá se před zapálením el. oblouku tak, že se zpozdí zapálení oblouku oproti začátku proudění ochranného plynu o 2 až 5 sekund. Také se používá dofuk, který má zabránit oxidaci při chladnutí elektrody a svarové lázně. Dofuk zajišťuje proudění ochranného plynu ještě 15 až 30 sekund po vypnutí proudu. Dobu dostatečného dofuku je možné vidět také ze zbarvení elektrody. Pokud má elektroda modré nebo černé zbarvení => nedostatečná ochrana => musí se doba dofuku prodloužit. [7]



Obr. č. 23: Plynová čočka [20]

4.10 Chladicí jednotka

Zajišťuje cirkulaci chladicí vody v celém systému. Skládá se z [19], [21]:

- Zásobníku chladicí vody
- Čerpadla s elektromotorem
- Ventilátoru na chlazení vody
- Propojovacích hadic (i rychlospojky)

4.11 Zásobník ochranného plynu (tlaková láhev s redukčním ventilem)

Zajišťuje pomocí redukčního ventilu požadovaný trvalý tlak plynu s předem nastaveným průtokem podle svařovaného materiálu. Nejčastěji používanými tlakové lahve mají objem 10, 40 a 50 l. Pokud se jedná o velké závody s velkosériovou výrobou je praktičtější (ekonomicky výhodné) skladovat kapalně plyny v mobilních odpařovacích nádobách. [19], [21]

Pro správnou dopravu ochranného plynu do svařovacího zařízení slouží propojovací prvky, jako jsou vodiče a hadice různých průměrů a délek. [21]

4.12 Netavící se wolframová elektroda

Tato elektroda se vyrábí ze spékaného wolframu, který má teplotu tavení 3380 °C, teplotu varu 5700 °C, měrný elektrický odpor $5,36 \cdot 10^{-8}$ a hustotu 19,1 g cm⁻³. [7], [19]

Vyrábějí se čisté bez příměsí o čistotě 99,9 % W, nebo legované oxidy kovů – thoria (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr) nebo yttria (Y), které jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny, viz tabulka č. 4. Přísada oxidů snižuje teplotu ohřevu elektrody o 1000 °C, zvyšuje životnost, zlepšuje se zapalování oblouku a jeho stabilitu díky zvýšené emisi elektronů. Emise elektronů může být zvýšena snížením výstupní práce při uvolnění elektronů (viz tabulka č. 3). Termoemise elektronů se také zvyšuje disociací Thoria (Ce, Y, Zr, La atd.), které se uvolňuje a pokrývá hrot wolframové elektrody. Životnost wolframové elektrody je pozitivně ovlivněna vysokou teplotou tavení oxidů kovů viz tabulka č. 5. Příklady wolframových elektrod barevně rozlišených jsou na obr. č. 24. [7], [19]

Materiál	Výstupní práce elektronů [eV]
W	4,24 – 5,01
Y ₂ O ₃	1,9 – 3,8
ThO ₂	2,0 – 3,0
CeO ₂	1,8 – 2,6
La ₂ O ₃	1,7 - 4,2

Tabulka č. 3: Přehled výstupních prací elektronů oxidických přísad a wolframu [7]

Označení	Hmotnostní % oxidů	Barevné značení
WP	Bez oxidů	Zelená
WT 10	ThO ₂ 0,9 – 1,2	Žlutá
WT 20	ThO ₂ 1,8 – 2,2	Červená
WT 30	ThO ₂ 2,8 – 3,2	Fialová

WT 40	ThO ₂ 3,8 – 4,2	Oranžová
WZ 3	ZrO ₂ 0,15 – 0,4	Světle hnědá
WZ 8	ZrO ₂ 0,7 – 0,9	Bílá
WLa 10	La ₂ O ₃ 0,9 – 1,2	Černá
WLa 15	La ₂ O ₃ 1,4 – 1,6	Zlatá
WLa 20	La ₂ O ₃ 1,8 – 2,2	Modrá
WC 20	CeO ₂ 1,8 – 2,2	Šedá
Lymox	La ₂ O ₃ + Y ₂ O ₃ + CeO ₂ 1,8 – 2,2	Růžová

Tabulka č. 4: Přehled vyráběných wolframových elektrod (ČSN EN ISO 6848) [6], [7]



Obr. č. 24: Příklady wolframových elektrod pro TIG svařování [6]

Název	Chemický vzorec	Teplota tavení [°C]
Oxid thoričitý	ThO ₂	3300
Oxid lanthanitý	La ₂ O ₃	2300
Oxid zirkoničitý	ZrO ₂	2700
Oxid ceričitý	CeO ₂	2600
Oxid hafničitý	HfO ₂	2900
Oxid ytřitý	Y ₂ O ₃	2700

Tabulka č. 5: Přehled oxidů kovů, které se používají jako přísady do wolframových elektrod [6], [7]

Teploty tavení oxidů kovů v tabulkách jsou vyšší v porovnání s oxidem wolframovým WO₃ (teplota tavení 1473 °C). Z toho plyne, že je vhodnější přísady do wolframových elektrod přidávat. Minimálně za účelem vyšší životnosti. [7]

Vhodné zvolení typu elektrody závisí na oblasti použití a na druhu proudu. Volí se také průměr a délka elektrody, viz tabulka č. 6 a č. 7. [7]

V normě ČSN EN ISO 6848 jsou normalizovány a jejich přehled lze vidět v tabulce č. 6. [6], [7]

Délky vyráběných elektrod [mm]			
Standartní	Na objednání		
175	50	75	150

Tabulka č. 7: Délky vyráběných elektrod [6], [7]

Průměry vyráběných elektrod [mm]									
0,5	1,0	1,6	2,0	2,4	3,2	4,0	4,8	6,0	6,4

Tabulka č. 6: Průměry vyráběných elektrod [6], [7]

Pro zajímavost: při zatížení proudem je spotřeba netavící se elektrody přibližně 4 mm za hodinu. [7]

Označení netavících se elektrod je řízeno těmito zásadami:

- První písmeno W označuje wolfram jako základní prvek elektrod
- Druhé písmeno označuje přísadu oxidů (T – oxid thoričitý, Z – oxid zirkoničitý, La – oxid lanthaničitý, C – oxid ceričitý)
- Druhé písmeno P (pure = čistý) označuje elektrodu z čistého wolframu
- Číslo za základní značkou určuje desetinásobek koncentrace oxidů

Tzn.: WT 10 – wolframová netavící se elektroda s příměsí oxidu thoričitého (0,9 – 1,2 hmot. %) [6], [7]

Charakteristika jednotlivých wolframových elektrod:

WP - čistá wolframová elektroda, která je vhodná pro svařování slitin hliníku, hliníkového bronzu a hořčíku střídavým proudem (vyniká stabilitou oblouku). Taktéž se používá pro svařování niklových slitin. [6], [7]

WZ – elektrody s přísadou zirkonu vytváří velice stabilní oblouk. Obsah Zr snižuje tvorbu wolframových vměstků ve svarové lázni na minimum. Použití nacházejí především jako náhrada WP elektrod pro střídavý proud. [6], [7]

WC – elektrody s přísadou Ce jsou universální. Mají velmi dobré zapalovací vlastnosti (i při zahřáté elektrodě) – mají dobrou životnost a vysokou proudovou zatížitelnost. Lze je využít i pro svařování stejnosměrným proudem nízké intenzity. Používají se při svařování legovaných i nelegovaných ocelí, slitin mědi, niklu a titanu. [6], [7]

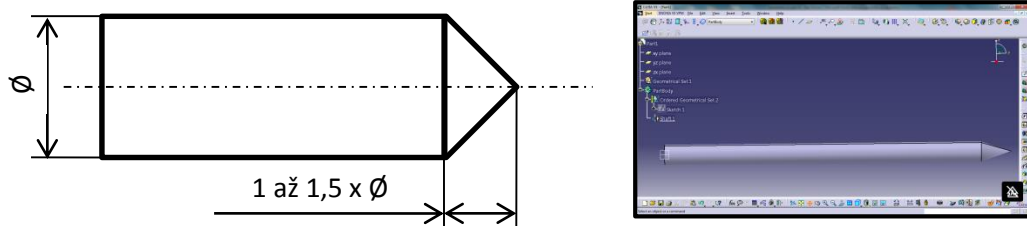
WLa – elektrody s přísadou La stejně jako elektrody WC lze použít pro svařování střídavým i stejnosměrným proudem. Tyto elektrody vynikají nad WC elektrodami především v oblasti nízkých svařovacích a zapalovacích proudů. Elektrody s vyšším podílem lanthanu snadněji opakovaně zapalují, to se především může využít při automatizovaném svařování (robotické, orbitální, polohovací stoly atd.). Tato elektroda byla využita v experimentální části diplomové práce. [6], [7]

WT – elektrody s přísadou Th snižují výstupní práci a zvyšují emise elektronů, viz tabulka č. 3. Čím vyšší je obsah Th ve wolframové elektrodě, tím lepší je zapalovací vlastnost, životnost i proudová zatížitelnost. Tyto elektrody se používají především pro svařování stejnosměrným proudem vysoce legovaných i nerezových ocelí. Nevýhodou je, že Th je radioaktivní prvek a s vyšším obsahem Th roste i vyšší radioaktivita elektrod (nebezpečí: při broušení elektrod dochází k usazování radioaktivního prachu v plicích). Z tohoto důvodu se přechází od WT elektrod k WLa a WC elektrodám. [6], [7]

Každá z těchto elektrod musí být označena na jednom konci 3 mm barevným proužkem, který určuje, o jakou netavící se elektrodu se jedná. [6], [7]

Mechanická úprava netavících se elektrod [6], [7]:

- Elektroda je broušena do požadovaného tvaru na opačném konci, než je barevně označena
- Tvar konce elektrody velice ovlivňuje kvalitu svaru a průběh svařování
- Pro svařování stejnosměrným proudem se funkční konec elektrody brousí do kužele s vrcholovým úhlem podle hodnoty svařovacího proudu, viz tabulka č. 8.
- Délka špičky (= kužel) má být 1 až 1,5 x průměr elektrody viz obr. č. 25 (příklad: elektroda \varnothing 1,0 mm má mít délku špičky 1,0 až 1,5 mm)
- Za účelem prodloužení životnosti je doporučováno elektrodu otupit na úhel 90° a zaleštit po broušení přibližně 10 % průměru elektrody). Otupení zapříčiní snížení tepelného zatížení špičky.
- Je nutné brousit elektrodu tak, aby rýhy vznikly v kolmém směru na povrch svařovaného materiálu, viz obr. č. 27, 28, 29
- Broušení se nejlépe provádí kotoučem z SiC nebo diamantu s velmi malými zrny (ruční je nevhodné) na speciální brusce viz obr. č. 26
- Pro svařování střídavým proudem se funkční konec wolframové elektrody nebrousí do špičky, ale do tupa. Poté se povrchově natakává svařovacím proudem do kulového tvaru (= kalota) viz obr. č. 30



Obr. č. 25: Stanovení délky špičky wolframové elektrody [6], [7]

V experimentální části bylo zvolena délka špičky 1,25 - krát průměr wolframové elektrody (\varnothing 2,4) \Rightarrow délka špičky byla 3 mm. Bylo tomu z důvodu dosažení určité šířky a hloubky průvaru viz obr. č. 29.

Svařovací proud [A]	Vrcholový úhel
Do 20	30°
20 až 100	60° až 90°
100 až 200	90° až 120°
200 a více	120°

Tabulka č. 8: Přehled doporučených hodnot vrcholového úhlu pro stejnosměrný proud [6], [7]

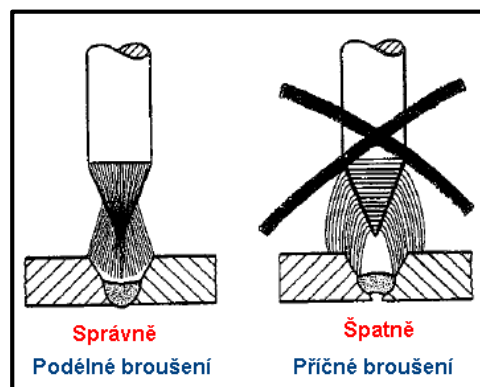
Ø elektroda [mm]	Střídavý proud [A]		Stejnosměrný proud [A]	
	WP	WT, WLa, WC, WZ	Přímá polarita (mínus pól na elektrodě)	
			WP	WT, WLa, WC, WZ
0,5	2 - 15	2 - 15	Do 20	Do 20
1,0	10-50	15 - 60	20 - 70	20 - 80
1,6	30 - 70	60 - 100	75 - 140	70 - 150
2,0	40 - 90	70 - 130	120 - 170	100 - 180
2,4	50 - 110	80 - 160	150 - 200	130 - 225
3,0	80 - 150	120 - 200	170 - 240	160 - 250
3,2	100 - 170	140 - 220	200 - 260	180 - 275
4,0	150 - 225	180 - 275	250 - 320	250 - 350
4,8	180 - 300	250 - 400	280 - 450	300 - 500
5,0	220 - 320	260 - 420		320 - 530
6,4	270 - 400	300 - 500		400 - 650

Tabulka č. 9: Proudové zatížení wolframových elektrod [6], [7]

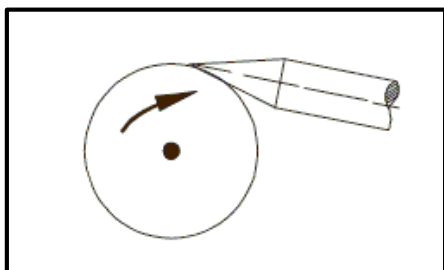
Pro zajímavost: V případě použití nepřímé polarity (plus pól na elektrodě) vydrží zatížení přibližně 10 % proudu přímé polarity. [6], [7]



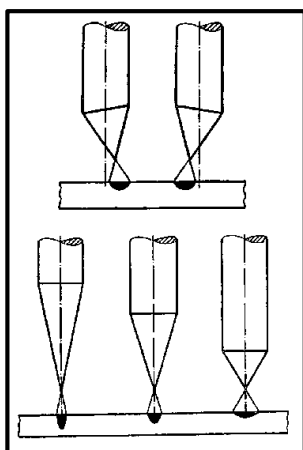
Obr. č. 26: Speciální bruska na wolframové elektrody [6]



Obr. č. 27: Vliv směru broušení špičky [6]



Obr. č. 28: Správné podélné broušení wolframové elektrody [6]



Obr. č. 29: Vliv excentricity a geometrie špičky [6]



Obr. č. 30: Vytvoření kaloty pro svařování hliníků střídavým proudem [13]

V experimentální části diplomové práce byla při svařování/pájení použita wolframová elektroda s označením WLa 15 Ø 2,4 x 175 zlato dle DIN EN ISO 6848, která se cenově za kus pohybuje kolem 130 Kč. [36]

4.13 Ochranné plyny

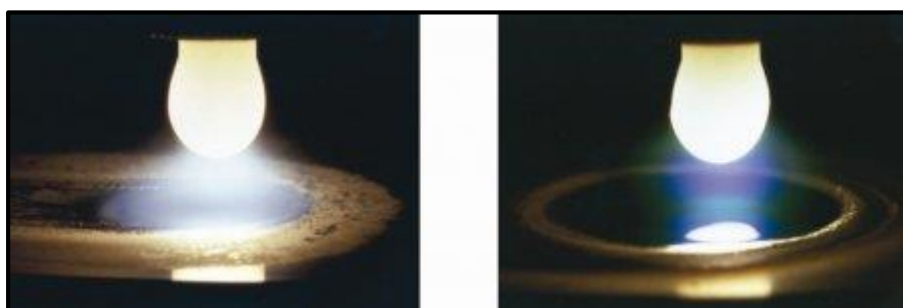
Nejčastěji používaným ochranným plynem při svařování metodou TIG je čistý Argon nebo směs plynů s argonem. [7]

Směsi Ar a He

Ve směsi jsou propojeny výhodné vlastnosti obou plynů a pro svařování metodou TIG se nejčastěji používají kombinace (70% Ar + 30% He, 50% Ar + 50% He, 30% Ar + 70% He). Rozdíl při svařování v ochranné atmosféře Ar nebo v ochranné atmosféře He lze vidět na obrázku č. 31. [7]

He zvyšuje napětí na oblouku a tepelný výkon oblouku => pozitivní vliv na tvar a rozměr svaru. [7]

Směsi Ar + He se používají hlavně pro kovy s vysokou tepelnou vodivostí – jako jsou měď a hliník. [7]



Obr. č. 31: Vliv kinetické energie plynu při svařování střídavým proudem, metodou TIG Ar – vlevo, He – vpravo [22]

Směsi Ar a H₂

Mají podobné účinky jako směsi Ar a He. Zlepšuje energetickou bilanci oblouku díky velmi vysoké tepelné vodivosti. [7]

Vodík v 5 % až 10 % snižuje množství oxidů ve svarové lázni => vyšší čistota povrchu svaru. [7]

Vodík podílem až 10% je schopný zlepšovat hloubku závaru, tvar a i rychlost svařování (30 – 50%). [7]

Směsi Ar + H₂ se používají jenom pro svařování vysoce legovaných austenitických, austeniticko-feritických chrom-niklových ocelí a slitin niklu. Tato směs ochranných plynů se nesmí používat při svařování martenzitických ocelí a feritických chromniklových ocelí, protože by způsobovala vodíkové praskání (prasknutí za studena). Zároveň se nesmí používat pro svařování hliníku, mědi a jejich slitin, protože by mohlo docházet ke zvýšení pórovitosti svaru. [7]

Směsi Ar a N₂

Dusík stejně jako vodík je dvouatomovým plynem, který disponuje vyšší tepelnou vodivostí a přenáší do svarové lázně větší podíl tepla. [7]

Obsah dusíku je přibližně 10% v této směsi a používá se pro svařování hlavně mědi a její slitin. [7]

Formovací plyny

Lze použít inertní, redukční nebo nereagující se svařovaným materiálem. Používají se proti oxidaci kořene svaru a vysoce vyhřáté oblasti okolí základního materiálu. [7]

Formovací plyn ve složení Ar + H₂ (2 až 10 % vodíku) nebo směs Ar + N₂ (5 až 20 % dusíku) lze použít proti oxidaci kořene svaru u vysoce legovaných austenitických ocelí a niklových slitin (tyto materiály nejsou náchylné na vodíkové praskání). [7]

V případě ochrany kořene svaru proti oxidaci u Ti, Zr, martenzitických a feritických ocelí nelze použít předešlé směsi. Jak už bylo dříve řečeno, i zde by způsobovaly praskání za studena (vodíkové praskání) nebo pórovitost. Pro takové účely se používá směs inertních plynů He a Ar. [7]

Příklad funkce formovacího plynu lze vidět při svařování trubek nebo dutých těles ve svislé poloze. Formovací plyn je těžší než vzduch => Ar se musí přivádět do spodní části svařovaného místa => vytěsni vzduch směrem nahoru (bez promísení). V případě formovacího plynu He nebo směsi N₂ nebo H₂ se přivádí tento plyn do horní části svařovaného místa, protože je lehčí než vzduch a vytlačuje ho směrem dolů (bez promísení). [7]

4.14 Přídavné materiály

Rozdělují se [7], [19]:

- a) Svařovací tyčky – pro ruční svařování (Ø 1 až 8 mm, délka 600 až 1000 mm, plně pro svařování, plněné legujícími a karbidickými přísadami pro navařování)
- b) Svařovací dráty – pro strojní svařování navinuté na cívkách (Ø 0,6 až 2,4 mm, pro navařování až Ø 5mm)

Přídavné materiály a jejich funkce [7], [19]:

- Doplnění objemu svarového kovu a vytvořit svar požadovaného tvaru a průřezu
- Legovat svar přísadami, které provádějí desoxidaci a pozitivně ovlivňují metalurgické děje (zlepšují materiálové vlastnosti) ve svarovém kovu

Přídavné materiály a zásady pro jejich použití [7], [19]:

- Chemické složení má být stejné nebo podobné jako základní materiál
- V případě svařování dynamicky zatěžovaných konstrukcí z oceli => přídavný materiál má mít lepší mechanické vlastnosti než základní materiál
- V případě svařování materiálů s náchylností k horkým trhlinám => přídavný materiál ke snížení této praskavosti
- V případě svařování materiálů s vysokou korozivzdorností => přídavný materiál o stejné čistotě a stejném chemické složení jako základní materiál
- V případě svařování materiálů s vysokou korozivzdorností, ale legované Ti (stabilizace) => přídavný materiál stabilizovaný Nb za účelem nižšího propalu při průchodu elektrického oblouku

Označení přídavných materiálů [7], [19]:

Lze označovat podle dvou rozdílných klasifikačních systémů a nelze je srovnávat!

- Systém A – vychází z velikosti meze kluzu a minimální nárazové práce 47 J čistého svarového kovu při určité pokojové teplotě

- Systém B – vychází z velikosti meze pevnosti čistého svarového kovu a jeho minimální nárazové práce 27 J při určité teplotě

Př. označení přídatného materiálu pro nelegované oceli podle klasifikačního systému A [7]:
Tyč EN ISO 636 – W 46 3 W3Si1

EN ISO 636 = číslo normy

W = tyč /drát nebo navařený kov obloukovým svařováním netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu

46 = do meze kluzu 460 MPa svařované oceli

3 = minimální nárazová práce 47 J při teplotě – 30 °C

W3Si1 = chemické složení (viz další kapitola)

4.14.1 Přídatné materiály pro TIG svařování – Ø 2 x 1000 W3Si1

Jedná se o svařovací W3Si1 viz tab. č. 10, který se používá pro svařování obyčejných a jemnozrných konstrukčních ocelí. Obvyklé svařování je DC-. Cena je přibližně 1279 Kč za 5 kg (= jedno balení => lze koupit pouze jako celé balení). [37], [38]

Re [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Nárazová práce KV při teplotě - 30 °C [J]	Mn [hm. %]	C [hm. %]	Si [hm. %]
470	560	26	70	1,50	0,09	0,90

Tabulka č. 10: Mechanické hodnoty čistého svarového kovu a chemické složení drátu [37]

Orientační svařovací parametry zde nebyly uvedeny, protože je ani výrobce neuvádí.

4.14.2 Přídatné materiály pro TIG pájení – Ø 1,5 x 500 Ag 20 %

Jedná se o holou nízkotavicí stříbrnou pájku Castolin RB 6110 s 20% Ag bez kadmia, dle EN 1044 se značí Ag206. Vyznačuje se velmi dobrou možností vyplňování mezer (vhodné spoje s vůlí 0,1 až 0,6 mm) a necitlivostí na přehřev. Chemické složení, mechanické vlastnosti a další lze vidět v tabulce č. 11. a 12. Barvu má jako mosaz a používá se pro spoje mechanických součástí a dekorativních předmětů z oceli, slitin mědi a čisté mědi. Obvyklé svařování je DC-. Cena s DPH za 1 kus délky 500 mm je 79 Kč. [39], [40], [41]

Re [MPa]	Rm [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Ag [hm. %]	Cu [hm. %]	Zn [hm. %]
430	560	25	20	44	35,9

Tabulka č. 11: Mechanické hodnoty čistého pájeného kovu a chemické složení pájeného kovu [39]

Teplota tavení [°C]
690 - 810

Tabulka č. 12: Rozsah teploty tavení [39]

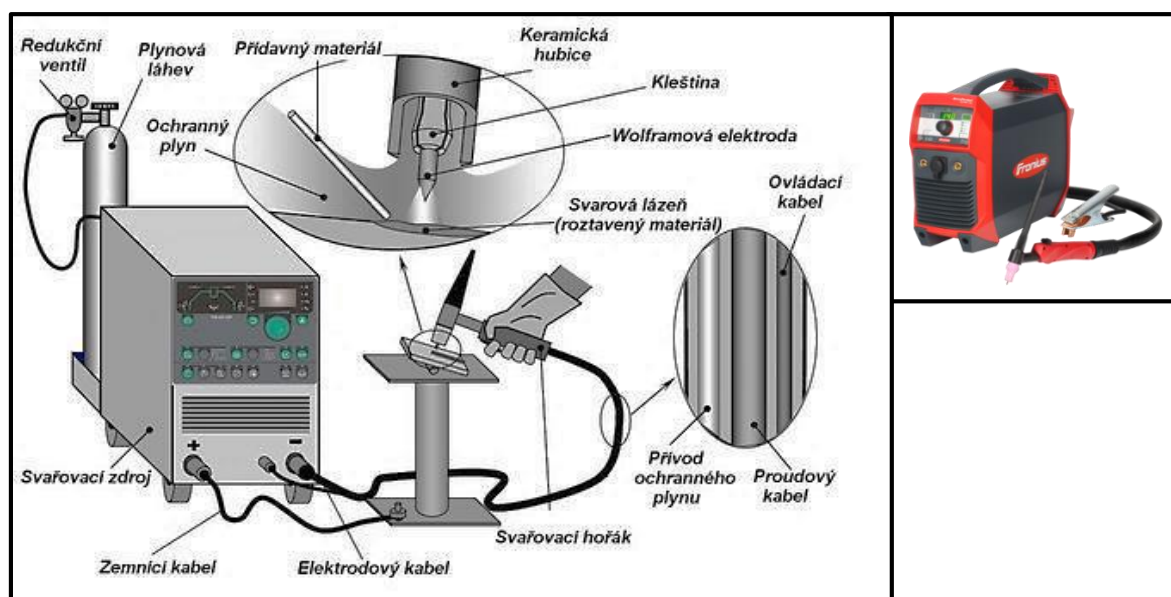
Orientační pájecí/svařovací parametry nejsou uvedeny, protože je ani výrobce neuvádí.

5 Technika ručního TIG svařování

Nezastupitelné řešení při svařování složitých prostorových konstrukcí, v malosériové a kusové výrobě. Prakticky všude, kde je potřeba vytvořit svar s velmi dobrými mechanickými (materiálovými) vlastnostmi, výborným povrchem a vysokou čistotou. Na obrázku č. 32 lze vidět schéma ručního svařování. [7]

Zásady při ručním svařování metodou TIG[6], [7]:

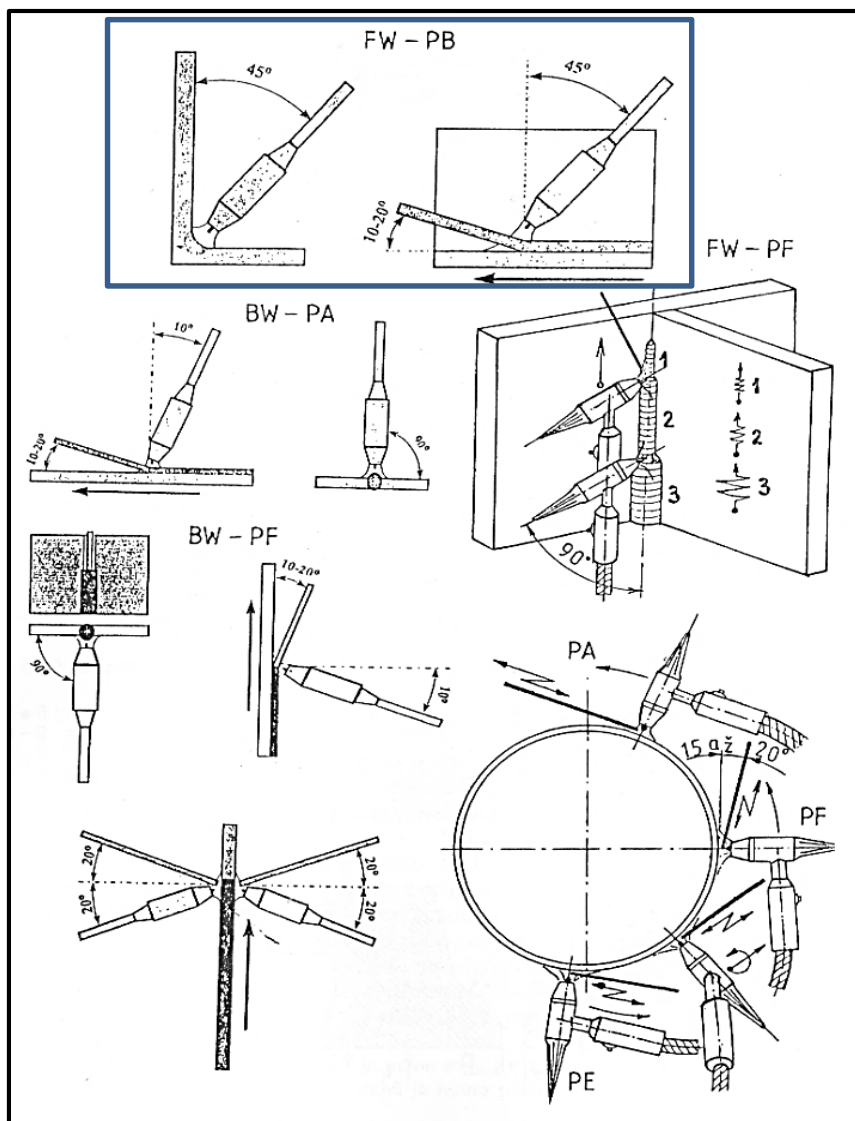
- 1) Příprava svarových ploch (založena na tloušťce a druhu svařovaného materiálu) – tvorba úkosů u lemového, I, V, U i při malých tloušťkách
- 2) Zpravidla se svařuje dopředu, drát podáván na okraj svarové lázně, povrch svaru se tvaruje podle elektrického oblouku
- 3) Lze svařovat ve všech svařovacích polohách viz obr. č. 33 a 34 – Poloha hořáku, přídavného materiálu se mění v závislosti na typu svaru, složitosti a tvaru svařence, polohy, směru svařování, dostupnosti svaru atd. V experimentální části bylo svařováno/pájeno v poloze PB (vodorovná šikmo shora – elektroda pod úhlem 45° viz modrý rámeček obr. č. 33.)
- 4) Pohyb svařovacího hořáku a přídavného drátu je klidnější než při svařování plamenem
- 5) Přídavný drát musí zůstat v ochranné oblasti (nesmí být kontaminován vzduchem => zanesení oxidů do svarové lázně – negativní vliv)



Obr. č. 32: Základní schéma ručního svařování metodou TIG a s příkladem ručního svářecího zdroje od Fronius [23], [24]

Vysunutí netavící se wolframové elektrody z plynové trysky pro [6], [7]:

- a) Tupý svar – cca 2 x průměr elektrody
- b) Koutový svar – o 3 až 5 mm (v experimentální části vysunuto o 4 mm)



Obr. č. 33: Polohy svařování metodou TIG [5]

	PA (1G, 1F)	poloha v úžlabí
	PB (2F)	vodorovná
	PC (2G)	vodorovná na svislé stěně
	PD (4F)	vodorovná nad hlavou
	PE (4G)	nad hlavou
	PF (3G, 3F, 5G up)	svislá nahoru
	PG (3G, 3F, 5g down)	svislá dolů

Obr. č. 34: Obecné svařovací polohy [42]

6 Princip a použití MIG svařování

Jedná se o svařování tavící se elektrodou v ochranných plynech (nejčastěji argon a helium nebo jejich směsi). Patří mezi nejrozšířenější metody svařování v celosvětovém měřítku. Používá se pro spojování uhlíkových, střednělegovaných a vysokolegovaných ocelí. Dále pak pro spojování slitin hliníku, mědi, niklu a i v oblasti navařování vrstev a tvrdonávarů.. Zdrojem tepla je stejně jako u TIG svařování el. oblouk. Hoří mezi základním materiálem a koncem tavící se elektrody, resp. drátu. Celý proces je chráněn inertním plynem (argon, helium nebo jejich směsi především). V porovnání s metodou TIG je MIG mnohem více produktivní metoda svařování, snadná možnost mechanizace a robotizace a větší nabídka přídavných materiálů. [7]

Schéma MIG svařování lze vidět na obr. č. 35 a 36.

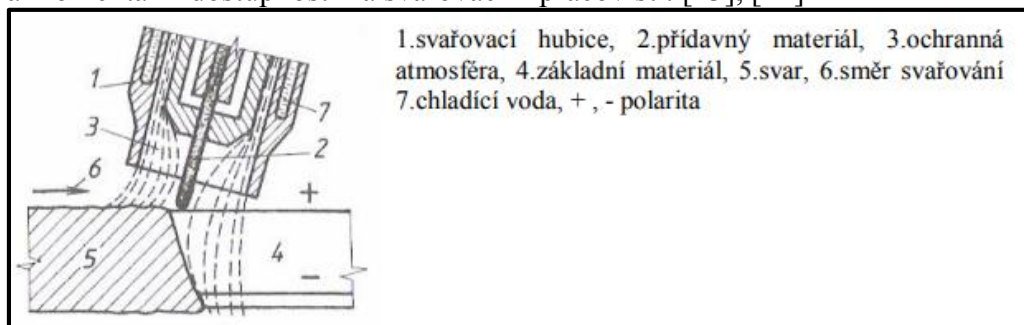
Shrnutí hlavní výhod svařování metodou MIG [7]:

- Vysoká efektivita
- Nevyžaduje se zručnost svářečského personálu v porovnání s TIG svařováním
- Snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systému svařování
- Možnost svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm
- Při svařování ve zkratovém přenosu – nižší vnesené teplo do svařence = menší deformace

Oblast použití [7]:

- nízko i vysoce legované oceli
- nerezové materiály
- hliník a hliníkové slitiny
- měď a slitiny

Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu, protože ochranný plyn ovlivňuje přenos kapek v oblouku, rozstřík, teplotní poměry v oblouku viz předešlá kapitola č. 2. 6. V experimentální části byl zvolen argon 4.6 (99,996% Ar) jak u TIG svařování/pájení, tak při MIG svařování/pájení z důvodu použitého spojovaného materiálu, ceny (nižší než u helia) a momentální dostupnosti na svařovacím pracovišti. [43], [44]



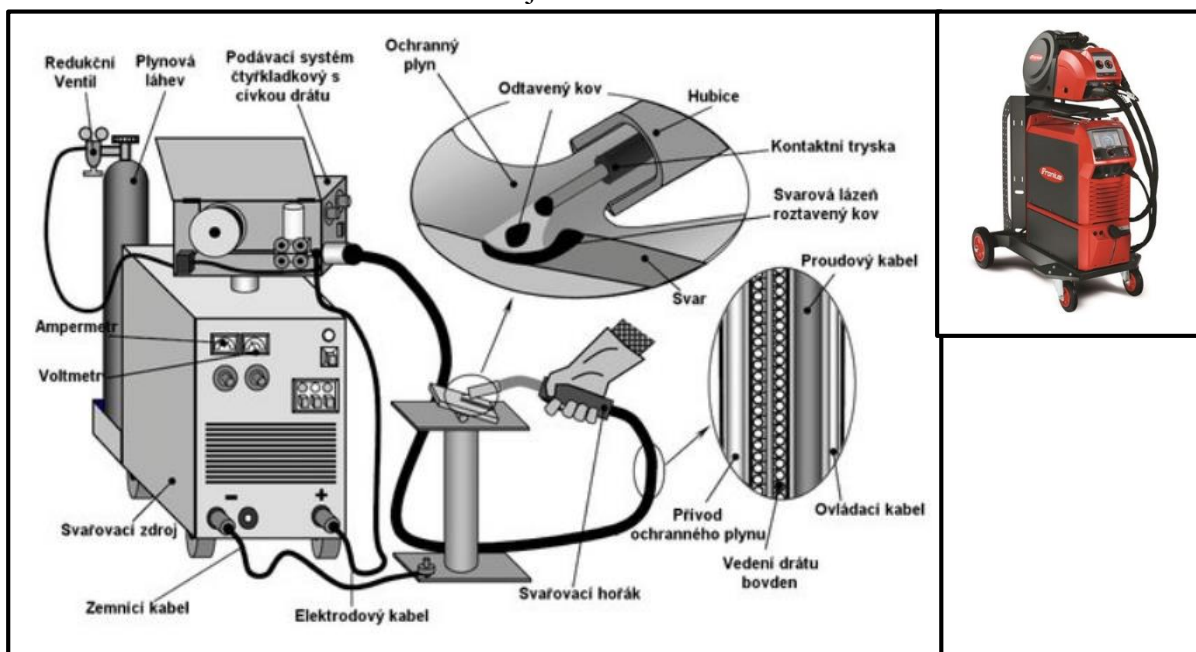
Obr. č. 35: Schéma svařování MIG [44]

7 Součásti svařovacího zařízení a technologie MIG svařování

Svařovací zařízení jsou monofunkční (pouze pro MIG/MAG) nebo multifunkční, kde je možnost navíc nastavit navíc TIG svařování a svařování obalenou elektrodou. V tomto případě byl použit svařovací zdroj pro TIG a MIG každý zvlášť viz experimentální část kapitola č. 16. [45], [46]

Základní vybavení pro MIG svařování (viz obr. č. 36) [45], [52]:

- Zdroj svařovacího proudu s řídicí jednotkou
- Svařovací hořák a multifunkční kabel hořáku s rychlospojku
- Svorka s uzemňovacím kabelem
- Podavač drátové tavicí se elektrody
- Zásobník ochranného plynu + redukční ventil
- Chladicí jednotka



Obr. č. 36: Základní schéma ručního svařování metodou MIG a vpravo svařovací zdroj od Fronius [45], [46]

7.1 Svařovací zdroje

Obvykle se pro svařování metodou MIG používá svařovací zdroj se stejnosměrným proudem (+ pól zdroje je připojen na svařovací elektrodu). K dispozici jsou klasické usměrňovače a invertory, které mají plochou statickou charakteristiku (tzn. konstantní napětí se samoregulační schopností udržování konstantní délky el. oblouku viz obr. č. 37). Tato samoregulace je založena na výrazné změně svařovacího proudu při relativně malé změně délky el. oblouku a tím i el. napětí na oblouku. Takto lze regulovat pouze při konstantním rychlosti podávání drátu. Při změně délky el. oblouku se změní napětí a dle pohybu pracovního bodu na statické charakteristice se mění svařovací proud. Při dlouhém oblouku se redukuje proud i rychlost odtavování elektrody a při konstantní rychlosti podávání drátu se začne drát přibližovat ke svarové lázni a

el. oblouk se tím zkrátí. V opačném případě při krátkém oblouku a poklesu napětí se zvyšuje intenzita proudu a odtavování elektrody je rychlejší => délka el. oblouku se tím zvýší a v reálném procesu svařování osciluje okolo nastavené „rovnovážné“ hodnoty. [7], [52]

Rozdělení svař. zdrojů [7], [52]:

- a) Kompaktní zdroje - Podavač drátu je ve společné skříni se zdrojem. Typické pro zdroje s nízkým až středním výkonem do 250 až 300 A. Hořák je zde chlazen proudícím ochranným plynem.
- b) Výkonné zdroje - chladicí jednotka je ve společné skříni se zdrojem, ale podavač svař. elektrody je oddělen. Výkon u těchto zdrojů je cca 500 A.

Technické možnosti moderních svařovacích zdrojů (nadstandardní funkce) [7]:

Za účelem zlepšování svařovacího procesu jsou využívány např. Horký start, databáze svařovacích programů pro většinu přídavných materiálů, synergické řízení, řízený zapalovací cyklus, funkce udržování konstantní délky oblouku, ukončení svařovacího cyklu proudovým impulzem. [7]

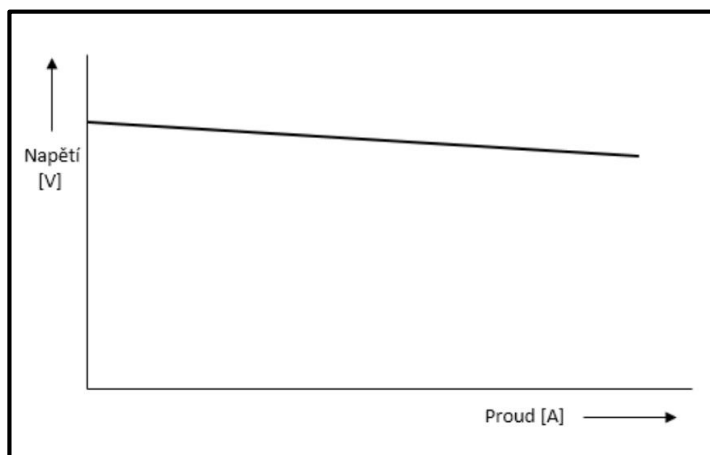
Horký start lze využít pro natavení začátku svarového spoje u materiálů s vysokou tepelnou vodivostí. [7]

Synergické řízení svařovacího procesu je vhodné díky své jednoduchosti, protože při změně jednoho parametru (např. tloušťka materiálu, proud, rychlost podávání drátu atd.) lze ovládat všechny ostatní parametry. [7]

Řízený zapalovací cyklus – zajišťuje velice klidné zapálení el. oblouku v přesně nadefinovaném místě svaru a to především při mechanizovaném a robotizovaném svařování. [7]

Funkce udržování konstantní délky el. oblouku – řádově v mikrosekundách se srovnávají reálné parametry svařování s nastavenými. Nastavená délka el. oblouku se udržuje bez ohledu na vzdálenost svařovacího hořáku od svařovaného materiálu. [7]

Poslední zmiňovanou funkcí je ukončení svař. cyklu proudovým impulsem. Jedná se o proudový impuls, který na konci svařovacího cyklu „odstříhne“ tvořící se kapku kovu a konec svařovacího drátu zůstane rovný. Netvoří se zde kapka jako u klasických svařovacích zdrojů při svařování metodou MIG. Tato kapka vzniká z důvodu poklesu proudu pro vyplnění koncového kráteru. [7]



Obr. č. 37: Plochá statická charakteristika [52]

7.2 Podavače drátu

Zaručuje rovnoměrné podávání svař. elektrody (drátu) bez jeho deformace a poškození povrchu. Svař. drát je veden bowdenem mezi svářecím zdrojem a kontaktním průvlakem. Takový podavač lze vidět na obr. č. 40. [47]

Nejčastěji se používají 2. a 4. kladkové posuvové systémy. V některých případech ale i s mimoběžnými osami. Výhodou 4. kladkových systémů je možnost bezproblémového posuvu i obtížně transportovatelných drátů. Rychlost posuvu drátu je nastavitelná obvykle v rozmezí od 1 do cca 22 m/min (možnost je i dosáhnout vyšší rychlosti). Další prvky svařovacího zařízení, které mají vliv na bezproblémový rovnoměrný posuv drátu, jsou [43], [50], [52]:

- a) Přítlačný tlak podávacích kladek, který je zapotřebí zvolit tak, aby nedocházelo k deformaci drátové elektrody, a aby byl přitom zajištěn spolehlivý transport svařovacího drátu.
- b) Odpovídající typ podávacích kladek, protože různé druhy přídavných materiálů vyžadují použití podávacích kladek s odpovídajícím tvarem drážky

Svařovací proud pro zvolené svařovací napětí se upravuje zvyšováním nebo snižováním rychlosti podáváním drátu (m/min), které lze taktéž vidět v experimentální části v tab. č. 29. [43], [50], [52]

7.2.1 Volná délka drátu – výlet drátu – výběh drátu

Všechny tři pojmy popisují to samé. Výlet drátu je měřen od konce kontaktního průvlaku po oblouk a platí obecné pravidlo, že je roven 10-krát průměru svařovacího drátu viz obr. č. 38. [7], [47]

Nicméně na skutečnou a přesnou délku výletu drátu mají vliv 2 parametry [7]:

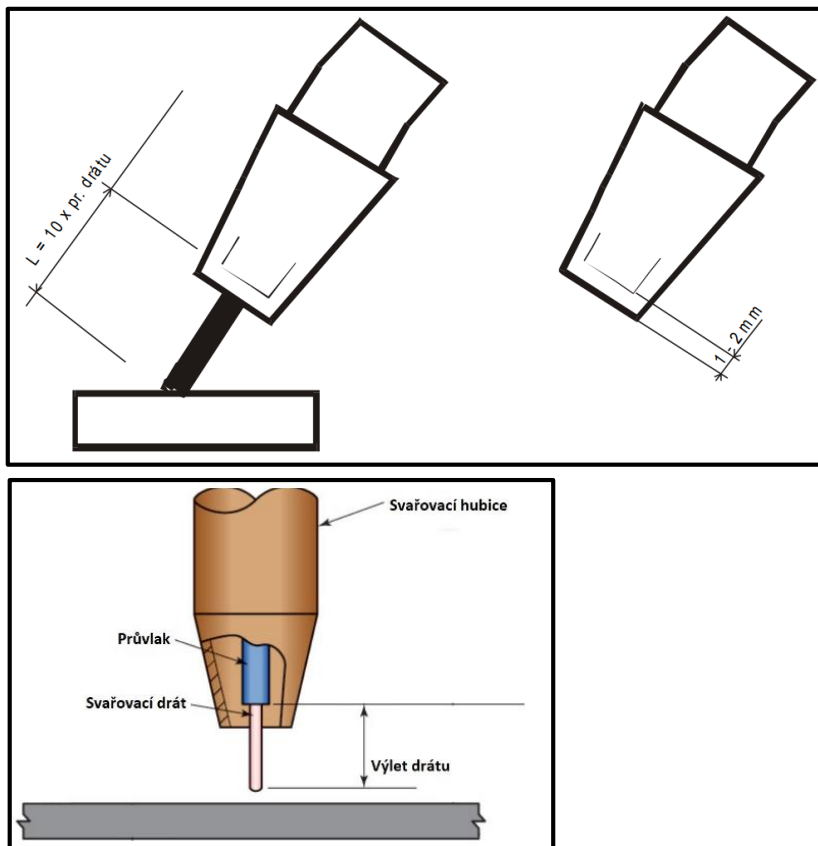
- Typ přenosu kovu
- Ochranný plyn

Z toho plyne, že přesnější vztah (5) je (s ohledem na použití ochranného plynu argon 4.6) [7]:

$$L = 7 + 5 \cdot d = 7 + 5 \cdot 1 = 12 \text{ mm} \quad (5)$$

L...výlet drátu v milimetrech

d... průměr svařovacího drátu v milimetrech



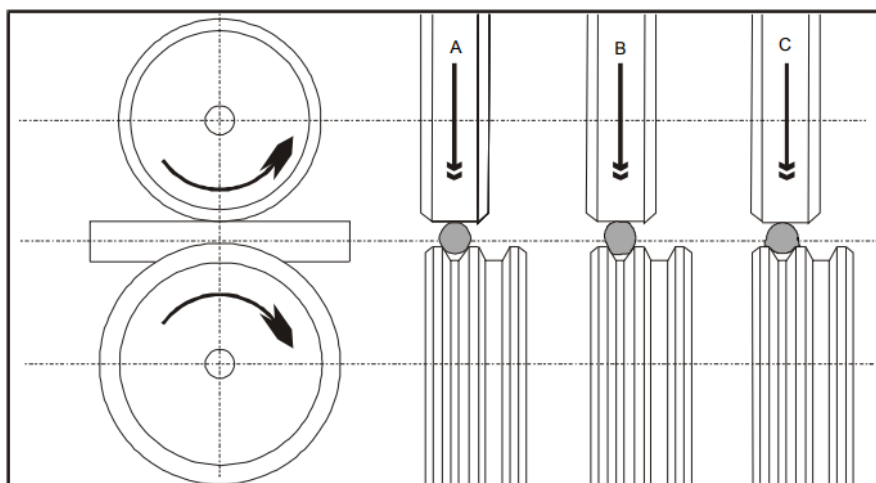
Obr. č. 38: Vzdálenost napájecího prův laku od základního materiálu (rychlost přisunutí svařovacího drátu neboli výlet drátu) se obecně blíží 10-násobku průměru svařovacího drátu. Vpravo nahoře je vidět utopení prův laku ve svařovací hubici. [47], [48], [51]

V experimentální části bylo ale nastaveno na přesnou délku výletu drátu 12 mm při MIG svařování/pájení, protože průměr drátu při MIG svařování/pájení byl 1 mm viz tab. č. 29 v experimentální části. Tato hodnota napomáhá dosažení určité kvality svarových/pájených spojů.

Zavedení svařovacího/pájecího drátu do kladky podavače (viz obr. č. 39) [51]:

- a) správné zavedení – žlábek kladky odpovídá průměru elektrody a nastavení přitlaku je správně (3 kg)
- b) špatné zavedení – žlábek kladky je nedostatečně velký (např. drát průměr 1 mm není možné hnát kladkou s drážkou pro drát průměru 0,8 mm).
- c) špatné zavedení – příliš velká přitlačná síla, která deformuje elektrodu

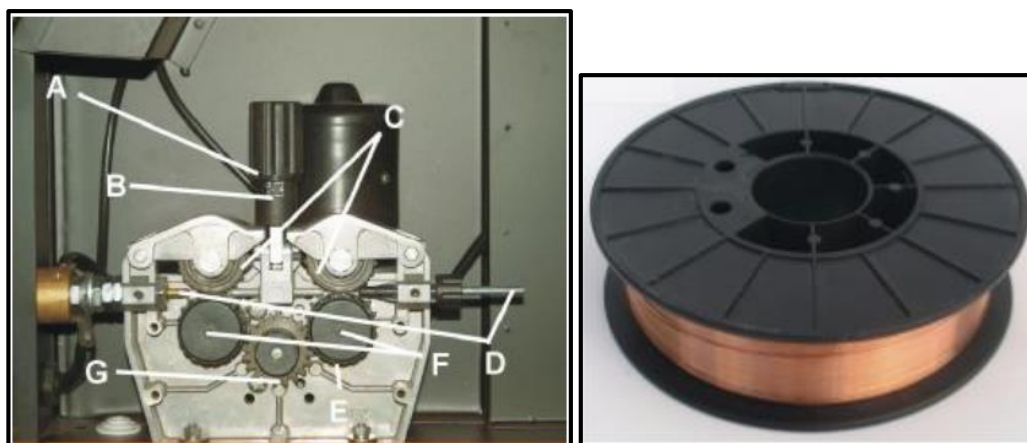
Možné problémy – při nastavení příliš velkého tlaku dochází k poškození kladky a ložisek podavače. Také může dojít při zablokování posuvu drátu k jeho deformaci a zatlačení zdeformovaného drátu do bowdenu hořáku.



Obr. č. 39: Zobrazení zavedení svařovacího drátu do kladky podavače a) správné b), c) špatné [51]

Nepravidelný posuv drátu lze odstranit výměnou kontaktní trysky nebo bowdenu hořáku. [51]

Cívka s navinutým svařovacím/pájecím drátem se nesmí dotýkat skříně, ve kterém je tato cívka umístěna => musí se volně otáčet, ale při zastavení posuvu drátu se nesmí otáčet setrvačností neboli „dobíhat“. Příklad cívky lze vidět na obr. č. 41. V případě, že kladky nebudou plynule posouvat svařovací drát, tak svarový/pájený spoj bude tímto nepříznivě ovlivněn (velký rozstřík, póry atd.) Kladky pro posuv svařovacího drátu musí vyhovovat jak průměrem drážky, tak i materiálem. Kladky musí svařovací drát plynule posouvat a to i při jeho částečném přibrždění. V případě úplného zastavení svařovacího drátu musí kladky prokluzovat. [51]



Obr. č. 40: Podavač svařovacího drátu [50] Obr. č. 41: Cívka s navinutým svař. drátem [49]
(A - matice přítlaku, B - stupnice přítlaku, C - přítlačná kladka/rameno, D - vedení drátu, E - podávací kladka s pojistnou maticí, F - pojistná matice, G - hlavní hnací ozubené kolo)

Matice přítlaku – pomocí pružiny uvnitř matice se nastavuje tlak kladky na svařovací drát

Stupnice přítlaku - udává nastavení přítlaku

Přítlačná kladka/rameno – tlačí svařovací drát do drážky kladky (poháněno ozubenými převody)

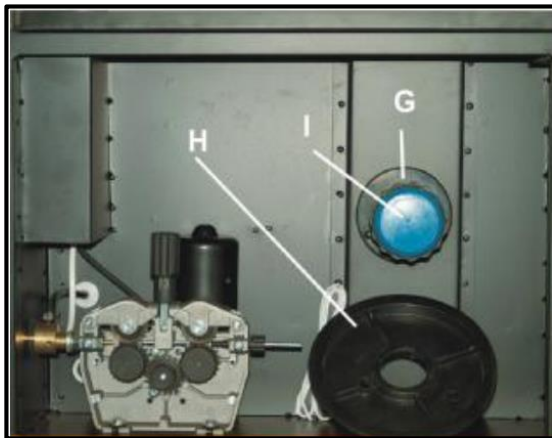
Vedení drátu – zajišťuje vedení svařovacího drátu podavačem. Nesmí dojít k vybočení

z osy.

Podávací kladka s pojistnou maticí – drážka podávací kladky musí být rovna průměru použitého svařovacího drátu. Pojistná matice zajišťuje upevnění podávací kladky. Při změně průměru svařovacího drátu se musí tato matice uvolnit a podávací kladku lze otočit. [50]

Hlavní hnací ozubené kolo – jedná se o centrální pohon, který přenáší pohyb na obě hnací kladky pomocí ozubení. [50]

Na obr. č. 42 níže lze vidět držák cívky, který je pod tímto obrázkem detailně rozebrán na jednotlivé komponenty.



Obr. č. 42: Držák cívky (G - unášec cívky drátu, H - redukce cívky, I - pojistná matice) [50]

Unášec cívky drátu – správně zapojuje cívku se svařovacím drátem [50]

Redukce cívky – otvor v redukci na vnitřní straně zapadá do čepu na držáku cívky, aby se cívka samovolně neotáčela [50]

Pojistná matice – jejím úkolem je upevňovat cívku svařovacího drátu na držák cívky. Za touto maticí je brzda, která nesmí být příliš utažena, protože svařovací drát by měl mezi kladkami prokluzovat v případě, že by byl násilím přidržen. Cívka se nesmí volně protáčet, protože při použití vyšší rychlosti posuvu svařovacího drátu by se mohl na cívce po zastavení posuvu uvolnit a zamotat. [50]

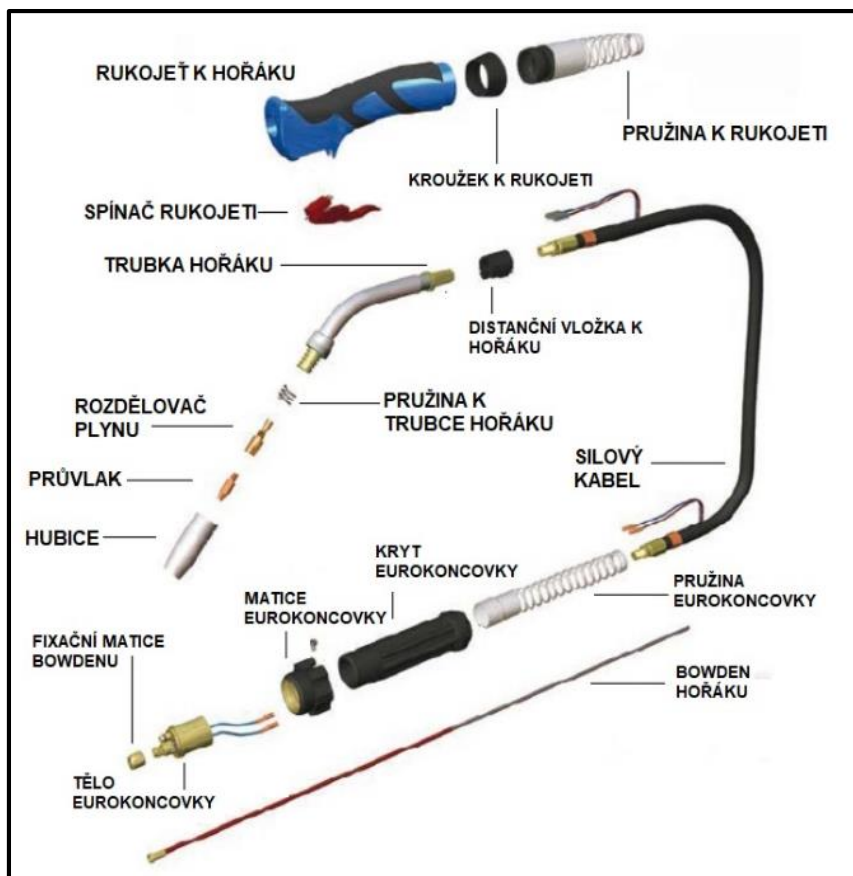
Příklad kompletní skříň v praxi ARC – H a.s. v Plzni lze vidět na obr. č. 43.



Obr. č. 43: Kompletní skříň s cívkou, podavačem a pájecím drátem CuSi3 ve společnosti ARC-H a.s., foceno autorem DP při experimentu

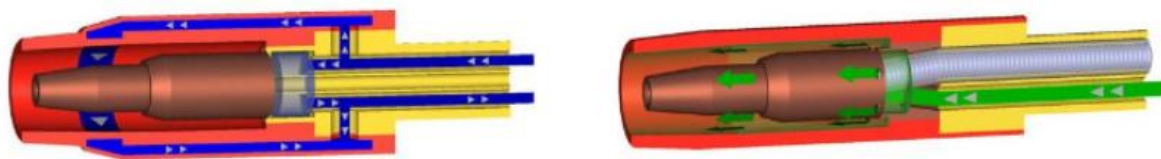
7.3 Svařovací hořák

Svařovací hořák při MIG svařování se vybírá podle pracovních podmínek a pokud možno s co nejkratším kabelem. Před připojením svařovacího hořáku je nutné se ujistit, zdali použité vedení svařovacího/pájecího drátu (neboli bowden) je roven svým průměrem průměru svařovacího drátu. Pro ocelové a nerezové svařovací dráty se používají ocelové bowdeny, při svařování např. měkkým svařovacím drátem (hliníkové slitiny) se používá teflonový bowden. V experimentální části diplomové práce bylo použito při svařování MIG ocelový bowden a při MIG pájení (MIG brazing) byl použit teflonový bowden, protože jako pájecí drát byl použit CuSi3. Kompletní složení svařovacího hořáku pro MIG svařování/pájení lze vidět na obr. č. 44. [51]

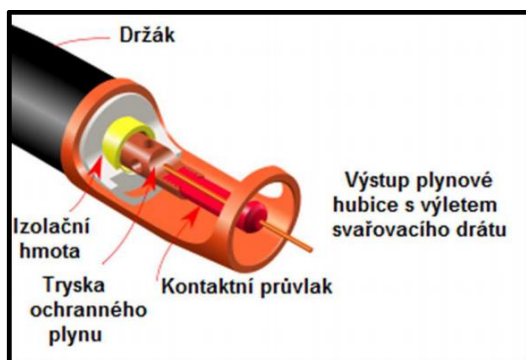


Obr. č. 44: Svařovací hořák MIG detailně [47]

V případě nízkého příkonu jsou svařovací hořáky chlazený procházejícím ochranným plynem a v případě vyšších příkonů (od 150 A) jsou chlazený proudící kapalinou v uzavřeném chladicím okruhu, viz obr. č. 45. Většina svařovacích hořáků je vybavena tvarovou trubkou na jejíž konci je umístěn kontaktní průvlek pro napájení drátu el. proudem, pak je zde vyústění trubky pro přívod ochranného plynu a plynová tryska. Lze vidět na obr. č. 44. [7], [52]



Obr. č. 45: Vlevo chlazení vodou a vpravo chlazení proudícím ochranným plynem [52]



Obr. č. 46: Schéma svařovacího hořáku v místě pod svařovací hubicí při MIG svařování/pájení [54]

Kontaktní proudový průvlek slouží pro rovnoměrné napájení svařovacího drátu svařovacím proudem. Z důvodu dobré el. vodivosti bývá vyroben ze slitiny Cu, kde je tato slitina legována Cr nebo Zr za účelem zvýšení odolnosti proti opotřebení. [50], [51]

Průměr otvoru pro vedení svařovacího drátu je o 0,2 mm větší než průměr drátu. To je z důvodu snížení opotřebení, protože tím může dojít k nepravidelnostem při napájení proudem a vychylování vedení svařovacího drátu ve svarovém úkosu. [50], [51]

Plynová tryska (= svařovací hubice) slouží k proudění ochranného plynu kolem el. oblouku a svarového kovu. Je vyrobena z galvanicky pochromované Cu, aby se zamezilo ulpívání kapek kovu na ní. [50], [51]

Řízení průběhu svařování spínačem na svařovacím hořáku lze 2 způsoby viz kapitola č. 4.9, kde už to je zmíněné. [50], [51]

7.4 Zemnicí kabel

Připojí se na svařovací stůl (nebo přímo na svařovaný materiál), na kterém se v blízkosti nachází svařovaný základní materiál. V místě spojení musí být např. svařovací stůl očištěn od rzi, nebo barvy. Špatné uzemnění způsobuje přehřívání zemnicího kabelu a svěrky => oblouk se bude obtížně zapalovat a bude nestabilně hořet. S tím pak bude souviset pokles svařovacího proudu, který je častou příčinou nekvalitního sváru. To platí i pro TIG svařování v předešlých kapitolách. [50], [51]

7.5 Ochranný plyn – tlaková láhev a redukční ventil

Tlakové láhve s ochranným plynem se připojí redukčním ventilem a k němu přívodní hadicí ke svářecímu zdroji. Nastaví se průtok plynu podle průměru drátu a proudu. Kvalita, typ a správně nastavený průtok plynu významně ovlivňuje kvalitu svarového/pájeného spoje. Redukční ventil (viz obr. č. 47) musí být před otevřením lahve uzavřen. Kdyby tomu tak nebylo, tak by náraz tlaku poškodil odběrový manometr. Taktéž platí i pro TIG svařování. [65]

Ochranný plyn nám ovlivňuje tyto kritéria [65]:

- Stabilitu oblouku
- Optimální smáčivost pájky
- Vlastnosti přenosu přídavného materiálu

- Řízení příkonu tepelné energie do procesu pájení

Při MIG svařování lze zvýšit tepelnou vodivost (viz obr. č. 10, kapitola č. 2.6) „čistého“ argonu přidáním helia, které pomáhá k dosažení většího závaru. V případě použití čistého argonu je obtížné dosáhnout většího závaru, viz experimentální část kapitola č. 18.1.2. Heliem se zvýší proudová hustota => větší množství tepla do svarového spoje. Profil housenky svaru je pak hluboký. [65]



Obr. č. 47: Redukční ventil pro ochranný plyn argon (s tlakem do 200 nebo 300 barů) [53]

8 Přenos kovu

Závisí především na svařovacích parametrech (el. proudu a napětí) a patří mezi základní charakteristiky metody svařování el. obloukem tavící se elektrodou. Dále je přenos ovlivněn složením ochranného plynu, druhu přídavného materiálu a technikou svařování. [7], [50], [52]

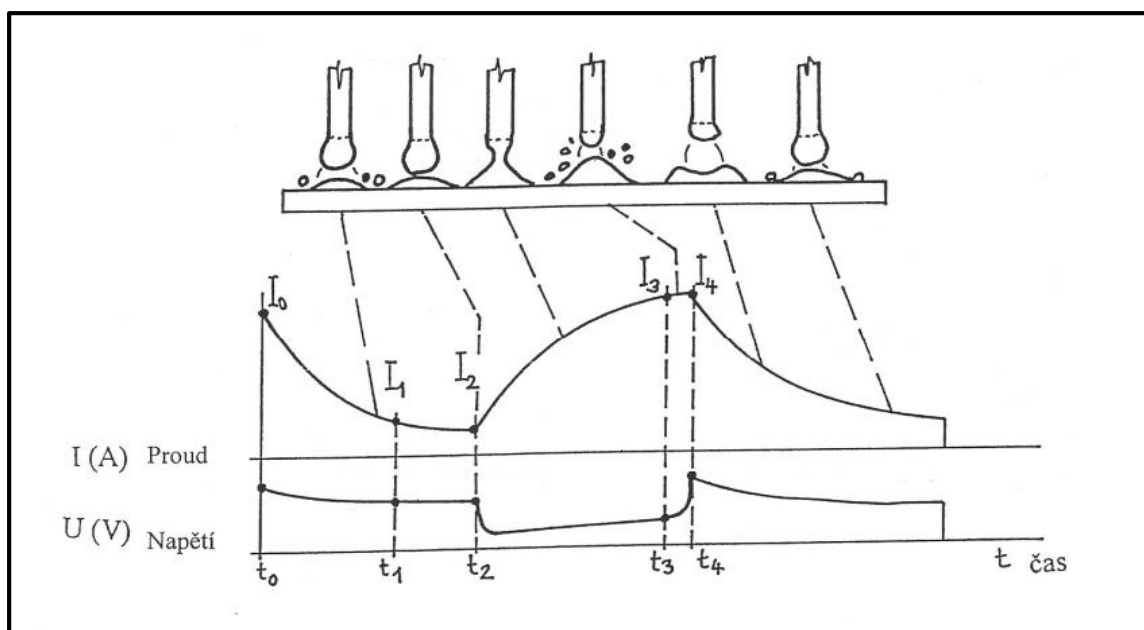
Typy přenosu kovu v oblouku:

- a) Krátký el. oblouk se zkratovým přenosem kovu

Jedná se o zkratový způsob přenosu kovu, při kterém dochází k přerušování el. oblouku zkratem a odděluje se část kovu svařovacího drátu. Rozsah svař. proudu je 60 - 180A a napětí 14 - 22V. V experimentální části byly tyto rozsahy splněny. Se vzrůstajícím napětím a klesajícím proudem se snižuje frekvence kapek kovu, ale rozstřík kovu je velký. Lze ho dosáhnout ve všech typech ochranných plynů, ale je nutné tomu podřídit napětí. Používá se pro při svařování tenkých plechů, kořenových vrstev tupých svarů, překlenutí širších mezer. Pro představu jej lze vidět na obr. č. 48. Závislost napětí a proudu na čase v průběhu zkratového přenosu kovu lze vidět ve schématu na obr. č. 49. Tento typ přenosu kovu byl využit v experimentální části při MIG svařování pozinkovaných plechů. [7], [50], [52]



Obr. č. 48: Krátký el. oblouk [55]



Obr. č. 49: Schéma zkratového přenosu kovu [44]

b) Krátký el. oblouk se zrychleným zkratovým přenosem kovu

V porovnání s předchozím přenosem kovu se tento vyznačuje vyšším proudem (nad 200 A) a rychlost podávání se pohybuje v oblasti sprchového přenosu. Vysoká frekvence zkratů neumožňuje vytvoření velké kapky jako u předchozího typu přenosu kovu. Tak-též sklon svařovacího hořáku a vzdálenost je vyšší => je nutné zvýšit průtok ochranného plynu (20-30 l/min) Lze takto svařovat materiály tloušťky od 2 mm, kořeny svarů a polohové sváry. [7], [50], [52]

c) Přečtový dlouhý el. oblouk s nepravidelnými zkraty

Napětí se pohybuje od 22 do 28 V a proud od 190 do 300 A. Vlivem takto vysoké hodnoty svařovacího proudu se konec svař. drátu nataví do velké kapky viz obr. č. 50. Tato kapka je mimo osu z důvodu reakčního tlaku par. Oblouk proudí po roztaveném konci svařovacího drátu, až mag. síly přeruší můstek. Kapka kovu je sice vymrštěna vysokou rychlostí do svarové lázně, ale s malou frekvencí (5 – 40 kapek/s). Největší nevýhodou je vznik velkého rozstříku právě z důvodu vyosení kapky a nepravidelných zkratů. Většinou se tento typ přenosu kovu nepoužívá z důvodu vzniku hrubé svarové housenky. [7], [50], [52]



Obr. č. 50: Přechodový oblouk [56]

d) Dlouhý el. oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem kovu (sprchový přenos)

Napětí se pohybuje v rozmezí 28 až 40V a proud od 200 do 500A. Účelem je získat drobné kapky kovu, které jsou vlivem mag. pole „ustřiženy“. Ty jsou pak osově urychleny ve vysoké frekvenci (150 – 350 Hz) směrem do svarové lázně. Během oddělování kapky kovu je proud vcelku konstantní, ale v okamžiku přerušení můstku je zřetelné mírné zvýšení. Oblouk nezhasíná a tím se do základního materiálu přenáší velké množství tepla => sprchový přenos se vyznačuje velkou hloubkou závaru. Ten roste lineárně s hodnotou proudu a klidným hořením oblouku. Povrch svarové housenky je hladký, čistý a s plynulým přechodem do základního materiálu. Většinou bez rozstříku. Tento typ přenosu kovu lze využít pro výplňové housenky svarů středních a velkých tlouštěk. Lze takto svařovat jen v některých polohách (především ve vodorovné). Tvar sprchového přenosu kovu lze vidět níže na obr. č. 51. [7], [50], [52]



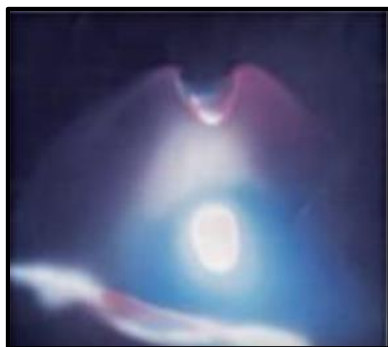
Obr. č. 51: Sprchový přenos kovu [55]

e) Impulzní bezzkratový el. oblouk

Jedná se o bezzkratový přenos kovu viz obr. č. 52. Parametry svařování/pájení tohoto typu překrývají oblast zkratového, přechodového a sprchového přenosu kovu. Řízení impulsního přenosu kovu probíhá danou frekvencí amplitudy impulsního proudu. [7], [50], [52]

Základní proud je nízký (od 20 do 50 A). Jeho funkcí je udržet ionizaci sloupce el. oblouku (vedení proudu). [7], [50], [52]

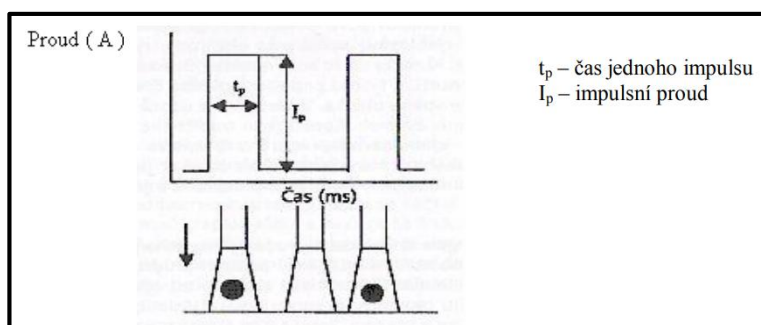
Impulsní proud (nutné nastavit) je časově i tvarově řízený a na konci amplitudy se odtavuje kapka kovu, viz obr. č. 53. V celém průběhu amplitudy impulsního proudu hoří el. oblouk. Díky závislosti frekvenci impulsů na proudu se dokáže zajistit téměř konstantní velikost kapky kovu. Vzhledem k nízkému svařovacímu proudu je i frekvence impulsů nízká => kapka kovu dosáhne optimální velikosti. To platí i v opačném případě, kdy při vysokém proudu musí být i vysoká frekvence impulsů. Platí zde vztah $f = 1/T_p$, kde f je frekvence impulsů a T_p je doba trvání impulsu. Většinou je frekvence impulsů od 25 do 500 Hz (výjimečně 1 kHz).



Obr. č. 52: Impulzní bezzkratový oblouk [56]

Výhody [7], [52] :

- Méně vneseného tepla z důvodu, že efektivní hodnota impulsního proudu je nižší než u konstantního
- Možnost spojovat tenké plechy ve všech polohách
- Možnost tavit i dráty větších průměrů díky vysokému impulsnímu proudu. Dráty větších průměrů bývají levnější => ekonomické hledisko
- Jemná kresba povrchu spoje
- Široká možnost aplikace z důvodu volně nastavitelných parametrů jako např. frekvence, amplituda, napětí a proudu.



Obr. č. 53: Impulsní přenos kovu v závislosti na čase a proudu [52]

Tento typ přenosu kovu byl použit v experimentální části při MIG tvrdém pájení pozinkovaných plechů (MIG brazing).

f) Moderovaný bezzkratový přenos kovu – zrychlený zkratový přenos kovu

Napětí je od 40 do 50 V a proud od 450 do 750 A. Těmto parametrů odpovídá i rychlost podávání drátu (od 20 do 45 m/min). Průtok ochranného plynu je 18 - 25 l/min. Kapky kovu jsou přibližně velké jako průměr přídavného materiálu. Jsou odtavovány vysokou frekvencí. Díky těmto vysokým svařovacím parametrům lze zvýšit rychlost svařování i při velkých tloušťkách základního materiálu. [7]

g) Dlouhý el. oblouk s rotujícím přenosem kovu (rotující přenos)

Svařovací parametry jsou téměř totožné jako u předchozího typu přenosu kovu. Je

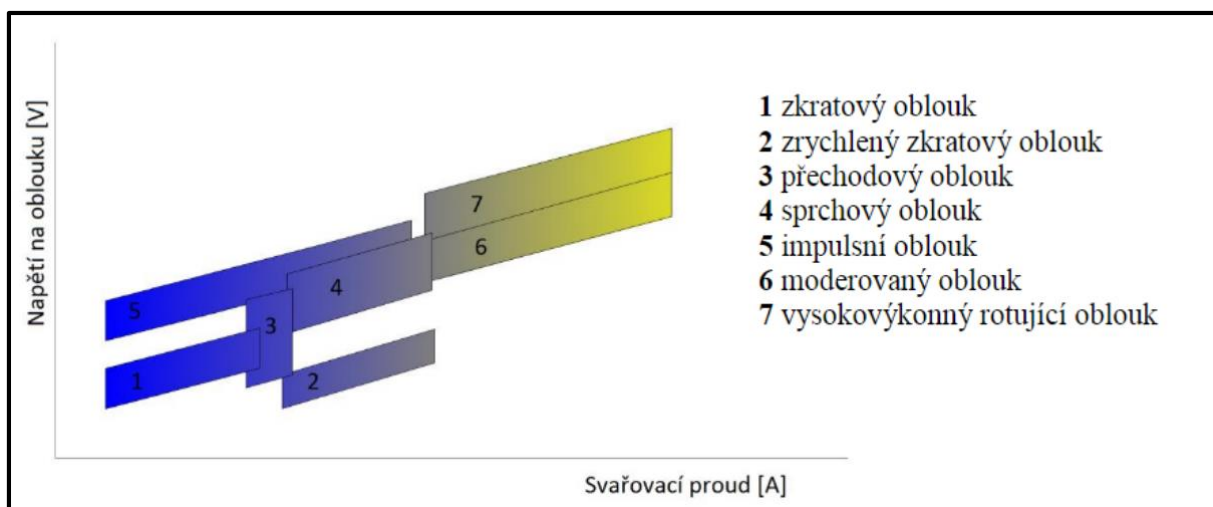
zde rozdíl pouze v hodnotě napětí, které se zvýší až na 65 V a větší volné délce svařovacího drátu (nad 20 mm). Vysoká hodnota intenzity svařovacího proudu a volná délka svařovacího drátu je svařovací drát přehříván téměř na teplotu tavení. Za to může odporové teplo. Konec svařovacího drátu ve vysoce plastickém stavu je roztáčen díky síle magnetického pole. Odtavující se kapky kovu vytvoří kuželovou plochu, viz obr. č. 54. [7], [52]

Tento typ přenosu umožňuje dobrý závar do boků svaru => vznik hlubokého a širokého svarového spoje, který má miskovitý profil. Vhodné pro svařování tlustostěnných konstrukcí. Lze takto vytvářet tupé i koutové svary. [7], [52]



Obr. č. 54: Rotující oblouk [56]

Porovnání jednotlivých typů přenosu kovu v závislosti napětí na proudu lze vidět na obr. č. 55.



Obr. č. 55: Typy oblouků v závislost napětí na proudu [52]

V dnešní době se často využívá speciálních technik svařování metodou MIG, jako je např. CMT (Cold Metal Transfer = studený svařovací proces). CMT je proces svařování MIG/MAG krátkým zkratovým el. obloukem. Tento proces je vhodný především pro spojování různých materiálů - ocelí a hliníkových slitin. Digitální regulace rozpozná zkrat a zpětným zatažením drátu podpoří uvolnění kapky. Během svařování se drát pohybuje vpřed, a jakmile dojde ke zkratu, je tažený nazpět. El. oblouk ve fázi hoření dodává teplo jen velmi krátce. Zkrat je tedy pod kontrolou a proud se udržuje na nízké úrovni. V porovnání s běžným svařováním MIG se CMT vyznačuje velmi malým vnosem tepla a mimořádně stabilním obloukem. [57], [65]

Další speciální metody svařování MIG/MAG jsou STT (Surface Tension transfer), vysokovýkonné metody (Rapid Melt, T.I.M.E proces), automatické svařování v ochranné atmosféře do úzkého úkosu, tandemové svařování, svařování s přívodem horkého drátu (nebo studeného drátu) do el. oblouku, orbitální svařování nebo MIG pájení pozinkovaných plechů. Poslední zmiňovanou metodu lze vidět podrobněji popsanou v kapitole č. 11. [7]

9 Technika, parametry a podmínky svařování/pájení metodou MIG

9.1 Svařovací proud

Nejvíce ovlivňuje charakter přenosu kovu a tvar průřezu svarové housenky při svařování/pájení. Se zvyšujícím se proudem roste proudová hustota, velikost a tekutost svarové lázně a výkon odtavení. Při konstantním napětí na el. oblouku a při narůstání proudu se zvyšuje hloubka závaru viz obr. č. 56. Na tomto obrázku lze také vidět, jak na změnu hodnoty proudu reaguje převýšení a šířka svaru. [58]

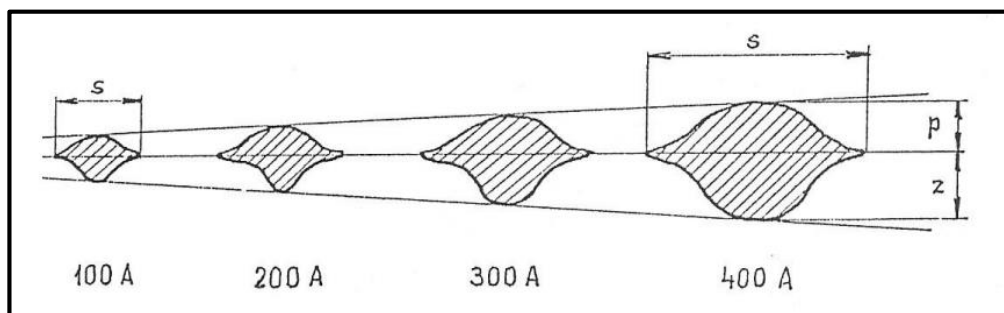
Svařovací proud ovlivňuje přenos kovu při svařování a to tak, že růstem proudu se zvyšuje frekvence kapek kovu a zmenšuje se objem kapek.

Předběžné nastavení svařovacího proudu se před samotným svařováním provádí dle zkušeností nebo dle tabulek. Tento postup byl zvolen i v experimentální části diplomové práce.

Z hlediska kvality svarového spoje je výhodnější mít menší průměr svařovacího drátu, protože poskytuje větší počet kapek drobných kapek => vyšší kvalita povrchu svarového spoje.

Z hlediska stability (směru) výletu drátu a ekonomické hlediska je lepší větší průměr svařovacího drátu. Z důvodu snížení počtu tahů je takový svař. drát levnější.

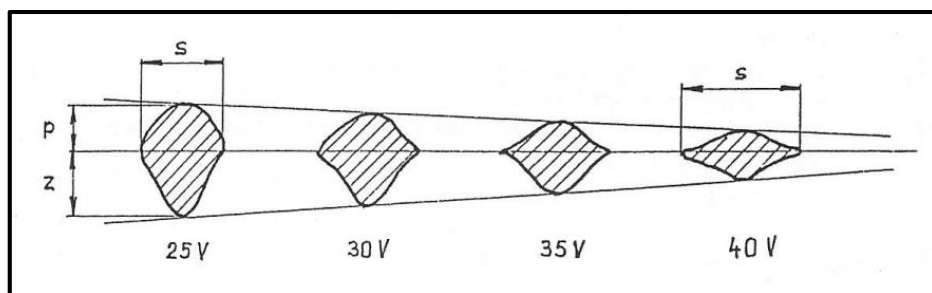
[58]



Obr. č. 56: Závislost tvaru svaru na svařovacím proudu (s – šířka housenky, p - převýšení z – hloubka závaru) [58]

9.2 Svařovací napětí

Svařovací napětí na el. oblouku je potenciální rozdíl mezi svařovacím drátem a povrchem svarové lázně. Napětí se mění podle délky oblouku. Nejvíce ovlivňuje šířku svarového spoje. S narůstajícím napětím se šířka svarového spoje rozšiřuje, ale snižuje se hloubka závaru a převýšení svaru viz obr. č. 57. [58]



Obr. č. 57: Závislost tvaru svaru na napětí (s – šířka housenky, p - převýšení z – hloubka závaru) [58]

Další vliv má na dosažení optimálních podmínek samoregulace délky el. oblouku.

Obecně lze nastavit napětí takto: $U = 15 + 0,035 * I$ [V] (6)

Vypočtené hodnoty svařovacího napětí dle vztahu (6) při MIG svařování/pájení lze vidět v experimentální části DP, kde tyto hodnoty byly zaznamenány a upraveny po konzultaci se zkušeným svářecím personálem. [58]

Vliv napětí na přenos kovu [58]:

Při napětí od 14 do 21 V probíhá zkratový přenos kovu => hodnota v experimentální části DP se pohybuje v tomto rozmezí (MIG svařování).

Při napětí od 21 V do 30 V probíhá bezzkratový (pulsní) přenos kovu => hodnota v experimentální části DP se pohybuje v tomto rozmezí (MIG pájení).

9.3 Polarita a druh svařovacího proudu

Nejčastěji se při svařování MIG používá stejnosměrný proud a nepřímá polarita (elektroda je zapojena na kladném pólu zdroje => zvýšená hloubka závaru, malé převýšení svaru a relativně širší svar. Toto zapojení bylo i při experimentu DP. [58]

V případě zapojení elektrody na záporný pól zdroje (přímá polarita) by se hloubka závaru a šířka svaru zmenšovala a naopak převýšení by rostlo (vhodné pro navařování). [58]

9.4 Technika svařování MIG

V případě svařování nelegovaných (v experimentu DP) a nízkolegovaných ocelí lze v závislosti na tloušťce materiálu a svařovací poloze využít všechny typy přenosů kovu obloukovým svařování. O těchto typech přenosu bylo možné se dočíst v předešlé kapitole č. 8, kde je popsáno i jaký typ přenosu byl použit. [58]

V případě ručního vedení svařovacího hořáku lze svařovat směrem dopředu nebo dozadu viz obr. č. 58, a při mechanizovaném je hořák obvykle v kolmé poloze ke svarovému spoji. Při robotizovaném vedení hořáku se úhel sklonu hořáku řídí podle přístupnosti koncového členu robota ke svařenci. V experimentální části DP bylo provedeno svařování ručním vedením hořáku a směrem dopředu, protože se svařovaly/pájely tenké plechy tloušťky 5 mm. [58]

Velice záleží na tom, jestli svařováním je snaha vytvořit kořenovou nebo výplňovou svařovou housenku. Kořenová se svařuje s přímým vedením svařovacího hořáku. Naopak výplňová lze svařovat s příčným nebo podélným rozkyvem svařovacího hořáku. Díky rozkyvu ho-

řáku se se zvyšuje velikost svarové lázně, zlepši se odplynění svaru, ale zvýší se množství vneseného tepla do svarového spoje, což je většinou nežádoucí. [58]

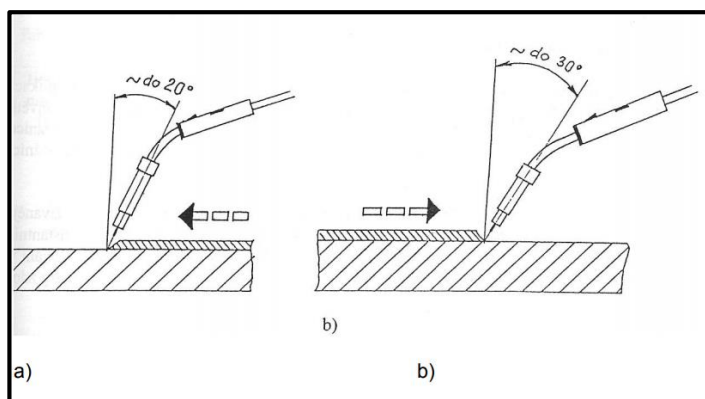
Níže jsou rozebrány charakteristiky svařování dopředu a dozadu [58]:

- a) Svařování dopředu – dokonalý výhled do úkosu, svařovací hubice zakrývá výhled na svarovou housenku, lepší přehřev svarových ploch, cca o 20% menší hloubka závaru, větší šířka svarové housenky, nižší převýšení, vyšší rychlost tuhnutí tavné lázně (zvýšená pórovitost), nebezpečí předbíhání tavné lázně => možný vznik studeného svarového spoje

Použití: svařování tenkých plechů, kořenových svarových housenek

- b) Svařování dozadu – svařovací hubice zakrývá výhled do úkosu, větší hloubka závaru, užší šířka a větší převýšení svaru, studené spoje a neprůvody se nevyskytují, tavná lázeň tuhne pomaleji => menší pórovitost

Použití: svařování větší tloušťky materiálu, krycí vrstvy tupých svarů



Obr. č. 58: Směr svařování a) dopředu b) dozadu [58]

9.5 Přídavné materiály

Je nezbytné zvolit správný přídavný materiál podle toho, jaká ocel se svařuje. Záleží na vlastnostech oceli a přídavného drátu a je snaha najít oba atributy, které jsou si podobné nebo stejné. [7]

Existují 2 druhy přídavných materiálů [7]:

- 1) Plný drát – Ø 0,6 0,8 1,0 1,2 1,6 2,0 a 2,4 mm. Na povrchu jsou hladké a mohou být i poměděné proti oxidaci.
- 2) Plněný drát (trubičkový drát)

Tyto svařovací dráty jsou navinuté na cívkách a jejich hmotnost je cca 15 kg. Taktéž je možnost sehnat cívky se svař. drátem větších hmotností - 5, 6, 10, 12, 16, 18, 25, 30 kg. V případě robotizovaných pracovišť nelze dodávat svařovací drát na cívkách z důvodu častého přerušování činnosti svařovacího robota, ale svařovací drát se odvíjí z baleného lepenkového paketu o hmotnosti 200 až 450 kg, viz obr. č. 59. [7]



Obr. č. 59: Svařovací drát Ø1 G3Si1 v baleném lepenkovém paketu o hmotnosti 200 kg [59]

Každý přídavný materiál musí být označen následovně [7]:

- Výrobce
- Svařovací drát dle výrobce i příslušné normy
- Ø svař. drátu
- Hmotnost
- Číslo tavby
- Klasifikace a certifikace u jiných orgánů

Norma ČSN EN 440 klasifikuje přídavné materiály pro svařování nelegovaných a jemnozrných ocelí MIG/MAG např. takto [58]:

EN 440 - G 46 3 M G3Si1

EN 440 je číslo normy

G značí svařování v ochranné atmosféře plynu

46 značí pevnost a tažnost (min. mez kluzu 460 MPa, mez pevnosti 530 až 680 MPa a tažnost 20 %)

3 udává desetinu mínusové teploty (- 30 °C), při které bylo dosaženo minimální nárazové práce 47 J.

M značí ochranný plyn – M jsou směsné plyny a C platí pro oxid uhličitý

9.5.1 Přídavný materiál pro MIG pájení – impulsní bezkratový přenos – Ø 1 CuSi3

Tento přídavný materiál OK Autrod 19.30 CuSi3 od firmy ESAB je vhodný zejména pro pozinkované plechy. Mechanické vlastnosti, chemické složení atd. lze vidět v tab. č. 13, 14, 15 a 16. Stal se z něj nejčastěji používaný typ drátu pro pájení dílů z pozinkovaných plechů v automobilovém průmyslu. Obvyklé svařování je DC+. Lze ho najít pod označením v normě EN ISO 24373: CuSi3Mn1. V porovnání s klasickými ocelovými dráty je drát CuSi3 poměrně měkký a je vhodné jej používat ve svářečkách se 4 - kladkovým podáváním a teflonovým popř. uhlíkovým bowdenem v hořáku. Tímto přídavným materiálem je možné vytvářet oba základní typy spojů: koutový i tupý pájený spoj. Spoj zhotovený drátem CuSi3 už není nutné dále chránit proti korozi. Díky nižší teplotě tání drátu CuSi3 viz tab. č. 14 (v porovnání s ocelovým svařovacím drátem) nedochází k výraznému tepelnému ovlivnění základního materiálu => minimalizuje se možné poškození zinkového povlaku na základním materiálu. Nevýhodou tohoto materiálu je cena, která se přibližně pohybuje (s DPH) 738 Kč za 1 Kg. [60], [61], [63]

R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Tvrдость [HB]
130	350	40	80 - 100

Tabulka č. 13: Typické mechanické hodnoty čistého pájeného kovu [62], [63]

Teplota tavení [°C]
900 - 1080

Tabulka č. 14: Rozsah teploty tavení CuSi3 [64]

Chemické složení přídatného materiálu Ø1 CuSi3 [hm. %]					
Si	Zn	Sn	Fe	Mn	Cu
3	0,05	0,01	0,05	0,9	96

Tabulka č. 15: Chemické složení přídatného materiálu Ø1 CuSi3 [63]

Rychlost podávání pájecího drátu [m/min]	Napětí [V]	Proud [A]
4,0 – 12,0	19 – 31	80 – 250

Tabulka č. 16: Pájecí parametry přídatného materiálu Ø1 CuSi3 [63]

Nárazová práce nebyla zmíněna výrobcem. Na obr. č. 60 lze vidět seznam dalších možností svářecích/pájecích drátů.

OZNAČENÍ	TEPLOTA TAVENÍ [°C]	MEZ KLUZU RP0,2 [MPa]	MEZ PEVNOSTI RM [MPa]	TAŽNOST A5 [%]
SG-CuSi3	910 - 1025	250	380	46
L-CuSi2Mn	1030 - 1060	> 80	290 - 340	45
SG-CuSn10SiMn	887 - 1020	240	> 350	15
SG-CuSn	1020 - 1050	230	> 340	25
SG-CuAl8	1030 - 1040	180	380 - 450	40
SG-CuAl8Ni2	1030 - 1050	290	530 - 590	> 30
SG-CuAl8Ni6	1015 - 1045	400	> 700	15
SG-CuAl5Mn1Ni1	1043 - 1074		430	35
SG-CuMn13Al7	945 - 985	400	650	10

Obr. č. 60: Seznam běžně používaných pájek pro MIG pájení [65]

Výhody pájek na bázi Cu [65]:

- Protikorozi ochrana svarové housenky
- Nízký rozstřik
- Malý opal zinkové vrstvy
- Malé množství vneseného tepla => malé deformace (především u tenkých plechů)
- Menší náklady na další opracování spoje

Výše zmíněné výhody plně vyhovují kladeným požadavkům na svařování pozinkovaných plechů zmíněných v kapitole č. 10.1.2. [65]

9.5.2 Přídavný materiál pro MIG svařování – zkratový přenos – Ø 1 G3Si1

Jedná se o poměděný drát Weld G3Si1 z produkce společnosti ESAB. Mechanické vlastnosti a chemické složení lze vidět v tab. č. 18 a vhodné svařovací parametry v tab. č. 17. Používá se pro běžné svařování konstrukčních ocelí. Hodí se pro svařování koutových a tupých svarů ve všech svařovacích polohách. Obvyklé svařování je DC+. Přibližná cena s DPH za 1 Kg je 47 Kč. [66]

Rychlost podávání svař. drátu [m/min]	Napětí [V]	Proud [A]	Spotřeba plynu [l/min]
2,7 – 15	18 – 32	80 – 300	14

Tabulka č. 17: Svařovací parametry [62]

R _e [MPa]	R _m [MPa]	Tažnost A ₅ [%]	Nárazová práce KV při teplotě - 30 °C [J]	Mn [hm. %]	C [hm. %]	Si [hm. %]
470	560	26	70	1,30	0,11	0,85

Tabulka č. 18: Mechanické hodnoty čistého svarového kovu a chemické složení drátu [66]

10 Popis svařovaného materiálu – Ocel S235JR + AR (+Z)

Jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel, která se používá pro mírně namáhané díly v ocelových konstrukcích a strojírenství. Vyznačuje se vysokou houževnatostí a velmi dobrou svařitelností. <https://www.thesteel.com/cz/o-materialech> Její chemické složení a mechanické vlastnosti lze vidět v tabulce č. 19. Dříve se označovala jako S235JRG2 podle EN 10025: 1990+A1; 1993; RSt 37-2 podle DIN 17100; podle ČSN 11 375.

Dle EN 10027- 1	Re [MPa]	Rm [MPa]	A ₈₀ [%]	C [hm. %]	Mn [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	N [hm. %]	Cu [hm. %]
S235JR	min. 235	360 - 510	min. 15 - 21	0,20 max.	1,4 max.	0,035 max.	0,035 max.	0,012 max.	0,55 max.

Tabulka č. 19: Mechanické vlastnosti a chemické složení [67], [68]

JR označení platí pro nárazovou práci 27 J při teplotě + 20 °C

G označení platí pro jiné charakteristiky (např. způsob dezoxidace, G, ... G4)

+AR ... válcovaný (bez zvláštních podmínek na válcování nebo tepelné zpracování)

+Z ... Žárově pozinkováno ponorem

[68], [69]

10.1 Žárové zinkování ponorem

Tuto metodu lze taktéž nazvat, jako zinkování v roztaveném zinku viz obr. č. 61. Když se ocel dostane do kontaktu s roztaveným zinkem, dojde k reakci mezi oběma kovy a na povrchu oceli se vytvoří slitina železo – zinek. [70], [71], [72]

Postup žárového zinkování ponorem [70], [71], [72]:

- 1) Ocelové svařence, výpalky očištěné od mastnoty, okují, rzi, barvy atd. jsou ponořeny do lázni s kyselinou (kyselině chlorovodíková, sírová nebo chlorid železnatý) k odmoření (Na povrchu oceli se vytváří povlak složený z několika vrstev slitinových Fe-Zn fází a vnější vrstvou čistého zinku).
- 2) Oplach ve vodě.
- 3) Ponoření do tavidla.
- 4) Po osušení jsou ponořovány do roztaveného zinku při teplotě 450 °C. Doba ponoru v zinkovací lázni se stanovuje podle možnosti manipulace s kusy. Většinou se pohybuje mezi 1,5 a 5 minutami. Obtížně manipulovatelné a těžké kusy vyžadují doby ponoru kolem 10 minut. Složení zinkové lázně se do určité míry mění. Základem je elektrolytický zinek (často SHG) s obsahem zinku 99,995 %. Zbývající tisíce % jsou tvořeny především železem. Někdy se přidávají legury kvůli ovlivnění zinkování. Většinou se jedná o hliník nebo další přísady, které působí jako potlačení silného vlivu Sandelinova efektu, získání lesklého povlaku, lepšího stékání zinku a zvýšené korozní odolnosti.

Výhody [70], [71], [72]:

- Dlouhá životnost
- Rovnoměrný povlak po celém povrchu (i na vnitřních a obtížně přístupných plochách)
- Odolnost vůči mechanickým vlivům
- Nízké vstupní náklady
- Možné kombinovat s dalšími povlaky
- Při eventuálních malých poškozeních chrání zinek ocel katodicky a menší šrámy není potřeba opravovat

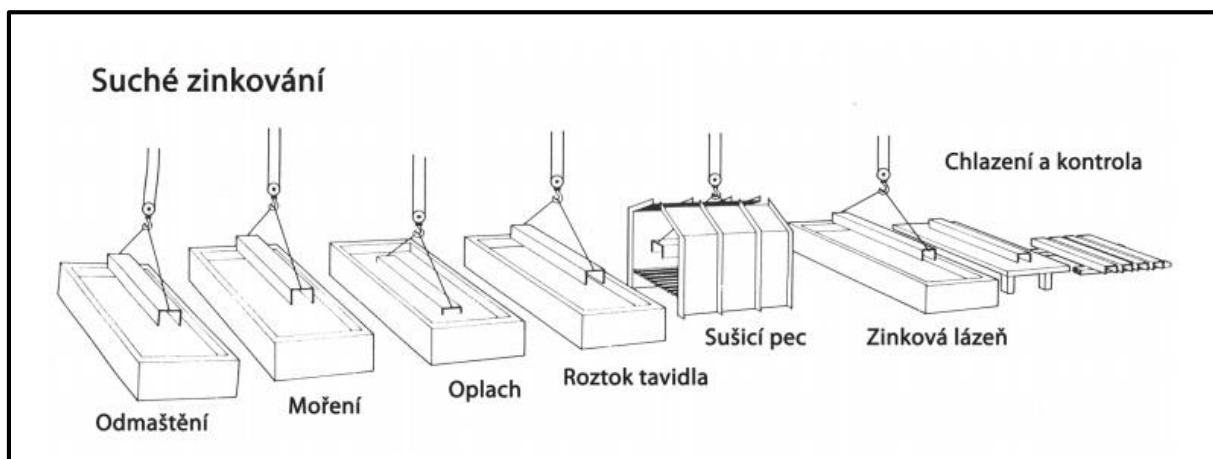
Nevýhody [70], [71], [72]:

- nelze provádět na místě, vyžaduje pevné zařízení
- barvu zinkového povlaku je možné změnit pouze nátěrem
- určité riziko u povrchů tvářených za studena, například tenkých plechů nebo profilů, které se deformují vlivem tepla v zinkovací lázni

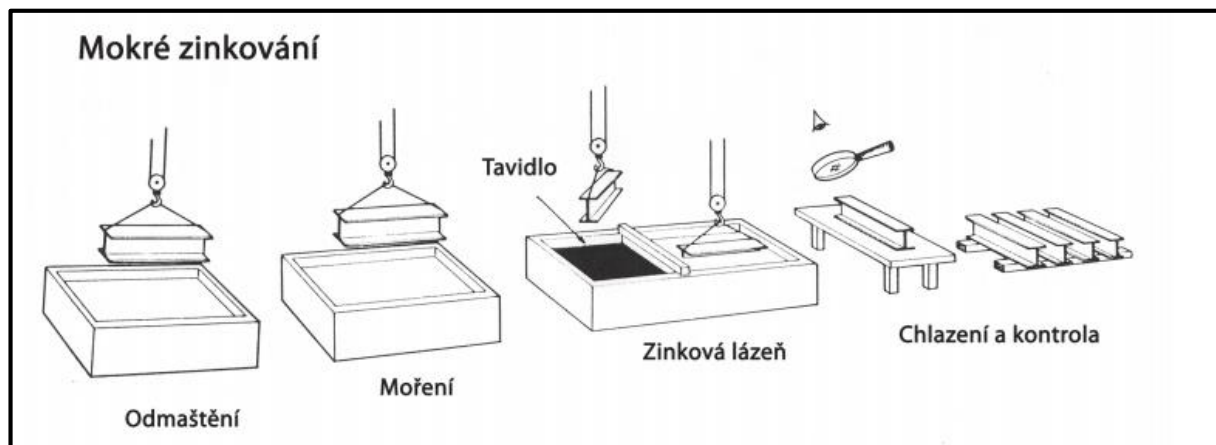


Obr. č. 61: Žárové zinkování ponorem [71]

Obecně jsou nejpoužívanější 2 metody žárového zinkování ponorem, viz obr. č. 62 a 63.



Obr. č. 62: Suché zinkování [71]



Obr. č. 63: Mokrý zinkování [71]

Obě zmiňované metody žárového zinkování ponorem poskytují z hlediska kvality a úrovně protikorozní ochrany zcela rovnocenné povlaky. Suchý způsob je ale běžnější, protože se dá snáze mechanizovat. [71]

Složení zinkové lázně se může do určité míry měnit. Základem je ale elektrolytický zinek (často SHG – Special High Grade) s obsahem zinku 99,995 %. Zbývající tisíce procenta jsou

tvořeny hlavně železem. Kvůli ovlivnění zinkování se přidávají legury. V posledních letech probíhal intenzivní výzkum týkající se legur v lázni. Hlavně se jedná o hliník nebo další přísady, které působí ve smyslu potlačení silného vlivu Sandelinova efektu, získání lesklého povlaku, lepšího stékání zinku a zvýšené korozní odolnosti. [71]

Jako zajímavost je zde obr. č. 64, na kterém lze vidět pouhým okem rozdíl ve způsobu zinkování materiálu. Třetí plech lze ostatně vidět i v experimentální části na obr. č. 76. [65]



Obr. č. 64: Způsoby zinkování materiálů (1 - galvanicky zinkováno, 2 - naválcovaná vrstva zinku, 3 - žárově zinkováno ponorem) [64], [65]

10.1.1 Reakce mezi železem a zinkem u S235JR + AR (+Z)

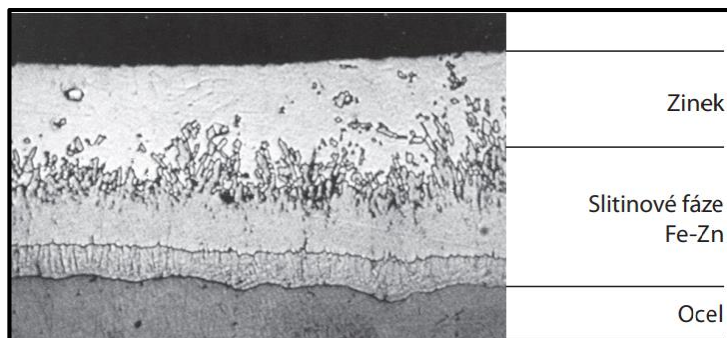
Při žárovém zinkování této oceli se krystaly železo – zinek ve slitinové vrstvě vytvářejí těsně na sobě, viz obr. č. 65. Kolem teploty 450 °C vzniká intermetalická fáze na rozhraní železo/zinek. Tím zabraňuje roztavenému zinku dosáhnout povrchu oceli. K reakci může proto dojít jen mezi zinkem a železem, které prodifunduje slitinovou vrstvou. Tato slitinová vrstva je tvořena povlakem složených z několika vrstev slitinových Fe - Zn fází. Obsah Fe v jednotlivých fázích klesá se vzdáleností od oceli. Po vytažení ze zinkové lázně ztuhne čistý zinek na vnější vrstvě slitinové fáze Fe - Zn. V experimentální části lze vidět zinkové povlaky zkoumaných vzorků, které odpovídají obrázku č. 65. [71]

Když zinek na povrchu povlaku ztuhne, je vrstva většinou hladká a má lehce namodralý kovový lesk. V některých případech (hlavně u tenkého plechu), může zinek ztuhnout ve tvaru náhodně orientovaných krystalů, které povrchu dávají vzhled „květu“ viz předešlý obr. č. 64 (třetí plech). Přidávky bismutu, olova nebo cínu do zinkové lázně ovlivňují vznik a velikost zinkového „květu“ hlavně při kusovém zinkování. Vznik „květu“ je pouze jedna z forem vzniku krystalů, která kromě jiného závisí na rychlosti tuhnutí zinkové vrstvy. Tvorba „květu“ neznamená, že zinkování bylo provedeno špatně. Taktéž ale nemá žádný význam z hlediska korozní odolnosti povlaku. [71]

Obecné požadavky na tloušťku zinkového povlaku lze vidět níže v tabulce č. 20, které souvisí s tabulkou č. 21. dále.

Tloušťka stěny kusu [mm]	Místní tloušťka povlaku [μm]	Průměrná tloušťka povlaku [μm]
ocel > 6 mm	70	85

Tabulka č. 20: Tloušťka zinkového povlaku dle ČSN EN ISO 1461 [71]



Obr. č. 65: Řez zinkovým povlakem [71]

ČSN EN ISO 1461 zmiňuje, že na vzhled zinkové vrstvy, struktura, její tloušťka a fyzikální i chemické vlastnosti má podstatný vliv chemické složení materiálu, tloušťka stěny a podmínky při zinkování.

10.1.2 Obloukové svařování pozinkované oceli

Ocel se zinkovým povlakem se dá bez větších těžkostí svařovat stejným způsobem a stejnými metodami jako uhlíková ocel bez povlaku. Parametry pro svařování materiálu bez povlaku se nelze využít, protože povlak má určitý rušivý efekt na průběh svařování. Jak velký tento efekt je, závisí především na tloušťce zinkového povlaku, složení a struktuře. S tímto souvisí požadavky kladené na svařování/pájení pozinkovaných plechů. Ty nejpodstatnější z nich jsou [71]:

- Nízké tepelné zatížení dílů z důvodů deformací a zachování zinkové vrstvy
- Svarový/pájený spoj musí být dostatečně ochráněn proti korozi

Akceptovatelná hranice tloušťky zinkového povlaku s ohledem na svařitelnost plechů je kolem 20 μm . Velkou roli zde hraje také svařecí poloha a typ svaru. V experimentální části lze vidět, že tloušťka zinkového povlaku dosahuje větších hodnot. [65]

Možné problémy [71]:

Menší průvar – roztavený zinkový povlak na povrchu narušuje energetickou stálost oblouku => změna napětí, proudu a dynamiky oblouku. Tento problém lze vypořádat v experimentální části.

Zvýšená tvorba pórů – zinkové zplodiny a ostatní plyny se nestačí odplynit z taveniny ještě předtím, než ztuhne.

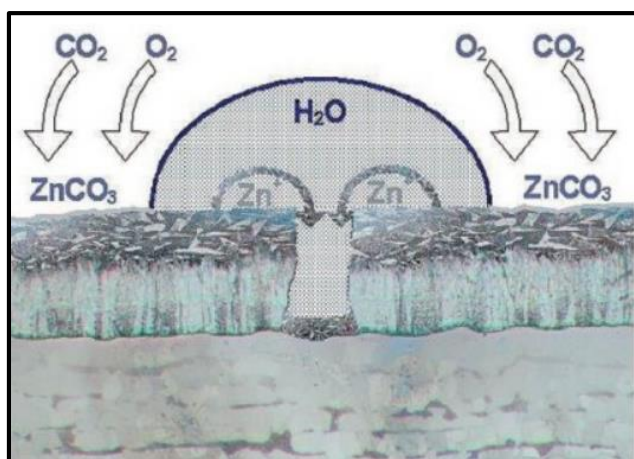
Zvýšený vývin dýmů - při svařování pozinkovaných ocelí se tvoří oxid zinečnatý, který vzniká jako bílá sloučenina na povrchu (viz experimentální část obr. č. 77). Pokud by došlo k nadýchání se oxidem zinečnatým, tak to může vyvrcholit až tzv. zinkovou horečkou a možná i dalšími zdravotními problémy.

10.1.3 Katodická ochrana

Převážná většina ocelových konstrukcí např. zábradlí, autobusové zastávky, sloupy veřejného osvětlení atd., mohou být chráněny zinkovým povlakem. Zinek se vyznačuje velmi důležitou vlastností, že se dokáže účinně pasivovat, čímž chrání ocel. V případě, že tato ocel je

nepokovená např. v místě poškození vystavena vlhkosti, tak se vytváří galvanický článek. Zinek nacházející se v blízkosti tohoto místa koroduje přednostně a vytváří oxidy (bílý povlak na povrchu), které se usazují na povrchu oceli a chrání ji, neboli zajišťuje u oceli přechod do stavu pasivity. Proto v místech poškození tak nedochází ke korozi oceli. Např. v suchém prostředí se pokrývá konzistentní vrstvičkou $ZnCO_3$ viz obr. č. 66, která významně zpomaluje korozní rychlost v atmosféře. [73]

Podrobněji lze popsat katodickou ochranu tak, že chráněný kov (Fe), který se stává katodou, koroduje pomaleji, než by korodoval sám, protože ochranný kov (Zn) se stal anodou (katoda je železo a anoda je zinek). Tato anoda podléhá korozi rychleji než katoda. Zinek poskytuje katodickou ochranu oceli. Má dostatečný protikorozní účinek. Elektrochemický potenciál železa je roven $-0,44$ eV (elektrochemicky ušlechtilější než zinek) a zinku je roven $-0,76$ eV (viz obr. č. 67). Z toho plyne, že materiál pod povlakem musí být elektrochemicky ušlechtilější (nižší elektrochemický potenciál) než je samotný povlak. Tato protikorozní vrstva ochrana není věčná, proto je nutné přihlídnout při volbě ochranného povlaku na prostředí, ve kterém má daný materiál chránit viz tabulka č. 21. [73]



Obr. č. 66: Schéma pasivace a katodické ochrany [74]



Obr. č. 67: Zredukovávaná Beketovova řada kovů v závislosti na elektrodovém potenciálu (pod hodnotou 0 jsou to kovy neušlechtilé se záporným elektrodovým potenciálem a nad 0 jsou to kovy ušlechtilé s kladným elektrodovým potenciálem). [75]

Obr. č. 67 zároveň popisuje elektrochemický potenciál mědi + 0,34 eV a stříbra + 0,80 eV, které se použily jako přídavné materiály (pájky) při pájení v experimentální části DP. Měď a stříbro se vyznačují nízkou reaktivitou a vysokou odolností vůči korozi. Měď i stříbro se sami dobře pasivují. Měď si vytvoří měděnku na povrchu. [76]

10.1.4 Korozní rychlost zinku

Zinkový povlak si svou kvalitu, v jaké byl nanesen, zachovává po celou dobu své životnosti. Nicméně v závislosti na korozní agresivitě prostředí ubývá různou rychlostí. Životnost kovového povlaku je nepřímo úměrná velikosti jeho ročních korozních úbytků. Korozní rychlost zinku v atmosférickém prostředí plyne z podstaty použití. Významný vliv mají přírodní zákony a způsob zacházení s pozinkovanou součástí. Při znalosti korozních účinků prostředí a minimální tloušťky naneseného zinkového povlaku je stanovení očekávané životnosti zinkového povlaku poměrně snadnou záležitostí. Rychlost koroze zinku v různých atmosférických prostředích je uváděna v celé řadě technických norem. Níže v tabulce č. lze vidět přibližný úbytek zinku za rok. [74]

Korozní úbytek Zn [μm/rok]	0,64 – 0,84	0,85-0,98	0,99 – 1,12	1,13 – 1,26	1,27 – 1,57
Minimální životnost Zn – povlaku o tloušťce 70 μm [rok]	83	71	62	55	45

Tabulka č. 21: Korozní úbytek a životnost zinku za předpokladu, že se jedná o stupeň korozní agresivity C3 – střední. [74]

Do stupně korozní agresivity C3 dle EN ISO 9223 patří prostředí průmyslových hal se středním znečištěním (potravinářské závody, prádelny, mlékárny, pivovary), mírné klimatické oblasti středním znečištěním ovzduší a tropické oblasti s nízkým znečištěním ovzduší. Dále sem patří městské prostředí a přímořské ovzduší s nízkou salinitou. Přibližný roční úbytek zinku se pohybuje v rozmezí od 0,7 do 2,1 μm/rok. To lze vidět v tabulce č. 21. kde je roční úbytek zinku přirovnán k rokům životnosti. Příklad použití ochrany zinkovým povlakem je na obr. č. 68. [74]



Obr. č. 68: Příklad součástí v lyžařském středisku chráněné zinkovým povlakem vytvořeném žárovým zinkováním ponorem [74]

11 Technologie svařování/pájení ocelových plechů se zinkovým povlakem metodou MIG a TIG

U pozinkovaných plechů je možné za určitých podmínek používat běžné způsoby svařování/pájení. [6], [29], [30]

Nicméně svařování/pájení metodou TIG není standardní pro pozinkované plechy, proto nejsou zdroje, které by poskytovaly informace o tom, jak se svařuje/pájí touto metodou. Z tohoto důvodu je níže popsána metoda spojování pozinkovaných plechů, která je osvědčená a do určité míry funguje. Svařování a pájení pozinkovaných ocelových plechů - S235JR + AR (+Z) metodou TIG se nachází v experimentální části diplomové práce. Nevýhodou běžného způsobu spojování je porušení zinkové vrstvy v místě a okolí svarového/pájeného spoje. Během svařování vznikají páry zinku při teplotě 908 °C (viz tabulka č. 23) a v místě svařování není základní materiál ochráněn katodickým účinkem (viz předešlé kapitoly). Z tohoto důvodu je doporučeno po svařování provést dodatečnou ochranu zinkovým nátěrem v místě svařování. Pro zachování ochrany proti korozi do značné míry se doporučuje použít odporové svařování nebo MIG tvrdé pájení (MIG brazing), což ostatně lze vidět v experimentální části, kde se metodou MIG pájí a svařuje. MIG pájení se považuje za speciální a donedávna za nepříliš rozšířenou metodu spojování materiálů. Patří do skupiny tvrdého pájení a je známa od 70. let minulého století. [28], [29], [65]

Negativní vlivy při svařování pozinkovaných plechů [6], [25], [64] :

- Nestabilní hoření oblouku
- Provaření zinkové vrstvy
- Pórování
- Velký rozstřík způsobený parami zinku
- Vysoký obsah zplodin a nebezpečí zinkové horečky

Před touto metodou spojování se ocelové pozinkované materiály svařovaly především metodou MAG (obvyklým drátem typu SG - 1,2 nebo 3). MIG tvrdé pájení je nazýváno jako pájení křemíkovým bronzem CuSi3 (použit v experimentální části), CuSi2 nebo hliníkovým bronzem CuAl8, CuAl3Ni2, kterým se pozinkované plechy spojují v rozmezí teplot 1030 až 1080 °C. Používané pájky se vyznačují vysokým obsahem mědi, a proto také mají relativně nízkou teplotu tavení, viz tabulka č. 23. [65]

MIG tvrdé pájení se provádí impulsním proudem (použit v experimentální části), STT, CMT v ochranné atmosféře Ar (Argon 4.6 byl použit v experimentální části) nebo Ar + 2,5 % CO₂. [6], [29], [30]

Výhody MIG pájení [6], [29], [30]:

- Minimální opal povlaku vedle svaru i na spodní straně plechu
- Svar bez koroze – katodická ochrana je v těsné blízkosti svaru
- Minimální tepelné ovlivnění materiálu => minimální deformace
- Možné spojovat i velmi tenké plechy
- Bezrozstříkové a stabilní přenášení svarového kovu

- Nízký obsah zplodin
- Možnost robotizace

MIG pájení je možnost použít pro plechy válcované za tepla i za studena, pozinkované i nepozinkované. S úspěchem je možnost pájet plechy do tloušťky 2,5 mm a pevností v tahu ≤ 530 MPa. V experimentální části byly použity plechy tloušťky 5 mm. [65]

Pozinkované plechy jsou v současné době stále častěji používány v automobilovém průmyslu, ve stavebnictví, vzduchotechnice, nábytkářství a výrobě domácích spotřebičů. [6], [29], [30]

Materiál	Teplota tavení [°C]	Teplota varu [°C]	Svařování/pájení
Zinek	419	908	-
Stříbro	960	2160	-
Měď	1083	2590	-
Křemík	1410	3265	-
Ocel	1536	2500	-
Wolfram	3422	5660	-
CuSi3	900 - 1080	-	MIG pájení
G3Si1	1536	-	MIG svařování
Ag206 (20 % Ag)	690 - 810	-	TIG pájení
W3Si1	Neuvedeno ani výrobcem (s největší pravděpodobností bude přibližná jako teplota tavení oceli-nebo vyšší z důvodu přidaného wolframu)	-	TIG svařování

Tabulka č. 23: Přibližná teplota tavení a varu použitých prvků a materiálů [65]

12 Programové řízení svařovacího/pájecího procesu MIG a TIG

Programové řízení svařovacího/pájecího procesu lze uskutečnit pomocí WeldEye welding management software (dále jen „WeldEye“) od společnosti Kemppi a.s. Jedná se o univerzální řešení řízení svařovací výroby, která se zabývá požadavky mezinárodních svařovacích norem jako ISO, ASME a AWS. WeldEye je řízení svařovací dokumentace, které obsahuje kontrolu a řízení svařovacích postupů, kvalifikaci svářečů, sledování svařovacích parametrů i dokumentaci projektu viz dále podrobněji v experimentální části. Díky WeldEye lze mít 100% - ní dohledatelnost každého provedeného svařovacího/pájecího spoje. Níže na obr. č. 69 lze vidět zařízení nutné pro úspěšné zavedení WeldEye do provozu a je zde také zobrazen náhled internetového uživatelského prostředí softwaru WeldEye ve výpočetní technice. Toto zařízení monitoruje výše zmiňované a přeposílá informace prostřednictvím internetového připojení do internetového uživatelského prostředí softwaru WeldEye. [77], [78], [81]

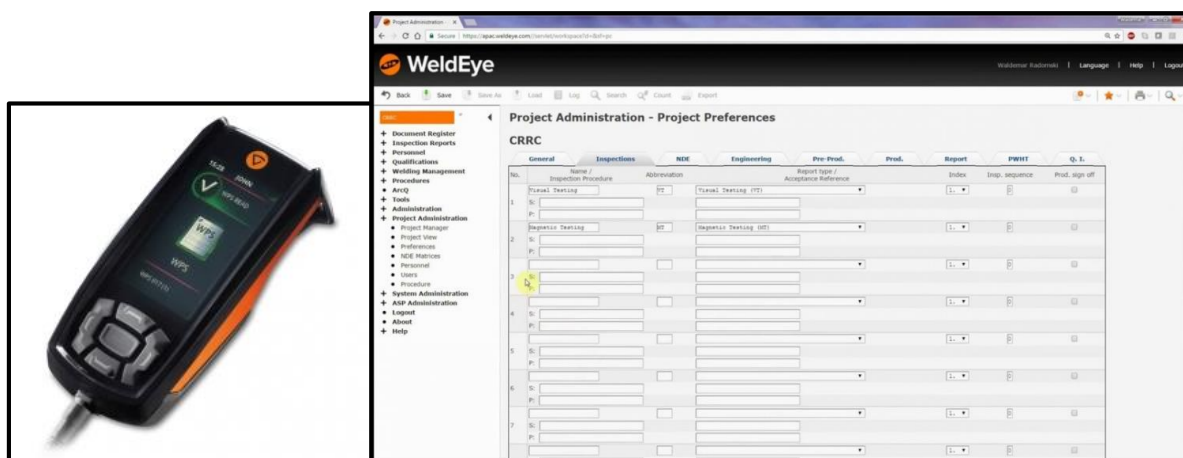
Hlavní přínosy [77], [78], [81]:

- rychlejší proces dokumentace (digitálně uložená data)
- informace o stavu projektu (lepší řízení projektu)
- efektivní řešení (řízení svařovací/pájecí dokumentace)

Další přínosy [77], [78], [81]:

- snížení času stráveného „papírováním“
- úspora peněz – vytváření WPS krok za krokem prostřednictvím pWPS a WPQR
- vyloučení duplicit při zpracování výrobních postupů díky jednotné databázi
- úspora času při zpracování osobních kvalifikací svářečů, operátorů a zpracování NDT
- Spárování s normami AWS, ASME, EN a ISO

V experimentální části se nachází výsledky a grafy tohoto programového řízení a jsou tam uvedeny další podrobnosti.



Obr. č. 69: Vlevo je monitorovací zařízení softwaru WeldEye od společnosti Kemppi a.s. a vpravo je náhled internetového uživatelského prostředí softwaru WeldEye ve výpočetní technice [78]

13 Numerická simulace procesu svařování metod MIG a TIG

Klíčem k úspěchu na současném trhu jsou především nízké náklady výroby a vysoká kvalita produktů. Zároveň roste tlak na zrychlení procesu vývoje a zkrácení času dodání výrobku na trh. Ke splnění uvedených požadavků lze využít prostředků počítačové simulace, o kterých si lze přečíst níže. [79]

Pro numerické simulace svařování jsou na trhu produkty vyvíjené společností ESI Group:

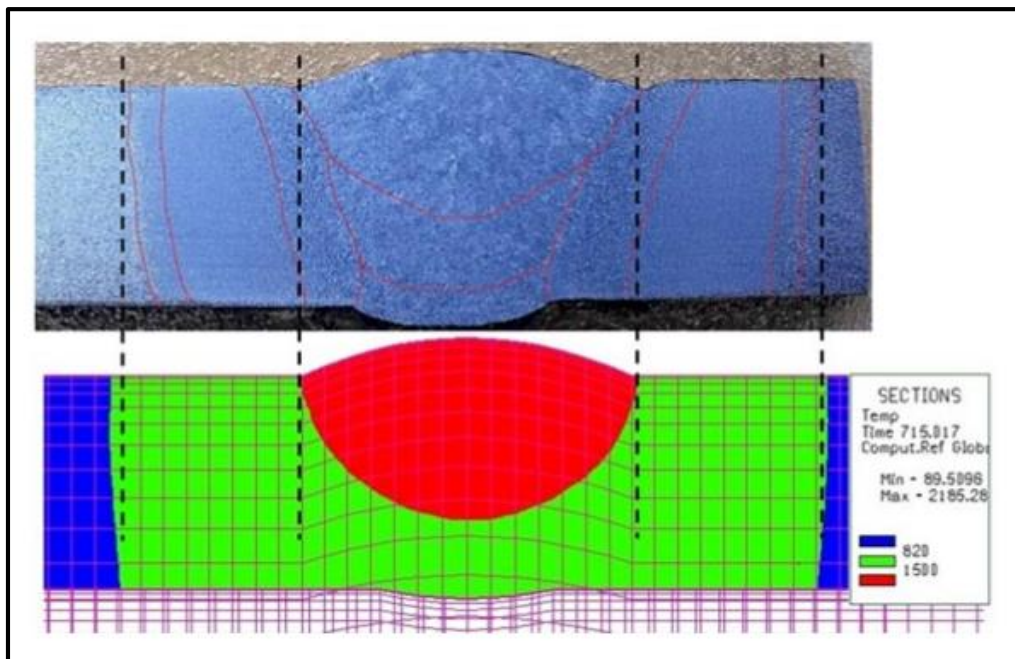
PAM Assembly, Sysweld a Weld Planner. Tyto softwary umožňují provedení numerických simulací svařování, a to jak při výrobě reálných průmyslových celků, tak v oblasti výzkumu a vývoje. [79]

Hlavní výsledky, které lze získat z numerických simulací, jsou: rozložení teplotních polí, predikce velikosti teplotně ovlivněné zóny, materiálové struktury, tvrdosti v jednotkách HV, zbytkového napětí, deformací a distorzí. Na základě těchto výsledků je možné provést optimalizaci technologického postupu numerickou cestou tak, aby se získaly požadované parametry bez potřeby provedení reálných experimentů. Díky získaným výsledkům lze rozhodnout o správné volbě materiálu a technologii svařování, vylepšit svařovací postup, svařovací parametry. Dále pak lze na základě těchto výsledků optimalizovat tuhosti svařovacích přípravků s cílem minimalizovat distorze (deformace), optimalizovat vznik nežádoucích struktur, omezit zbytkové napětí po svaření a omezit vznik vad (trhlin). Nakonec je potřeba zmínit, že je také možné predikovat životnost během provozu součásti dle skutečného provozního zatížení včetně zahrnutí zbytkového napětí po svařování. [79]

Metoda řešení numerických simulací svařování nebo tepelného zpracování

Společnost ESI Group více než 20 let vyvíjí software Sysweld, který slouží k numerickým simulacím procesu svařování a tepelného zpracování. Numerická řešení procesu svařování a tepelného zpracování v Sysweld jsou provedena metodou konečných prvků. Jednou z možností numerických analýz je Welding (Transient). Jedná se o transienční řešení, které je prováděno právě softwarem Sysweld, který uvažuje téměř všechny materiálově fyzikální vlivy procesu svařování a tepelného zpracování. Výsledkem těchto analýz může být teplotní pole, materiálová struktura, velikost zrna, tvrdost v jednotkách HV, zbytkové napětí a deformace, distorze konstrukce, predikce meze kluzu v oblasti svaru a teplotně ovlivněné zóně atd. Některé z těchto výsledků lze vidět v experimentální části diplomové práce. [79]

Využití numerických analýz svařování v praxi jako např. Sysweld, v kombinaci s experimentálním měřením představují silný nástroj pro oblast přípravy výroby. Prováděné analýzy pružně reagují na změny v technologickém postupu a snižují množství experimentálních zkoušek. Na základě provedení virtuálních numerických simulací svařování se může provést primární návrh technologie svařování a jeho optimalizaci a to vše bez provedení experimentálních zkoušek => snížení nákladů, zrychlení zavedení technologie do výroby a zvyšování kvality, spolehlivosti a konkurenceschopnosti vyráběných svařovaných konstrukcí nebo jen součástí. V experimentální části diplomové práce se lze dočíst o vstupních parametrech pro TIG a MIG svařování, tvorba modelu a jeho nasíťování, což je jedna z nejdůležitějších operací. Tyto data se zaznamenávají do softwaru Visual Weld od ESI GROUP. Z tohoto softwaru se data přepošlou k řešení do softwaru Sysweld, kde probíhá samotný výpočet určitou dobu. Příklad vypočtených hodnot lze vidět na obr. č. 70. [79]



Obr. č. 70: Výpočet zbytkového napětí ve svařované konstrukci. Porovnání celkové šířky TOO krycí housenky stanovené pomocí numerické simulace Sysweld a makrostrukturním rozbořem svarového spoje oceli T24. [80]

Praktická část

Úvod

Praktická část diplomové práce byla zaměřena na ruční svařování a pájení pozinkovaných ocelových plechů metodami MIG a TIG. Celkem se jednalo o použití 4 různých metod spojování materiálů (tab. č. 24). Cílem experimentální části bylo svařit/spájet dva ocelové plechy tloušťky 5 mm se zinkovým povlakem a vytvořit T spoj při co nejmenším odpařením zinkového povlaku. To vše za podpory WeldEye a Sysweld. Zkušební materiál byl poskytnut od společnosti ABADIA a.s., která se zabývá spojováním těchto ocelí.

Svařovací/pájecí metody MIG (131) a TIG (141 dle ČSN EN ISO 4063) byly provedeny na T spojích (zkr. 31022 dle ČSN EN 1792), kde byl vytvořen jednostranný jednovrstvý koutový (ss sl FW – fillet weld dle ČSN EN ISO 9606-1) svarový/pájený spoj o délce 50 mm (zkr. 31015 dle ČSN EN 1792) nelegované jemnozrnné uhlíkové feriticko-perlitické oceli S235JR + AR (+Z) dle ČSN 11 375 se zinkovým povlakem na povrchu viz obr. č. 71, 72, 73, 74. Ocel je takto chráněna proti korozi. Povlak zinku byl nanesen žárovým zinkováním ponorem (+Z) (ČSN EN ISO 14713-2). Tento proces ochrany materiálu proti korozi je popsán v teoretické části diplomové práce. Detail tohoto zinkového povlaku před a po procesu svařování/pájení lze vidět v kapitole č. 19. Mechanické vlastnosti a chemické složení této oceli jsou podrobně popsány v kapitole č. 10, str. č. 55, a která taktéž obsahuje výpočet uhlíkového ekvivalentu, který nejen že je nezbytný pro určení svařitelnosti, ale zároveň byl také zmíněn v pWPS a pBPS. Kromě tohoto výpočtu bylo nutné navrhnout rozměry svaru, viz kapitola č. 15, které jsou také zaneseny ve výkresech a modelu. Ty byly vytvořeny v software 2D/3D CATIA V6 a nachází se v příloze diplomové práce. Model sestavy lze vidět na obr. č. 79.

Před samotným svařováním/pájením bylo nutné materiál na obr. č. 76 důkladně očistit acetonem od nečistot (prach, mastnota atd.), které by mohly nepříznivě ovlivnit proces svařování a pájení. Po svařování/pájení nebylo nutné čistit strusku na povrchu spoje, protože ochranný inertní plyn byl nastaven správně. Nejvýraznějším nepříjemným a nevyhnutelným jevem byl vznik oxidu zinečnatého nejvíce kolem svarového spoje. Ten musel být očištěn. V případě pájeného spoje ke vzniku oxidu zinečnatého došlo v omezené míře, viz obr. č. 77. Tato příprava měla další opodstatnění právě pro nedestruktivní a destruktivní zkoušení materiálu viz kapitola č. 18. Dále se v této kapitole lze dočíst o metalografické kontrole materiálu (mikroskopické a makroskopické zkoušení) a jsou zde popsány nalezené vady těchto spojů. Svarové/pájené spoje z důvodu délky a podrobnější analýzy materiálu byly říznuty ve 2 místech zkušebního kusu. Tyto místa jsou vyznačeny písmeny „a“ a „b“ už na těchto zmíněných obrázcích. Místo „a“ je v 1/3 spoje a místo „b“ je ve 2/3 spoje směrem od začátku svarového/pájeného spoj, protože bylo nutné vyhnout se začátku a konce spoje. Jednotlivé zkušební vzorky jsou na obr. č. 75. Jedná se o výbrusy příčných řezů spoje. Následně byla zkoumána makrostruktura a mikrostruktura uvnitř svarového/pájeného spoje viz obr. č. 83 až 101. Pro kontrolu a jako zajímavost byla navíc zdokumentována i mikrostruktura této oceli i mimo svarový/pájený spoj viz obr. č. 82. Kromě toho byl zkoumán povlak a odpaření zinku viz obr. č. 102, 103, 104, 105, 106 a rozhraní základní materiál – pájka viz obr. č. 107, 108, 109 a 110.

Co se týče parametrů svařování/pájení, postupu svařování/pájení jako (např. poloha svařování PB dle ČSN EN ISO 6947 zkr. 31053 dle ČSN EN 1792, směr svařování dopředu lw – leftward welding dle ČSN EN ISO 9606 - 1), tak tyto a další důležité podrobnosti lze vidět v tabulce č. 24. Přisnost přístupu k těmto spojům byla stanovena zvoleným stupněm jakosti D výrobku dle ČSN EN ISO 3834. Tento stupeň jakosti udává více hledisek (v technické normě

ČSN EN ISO 3834) a jedno takové důležité je např. před svařováním a po svařování není nutné tepelné zpracování (např. předehřev). Tato a další informace jsou nezbytné vědět před samotným svařováním/pájením. Stupeň jakosti D byl zvolen s ohledem na použití tohoto spoje na konstrukcích, které nejsou staticky ani dynamicky namáhané. Během nastavení svařovacích parametrů a podmínek byla snaha se co nejvíce přiblížit reálným svařovacím/pájecím podmínkám společnosti ABADIA, a.s., ve Slapech u Tábora. Tato společnost nejen že poskytla zkušební materiál pro diplomovou práci, ale také poskytla částečné informace ohledně svařování a pájení těchto spojovaných materiálů. Podle těchto informací, zkušeností svářečského personálu a teoretické části DP pak byla přibližně nastavena metodika svařování a pájení. Všechny procesy svařování/pájení byly programově řízeny softwarem WeldEye. Svařovací a pájecí křivky lze najít v kapitole č. 17. Celý proces svařování, jak metodou TIG, tak i metodou MIG byl vymodelován v software Visual Weld 12.0 za účelem zjištění zbytkového napětí, průběhu dosažených teplot (TOO) a deformací po svaření a následném vychladnutí. Následně proběhla numerická simulace v software Sysweld od ESI GROUP. Pro splnění jedny z podmínek numerické simulace bylo nutné spočítat tepelný příkon, viz kapitola č. 20. Podrobněji se o tomto modelování a numerické simulaci lze dočíst v kapitole č. 21 a lze vidět na obr. č. 111 až 134.



Obr. č. 71: TIG – svařový spoj, Ø2 W3Si1



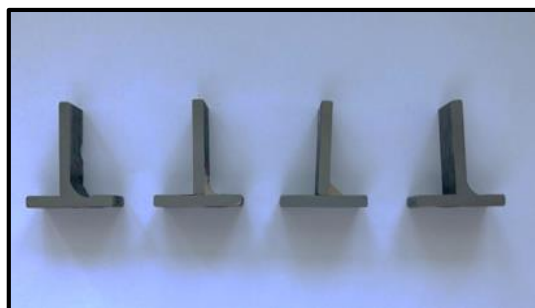
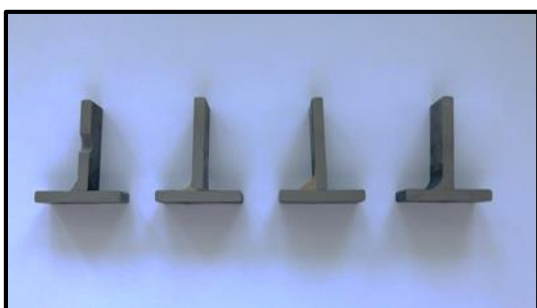
Obr. č. 72: MIG – pájený spoj, Ø1 CuSi3



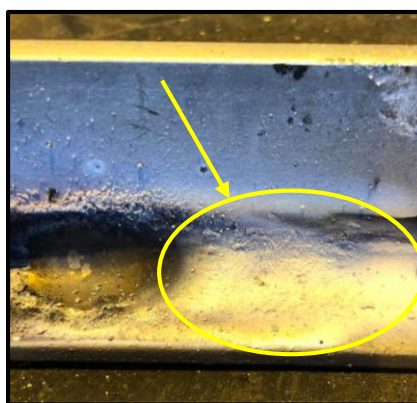
Obr. č. 73: MIG – svařový spoj, Ø1 G3Si1



Obr. č. 74: TIG – pájený spoj, Ø1,5 20 % Ag



Obr. č. 75: Zkušební vzorky - První zleva – MIG svar, TIG – pájený spoj, MIG – pájený spoj, TIG svar



Obr. č. 77: Oxid zinečnatý na povrchu

Obr. č. 76: Materiál poskytnutý od společnosti ABADIA, a.s., tloušťka 5 mm, šířka 40 mm a délka 225 mm

Č. zk. kusu	Metoda	Typ spoje	Typ svaru	Délka spoje [mm]	Poloha	Směr	Typ oceli
1	TIG svařování	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
2	MIG pulsní pájení	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
3	MIG pulsní svařování	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
4	TIG pájení	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)

Tabulka č. 24: Přehled použitých metod svařování/pájení, typ spoje, materiál a další podstatné informace

14 Uhlíkový ekvivalent pro feritické oceli dle ČSN EN 1011-2

Před svařováním bylo nutné splnit podmínky (mezi ně patří vzorec č. 7), které jsou popsány vztahy níže. Chemické složení S235JR + AR (+Z) nutné pro splnění 2 podmínek lze vidět v tab. č. 25.

C [hm. %]	Mn [hm. %]	P [hm. %]	S [hm. %]	N [hm. %]	Cu [hm. %]
0,17	1,3	0,035	0,035	0,012	0,5

Tabulka č. 25: Chemické složení ocelových plechů společnosti ABADIA, a.s.

Uhlíkový ekvivalent C_e

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad (7)$$

$$C_e = 0,17 + \frac{1,3}{6} + \frac{0,5}{15} = 0,17 + 0,22 + 0,03 = 0,42$$

$$C_e \leq 0,45$$

$$0,42 \text{ hm. \%} \leq 0,45 \text{ hm. \%}$$

$$C = 0,17 \text{ hm. \%} \leq 0,20 \text{ hm. \%}$$

TLoušťka svařovaného materiálu 5 mm ≤ 25 mm

Všechny 3 podmínky svařitelnosti jsou splněny => není potřeba žádné zvláštní opatření (např. předehřev) za účelem snížení vzniku trhlin. Uhlíkový ekvivalent byl doplněn do pWPS. Níže lze vidět tabulku. č. 26, kde jsou přehledně zobrazeny výsledky.

Název/zkratka	C_e [hm. %]	C [hm. %]	Tloušťka svařovaného materiálu [mm]
Hodnoty (vypočtená hodnota ≤ stanovená hodnota z normy)	$0,42 \leq 0,45$	$0,17 \leq 0,20$	$5 \leq 25$
Podmínka (splněna/nesplněna)	splněna	splněna	splněna

Tabulka č. 26: Přehled podmínek zaručené svařitelnosti

15 Určení rozměru koutového svaru dle ČSN EN 1708-2

Jedná se o účinnou tloušťku svaru DLE ČSN EN 1708-2 nebo taktéž konstrukční tloušťku průřezu svaru dle ČSN EN ISO 9606 - 1 anebo jmenovitá velikost koutového svaru dle ČSN EN ISO 5817 (dále jen „a – rozměr“). Schéma pro určení a – rozměru je na obr. č. 78 a platí pro něj vzorec (8) níže.

$$3 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 * t_2 \quad t_1 = t_2 \text{ (oba spojované materiály jsou tloušťky 5 mm)} \quad (8)$$

$$3 \text{ mm} \leq a \leq 0,7 * 5$$

$$3 \text{ mm} \leq a \leq 3,5 \text{ mm}$$

První podmínka je splněna. V případě, že by se jednalo o zvláštní případ, tak lze a - rozměr navýšit na kolik je potřeba. Jinak řečeno překročit horní mez 3,5 mm v tomto případě. Druhá podmínka, která byla taktéž splněna, je níže.

$$a \geq \sqrt{t_{max}} - 0,5 \quad (9)$$

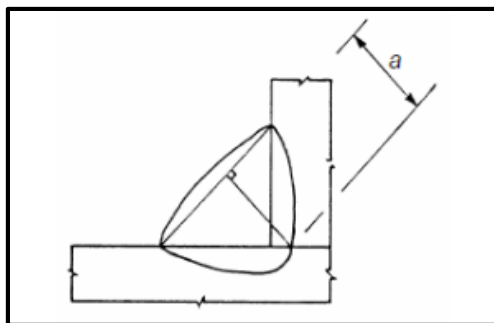
$$a \geq \sqrt{5} - 0,5$$

$$a \geq 2,2 - 0,5$$

$$a \geq 1,7$$

Vztah (9) platí pouze pro plechy s tloušťkou do 30 mm a nejedná se o svařování pod tavidlem.

V tomto případě se volí se a-rozměr = 3,5 mm podle první podmínky (dle ČSN EN 1708 - 2) a to z důvodu předpokladu dosažení větších mechanických vlastností tohoto spoje.



Obr. č. 78: Určení a-rozměru dle ČSN EN ISO 1993-1-8 (Podle tohoto obrázku se postupovalo při určení a - rozměru)

Vzorec (9) výše pro a-rozměr platí pro plechy do tloušťky 30 mm => splňuje (5mm)

z-rozměr se počítá dle vzorce (10) a jedná se o délku odvěsny koutového svaru dle ČSN EN ISO 9606 - 1

$$a = 0,7 * z \quad (10)$$

$$3,5 = 0,7 * z$$

$$Z = 5 \text{ mm}$$

Účinná délka koutového svaru (délka svaru bez začátku a bez konce dle ČSN EN 1993 - 1 - 8)

$$L_{\text{účinná}} = l_{\text{celk}} - 2 * a \quad (11)$$

$$L_{\text{účinná}} = 50 - 2 * 3,5$$

$$L_{\text{účinná}} = 43 \text{ mm}$$

Minimální účinná délka koutového svaru pro přenášení zatížení dle ČSN EN 1993 - 1 - 8

$$L_{\text{MIN}} \geq 6 * a \quad (12)$$

$$L_{\text{MIN}} \geq 6 * 3,5$$

$$L_{\text{MIN}} \geq 21 \text{ mm}$$

$$L_{\text{účinná}} \geq L_{\text{MIN}}$$

$$43 \text{ mm} \geq 21 \text{ mm}$$

$$43 \text{ mm} \geq 30 \text{ mm (větší hodnota rozhoduje)}$$

Podmínka minimální účinné délky koutového svaru L_{MIN} pro přenášení zatížení je splněna, protože účinná délka svaru je 43 mm viz vzorec (11). V případě, že účinná délka koutového svaru $L_{\text{účinná}}$ by byla menší než 30 mm nebo menší než šestnásobek účinné tloušťky svaru (větší rozměr rozhoduje), tak by tento svar nesměl být použit pro přenášení zatížení dle ČSN EN 1993-1-8 viz vzorec (12).

Sklon připojovaných částí je taktéž dodržen, protože spojované součásti jsou pod úhlem od 60°- 120° (konkrétně 90°) dle ČSN EN 1993-1-8 viz pWPS, pBPS nebo výkresy v příloze.

Tyto výpočty (a, b, c, d) byly provedeny z důvodů jejich použití při nastavení numerické simulace v Sysweld. Taktéž je lze přehledně vidět v tabulce č. 27.

Rozměr	a – rozměr [mm]	z – rozměr [mm]	Úhel mezi zákl. materiály [°]	Lúčinná [mm]
Hodnota	3,5 mm	5 mm	90	43
Podmínka (splněna/nesplněna)	splněna	splněna	splněna	splněna

Tabulka č. 27: Přehled navržených základních rozměrů koutového svarového/pájeného spoje

Před samotným svařováním/pájením ocelových pozinkovaných plechů byla navržena a vystavena IWT (kvalifikace dle ČSN EN ISO 14731) pWPS podle ČSN EN ISO 15607 (zrušena a není nahrazena), ČSN EN ISO 15609-1 a pBPS podle ČSN EN ISO 13134. Dále se při posuzování jakosti svarového/pájeného spoje bralo zřetel na ČSN EN ISO 3834 a ČSN EN ISO 5817 viz podrobněji níže. V neposlední řadě je potřeba zmínit použití ČSN EN 1011 - část 1 a 2 pro všeobecné vědomí, jak postupovat při obloukovém tavném svařování (při vzniku svarového spoje) feriticko perlitických ocelí.

Tyto předběžné svářecí/pájecí postupy jsou jako jediné z protokolů v diplomové práci zmíněny na straně 80 až 83 (včetně), i přestože by bylo vhodnější zmínit konečný kvalifikovaný postup WPS/BPS vzhledem k důležitosti protokolů (postupů). Nicméně aby mohl vzniknout WPS/BPS, tak by se musel vytvořit kvalifikační certifikát (záznam) WPQR/BPAR dle ČSN EN ISO 15614. Na základě tohoto certifikátu, který se předkládá společně s pWPS, rozhoduje inspekční orgán (dle ČSN EN ISO/IEC 17020) o kvalifikaci WPS.

Kvalifikační certifikát WPQR/BPAR nebyl vytvořen a ani ověřen inspekčním orgánem (dle ČSN EN ISO/IEC 17020), a proto ani nebyla kvalifikována WPS/BPS. Předložené předběžné svářecí/pájecí postupy slouží v diplomové práci pouze pro ucelení informací a pro přehlednost svařovacích procesů.

V případě, že by došlo ke kvalifikaci WPS/BPS, tak dle nich mohl postupovat pouze kvalifikovaný svářecí a pájecí personál. V případě svařování a pájení ocelí podle WPS/BPS by bylo zapotřebí splňovat alespoň dle ČSN EN ISO 9606 – část 1 (starší neplatná ČSN EN 287-1), ČSN EN ISO 14732, ČSN EN ISO 13585 (starší neplatná ČSN EN 13133) a ČSN 05 0705 – u poslední technické normy v případě, že nemají k dispozici jiný prováděcí postup.

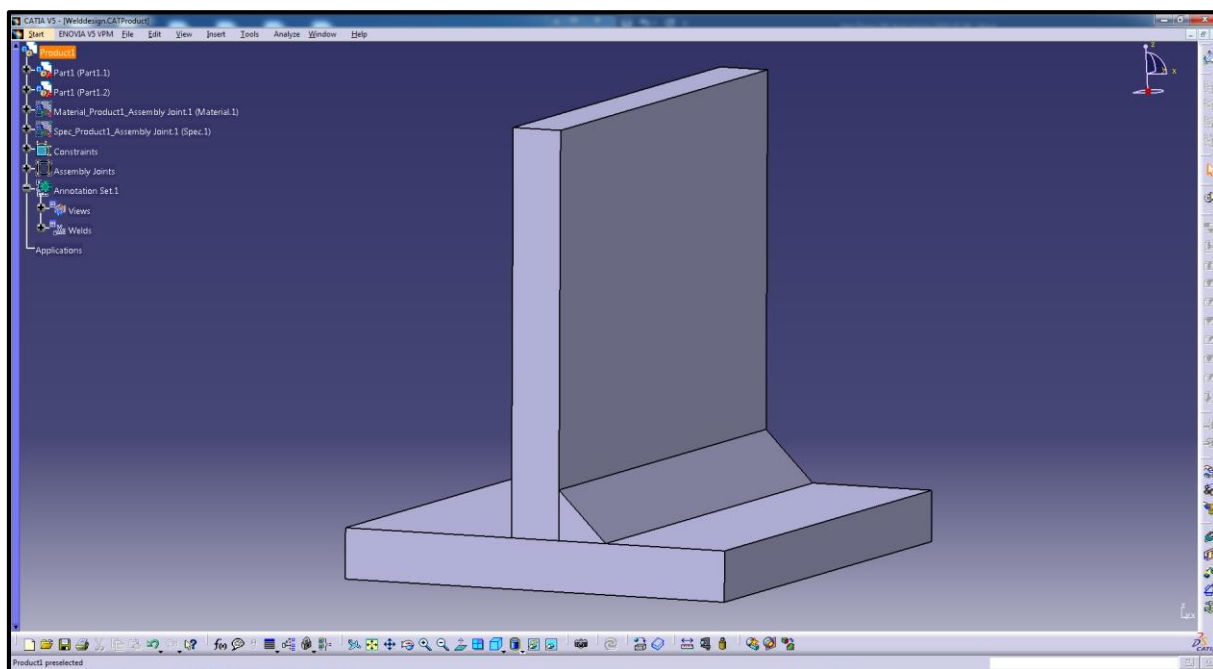
Dle kritérií a hledisek v ČSN EN ISO 3834-1 a vzhledem k funkčnosti byla zvolena technická norma a část ČSN EN ISO 3834-4. Stupeň jakosti dle ČSN EN ISO 5817 (s uvnitř popsanou 6520-1) byl vybrán D. To vše vzhledem k funkčnosti svarového/pájeného spoje. Dle ČSN EN ISO 3834 – 1 a 6 se píše, že při zvolení 3834-4 se přímo nevyžaduje pWPS a WPS, ale pouze pracovní instrukce, které mohou být ve formě pWPS a WPS. V tomto případě stejně došlo k vypracování alespoň pWPS, pBPS, neboť byly použity pro programově řízené svařování/pájení pomocí WeldEye. Při zkouškách svařování se postupuje dle pWPS nebo WPS viz ČSN EN ISO 9606-1.

Kvalifikace WPQR, která se nevyžaduje při použití ČSN EN ISO 3834-4, nebyla zhotovena.

Níže v tabulce č. 28 lze přehledně vidět, které dokumenty byly zpracovány. Pod touto tabulkou se nachází model (obr. č. 79) vytvořený ve 2D/3D CATIA V6, ze kterého byla vytvořena výkresová dokumentace pro svařování a pájení. Tuto výkresovou dokumentaci lze najít v příloze diplomové práce a lze ji porovnat s vytvořenými pWPS a pBPS.

Metoda	pWPS (ano/ne/-)	pBPS (ano/ne/-)	WPS (ano/ne/-)	BPS (ano/ne/-)
TIG svařování	ano	-	ne	-
MIG svařování	ano	-	ne	-
TIG pájení	-	ano	-	ne
MIG pájení	-	ano	-	ne

Tabulka č. 28: Přehled vypracovaných protokolů pro svařování/pájení



Obr. č. 79: Model vytvořený ve 2D/3D CATIA V6

16 Použité svařovací/pájecí parametry, technika a přídavné materiály pro svarové/pájené spoje

Tato kapitola se zabývá nastavením svařovacích parametrů, které jsou přehledně zobrazeny níže v tabulce č. 29. Dále se zde popisuje, jaké přídavné materiály, ochranné plyny, technika atd., byly použity v diplomové práci. V tabulkách jsou uvedeny parametry jak pro svařování, tak i pro pájení. Svařovací proud a napětí (případně rychlost podávání elektrody) byl zvolen dle tabulek, druhu svařovaného materiálu, druhu a průměru svařovací elektrody, rychlosti svařování a nakonec zkušeností autora a svařovacího personálu. Z důvodu přehlednosti a úspory místa v tabulce bylo nutné zapsat pouze svařování, ale je tím myšleno i pájení. To je přehledně zobrazeno metodou v prvním sloupci tabulky. Jednotlivé zkratky a symboly jsou vypsány v seznamu zkratk a symbolů na začátku diplomové práce.

Metoda	Svař. I [A]	Svař. U [V]	Čas procesu [s]	Svař. v [mm/s]	Ø [mm] Elektroda	Ø [mm] Příd. materiál	Výlet drátu [mm]	Podávání drátu [m/min]	Ochr. plyn	Průtok plynu (l/min)
TIG svařování	140 konst.	10,2 ± 0,4	90	0,55	Ø 2,4 WLa 15	Ø2 W3Si1	-	-	Ar 4.6	9
MIG svařování	126 ± 5	15,8 ± 0,4	42	1,19	-	Ø1 G3Si1	12	5	Ar 4.6	15
TIG pájení	105 konst.	15,4 ± 1,5	90	0,55	Ø 2,4 WLa 15	Ø1,5 Ag 20 %	-	-	Ar 4.6	9
MIG pájení	229 ± 11	24,6 ± 5,0	8	6,25	-	Ø1 CuSi3	12	12	Ar 4.6	15

Tabulka č. 29: Přehled použitých svařovacích/pájecích parametrů a další nezbytné informace spojené se vznikem svarových/pájených spojů

Tabulka výše taktéž souvisí s kapitolou č. 17, kde jsou zobrazeny svařovací a pájecí křivky z WeldEye. Hodnoty proudu a napětí na těchto křivkách odpovídají hodnotám v této tabulce.

Ochranné plyny, přídavné materiály a vše příbuzné svařování a pájení

a) TIG svařování

- netavící se wolframová elektroda Ø 2,4 WLa 15 zlatá
- přídavný materiál Ø 2 mm W3Si1 OK TIGROD 12.61 ESAB, délka 1000 mm (dle ČSN EN ISO 636-A)
- ochranný plyn argon 4.6 z důvodu ceny, dostupnosti a jeho vlastnostem popsanych v teoretické části DP
- svařovací technika – třífázový MASTERTIG MLS 3003 ACDC, polarita DC- , Bezkontaktní HF zapalování, svařování dvoutaktem, svař. hořák TTC 250W, jednotka vodního chlazení Mastercool 30

b) MIG svařování

- tavící se elektroda (= zároveň i přídavný materiál) Ø 1mm WELD G3Si1 ESAB
- ochranný plyn argon 4.6 z důvodu ceny, dostupnosti a jeho vlastnostem popsanych v teoretické části DP
- svařovací technika – svařovací zdroj FastMig - WFX 300 AMC – podavač drátu, bowden PMT42W – pro svařování zkratem, jednotka vodního chlazení Fast-Cool 10

c) TIG pájení

- netavící se wolframová elektroda Ø 2,4 WLa 15 zlatá
- přídavný materiál Ø 1,5 mm tříložková, holá, stříbrná pájka bez kadmia (44 % Cu, 35,9 % Zn, 20 % Ag) Castolin RB 6110. Délka 500 mm. Označení je Ag206 dle EN 1044 (teplota tavení 690 – 810 °C)
- ochranný plyn argon 4.6 z důvodu ceny, dostupnosti a jeho vlastnostem popsanych v teoretické části DP
- pájecí technika – třífázový MASTERTIG MLS 3003 ACDC, polarita DC- , bezkontaktní HF zapalování, svařování dvoutaktem, svař. hořák TTC 250W, jednotka vodního chlazení Mastercool 30

d) MIG pájení

- pájecí drát Ø 1 mm CuSi3 OK AUTROD 19.30 ESAB (teplota tavení 900 – 1080 °C) – z důvodu nejpoužívanějšího materiálu pro tuto technologii
- ochranný plyn argon 4.6 z důvodu ceny, dostupnosti a jeho vlastnostem popsanych v teoretické části DP
- pájecí technika - svařovací zdroj FastMig X 450, jednotka vodního chlazení Fast-Cool 10, podavač drátu - teflonový bowden z důvodu použitého pájecího drátu,

pulsní pájení – z důvodu ověřené technologie pro spojování pozinkovaných plechů

Použité přídatné materiály patří do skupiny FM1 dle ČSN EN ISO 9606-1. Jedná se o přídatné materiály nelegované a jemnozrné oceli.

Podrobnější informace v této kapitole jsou zmíněny a popsány v příslušné kapitole v teoretické části diplomové práce a vychází z těchto zdrojů, které jsou u těchto informací zmíněny.

17 Programově řízené svařování a pájení (WeldEye)

Svařování a pájení bylo monitorováno pomocí software WeldEye. Jednotlivé svařovací a pájecí křivky lze vidět níže v této kapitole. Pouze v jednom případě se programově řízený graf zanechal v původním stavu (MIG pájecí křivka). Zbytek svařovacích/pájecích křivek byl předělán do vizuálně přehlednějších grafů, viz níže. Na výsledky to nemělo vliv. Na obrázku č. 80 níže lze vidět papír s čárovými kódy, pomocí něž se načte např. svářecí personál, přídatný materiál, ochranný plyn atd. WeldEye funguje pouze v případě, že svářecí technika je propojena s WIFI a je přítomno monitorovací čtecí zařízení. Na obr. č. 81 se nachází nabídka software WeldEye v uživatelském prostředí ve výpočetní technice. Jsou zde vyznačeny dokumenty, které byly vypracovány pro svařové/pájené spoje. Ty jsou hned zobrazeny na dalších stranách a lze je snadno rozlišit.

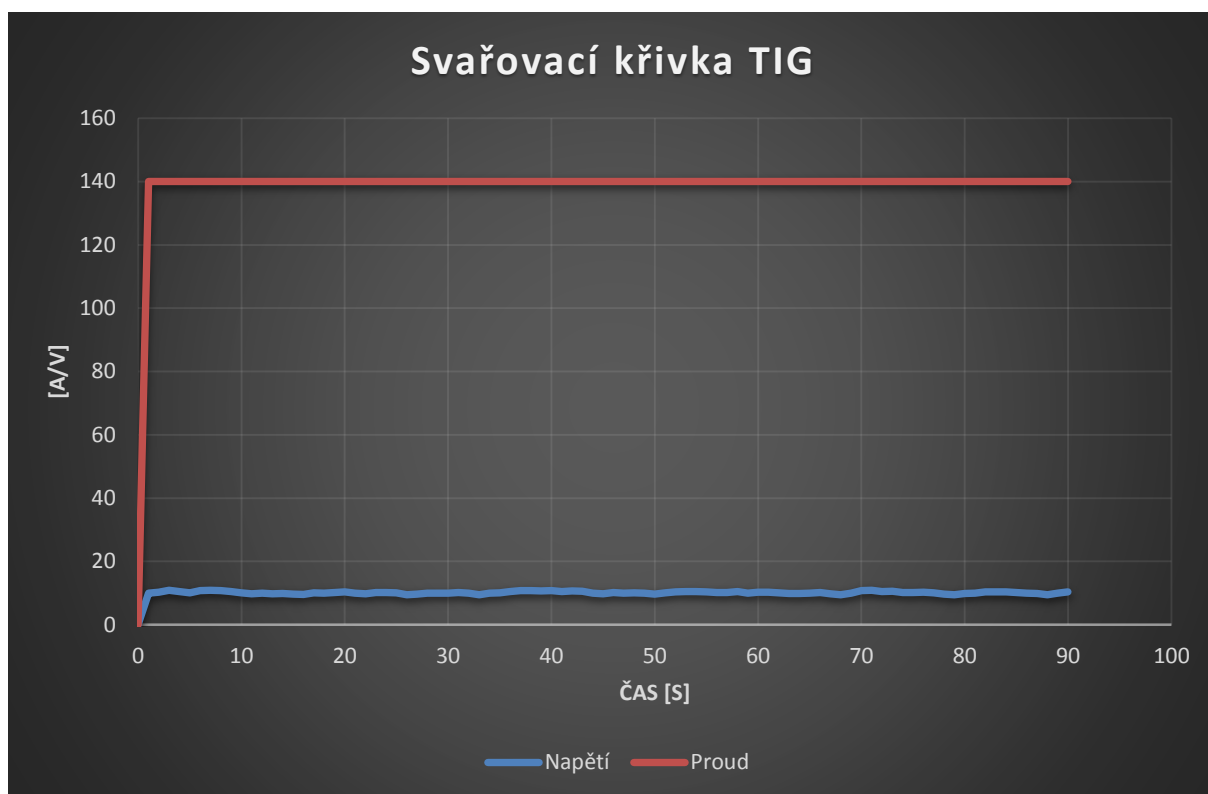
WeldEye pomáhá najít odpovědi na otázky typu: Kdo svařoval/pájel? Kdy? Čím? Jak? Jak dlouho? Atd. [81]

WeldEye moduly [81]:

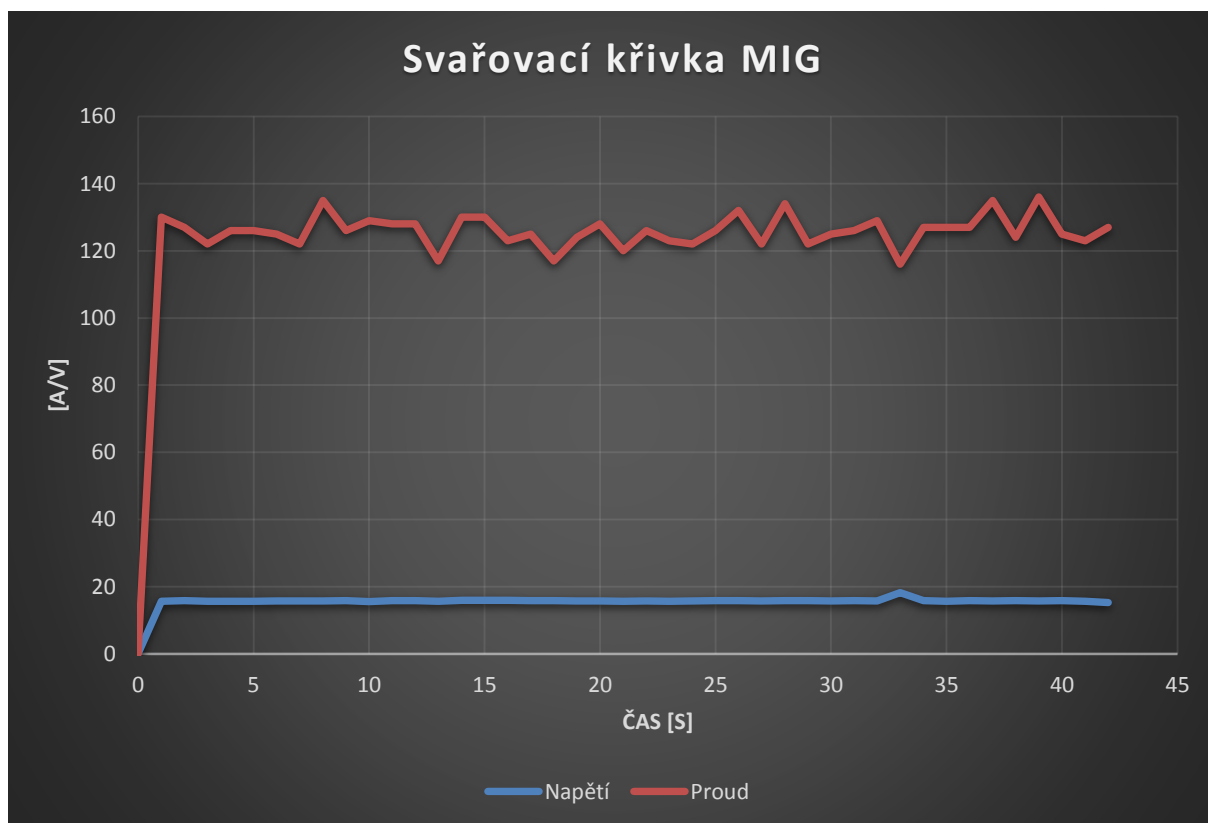
- a) Svařovací postupy (digitální databáze všech podkladů pro pWPS, WPQR a WPS v souladu s předepsanými normami)
- b) Řízení svařování (řízení procesu svařování a technické dokumentace)
- c) Řízení kvality (kontrola dodržování WPS a dohledatelnost každého svaru)
- d) Osobní kvalifikace (řízení svařovacích certifikátů a personálních kvalifikací)

V této diplomové práci byl především využit první, druhý a třetí modul WeldEye – svařovací postupy, řízení svařování, řízení kvality. Poslední modul WeldEye nebyl využit. Na základě těchto modulů byly vytvořeny pWPS, pBPS (str. 81 až 84). Ty byly následně přeposlány do svařovacího zařízení. Tento software komunikuje se svařovací/pájecí technikou přes WeldEye cloud, který sbírá data ze svářecího zdroje. Tyto data lze vidět níže na grafech - svařovací a pájecí křivky. V porovnání pWPS, pBPS a výkresové dokumentace ve 2D/3D CATIA V6, je nutno zmínit, že velikost Kemppi skicy v Kemppi editoru není dostačující (rozměry a poznámky) => byla navíc vytvořena výkresová dokumentace v příloze.

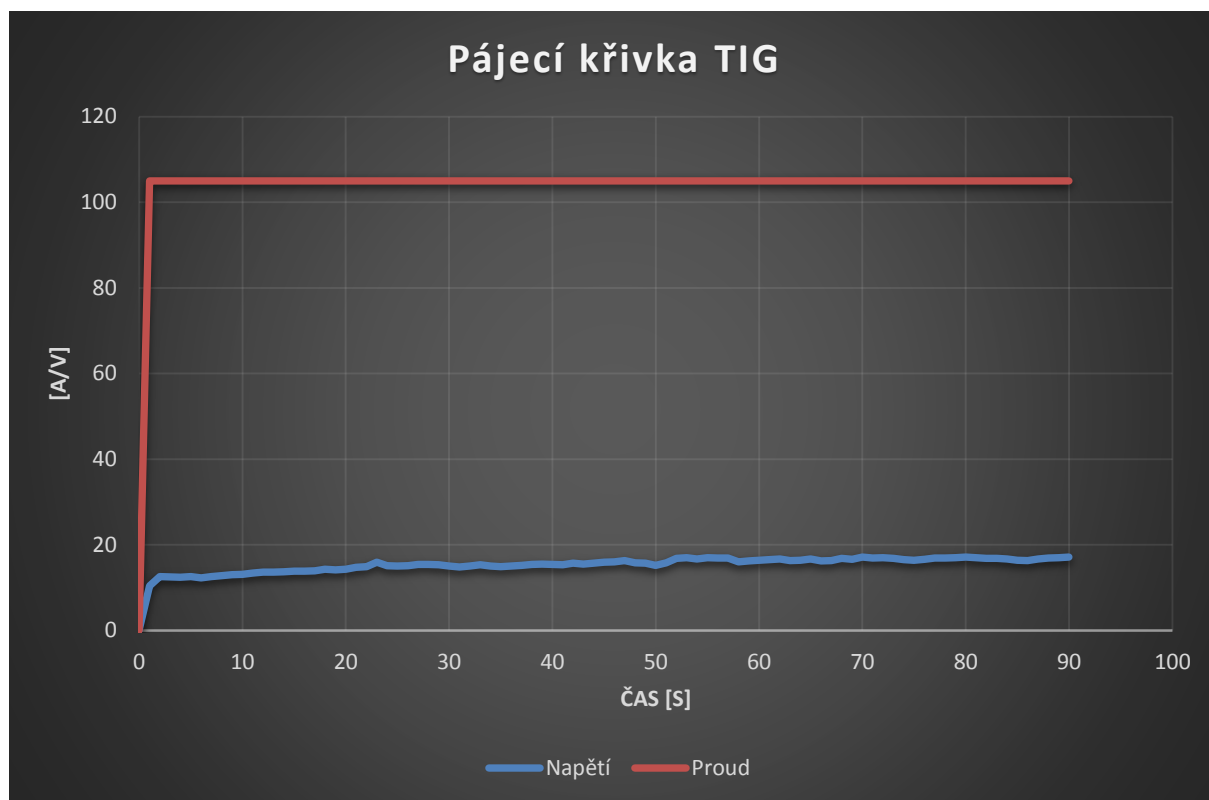
a) Svařovací křivka TIG



b) Svařovací křivka MIG



c) Pájecí křivka TIG



Tyto křivky (vztahuje se to i na křivku pod tímto odstavcem) zobrazují použité svařovací napětí a proud při svařování a pájení metodami MIG a TIG. Obě veličiny jsou v závislosti na čase. Při pohledu na svařovací/pájecí křivku TIG lze vidět typický konstantní průběh svařovacího proudu. V případě TIG svařování je roven 140 A a v případě TIG pájení je roven 105 A. Při TIG svařování bylo nastaveno větší hodnota svařovacího proudu z důvodu nutnosti natavení a spojení základního materiálu a přídavného materiálu. Naopak svařovací napětí „mírně“ kolísá a v případě TIG svařování se pohybuje v rozmezí 9,8 V až 10,6 V. V případě TIG pájení se svařovací napětí pohybuje v rozmezí 13,9 V až 16,9. V obou případech je toto kolísání dáno měnící se vzdáleností netavící se wolframové elektrody od svarové lázně způsobené především ručním svařováním. Při MIG svařování je svařovací napětí téměř konstantní, což je dáno nastavenou rychlostí podávání tavicího se svařovacího drátu, díky jemuž se nastavuje hodnota svařovacího proudu. Při MIG svařování je dosahováno svařovacího proudu v rozmezí od 121 A do 131 A a svařovací napětí se pohybuje v rozmezí od 15,4 V do 16,2 V. V případě MIG pájení se dosahuje větších hodnot svařovacího proudu a napětí. Svařovací proud se pohybuje v rozmezí od 218 A do 240 A. To je způsobeno svařovací rychlostí. Svařovací rychlost je v případě svařování MIG nižší z důvodu důkladného natavení a spojení základních materiálů. V případě pájení MIG jde pouze o natavení pájecího drátu, který se nanese do mezery a vyplní => není nutné řešit hloubku a šířku průvaru neboli dokonalé a rovnoměrné natavení a spojení obou materiálů.

d) Pájecí křivka MIG (Originální pájecí křivka z WeldEye)

Parametry svařování

Rychlost podávání drátu

průměr 12.9 m/min / min. 12.4 m/min / max. 13.2 m/min

průměr 12.9 m/min / min. 12.4 m/min / max. 13.2 m/min (filtrované starty a vypnutí)

Proud

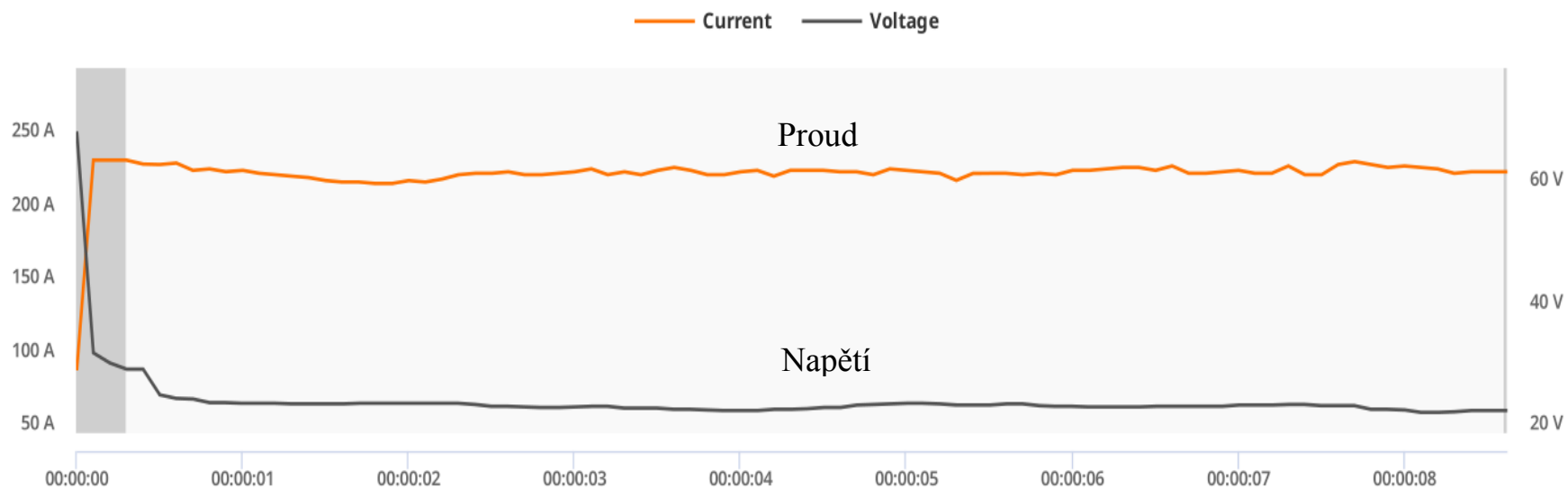
průměr 227 A / min. 93 A / max. 237 A

průměr 229 A / min. 221 A / max. 237 A (filtrované starty a vypnutí)

Napětí

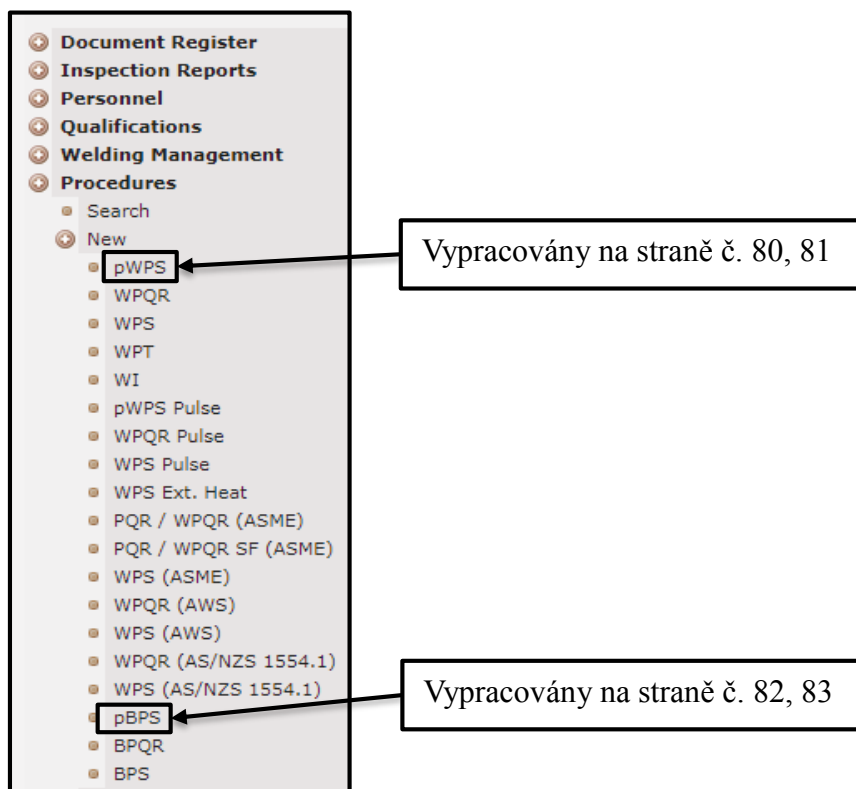
průměr 25.3 V / min. 23.4 V / max. 69.6 V

průměr 24.6 V / min. 23.4 V / max. 30.5 V (filtrované starty a vypnutí)


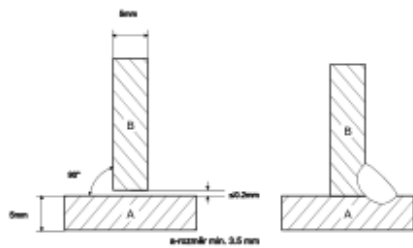





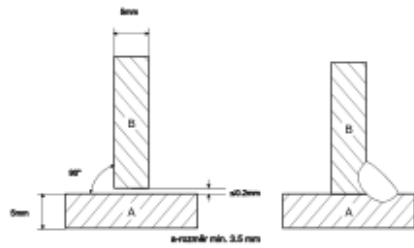
Obr. č. 80 : Monitorovací a čtecí zařízení značky Kempppi vlevo a vpravo papír pro načtení svař. informací (svářečcí personál, přídavný materiál, ochranný plyn atd.)


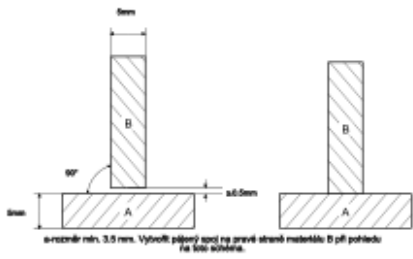



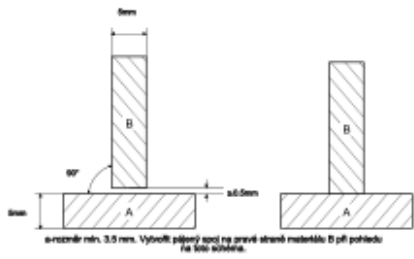
Obr. č. 81 : Nabídka software WeldEye v uživatelském prostředí ve výpočetní technice

		PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)				pWPS no: 00000930120 Ref.: Date: 04.06.20 Rev: IV					
Prod. by: ZČU FST Project: DIPLOMA THESIS Location: PLZEŇ		Client: Ref. spec.: Ref. Proc.:		Ref. stand: Exam. body:							
Welding process: 141 Shielding gas type: 1 Argon 4.6 Weaving (yes/no):		2 max: mm		3 max: mm							
Purgig gas type: l/min Welding positions: PB Joint type: FW Joint preparation: Cutting and grinding Cleaning method: Acetone cleaning Backing: Single/Double: Single side Back gouging: Flux designation: Flux handling: Tungsten electrode: 2.4 mm Torch angle: 45 ° Stand off distance: mm Nozzle diameter(s): mm Tack welding proc.: Rev:											
Identification of parent metal I: CE max: 0.42 C max: 0.17 PCM max: II: CE max: 0.42 C max: 0.17 PCM max:											
Part	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range (mm)	Diameter range (mm)					
I	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
II	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
Identification of filler metal											
Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling							
1	W3Si1 TIGROD 12.61	W3Si1 Ø2.0 mm									
2											
3											
Welding Parameters Equipment:											
Pass no.	Index	Dia. (mm)	Welding process	Wire feed speed (m/min)	Current (A)	Voltage (V)	Current / Polarity	Welding speed (mm/min)	Run Out Length (mm)	Gas (l/min)	Heat input (kJ/mm)
1			141	-	140	9.8 - 10.6	DC-	33.0		9	1550
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
				-	-	-		-			-
Heat treatment Method:											
Preheat min: °C Interpass temp. max: °C Heat treatment proc.:				Temp. control:							
PWHT min: °C max: °C Soaking: min/mm		min		Heating rate: °C/h		Cooling rate: °C/h					
Remarks:											
Additional info enclosed (Yes/No): Yes Date/Signature: 04.06.20 IV Igor Vilcsek Approved:											

		PRELIMINARY WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (pWPS)				pWPS no: 00000930121 Ref.: Date: 03.06.20 Rev: IV					
Prod. by: ZČU FST Project: DIPLOMA THESIS Location: PLZEŇ		Client: Ref. spec.: Ref. Proc.:		Ref. stand: Exam. body:							
Welding process	131										
Shielding gas type	1 Argon 4.6	2			3						
Weaving (yes/no)	max: mm				max: mm		max: mm				
Purging gas type	l/min										
Welding positions	PB										
Joint type	FW										
Joint preparation	Cutting and grinding										
Cleaning method	Acetone cleaning										
Backing											
Single/Double	Single side										
Back gouging											
Flux designation											
Flux handling											
Tungsten electrode	mm										
Torch angle	45	°									
Stand off distance	mm										
Nozzle diameter(s)	mm										
Tack welding proc.	Rev:										
Identification of parent metal I: CE max: 0.42 C max: 0.17 PCM max: II: CE max: 0.42 C max: 0.17 PCM max:											
Part	Name/Grade	Standard	Group	Delivery cond.	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]					
I	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
II	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
Identification of filler metal											
Index	Trade name	Classification	Group	Filler handling							
1	WELD G3Si1 ESAB	Ø 1.0 mm									
2											
3											
Welding Parameters Equipment:											
Pass no.	Index	Dia. [mm]	Welding process	Wire feed speed [m/min]	Current [A]	Voltage [V]	Current / Polarity	Welding speed [mm/min]	Run Out Length [mm]	Gas [l/min]	Heat input [kJ/mm]
1			131	5.00	121 . 131	15.4 . 16.2	DC+	71.4		15	1340 . 1.4
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
				-	-	-					-
Heat treatment Method:											
Preheat min: °C Interpass temp. max: °C Heat treatment proc.:				Temp. control:							
PWHT min: °C max: °C Soaking: min/mm		min		Heating rate: °C/h		Cooling rate: °C/h					
Remarks:											
Additional info enclosed (Yes/No): Yes Date/Signature: 03.06.20 Igor Vilcsek IV Approved:											

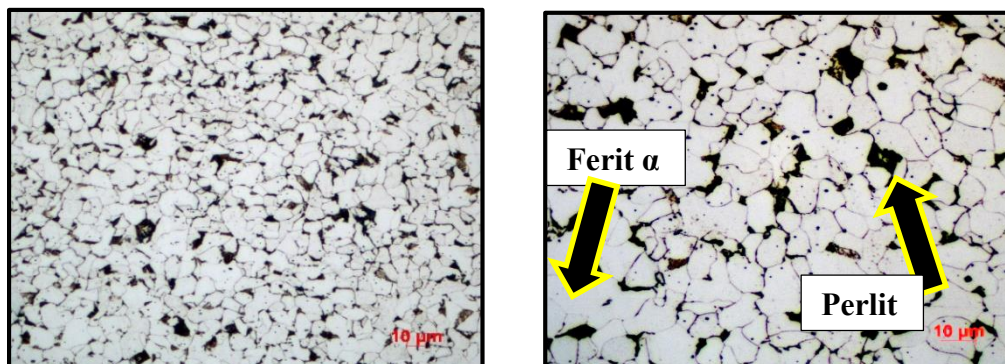


		Preliminary Brazing Procedure Specification (pBPS)		pBPS no.: 00000930119 Ref.: Date: 03.06.20 Rev: IV							
Prod. by: ZČU FST Address: Project: DIPLOMA THESIS Location: PLZEŇ Ref. BP:		Exam. body: Address: Ref. spec.: Client:		Ref. stand:							
Brazing process	TIG BRAZING										
Type											
Filler materials											
Type	Ag206 DLE EN1044										
Form	Castolin RB 6110 HOLÁ										
Method of filler metal supply											
Dim.	1.50 mm		mm		mm						
Other	1	2		3							
Flux material											
Flux type											
Form											
Method of flux supply											
Point of application											
Other											
Assembly design											
Assembly design											
Backing											
Backing Material (Type)											
Nozzle/burner size											
Nozzle/burner number											
Heating gas(es)											
Heating gas type						Pressure					
Argon 4.6						bar					
						bar					
Internal purge											
Jig/fixture details											
Identification of parent metal											
Part	Name/grade	Standard	Group	Delivery condition	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]					
I	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
II	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-					
Heat treatment											
Method:											
Preheat min.:	°C	Preheat time:	min	Post heat min.:	°C	Time:	min	Temp. control:			
Heat treatment proc.:		PWHT min.:	°C	max.:	°C						
Soaking:	min/mm	Soaking min.:	min	Heating rate:	°C/h	Heating rate max.:	°C	Cooling rate:	°C/h	Cooling rate max.:	°C/h
Remarks:						Additional information enclosed(Yes/No): Yes Date/signature: 03.06.20 Igor Vilcsek Approved:					

		Preliminary Brazing Procedure Specification (pBPS)		pBPS no.: 00000930118 Ref.: Date: 04.06.20 Rev: IV					
Prod. by: ZČU FST Address: Project: DIPLOMA THESIS Location: PLZEŇ Ref. BP:		Exam. body: Address: Ref. spec.: Client:		Ref. stand:					
Brazing process	MIG brazing								
Type									
Filler materials									
Type	CuSi3								
Form	OK Autrod 19.30								
Method of filler metal supply									
Dim.	1.00 mm		mm		mm				
Other	1	2		3					
Flux material									
Flux type									
Form									
Method of flux supply									
Point of application									
Other									
Assembly design									
Assembly design									
Backing									
Backing Material (Type)									
Nozzle/burner size									
Nozzle/burner number									
Heating gas(es)									
Heating gas type	Pressure								
Argon 4.6		bar							
		bar							
Internal purge									
Jig/fixture details									
Identification of parent metal									
Part	Name/grade	Standard	Group	Delivery condition	Thickness range [mm]	Diameter range [mm]			
I	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-			
II	S235/S275/S355	EN 10025-2	1.4	+AR (+Z)	5.00 -	-			
Heat treatment									
Method:									
Preheat min.:	°C	Preheat time:	min	Post heat min.:	°C	Time:	min	Temp. control:	
Heat treatment proc.:		PWHT min.:	°C	max.:	°C				
Soaking:	min/mm	Soaking min.:	min	Heating rate:	°C/h	Heating rate max.:	°C	Cooling rate:	°C/h
Cooling rate max.:	°C/h								
Remarks:				Additional information enclosed(Yes/No): Yes					
				Date/signature: 04.06.20 Igor Vilcsek					
				Approved:					

18 Nedestruktivní a destruktivní zkoušení materiálu

Jak už bylo v úvodu zmíněno, tak ocel S236JR+AR (+Z) je feriticko-perlitická viz obr. č. 82.



Obr. č. 82: Feriticko - perlitická ocel S235JR + AR (+Z), zvětšení 500 x vlevo a vpravo zvětšení 1000 x, Ferit představuje „bílá zrna“ a perlit představuje „černé ostrůvky“. Jsou zde i nečistoty v podobě menších „teček“ uvnitř feritického zrna. Může se jednat o oxidy nebo vměstky.

18.1 Vady svarového spoje MIG a TIG dle ČSN EN ISO 5817 (6520-1)

Obecně se nedestruktivní zkoušení materiálu (dále jen „NDT“) řídilo podle ČSN EN ISO 17635 - vzhledem k metodě svařování, základnímu materiálu, přídavnému materiálu, typu spoje, geometrie spoje, uspořádání konstrukční části, předpokládanému typu diskontinuity a stupni jakosti. Jedná se o svarové spoje oceli, která má mez kluzu 235 MPa.

18.1.1 Nedestruktivní testování materiálu

Před destruktivním zkoušením (dále jen „DT“) svarového spoje byla vybrána jako nedestruktivní zkouška přímá vizuální kontrola (VT) dle ČSN EN ISO 17637, která je dle ČSN EN ISO 9606-1 závazná pro tento typ svaru. Je nejjednodušší a nejobvyklejší nedestruktivní zkouška pro nedestruktivní zjišťování povrchových (vnějších) vad svarových spojů. Důležitý je přístup k svarovému spoji, který v tomto případě je vhodný. Vizuálně (okem) byl zkontrolován jak svarový spoj, tak i jeho okolí (bez pomůcek) z důvodu možného výskytu vad.

Tuto zkoušku může provádět pouze kvalifikovaný pracovník dle ČSN EN ISO 17637.

18.1.2 Destruktivní testování materiálu

Po NDT byla pro kontrolu výskytu vnitřních vad svarového spoje vybrána metalografická kontrola (mikroskopická a makroskopická zkouška) dle ČSN EN ISO 17639. ČSN EN ISO 9606-1 sice popisuje, že by měla být provedena zkouška rozlomením dle ČSN EN ISO 9017, ale může se tato zkouška nahradit zkouškou makrostruktury dle ČSN EN ISO 17639. Navíc ani zkušební kusy této diplomové práce nesplňovaly rozměry zkušebních kusů, ze kterých byly následně odřezány zkušební vzorky pro tuto destruktivní zkoušku, viz výkres a ČSN EN ISO 9017. Taktéž by šlo obejít rozměry zkušebních kusů a počet zkušebních vzorků výrobkovou normou nebo dohodou mezi smluvními stranami.

Během přípravy mikroskopické a makroskopické zkoušky proběhl obvyklý postup metalografie (odběr vzorku, broušení, leštění, leptání, pozorování a vyhodnocení), ale z důvodu velikosti vzorku nebylo možné provést většinu přípravy v automatech, ale pouze ručně. Pro vyhodnocení makrostruktury sice není leštění požadováno dle ČSN EN ISO 9606-1, ale vzhledem

k tomu, že se vyhodnocovala i mikrostruktura, tak to bylo provedeno v rámci toho.

Potřeba zmínit:

Místo odběru zkušební vzorku na zkušebním kuse 1 a 3 lze vidět na obr. č. 71 a 73.

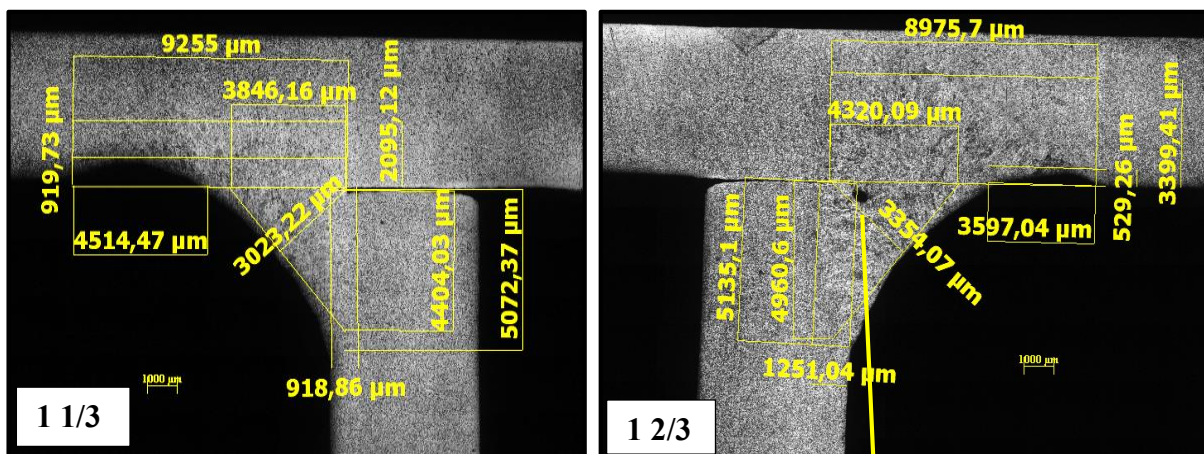
Leptání výbrusu proběhlo 1% Nitalem po dobu 40 vteřin. V případě leptání pro pozorování zinkové vrstvy byl použit stejný leptací roztok jako předchozí, ale pouze po dobu 6 vteřin.

Pozorování a vyhodnocení makroskopické a mikroskopické zkoušky proběhlo pomocí světelného mikroskopu

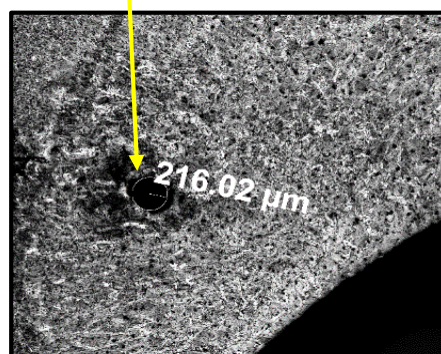
Zkontrolovala se makrostruktura a mikrostruktura svarového spoje typu T viz obr. č. 83 až obr. č. 91.

a) TIG svařování - zkušební kus č. 1, zkušební vzorek 1/3 a 2/3

Vzhledem k úvodu praktické diplomové práce, kde byl popsán a zvolen stupeň jakosti, podle nějž se zjišťovala skutečnost, jestli naleznutá vada je přípustná nebo nepřípustná dle ČSN EN ISO 5817 (6520-1) viz tab. č. 30. Označení zkušebních vzorků je uvedeno na obrázcích v bílém poli a i ve zmíněné tabulce. První číslo označuje číslo zkušební kusu, viz úvod praktické části a druhé číslo označuje vzdálenost řezu od začátku spoje.



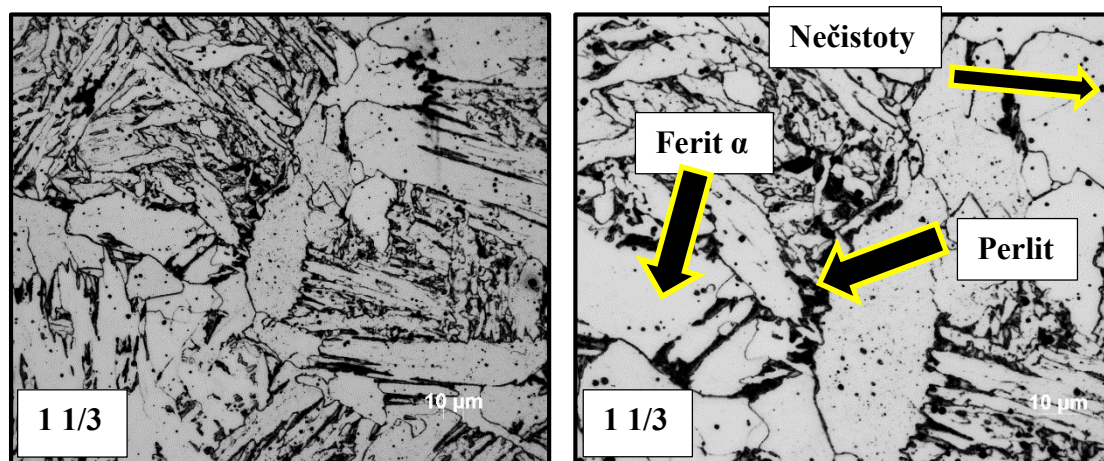
Obr. č. 83: TIG svar v 1/3 vlevo a 2/3 vpravo (zvětšení 25 x, slepovaný obraz)



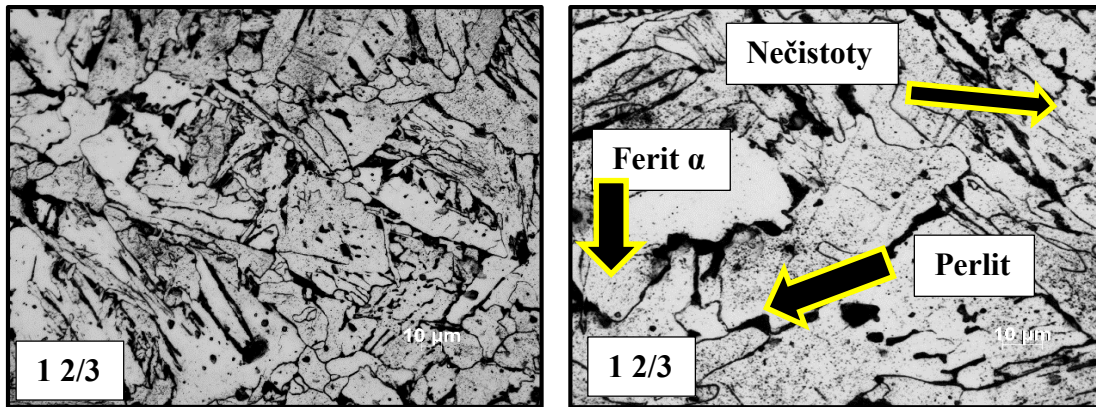
Obr. č. 84: Detail póru ve vzorku 1 2/3 při zvětšení 25x

Metoda zkoušení	Označ. zkuš. vzorku	Ref. č.	Název vady	Mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti D	Poznámka	Přípustná (Ano/Ne)
NDT	1 1/3 1 2/3	602	Rozstřík	Přípustnost závisí na použití, např. materiálu, ochraně proti korozi	-	Ne
NDT	1 1/3 1 2/3	5011	Souvislý zápal	$h \leq 0,2 \cdot t$, ale max. 1 mm	Požadován plynulý přechod	Ano
DT	1 2/3	2011	Pór	Maximální rozměr póru $d \leq 0,4 \cdot a$, ale max. 5 mm		Ano
NDT/DT	1 1/3 1 2/3	5213	Podkročení velikosti kout. svaru			Ne

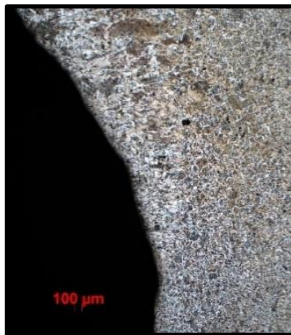
Tab. č. 30: Přehled nalezených vad svarového spoje klasifikovaných dle ČSN EN ISO 6520-1



Obr. č. 85: Mikrostruktura v 1/3 TIG svarového spoje zkušební kusu č. 1 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř svaru, feriticko perlitická mikrostruktura (ferit alfa – „bílá zrna“, perlit – „černé ostrůvky“, „drobnější černé tečky“ uvnitř feritu jsou nečistoty oceli s největší pravděpodobností ve formě oxidů



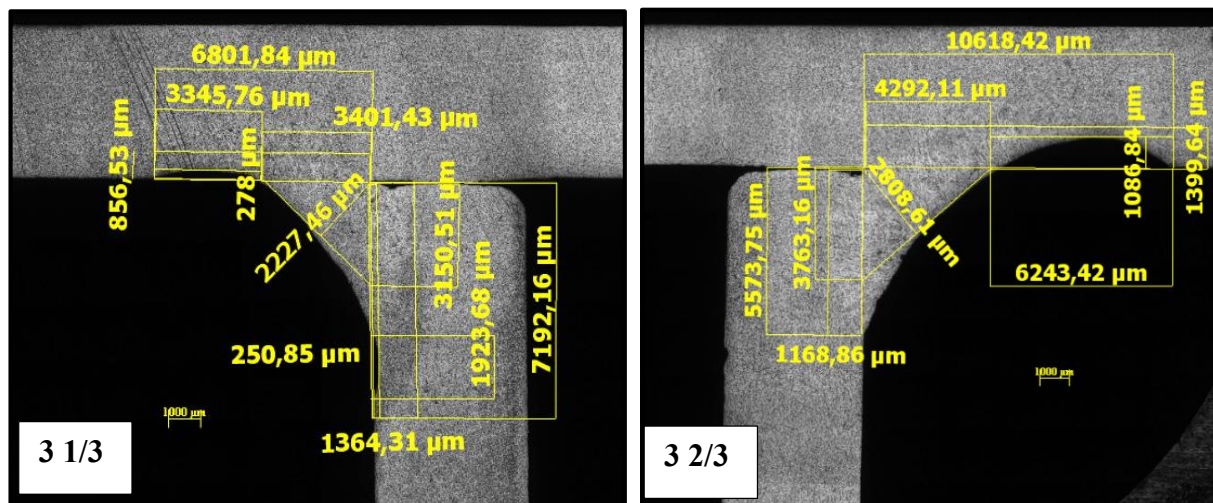
Obr. č. 86: Mikrostruktura ve 2/3 TIG svarového spoje zkušební kusu č. 1 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř svaru, feriticko perlitická mikrostruktura (ferit alfa – „bílá zrna“, perlit – „černé ostrůvky“, „drobnější černé tečky“ uvnitř feritu jsou nečistoty oceli s největší pravděpodobností ve formě oxidů



Obr. č. 87: Rozhraní svar – základní materiál (zvětšení 25 x)

b) MIG svařování - zkušební kus č. 3, zkušební vzorek č. 1/3 a 2/3

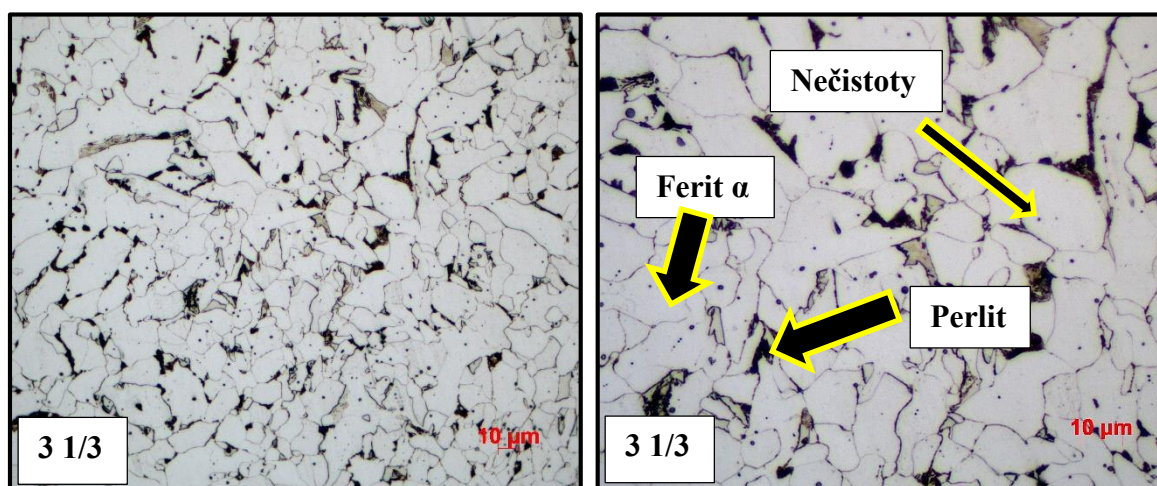
Vzhledem k úvodu praktické diplomové práce, kde byla popsán a zvolen stupeň jakosti, podle něž se zjišťovala skutečnost, jestli naleznutá vada je přípustná nebo nepřípustná dle ČSN EN ISO 5817 (6520-1) viz tab. č. 31. Označení zkušebních vzorků je uvedeno na obrázcích v bílém poli a i ve zmíněné tabulce. První číslo označuje číslo zkušební kusu, viz úvod praktické části a druhé číslo označuje vzdálenost řezu od začátku spoje.



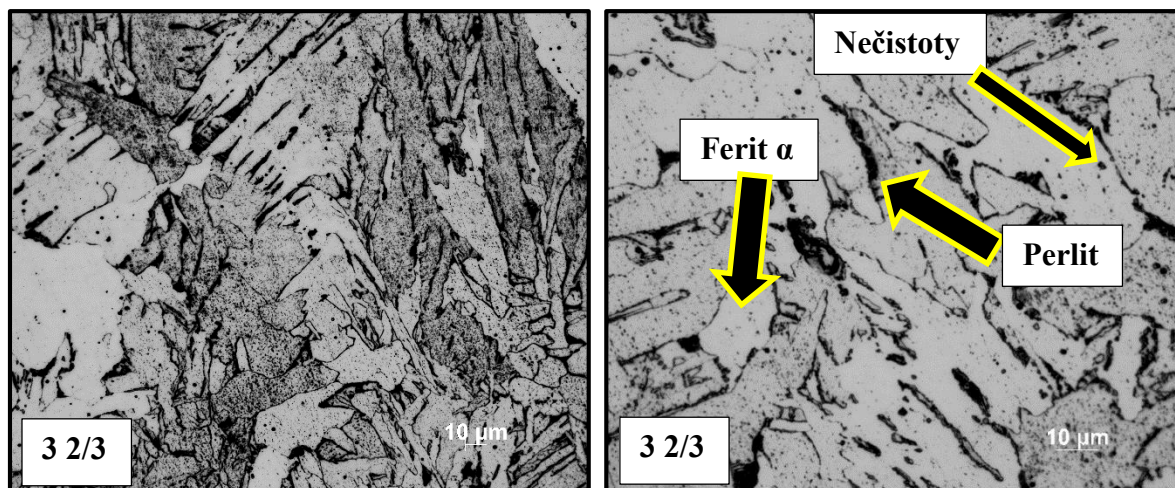
Obr. č. 88: MIG svar v 1/3 vlevo a 2/3 vpravo (zvětšení 25x, slepovaný obraz)

Metoda zkoušení	Označ. zkuš. vzorku vady	Ref. č.	Název vady	Mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti D	Poznámka	Přípustná (Ano/Ne)
NDT	3 1/3 3 2/3	602	Rozstřík	Přípustnost závisí na použití, např. materiálu, ochraně proti korozi	-	Ne
NDT	3 1/3 3 2/3	5011	Souvislý Zápal	$h \leq 0,2 \cdot t$, ale max. 1 mm	Požadován plynulý přechod	Ne u 3 2/3 => celkově Ne
NDT/DT	3 1/3 3 2/3	5213	Podkročení velikosti kout. svaru			Ne

Tab. č. 31: Přehled nalezených vad svarového spoje klasifikovaných dle ČSN EN ISO 6520-1



Obr. č. 89: Mikrostruktura ve 1/3 MIG svarového spoje zkušebnímu kusu č. 3 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), „černé ostrůvky“ jsou perlit a „bíla zrna“ jsou ferit alfa, nejmenší „černé tečky“ uvnitř feritického zrna jsou s největší pravděpodobností nečistoty ve formě oxidů



Obr. č. 90: Mikrostruktura ve 2/3 MIG svarového spoje zkušební kusu č. 3 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř svaru, „černé ostrůvky“ jsou perlit a „bílá zrna“ jsou ferit alfa, nejmenší „černé tečky“ uvnitř feritického zrna jsou s největší pravděpodobností nečistoty ve formě oxidů



Obr. č. 91: Rozhraní svar – základní materiál (zvětšení 25 x)

18.2 Vady pájeného spoje MIG a TIG

18.2.1 Nedestruktivní testování materiálu

Byla vybrána přímá vizuální kontrola (VT) dle ČSN EN 12799. Je nejjednodušší a nejobvyklejší nedestruktivní zkouška pro nedestruktivní zjišťování vad pájených spojů. Důležitý je přístup k pájenému spoji, který v tomto případě je vhodný. Vizuálně (okem) byl zkontrolován jak pájený spoj, tak i jeho okolí (bez pomůcek) z důvodu možného výskytu vad.

Tuto zkoušku může provádět pouze kvalifikovaný pracovník dle ČSN EN 12799 (4.3, 4.4, 4.5, 4.6).

18.2.2 Destruktivní testování materiálu

Byla vybrána metalografická kontrola (mikroskopická a makroskopická zkouška) dle ČSN EN 12797. Proběhl obvyklý postup metalografie (odběr vzorku, broušení, leštění, leptání, pozorování a vyhodnocení), ale z důvodu velikosti vzorku nebylo možné provést většinu přípravy v automatech, ale pouze ručně. Pro vyhodnocení makrostruktury sice není leštění požadováno dle ČSN EN ISO 9606-1, ale vzhledem k tomu, že se vyhodnocovala i mikrostruktura, tak to bylo provedeno v rámci toho.

Potřeba zmínit:

Místo odběru zkušební vzorku na zkušebním kuse 2 a 4 lze vidět na obr. č. 72 a 74.

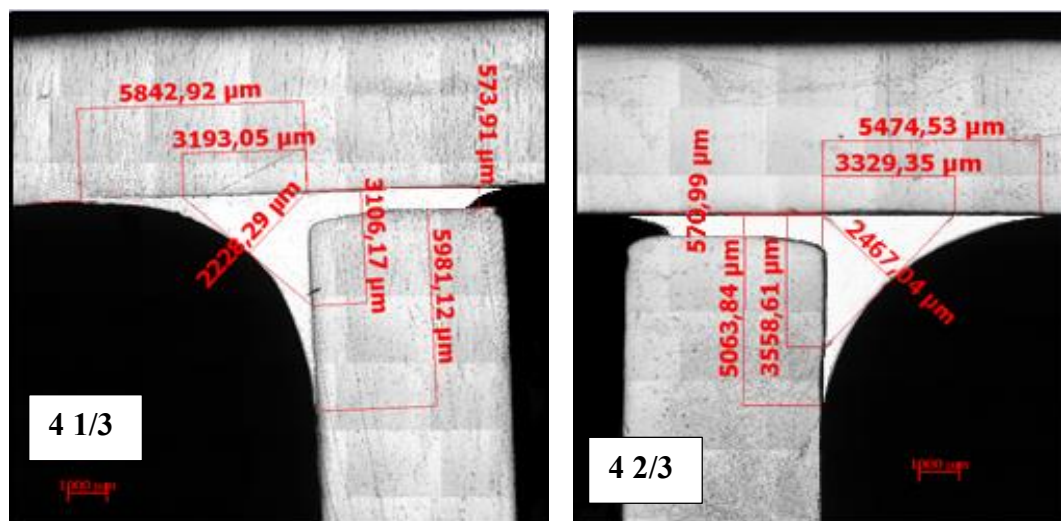
Leptání výbrusu proběhlo v roztoku 30 ml HCl + 10g FeCl₃ + 120ml C₂H₅OH po dobu 30 vteřin v případě TIG pájeného spoje a v případě MIG pájeného spoje to bylo 120 vteřin. V případě leptání pro pozorování zinkové vrstvy byl použit leptající roztok 1% Nital po dobu 6 vteřin.

Pozorování a vyhodnocení makroskopické a mikroskopické zkoušky proběhlo pomocí světelného mikroskopu

Zkontrolovala se makrostruktura a mikrostruktura pájeného spoje typu T viz obr. č. 92 až č. 101.

c) TIG pájení - zkušební kus č. 4, zkušební vzorek č. 1/3 a 2/3

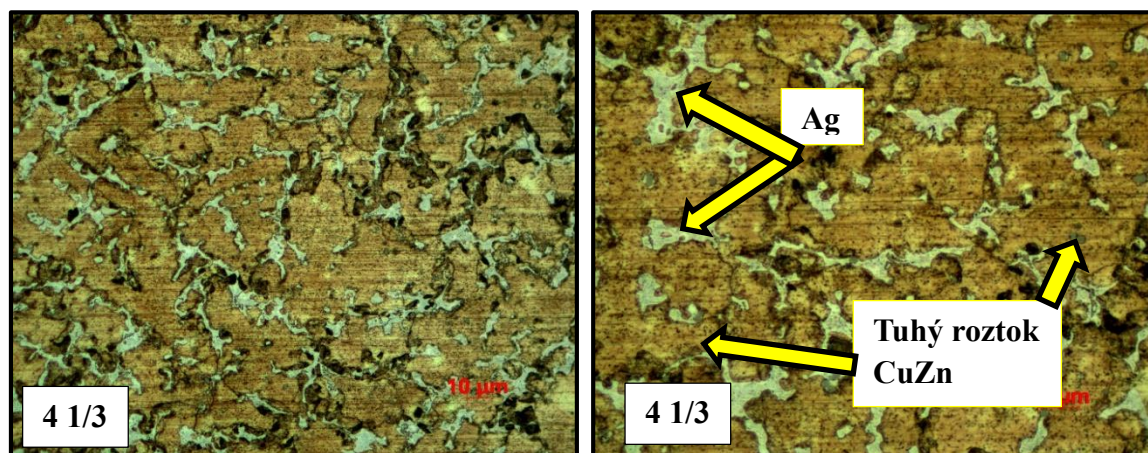
Vzhledem k úvodu praktické diplomové práce, kde byl popsán a zvolen stupeň jakosti, podle nějž se zjišťovala skutečnost, jestli naleznutá vada je přípustná nebo nepřípustná (dle ČSN EN ISO 18279) viz tab. č. 32. Označení zkušebních vzorků je uvedeno na obrázcích v bílém poli a i ve zmíněné tabulce. První číslo označuje číslo zkušební kusu, viz úvod praktické části a druhé číslo označuje vzdálenost řezu od začátku spoje.



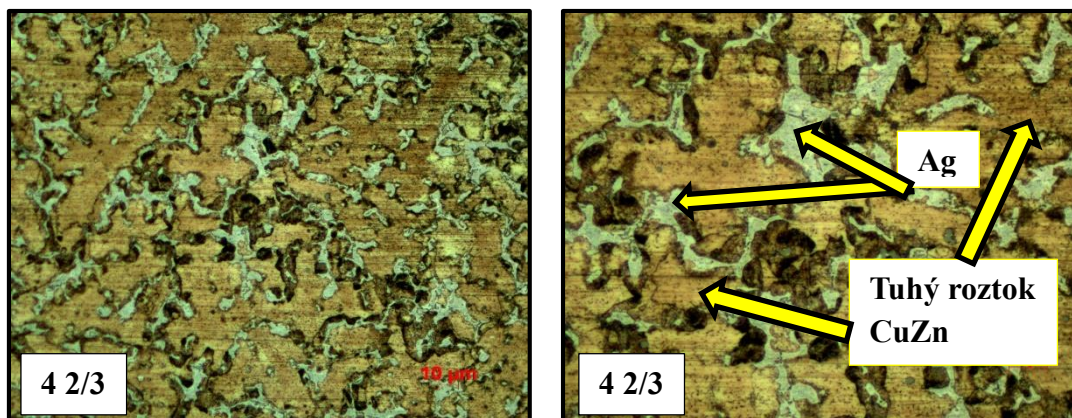
Obr. č. 92: TIG pájený spoj v 1/3 vlevo a 2/3 vpravo (zvětšení 25 x, slepovaný obraz)

Metoda zkoušení	Označ. zkuš. vzorku vady	Označ.	Název vady	Mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti D	Poznámka	Přípustná (Ano/Ne)
NDT	4 1/3 4 2/3	6FAAA	Nedosta- tečný koutový spoj	Dovoleno, po- kud není funkce komponenty ne- příznivě ovliv- něna	Koutový spoj se vytvořil pod stanovenou ve- likost	Ne
NDT	4 1/3 4 2/3	5GAAA	Nepravi- delný koutový spoj	Dovoleno, po- kud není funkce komponenty ne- příznivě ovliv- něna	Měníci se vzhled kouto- vého spoje	Ano
NDT	4 1/3 4 2/3	7CAAA	Rozstřík	Dovoleno	Kapky pájky ulpělé na po- vrchu pracov- ního kusu	Ano
NDT	4 1/3 4 2/3	7QAAA	Nad- měrné te- čení pájky	Dovoleno	Nadměrné te- čení pájky	Ano

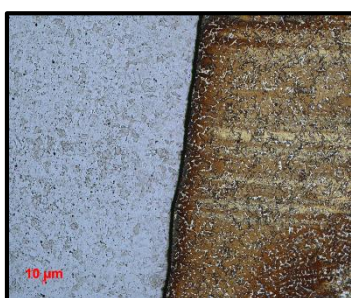
Tabulka č. 32: Přehled nalezených vad pájeného spoje klasifikovaných dle ČSN EN ISO 18279



Obr. č. 93: Mikrostruktura ve 1/3 TIG pájeného spoje zkušební kusu č. 4 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř pájeného spoje, „bílé ostrůvky“ jsou stříbro, zbytek je tuhý roztok CuZn



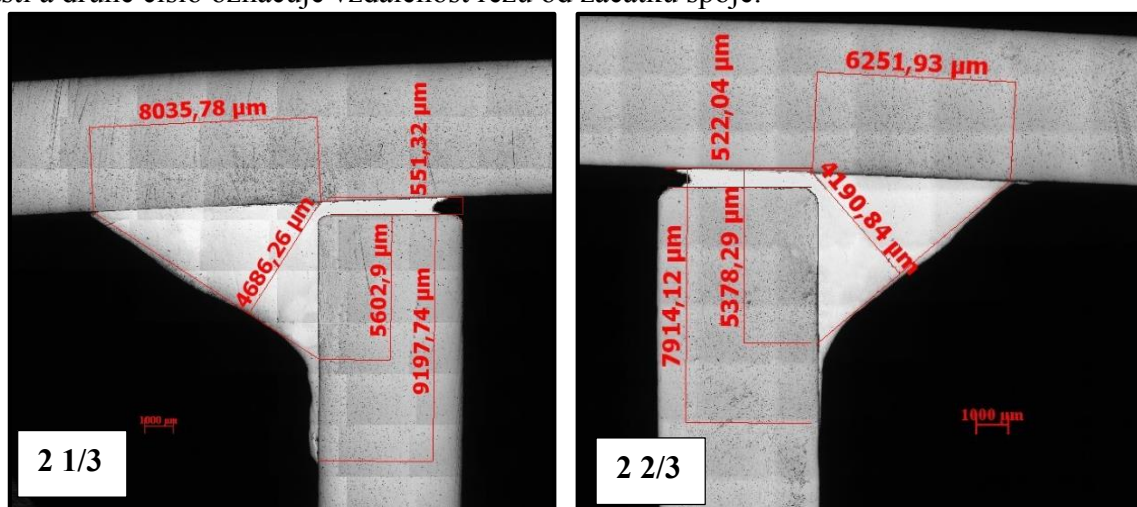
Obr. č. 94: Mikrostruktura ve 2/3 TIG pájeného spoje zkušebního kusu č. 4 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř pájeného spoje, „bílé ostrůvky“ jsou stříbro, zbytek je tuhý roztok CuZn



Obr. č. 95: Rozhraní pájený spoj – základní materiál (zvětšení 100 x)

d) MIG pájení - zkušební kus č. 2, zkušební vzorek č. 1/3 a 2/3

Vzhledem k úvodu praktické diplomové práce, kde byla popsán a zvolen stupeň jakosti, podle nějž se zjišťovala skutečnost, jestli naleznutá vada je přípustná nebo nepřípustná (dle ČSN EN ISO 18279) viz tab. č. 33. Označení zkušebních vzorků je uvedeno na obrázcích v bílém poli a i ve zmíněné tabulce. První číslo označuje číslo zkušebního kusu, viz úvod praktické části a druhé číslo označuje vzdálenost řezu od začátku spoje.

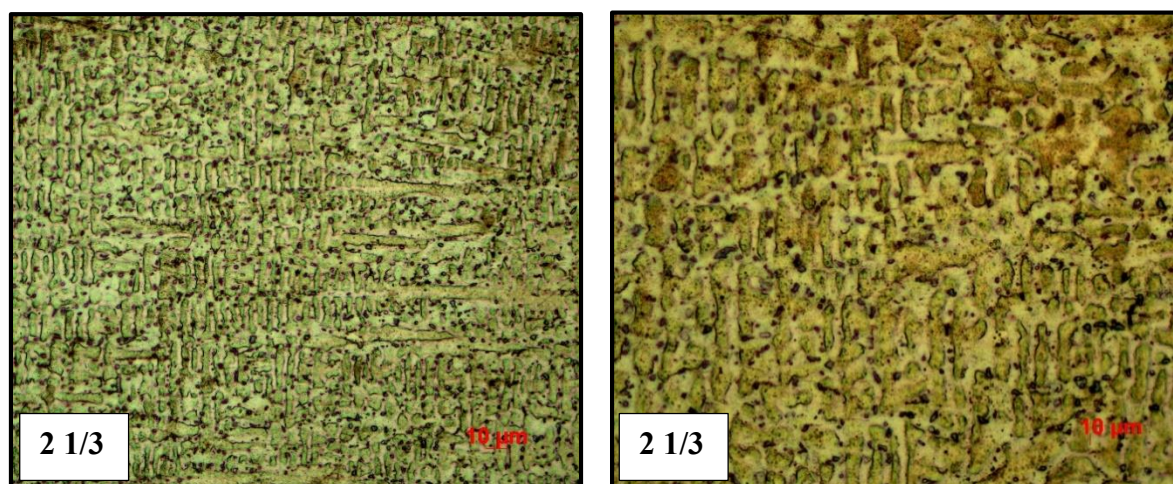


Obr. č. 96: MIG - pájený spoj v 1/3 vlevo a 2/3 vpravo (zvětšení 25 x, slepovaný obraz)

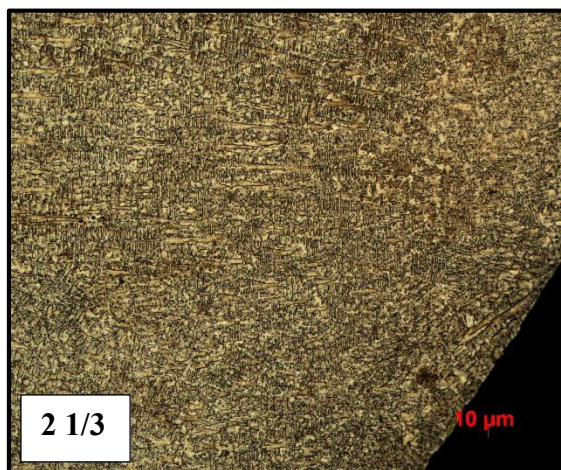
Metoda zkoušení	Označ. zkuš. vzorku vady	Označ.	Název vady	Mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti D	Poznámka	Přípustná (Ano/Ne)
NDT	2 1/3	6BAAA	Nadbytek pájky	Dovoleno	Pájka se přelila na základní materiál	Ano
NDT	2	7CAAA	Rozstřík	Dovoleno	Kapky pájky ulpělé na povrchu pracovního kusu	Ano
NDT	3	2BALF	Povrchový pór	Dovoleno, pokud není funkce komponenty ovlivněna	Plynový pór vystupující na povrch	Ano
NDT	4	5GAAA	Nepravidelný koutový spoj	Dovoleno, pokud není funkce komponenty nepříznivě ovlivněna	Měnicí se vzhled koutového spoje	Ano

Tabulka č. 33: Přehled nalezených vad pájeného spoje klasifikovaných dle ČSN EN ISO 18279

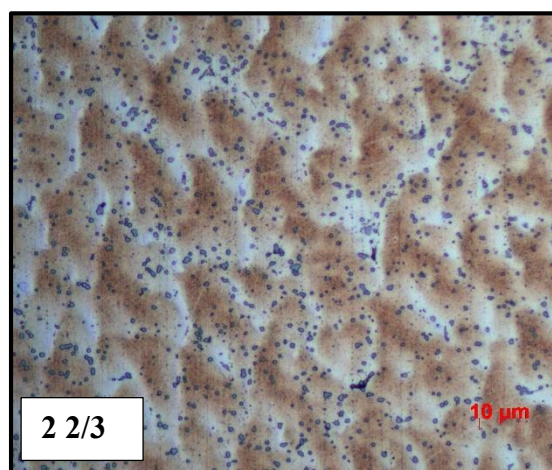
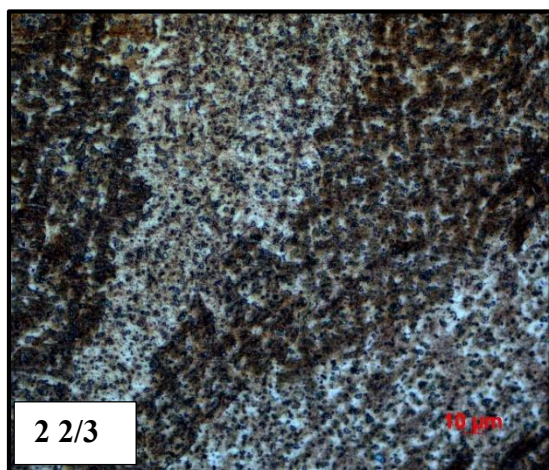
Při pohledu na obr. č. 96 lze vidět, že veškeré rozměry (a - rozměr atd.) byly dodrženy.



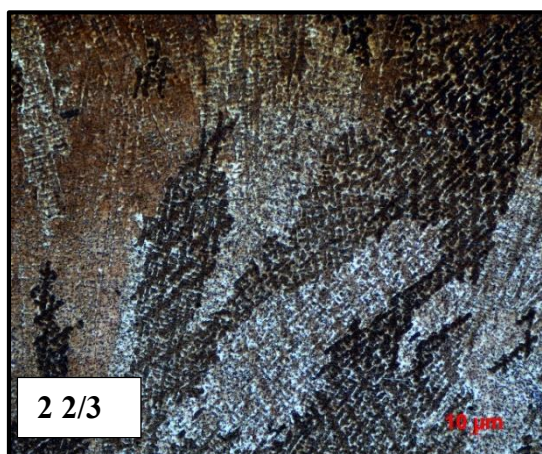
Obr. č. 97: Mikrostruktura ve 1/3 MIG pájeného spoje zkušební kusu č. 2 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř pájeného spoje, tuhé roztok CuSi, „černé tečky“ jsou nečistoty nejčastěji ve formě oxidů



Obr. č. 98: Mikrostruktura ve 1/3 MIG pájeného spoje zkušebního kusu č. 2 (200 x zvětšení)



Obr. č. 99: Mikrostruktura ve 2/3 MIG pájeného spoje zkušebního kusu č. 2 (500 x zvětšení vlevo a vpravo 1000 x zvětšení), foceno uvnitř pájeného spoje, tuhý roztok CuSi, „černé tečky“ jsou nečistoty nejčastěji ve formě oxidů



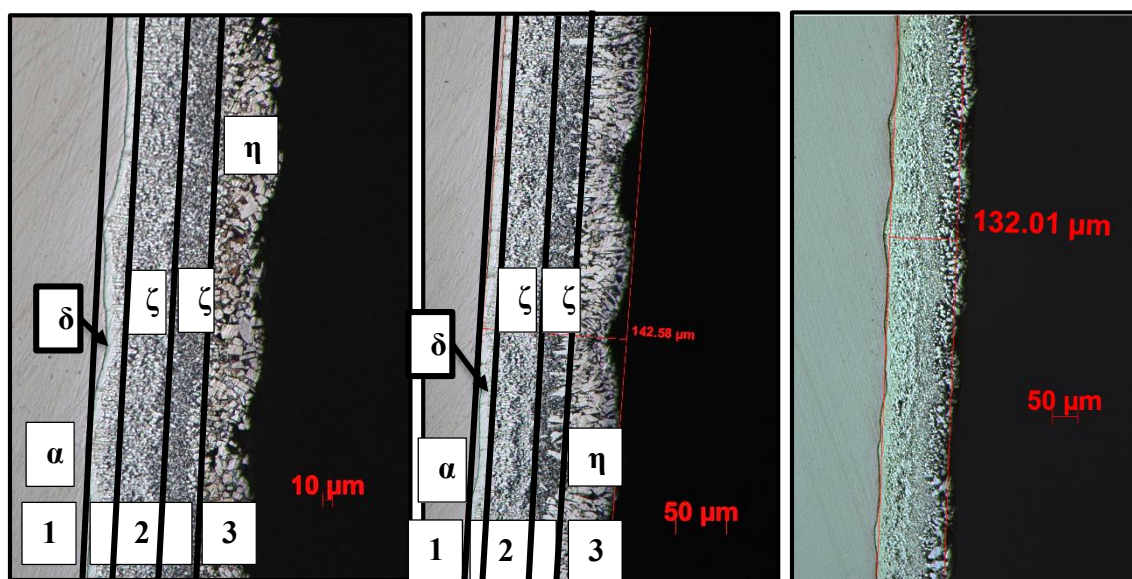
Obr. č. 100: Mikrostruktura ve 2/3 MIG pájeného spoje zkušebního kusu č. 2 (200 x zvětšení), foceno uvnitř pájeného spoje



Obr. č. 101: Rozhraní svarový spoj – základní materiál (zvětšení 100 x)

19 Vyhodnocení stavu zinkové vrstvy v místě spoje

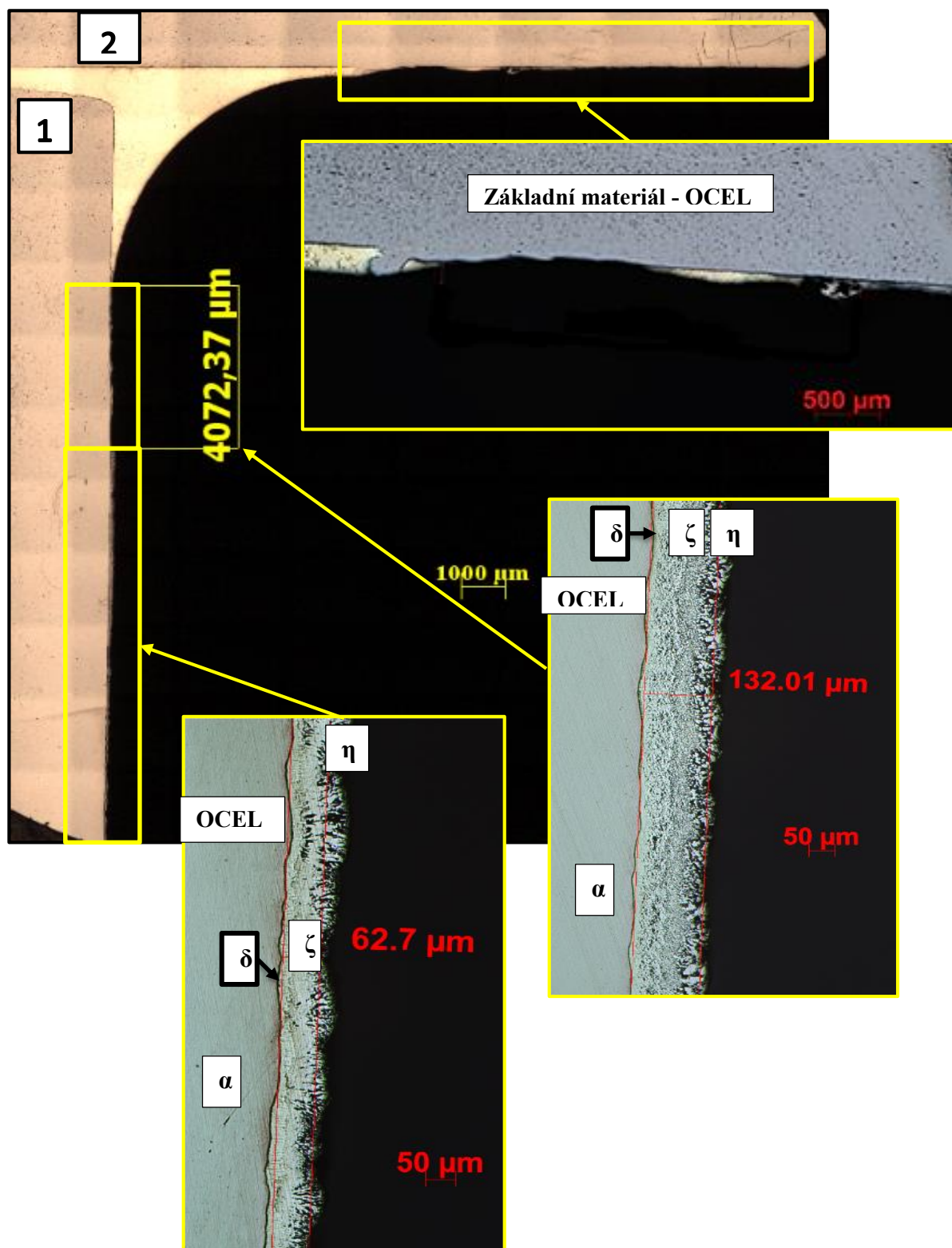
Před pozorováním zinkové vrstvy v místě spoje bylo zapotřebí dostatečně očistit zkušební vzorky a to nejen v řezu, ale i po celém povrchu. Poté byl tento zinkový povlak zkoumán pod světelným mikroskopem na různém zvětšení a tyto snímky lze vidět na obr. č. 102. Jedná se o stanovení tloušťky povlaku mikroskopickou metodou dle ČSN EN ISO 1463. V porovnání zinkového povlaku v teoretické části lze říci, že žárové zinkování ponorem proběhlo úspěšně, neboť tato mikrostruktura odpovídá oceli neuklidněné křemíkem (použitá ocel pro experiment). Byly nalezeny všechny fáze, které má tento povlak mít. V některých případech se může stát, že primární a sekundární fáze ζ (zéta) nejsou od sebe rozlišitelné. Nicméně na funkčnost to nemá vliv. Na obr. č. 103, 104, 105 a 106 lze vidět, jak tento zinkový povlak dopadl po vzniku svařového/pájeného spoje. Je potřeba se zaměřit především na tloušťku povlaku a jeho celistvost.



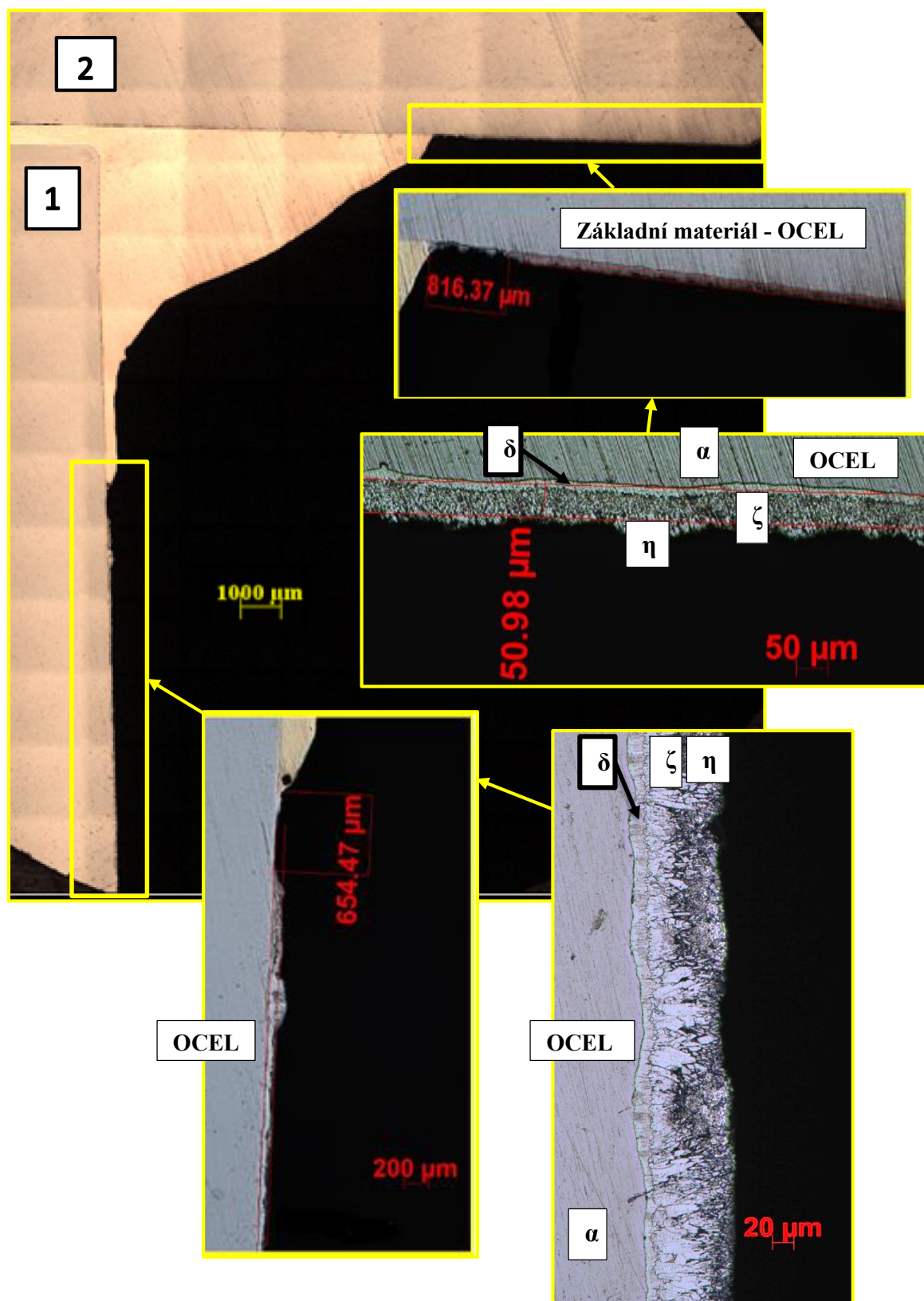
Obr. č. 102: Příklady zinkového povlaku během zkoumání svařových/pájených spojů (směrem zleva zvětšení 200 x, 200 x, 100 x), přičemž 1. vrstva je železo α (alfa), 2. vrstva je slitinová fáze Fe - Zn složená ze 3 fází - fáze δ (delta) primární fáze ζ (zéta), sekundární fáze ζ (zéta), 3. vrstva je čistý zinek (fáze η – éta).

Na těchto snímcích lze vidět jak slitinovou fázi Fe + Zn, tak i zinek, jak bylo popsáno v teoretické části. Při pohledu níže na jednotlivé zkoumané spoje lze říci, že během svařování nelze zajistit téměř žádný zinkový povlak v okolí spoje. Nicméně v případě pájení se zinkový povlak tolik neodpařoval z důvodu nižších teplot procesu pájení v porovnání se svařováním.

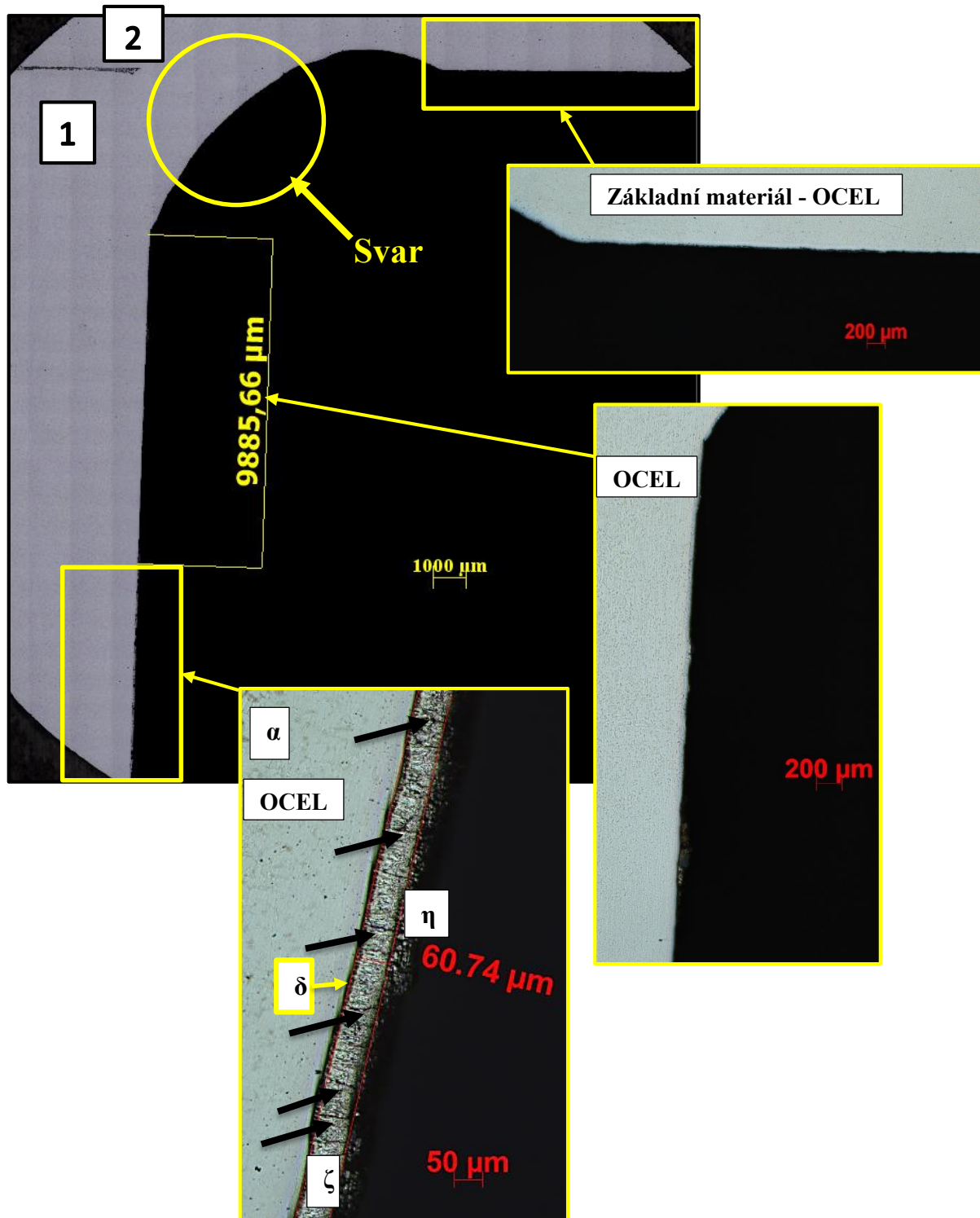
Při TIG pájení se ale i tak odpařilo větší množství zinku v porovnání s MIG pájením. MIG pájení je proto, co se týče nejnižšího odpaření zinkového povlaku, vybrána jako nejvhodnější metoda.



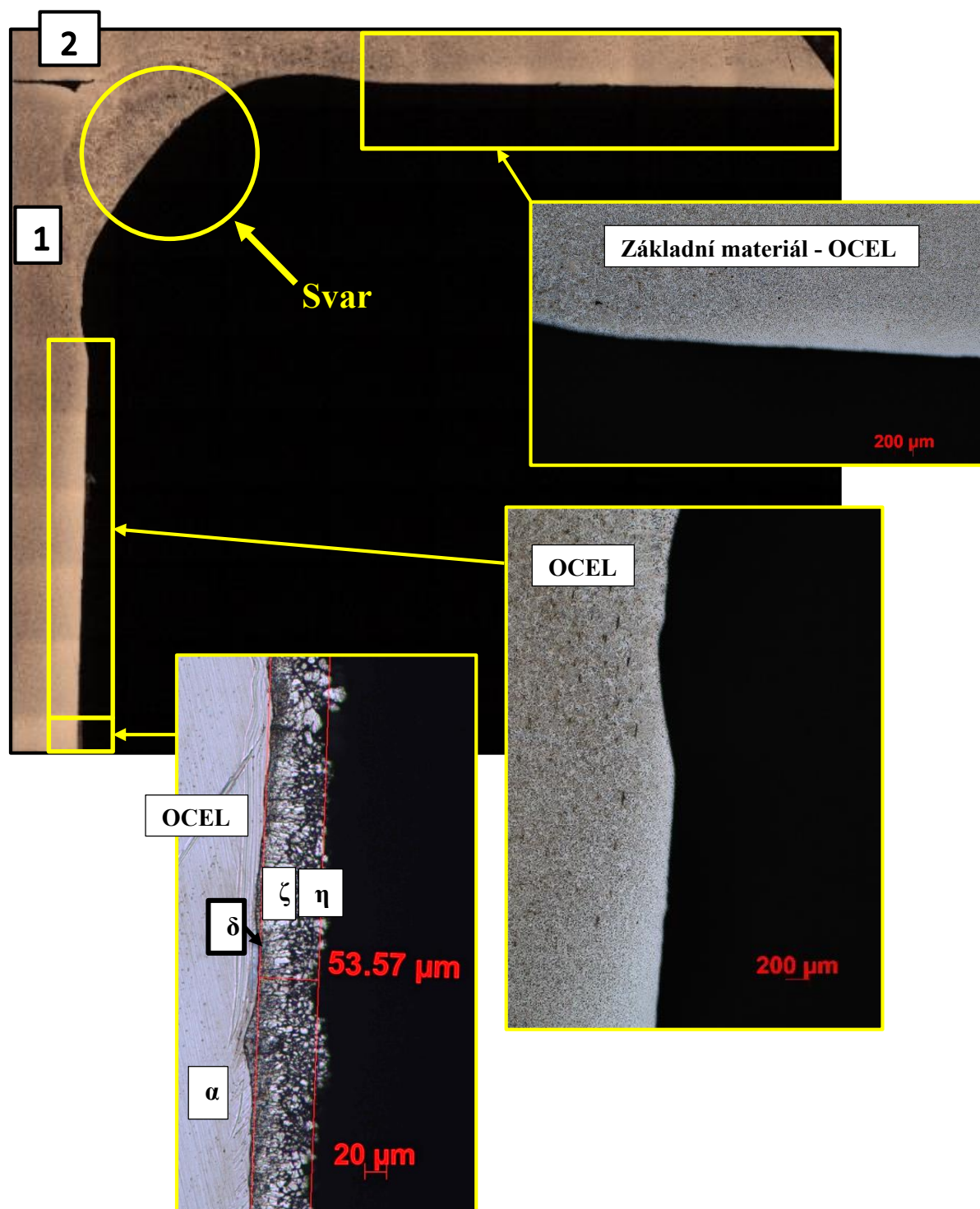
Obr. č. 103: Zinkový povlak - TIG pájený spoj (na materiálu č. 1 v oblasti spoje lze vidět zachování všech fází zinkového povlaku, naopak na materiálu č. 2 se zinkový povlak v oblasti spoje úplně odpařil)



Obr. č. 104: Zinkový povlak - MIG pájený spoj (na materiálu č. 1 a 2 v oblasti spoje lze vidět zachování všech fází zinkového povlaku. Problémem je mezera mezi zinkovým povlakem a nanesenou pájkou na obou materiálech. Řešením by bylo nanést vrstvičku zinku zinkovou pastou a vyplnit tuto mezeru.).



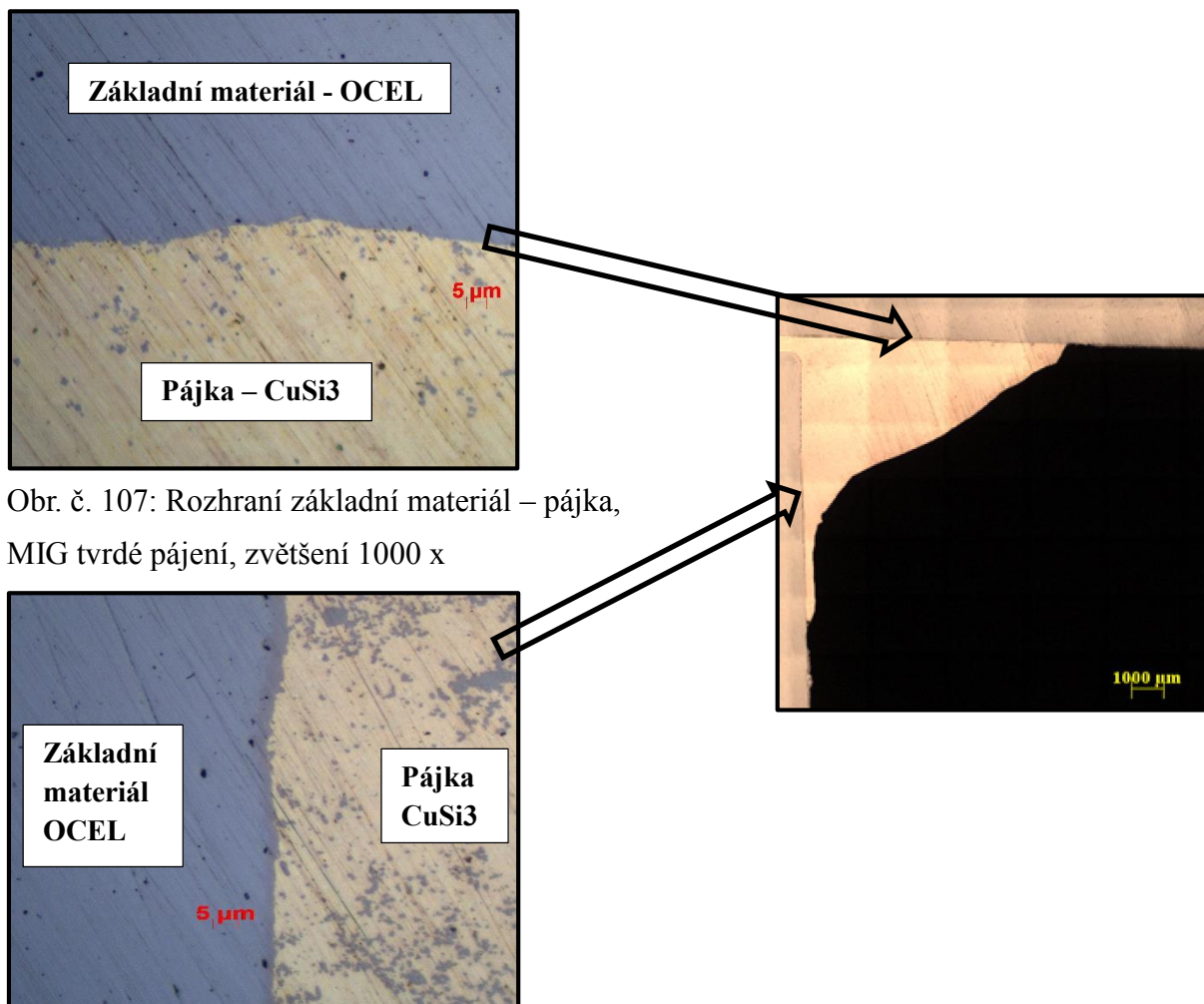
Obr. č. 105: Zinkový povlak - TIG svarový spoj (Na materiálu č. 1 v oblasti spoje lze vidět odpaření zinkového povlaku až do vzdálenosti 9885,66 μm od svaru. Od této vzdálenosti lze vidět zachování 2 fází zinkového povlaku – místy i 3. fáze η. Navíc je povlak postižený nečistotami – černými šipkami označené – „trhlínky v povlaku“. Na materiálu č. 2 se zinkový povlak v oblasti spoje úplně odpařil.).



Obr. č. 106: Zinkový povlak - MIG svarový spoj (Na materiálu č. 1 v oblasti spoje lze vidět odpaření zinkového povlaku. Téměř u konce oblasti spoje lze vidět zachování všech 3 fází zinkového povlaku. Na materiálu č. 2 se zinkový povlak v oblasti spoje úplně odpařil.).

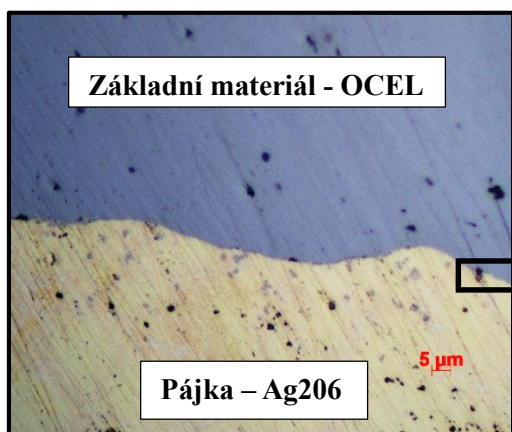
Rozhraní základní materiál ocel – pájka

Tato kapitola se zaměřuje na rozhraní ocel – pájka, přičemž na obr. č. 107, 108, 109 a 110 nelze vidět zinkový povlak, který se nanášením pájky odpařil. Nicméně v těchto místech není důležité, aby se zinkový povlak zachoval.

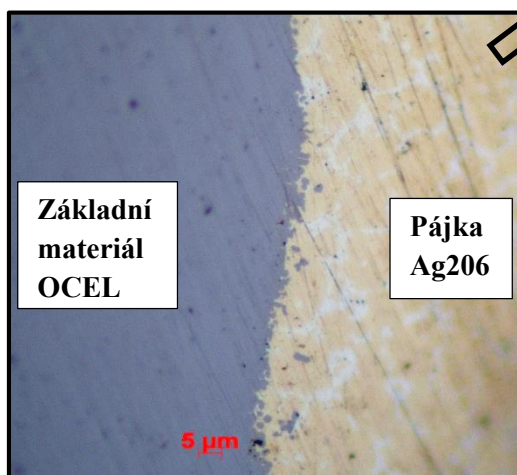


Obr. č. 107: Rozhraní základní materiál – pájka,
MIG tvrdé pájení, zvětšení 1000 x

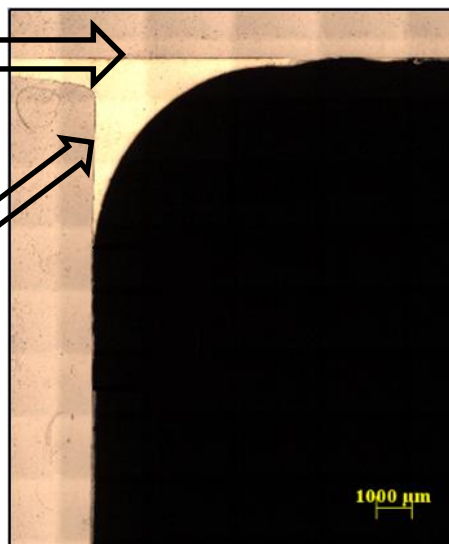
Obr. č. 108: Rozhraní základní materiál – pájka, MIG tvrdé pájení, zvětšení 1000 x



Obr. č. 109: Rozhraní základní materiál – pájka,
TIG tvrdé pájení, zvětšení 1000 x



Obr. č. 110: Rozhraní základní materiál – pájka, TIG tvrdé pájení, zvětšení 1000 x



20 Tepelný příkon stanovený v souladu dle ČSN EN 1011-1

Tepelný příkon byl spočten níže dle vzorce (13) z důvodu jeho využití v pWPS, pBPS a v numerické simulaci Sysweld. Vybraný a zvýrazněný koeficient tepelné účinnosti lze vidět v tab. č. 34.

Číslo metody	Metoda svařování	k
12	svařování pod tavidlem	1,0
111	ruční obloukové svařování obalenou elektrodou	0,8
131	obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu; MIG svařování	0,8
135	obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu; MAG svařování	0,8
114	obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu	0,8
136	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v aktivním plynu	0,8
137	obloukové svařování tavidlem plněnou elektrodou v inertním plynu	0,8
141	obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu; TIG svařování	0,6
15	plazmové svařování	0,6

Tab. č. 34: Koeficient tepelné účinnosti metody svařování dle ČSN EN 1011-1

a) TIG svařování

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3} \quad (13)$$

$$Q = 0,60 * \frac{10,17 * 140}{0,55} * 10^{-3}$$

$$Q = 1,55 \text{ kJ/mm}$$

1,55 kJ/mm = 1550 J/mm hodnota pro numerickou simulaci v Sysweld a pWPS.

v = 0,55 mm/s (50/90 = 0,55) - viz pWPS, kde je tato hodnota uvedena v mm/min.

b) MIG svařování

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3}$$

$$Q = 0,8 * \frac{15,80 * 126}{1,19} * 10^{-3}$$

$$Q = 1,34 \text{ kJ/mm}$$

1,34 kJ/mm = 1340 J/mm hodnota pro numerickou simulaci v Sysweld a pWPS.

v = 1,19 mm/s (50/42 = 1,19) => viz pWPS, kde je tato hodnota uvedena v mm/min.

c) TIG pájení

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3}$$

$$Q = 0,60 * \frac{15,40 * 105}{0,55} * 10^{-3}$$

$$Q = 1,76 \text{ kJ/mm}$$

1,76 kJ/mm = 1760 J/mm - není požadováno v pBPS

v = 0,55 mm/s (50/90 = 0,55) - není požadováno v pBPS

d) MIG pájení

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3}$$

$$Q = 0,80 * \frac{24,60 * 229}{6,25} * 10^{-3}$$

$$Q = 0,72 \text{ kJ/mm}$$

0,72 kJ/mm = 720 J/mm - není požadováno v pBPS

v = 6,25 mm/s (50/8 = 6,25) - není požadováno v pBPS

Nejvíce tepleného příkonu resp. vneseného tepla, bylo použito při TIG pájení a naopak nejméně tepelného příkonu bylo přivedeno do místa spojovaných základních materiálů při MIG pájení => nejmenší tepelné ovlivnění => nejvhodnější technologie spojování z těchto 4 nabízených. Z tabulky č. 35 lze vypočítat, že při TIG pájení bylo vneseno více tepla než při svařování. Přičemž, se vždy uvádí, že při svařování je potřeba dosáhnout mnohem vyšších teplot než při pájení. V tomto případě je tomu naopak z důvodu vyššího napětí. Přehledně lze tyto výsledky v tabulce č. 35.

Metoda	TIG svařování	MIG svařování	TIG pájení	MIG pájení
Tepelný příkon [J/mm]	1550	1340	1760	720

Tabulka č. 35: Přehled hodnot tepelných příkonů jednotlivých metod procesu svařování/pájení

21 Numerická simulace procesu svařování metodami TIG a MIG

Na příkladu svařování metodou MIG a TIG velmi jednoduchého T spoje byly demonstrovány možnosti programu Sysweld, tzn. transientního řešení. Cílem bylo získat výsledky z tří oblastí (teplotní pole během svařování, zbytkové napětí a deformace po svařování) Obě desky v T spoji jsou z materiálu S235JR+AR (+Z), jenž byl popsán v předchozích kapitolách. Tloušťka, šířka, délka a mezera mezi spojovanými materiály byly důležité pro vytvoření výpočetního modelu v software Sysweld. Chemické složení přídavného materiálu je odpovídá přídavným materiálům ze předěšlých kapitol pro MIG a TIG svařování. Svařování je provedeno bez předehřevu.

Návrh sítě výpočetního modelu T spoje – Směrem od konců spojovaných materiálů do místa předpokládaného svarového spoje se síť zhušťovala, protože ta podstatná část pro numerickou simulaci je TOO. Výpočet lze omezit pouze na svarovou oblast, ale v tomto případě se provedl výpočet v celém rozsahu materiálu z důvodu kompletního a detailního nasimulování reálných podmínek svařovacího procesu. Nastavení procesu proběhlo ve Visual - Weld 12.0 od ESI Group a lze ho vidět níže u obou metod svařování. Samotný výpočet se pak přepošle do Sysweld, kde dojde k celé numerické simulaci. Níže lze pro přehled vidět souhrn parametrů, které byly nastaveny v numerické simulaci Sysweld.

TIG svařování

- a) Visual – Weld 12.0 - Nastavení počátečních, okrajových podmínek a tepelného zdroje:
 - Metoda svařování – TIG (141), obloukové svařování
 - Základní materiál – S235JR + AR (+Z)
 - Přídavný materiál – W3Si1, průměr 2 mm
 - Rychlost svařování – 0,55 mm/s => skutečná doba svařování 90 vteřin v kapitole č. 16
 - Délka, a - rozměr, z -rozměr svarového spoje – stanoven výpočty z kapitoly č. 15 a lze je taktéž vidět na výkresech v příloze diplomové práce
 - Rozměry spojovaných součástí viz výkres v příloze diplomové práce
 - Tepelný příkon – 1550 J/mm viz předchozí kapitola
 - Tepelná účinnost – 0,6 viz předchozí kapitola nebo ČSN EN 1011-1
 - Doba ochlazení na vzduchu na pokojovou (počáteční) teplotu 20 °C – 600 vteřin
 - Upnutí – počet upínek 4 a numerická simulace při napětí, fixace směru a do jakého směru je dovolena roztažnost, zanedbaná elasticita upínek – tuhá, po svařování byla sestava uvolněna

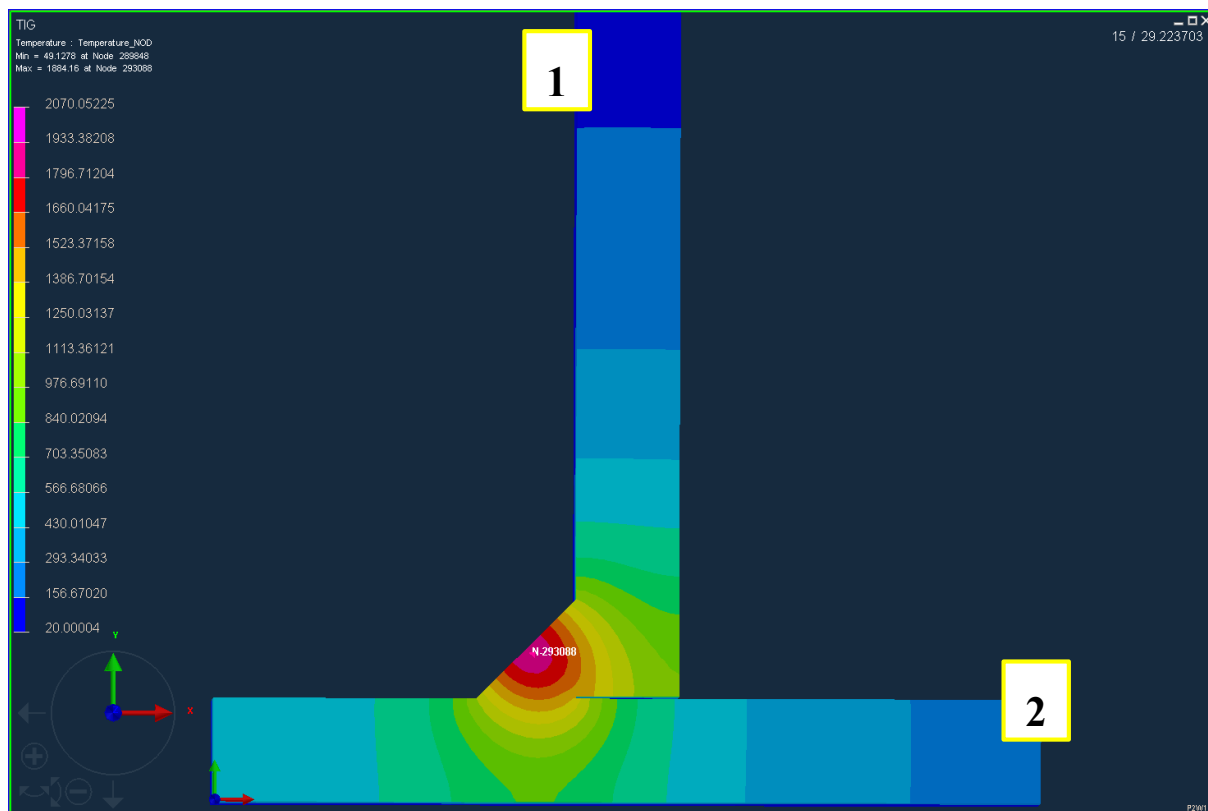
- b) Sysweld – numerická simulace + výpočet

Doba numerické simulace – 6 hodin – odhadovaný čas pro vznik spolehlivého výpočtu. Stanovený na základě zkušeností. Byly provedeny obě varianty výpočtu. První výpočet obsahoval numerickou simulaci přenosu tepla materiálem během svařování (teplotní pole). Druhý výpočet obsahoval numerickou simulaci deformace a zbytkového napětí po svařování.

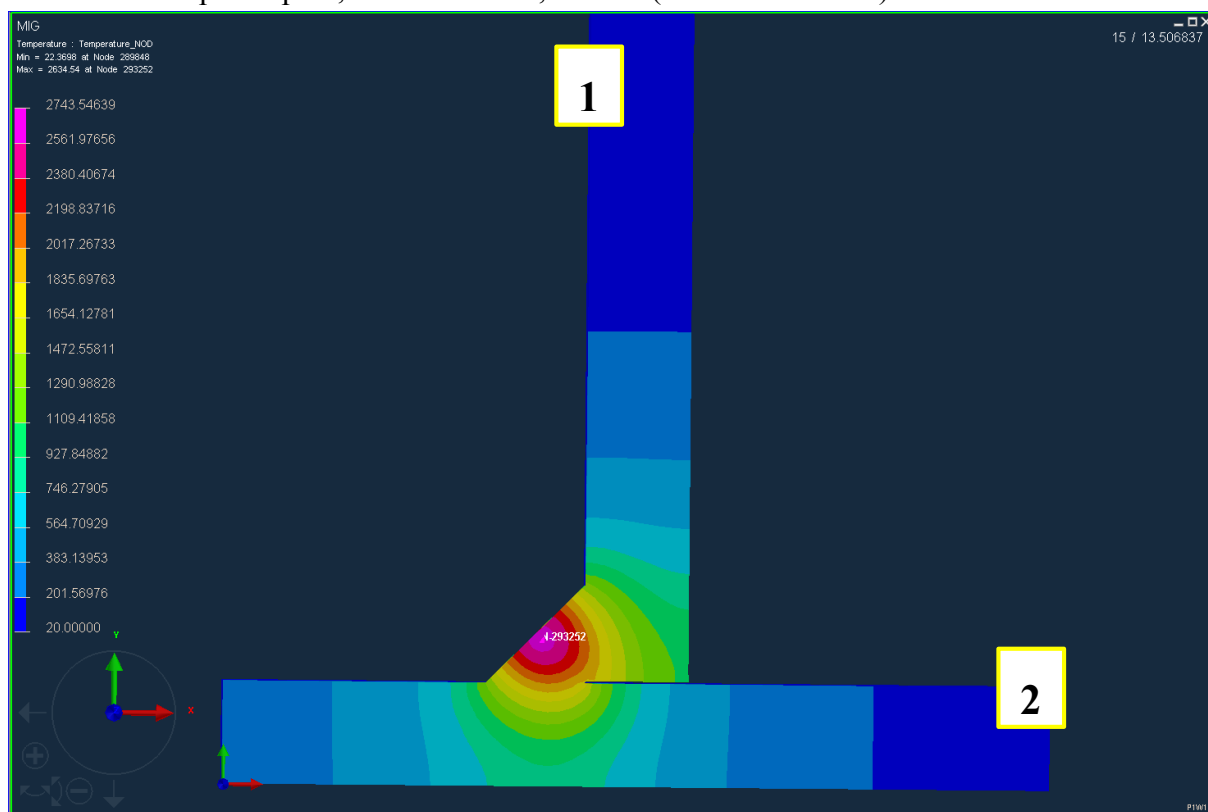
MIG svařování

- a) Visual – Weld 12.0 - Nastavení počátečních, okrajových podmínek a tepelného zdroje
- Metoda svařování – MIG (131), obloukové svařování
 - Základní materiál – S235JR + AR (+Z)
 - Přídavný materiál – G3Si1, průměr 1 mm
 - Rychlost svařování – 1,19 mm/s => skutečná doba svařování 42 vteřin stanoveno z kapitoly č. 16
 - Délka, a - rozměr, z - rozměr svarového spoje – stanoveny výpočty z kapitoly č. 15 a lze je taktéž vidět na výkresech v příloze diplomové práce
 - Rozměry spojovaných součástí viz výkres v příloze diplomové práce
 - Tepelný příkon – 1340 J/mm viz předchozí kapitola
 - Tepelná účinnost – 0,8 viz předchozí kapitola nebo ČSN EN 1011-1
 - Doba ochlazení na vzduchu na pokojovou (počáteční) teplotu 20 °C – 600 vteřin
 - Upnutí – počet upínek 4 a numerická simulace při napětí, fixace směru a do jakého směru je dovolena roztažnost, zanedbaná elasticita upínek – tuhá, po svařování byla sestava uvolněna
- b) Sysweld – numerická simulace + výpočet

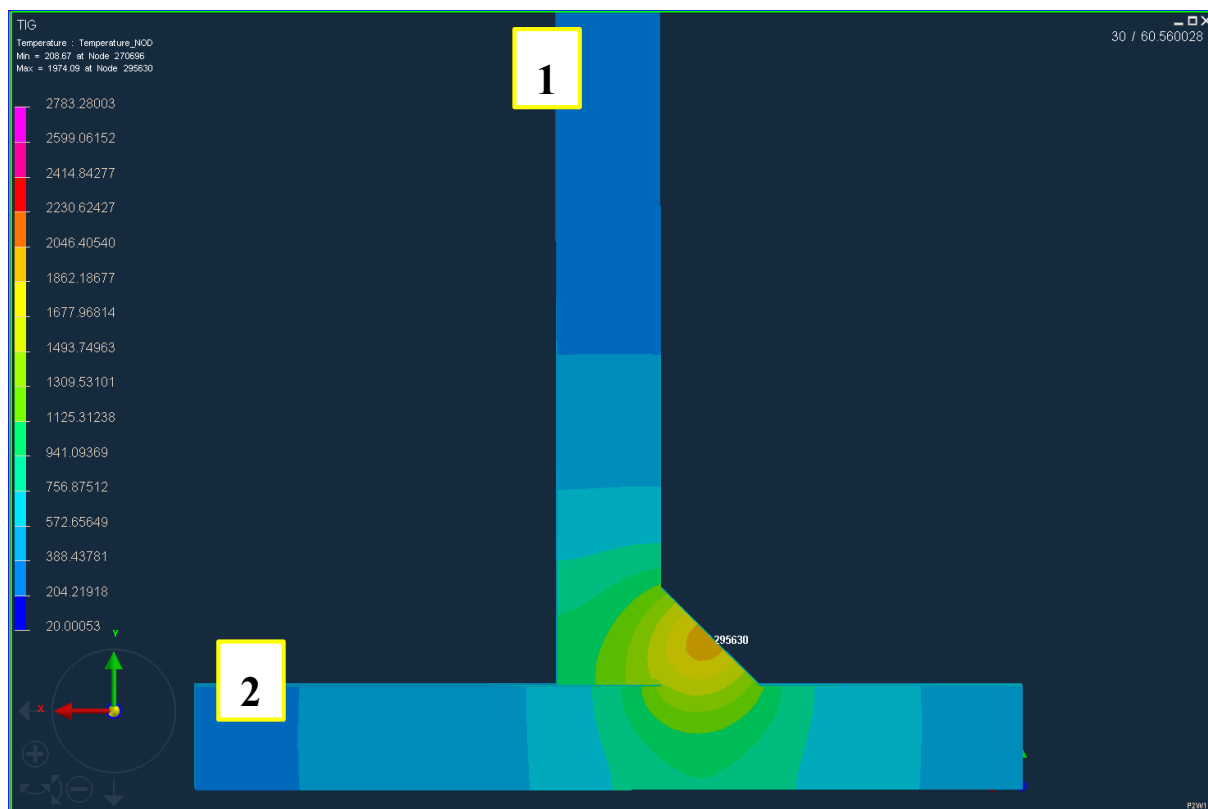
Doba numerické simulace – 6 hodin – odhadovaný čas pro vznik spolehlivého výpočtu. Stanovený na základě zkušeností. Byly provedeny obě varianty výpočtu. První výpočet obsahoval numerickou simulaci přenosu tepla materiálem během svařování (teplotní pole). Druhý výpočet obsahoval numerickou simulaci deformace a zbytkového napětí po svařování.



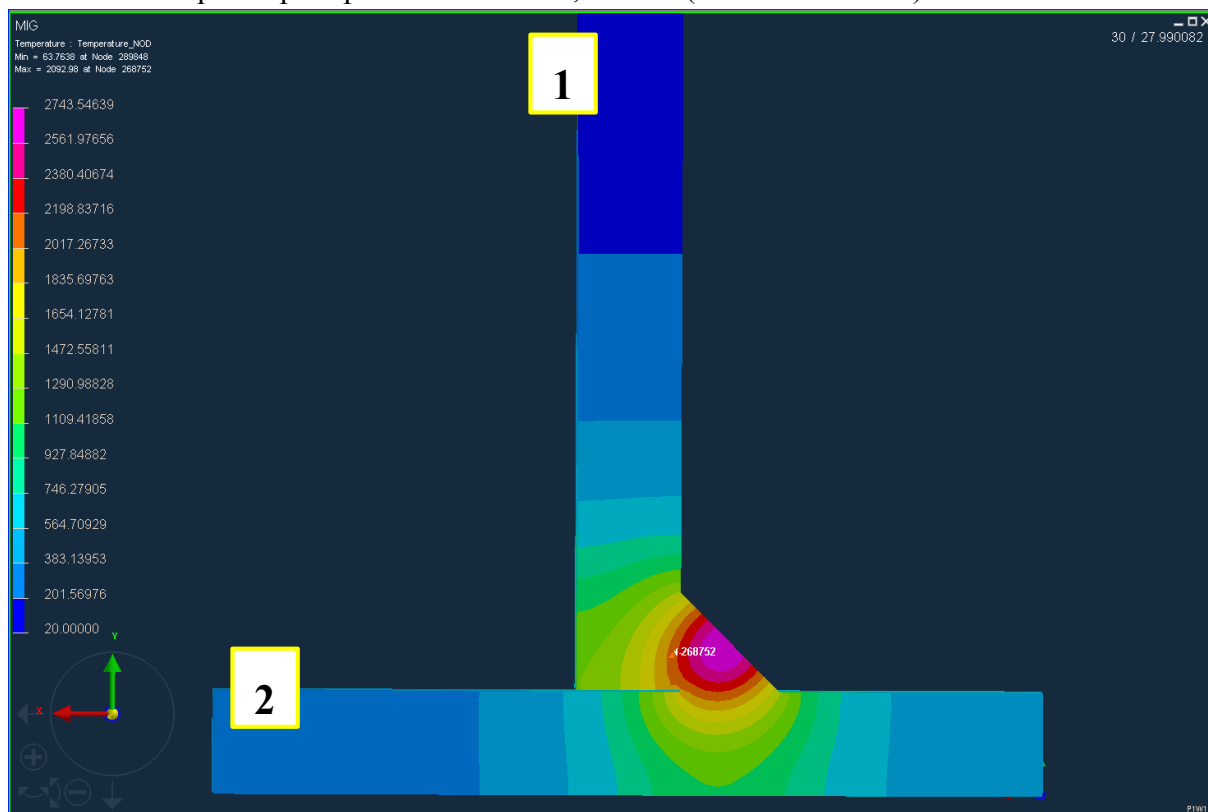
Obr. č. 111: Teplotní pole, TIG svařování, řez 1/3 (během svařování)



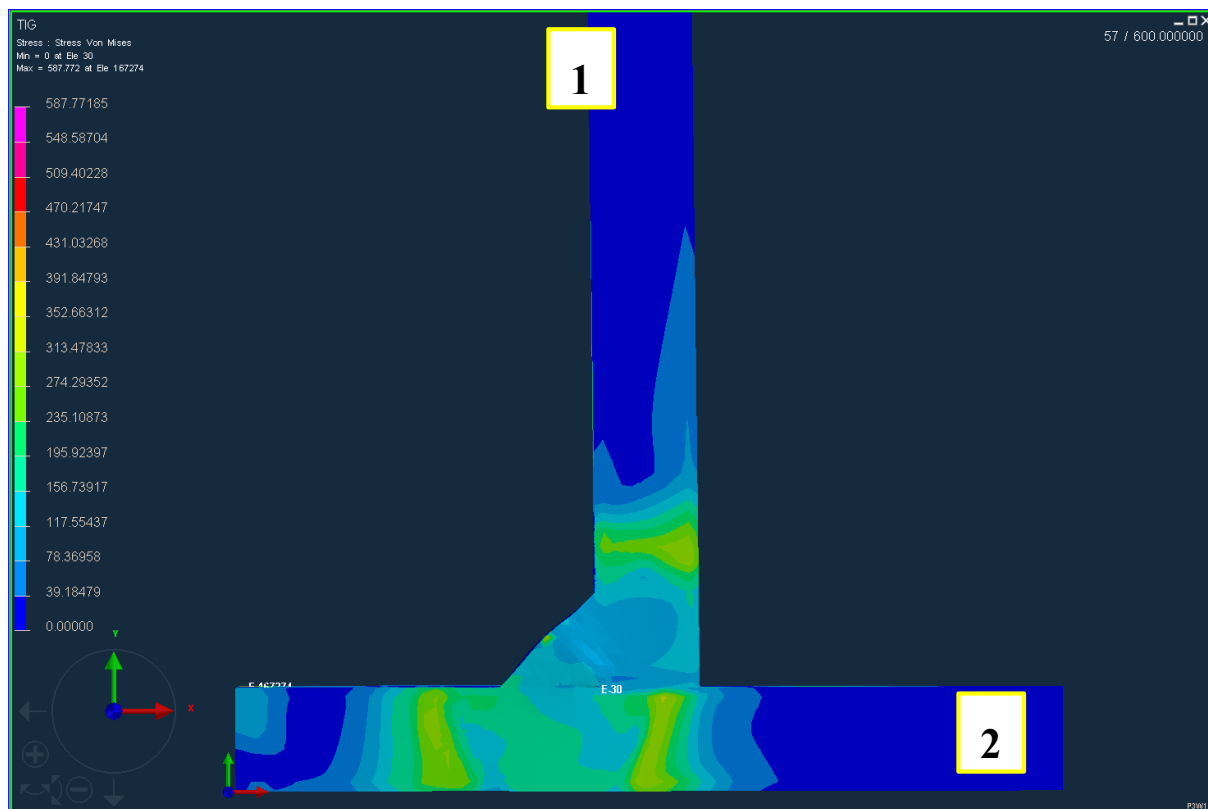
Obr. č. 112: Teplotní pole, MIG svařování, řez 1/3 (během svařování)



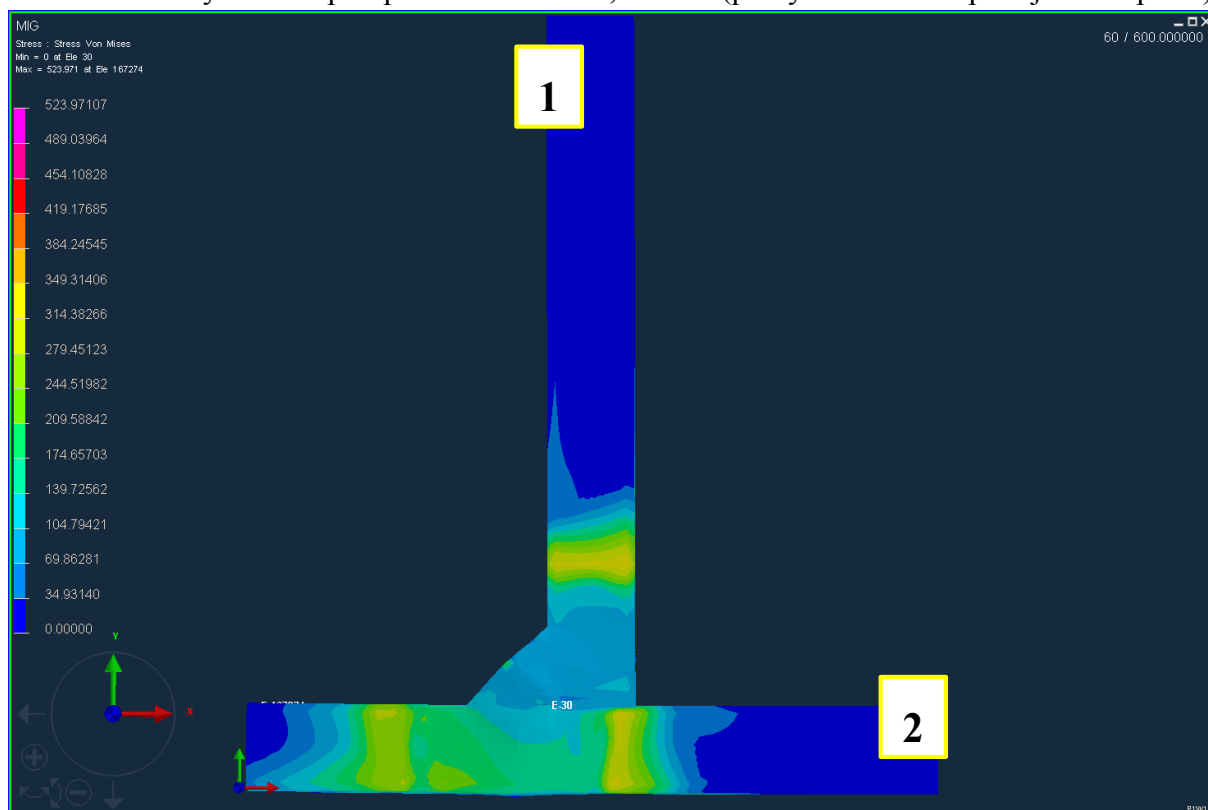
Obr. č. 113: Teplotní pole při TIG svařování, řez 2/3 (během svařování)



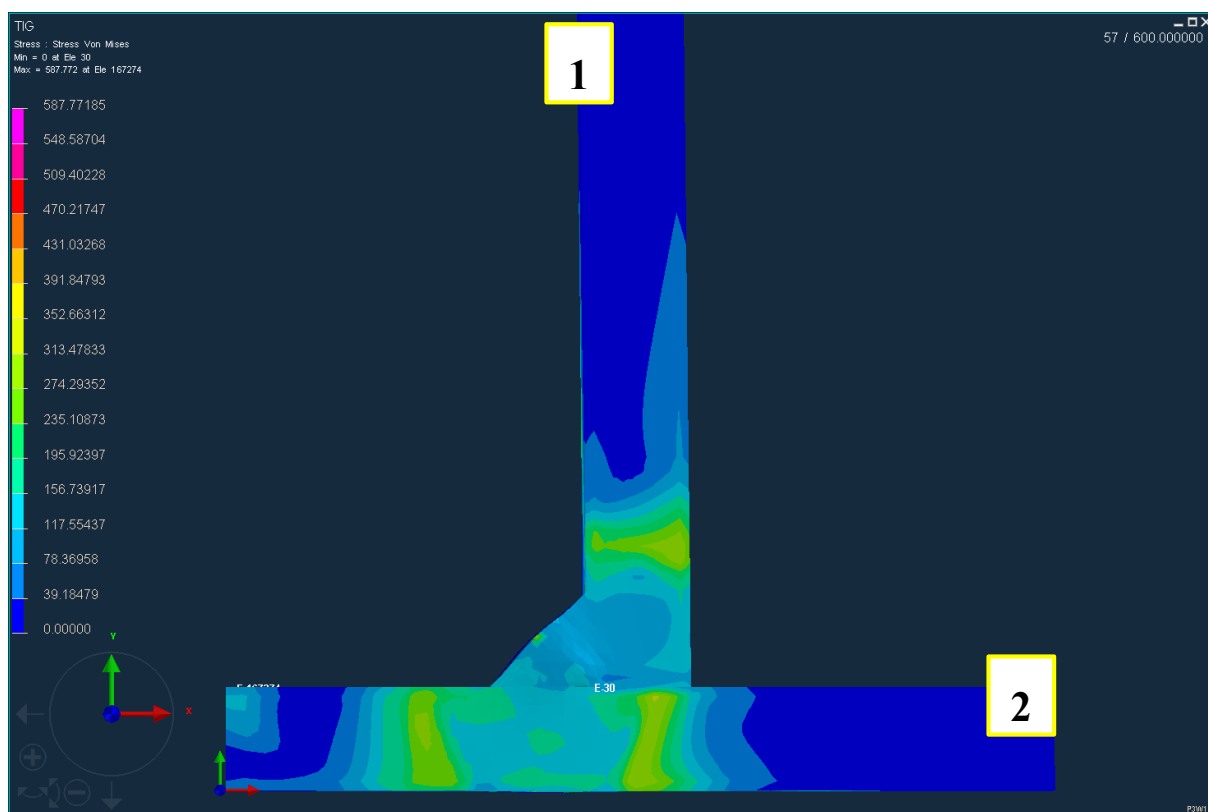
Obr. č. 114: Teplotní pole při MIG svařování, řez 2/3 (během svařování)



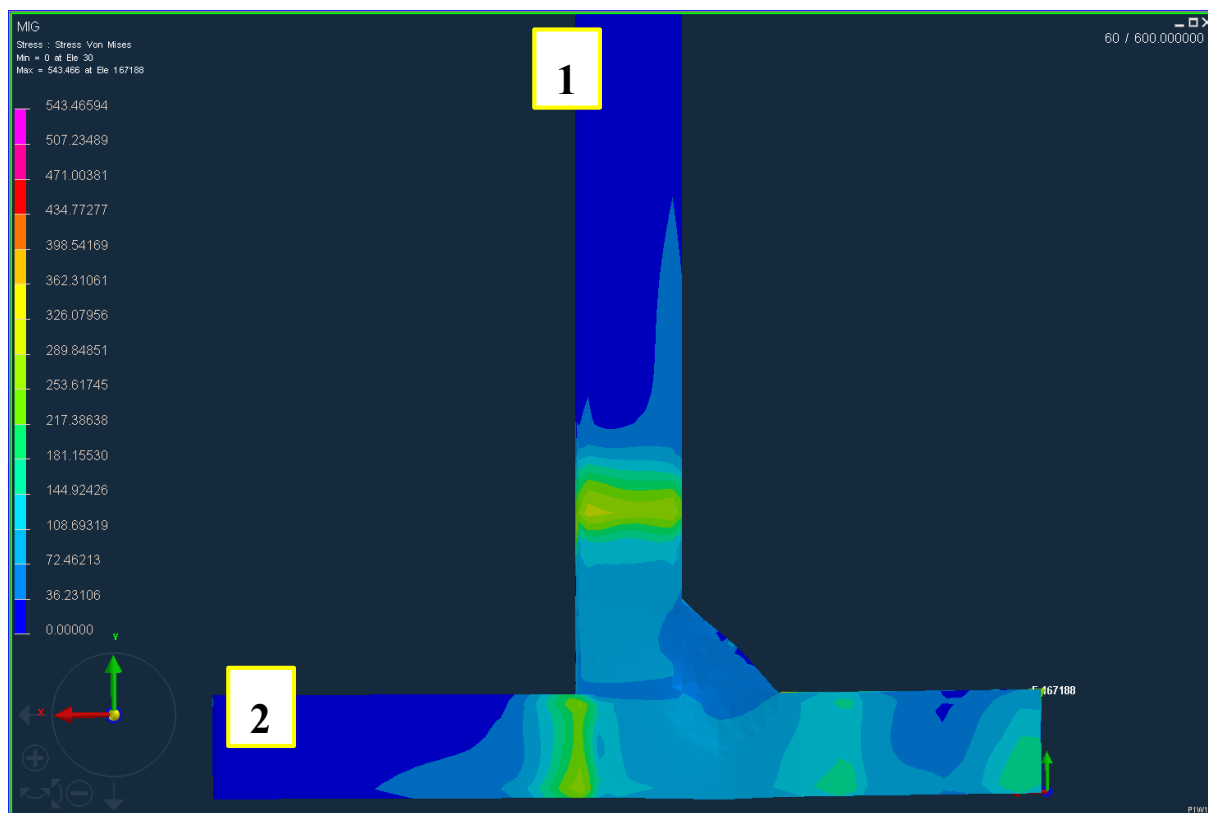
Obr. č. 115: Zbytkové napětí po TIG svařování, řez 1/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



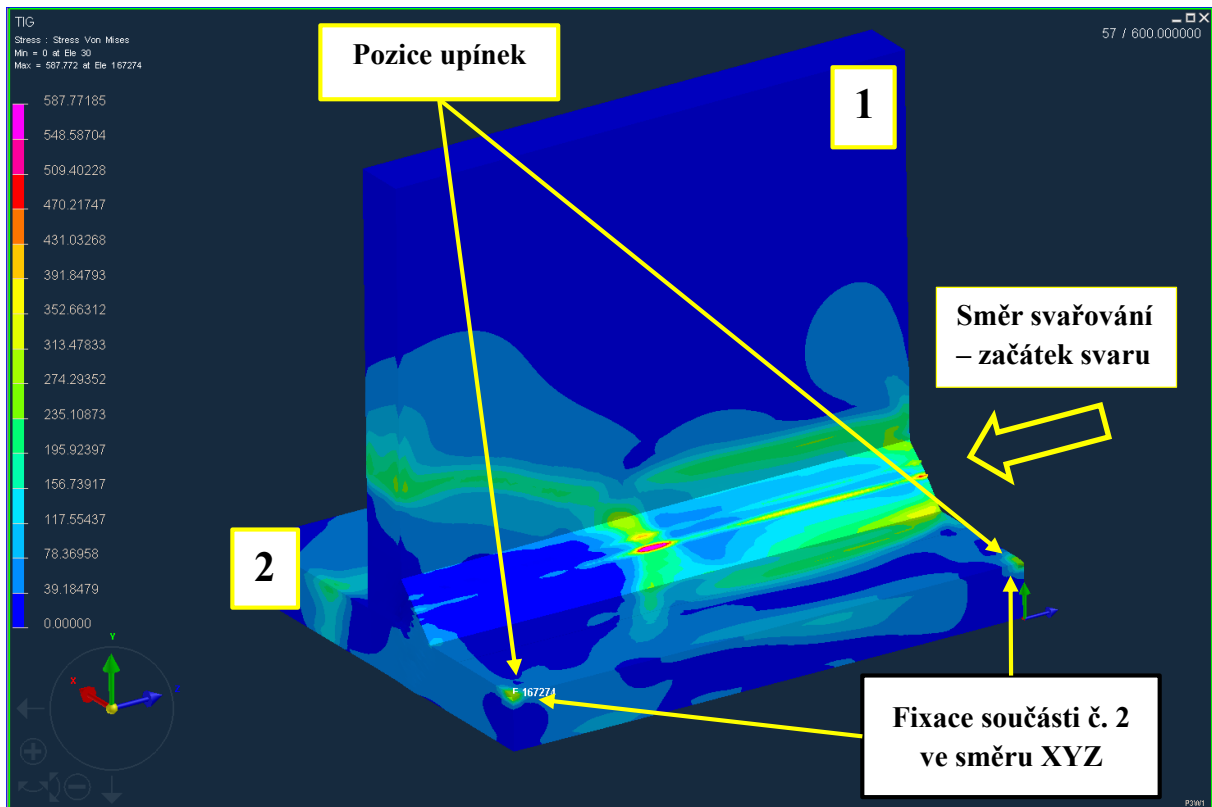
Obr. č. 116: Zbytkové napětí po MIG svařování, řez 1/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



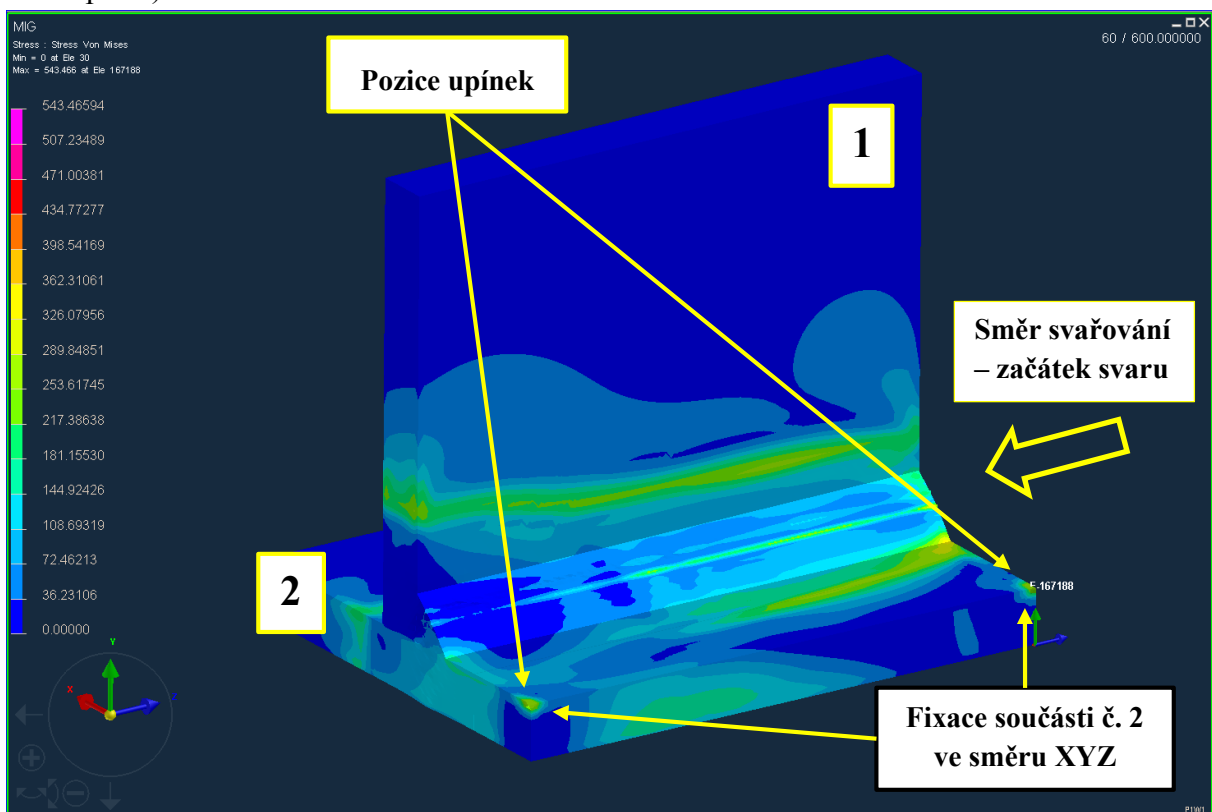
Obr. č. 117: Zbytkové napětí po TIG svařování, řez 2/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



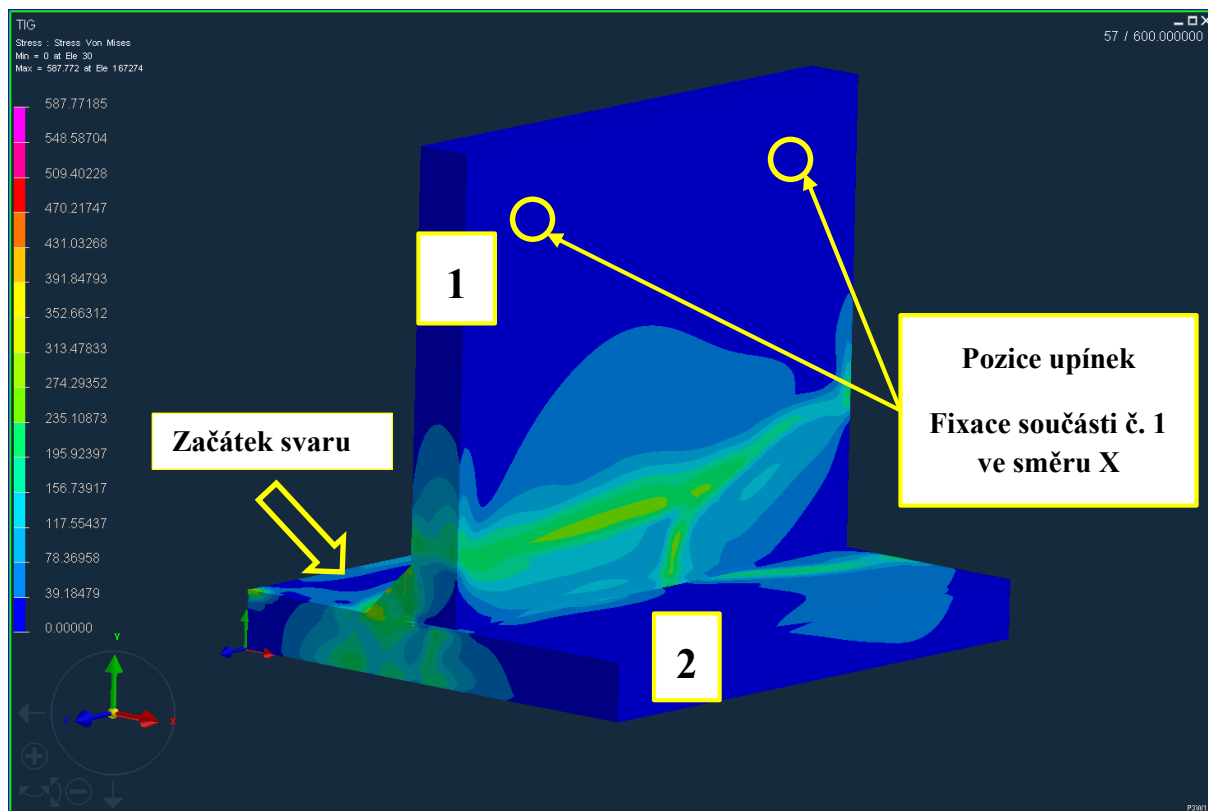
Obr. č. 118: Zbytkové napětí po MIG svařování, řez 2/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



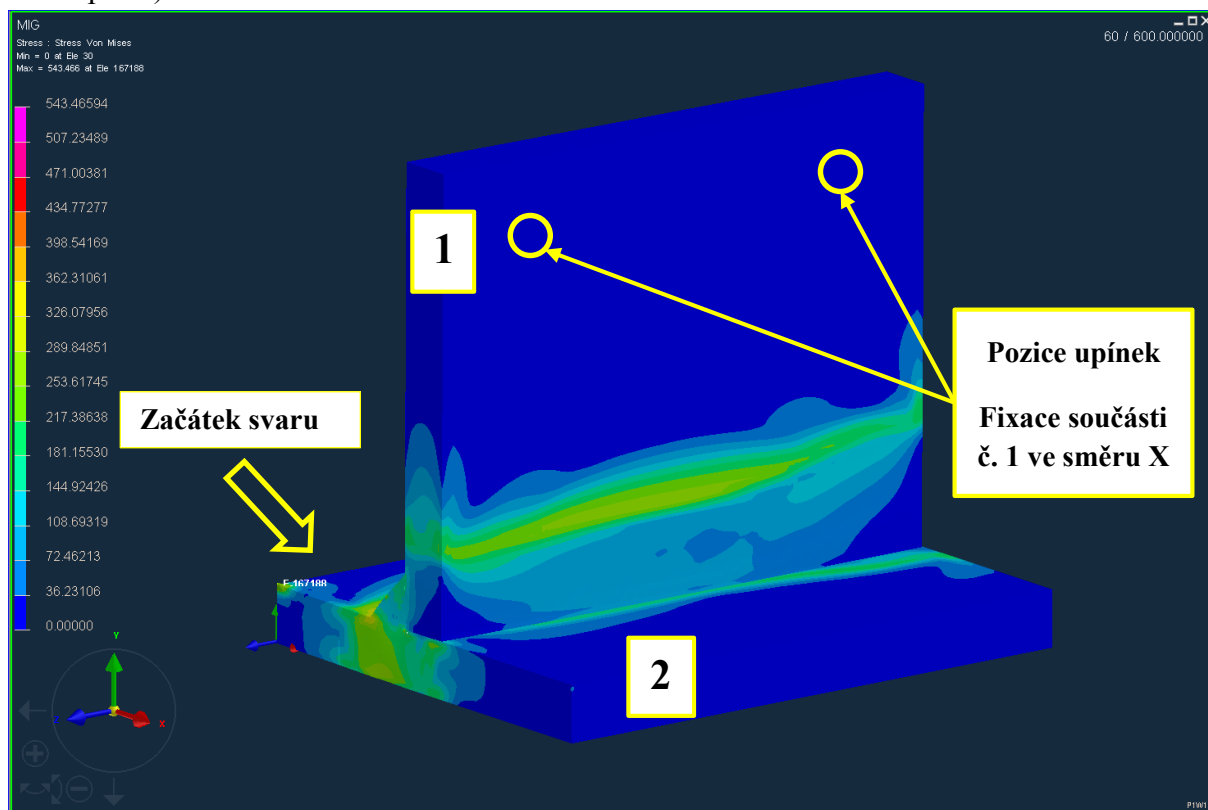
Obr. č. 119: Zbytkové napětí po TIG svařování, 1. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



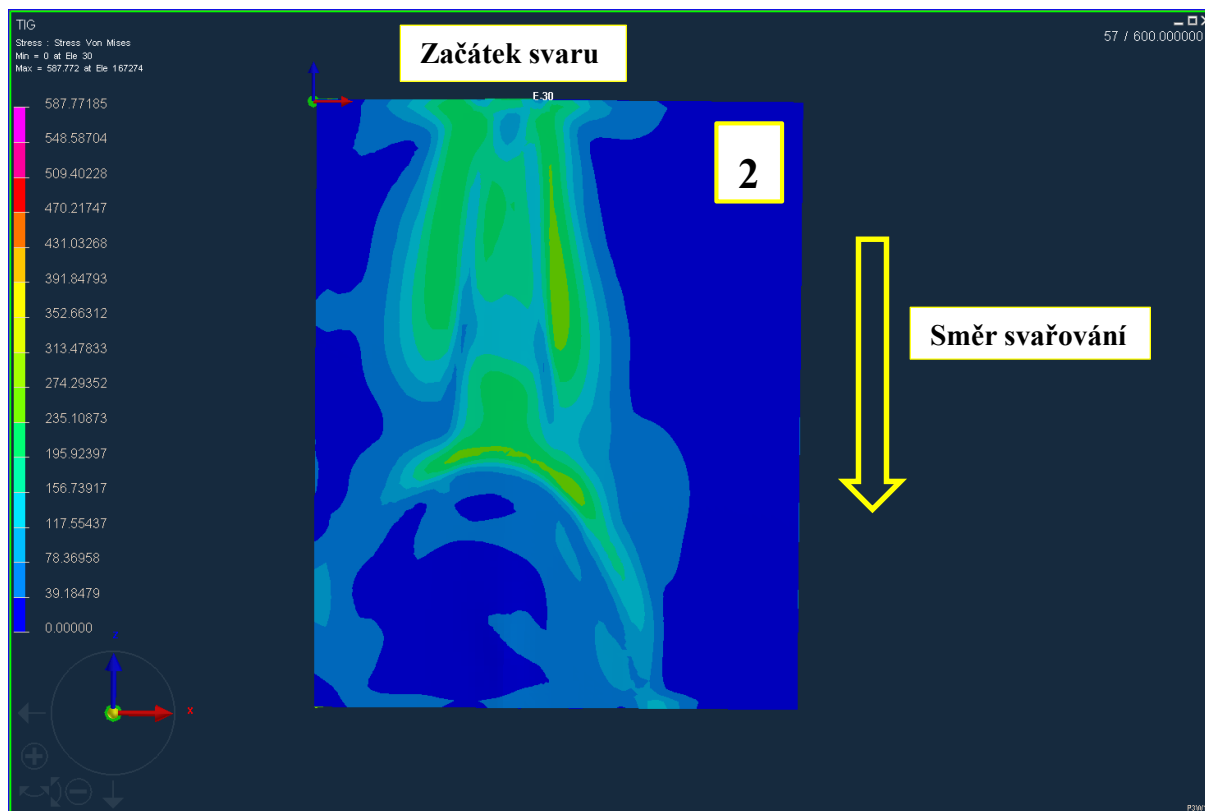
Obr. č. 120: Zbytkové napětí po MIG svařování, 1. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



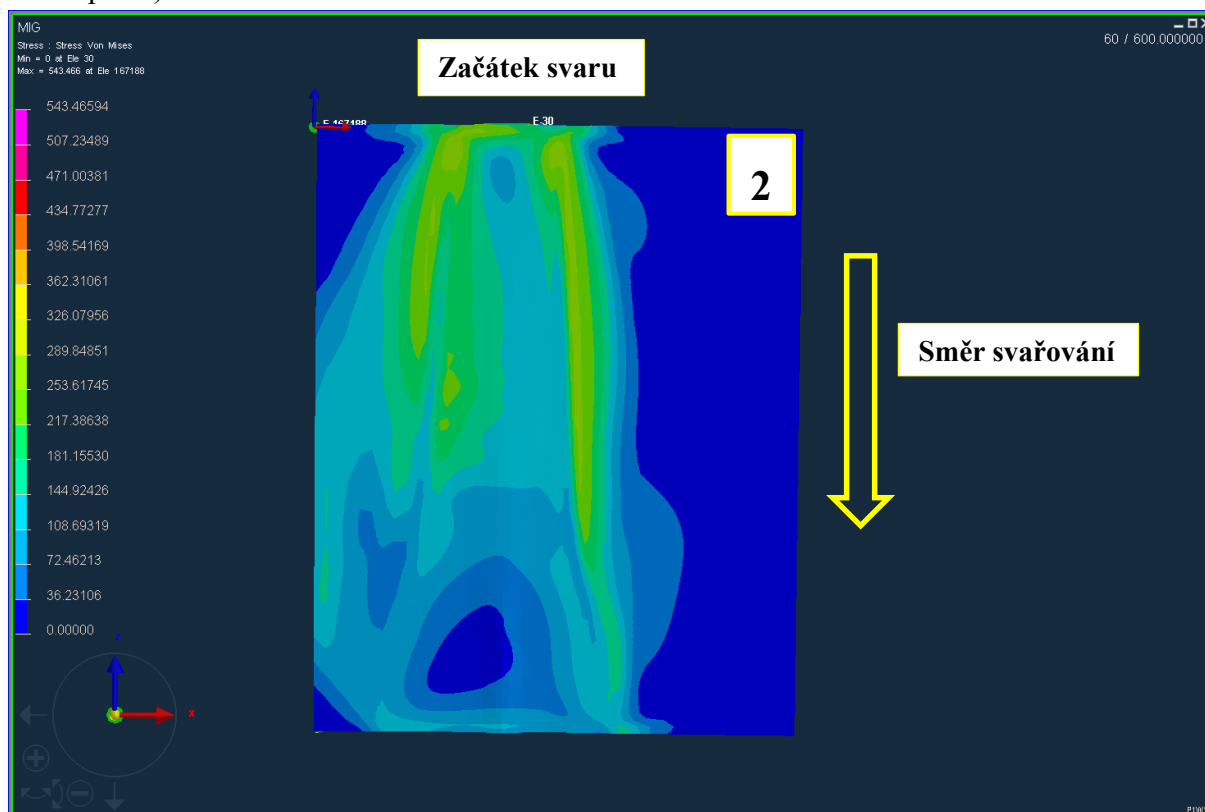
Obr. č. 121: Zbytkové napětí po TIG svařování, 2. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



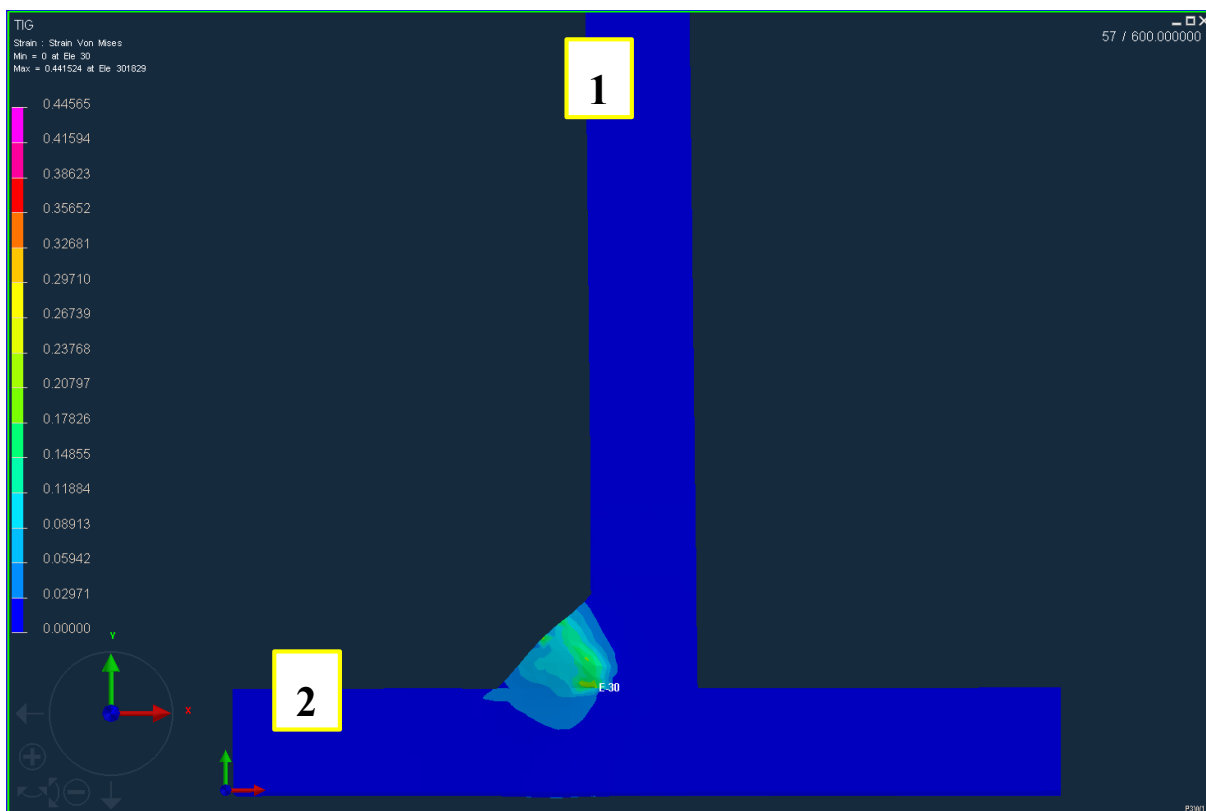
Obr. č. 122: Zbytkové napětí po MIG svařování, 2. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



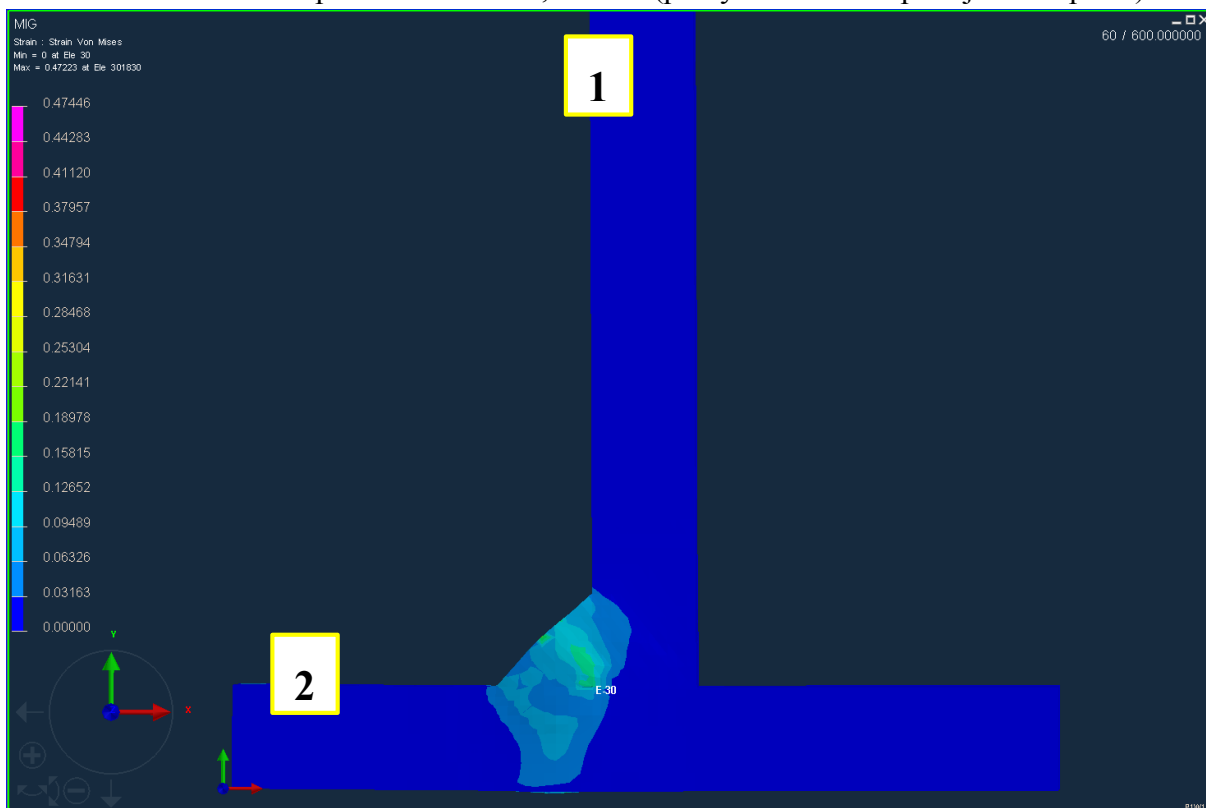
Obr. č. 123: Zbytkové napětí po TIG svařování, 3. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



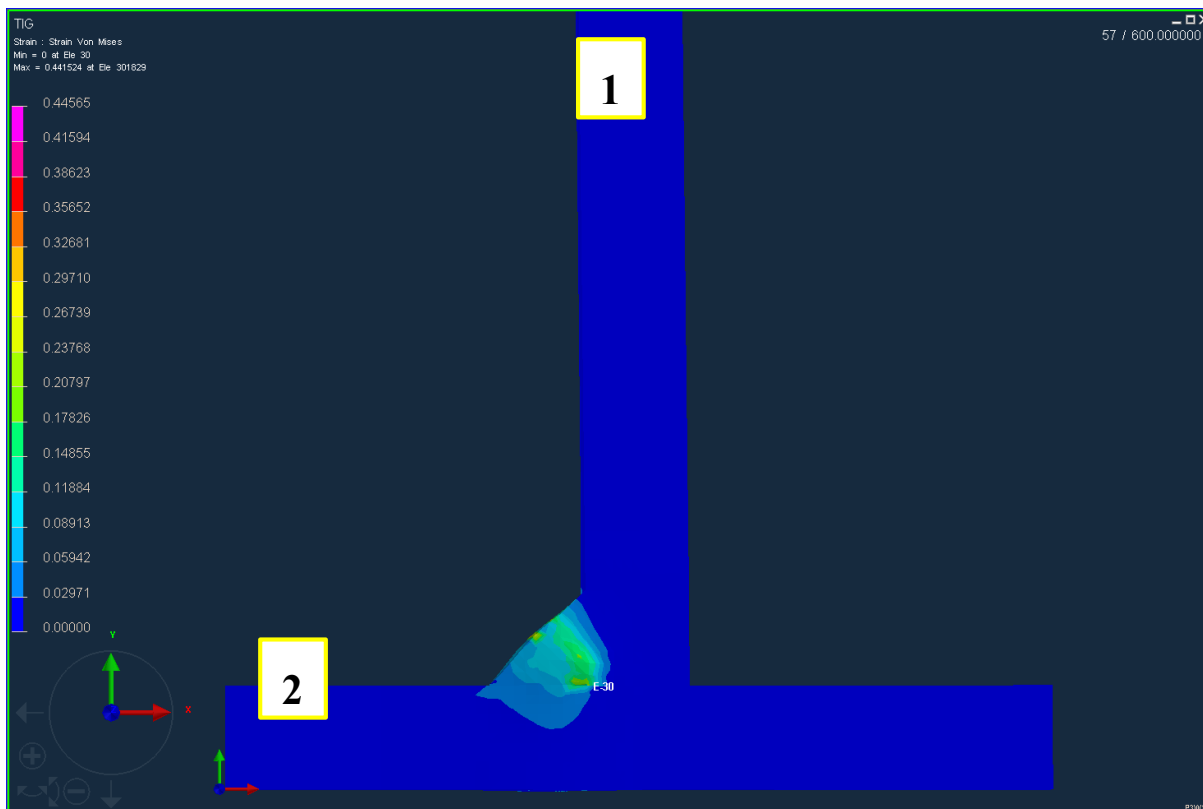
Obr. č. 124: Zbytkové napětí po MIG svařování, 3. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



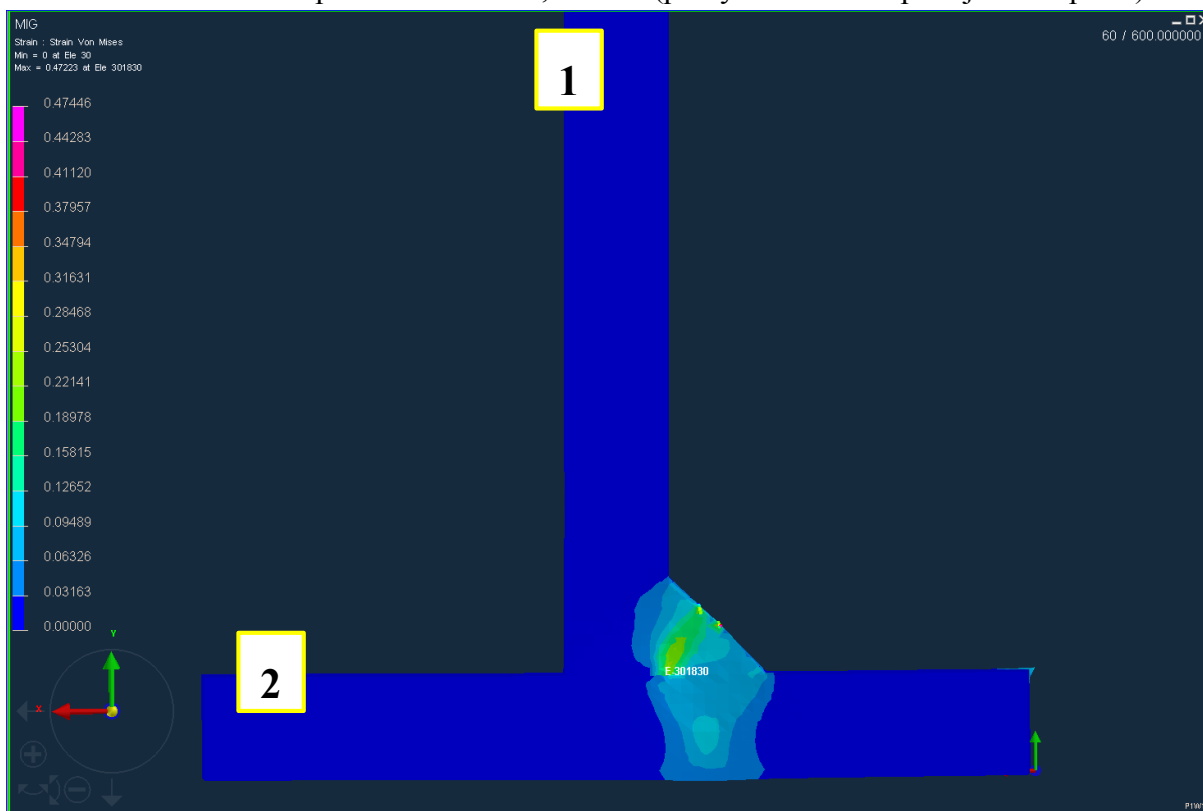
Obr. č. 125: Deformace po TIG svařování, řez 1/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



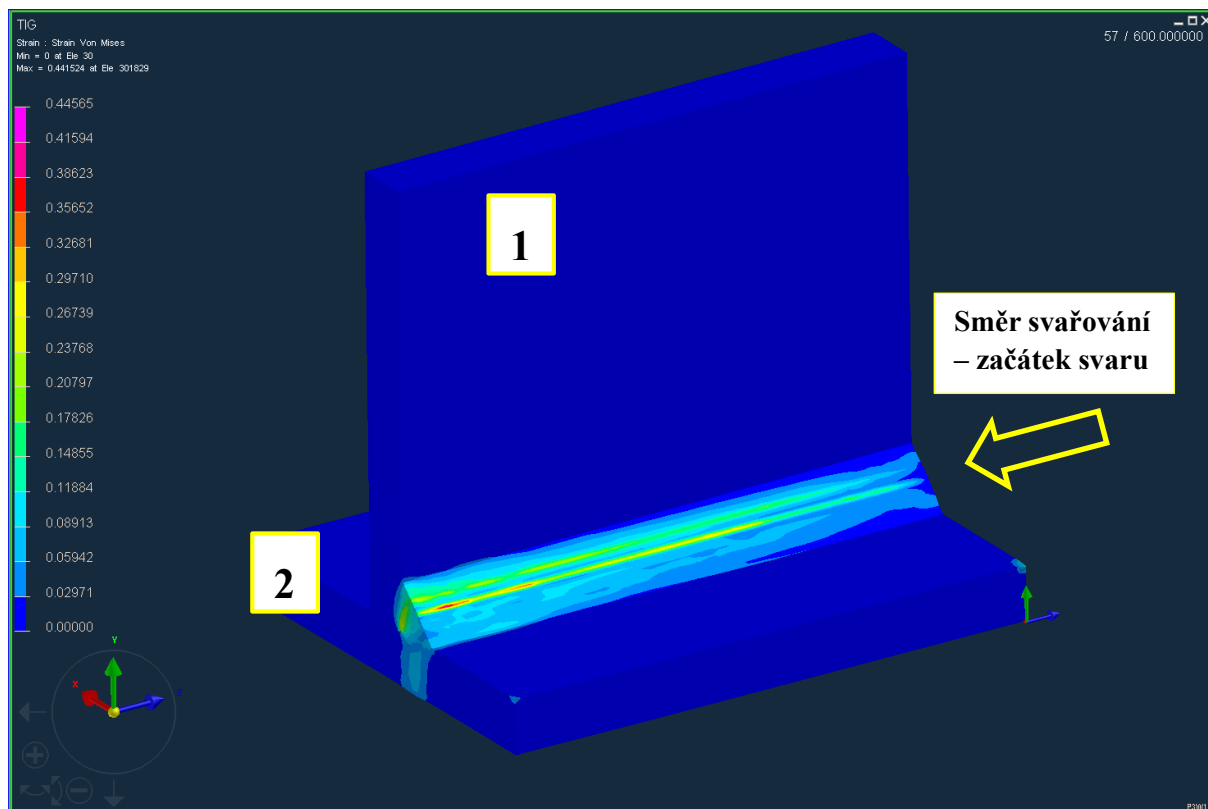
Obr. č. 126: Deformace po MIG svařování, řez 1/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



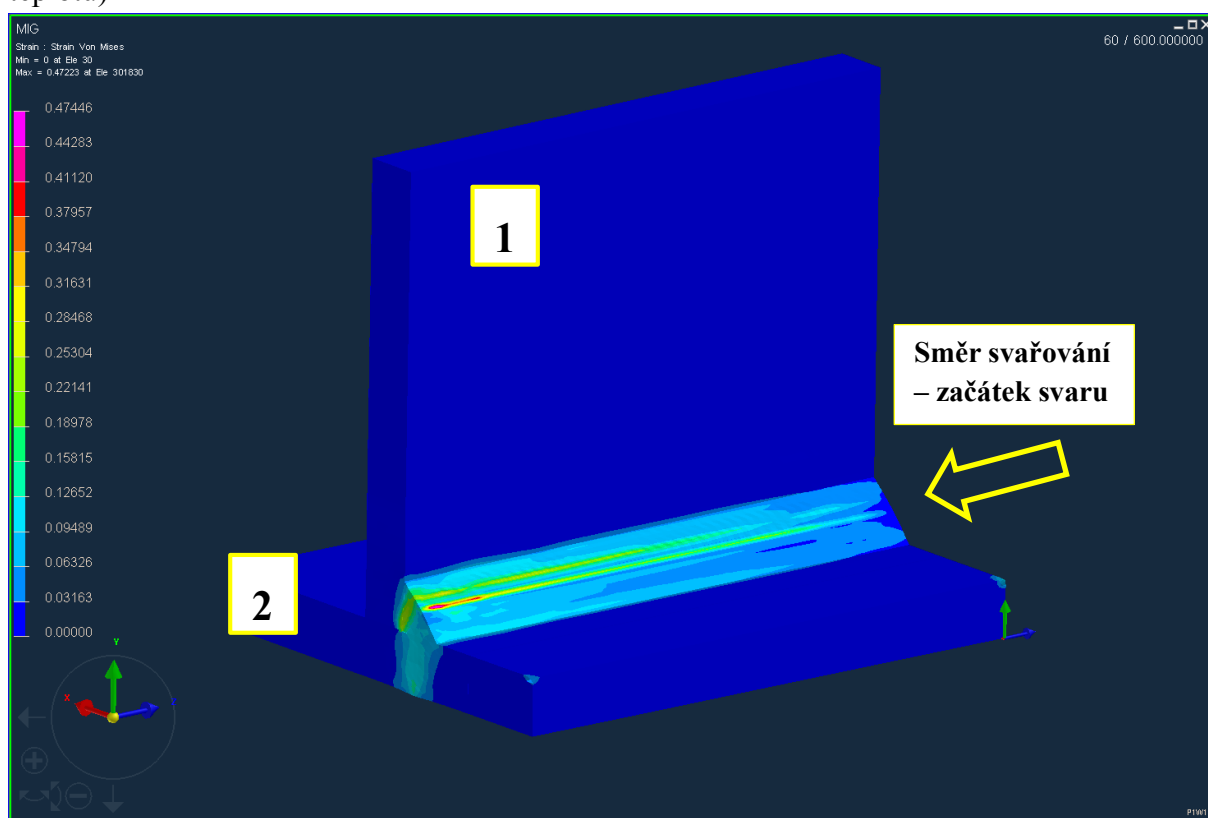
Obr. č. 127: Deformace po TIG svařování, řez 2/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



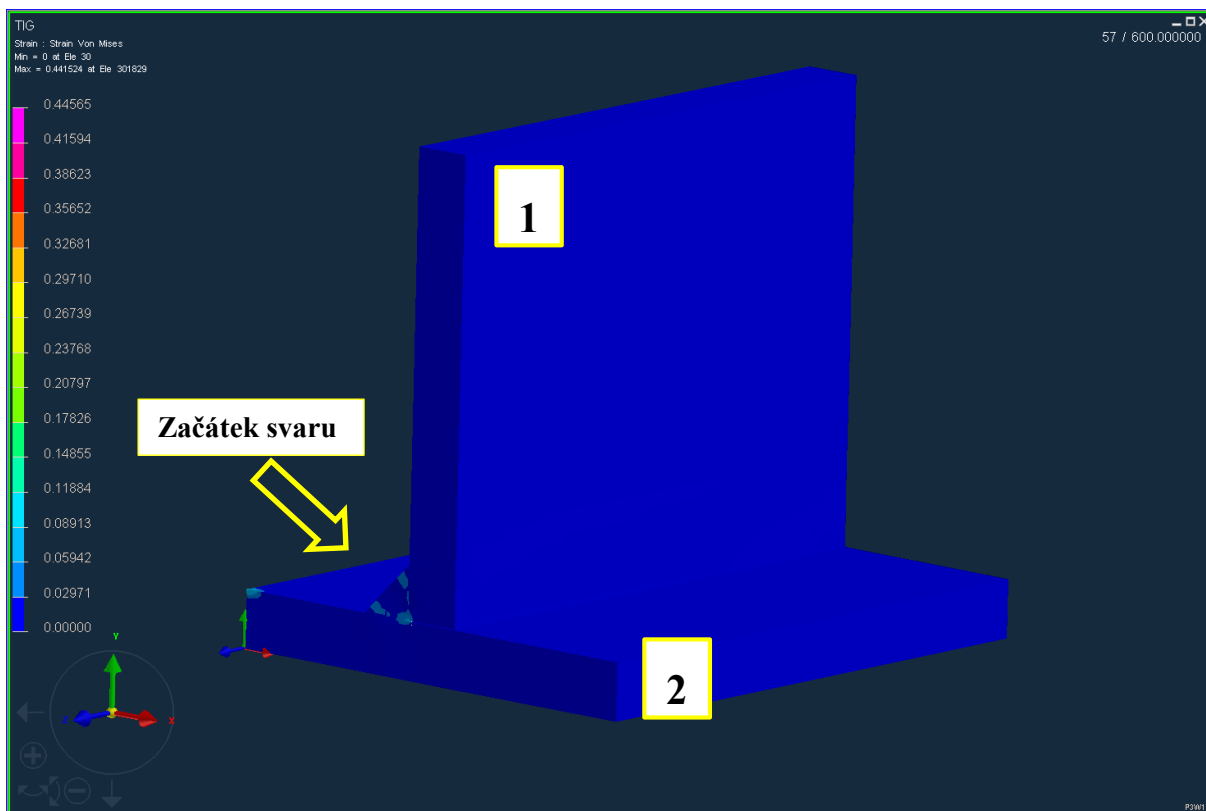
Obr. č. 128: Deformace po MIG svařování, řez 2/3 (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



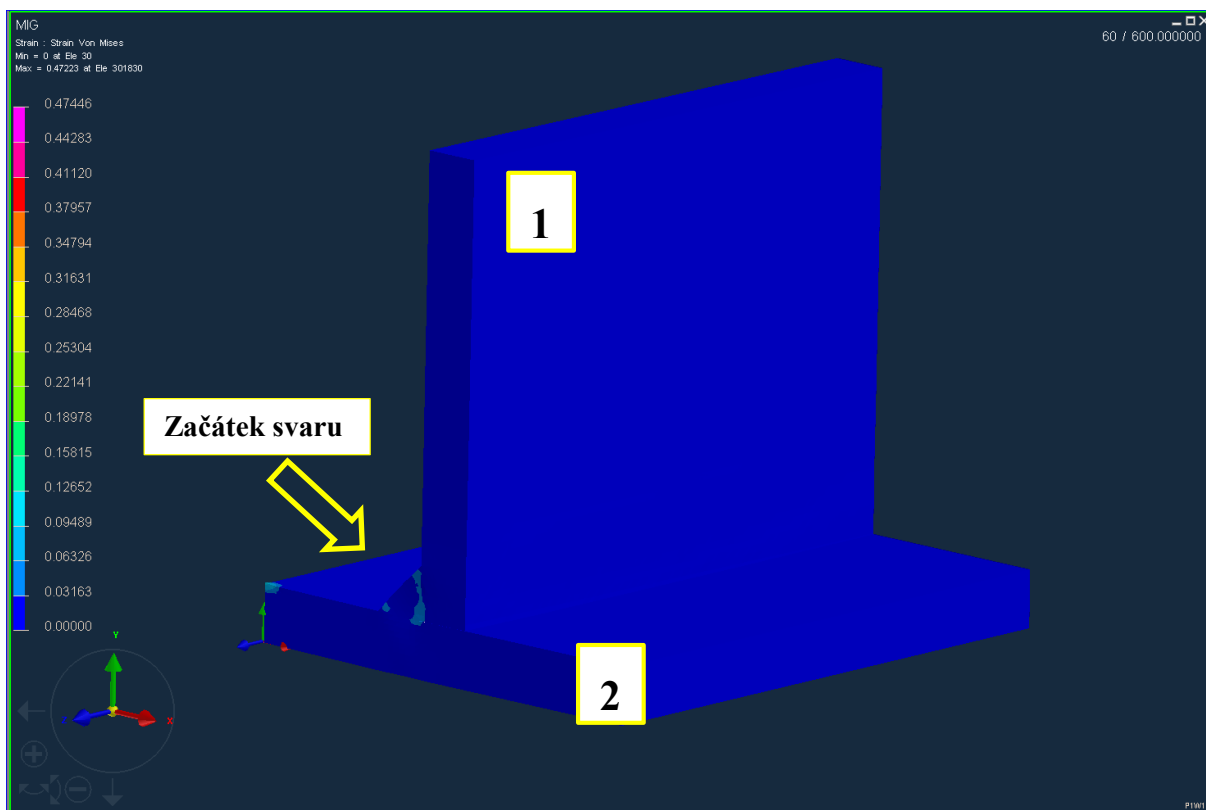
Obr. č. 129: Deformace po TIG svařování, 1. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



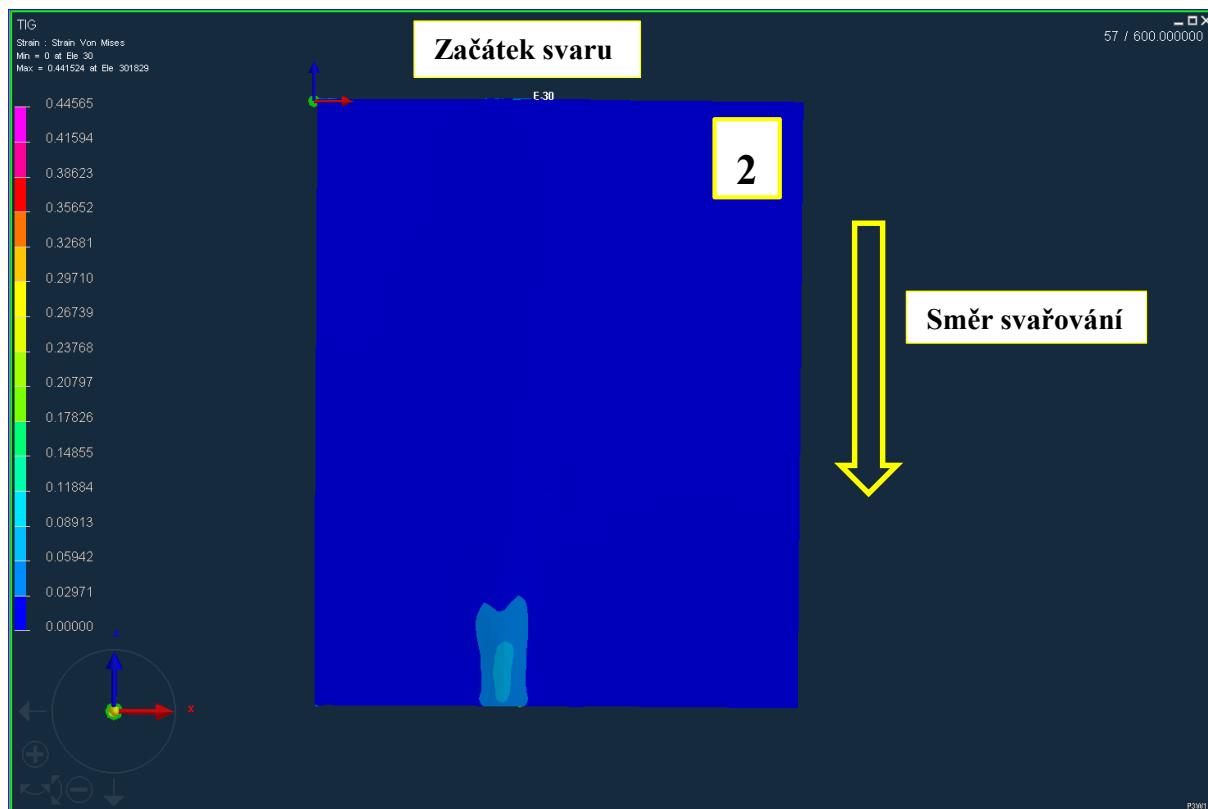
Obr. č. 130: Deformace po MIG svařování, 1. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



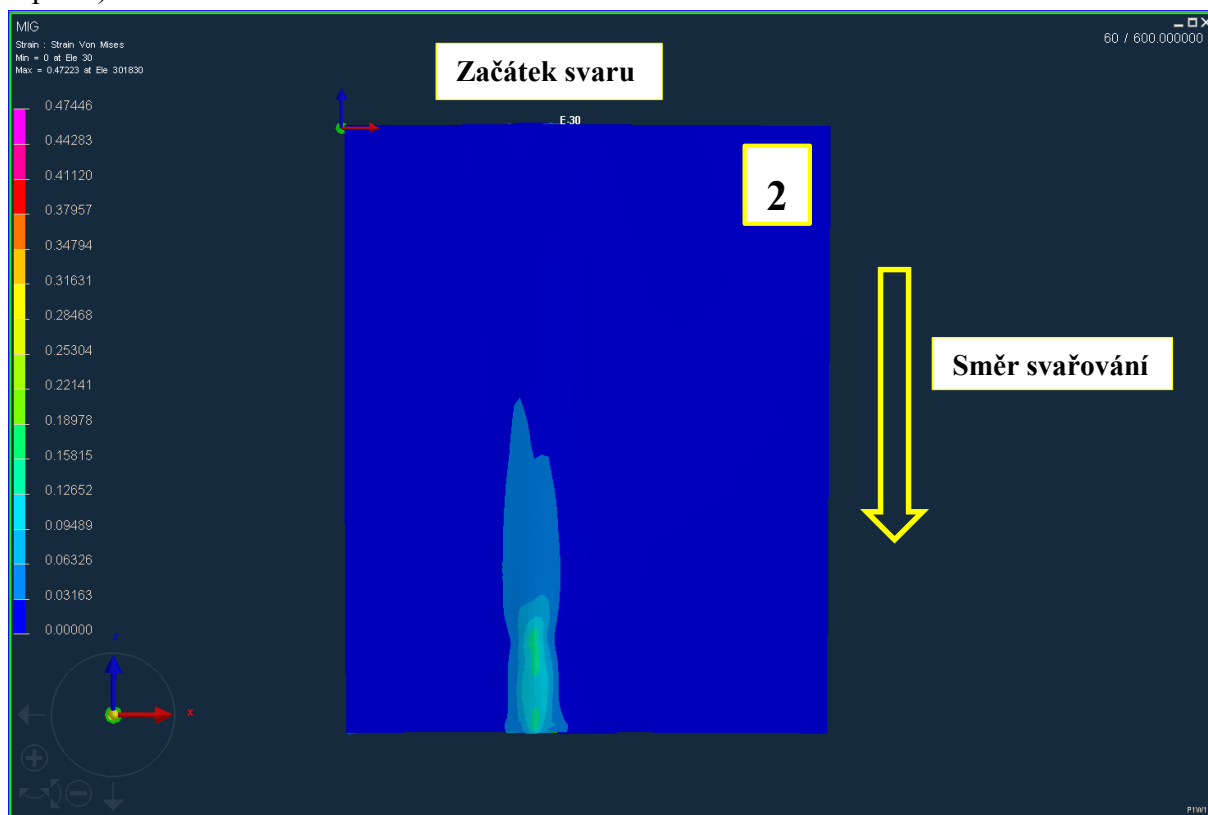
Obr. č. 131: Deformace po TIG svařování, 2. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



Obr. č. 132: Deformace po MIG svařování, 2. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



Obr. č. 133: Deformace po TIG svařování, 3. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)



Obr. č. 134: Deformace po MIG svařování, 3. strana, komplet (po vychladnutí na pokojovou teplotu)

Na základě obdržených výsledků ze softwaru Sysweld lze provést změnu vstupních parametrů, jako jsou např. svařovací příkon, rychlost svařování, způsob upnutí ve svařovacím přípravku, aplikace žíhání na odstranění zbytkového napětí atd. Poté znovu provést numerickou analýzu a porovnat získané výsledky analýz a rozhodnout, která varianta technologie svařování odpovídá požadavkům. [79]

Na závěr této kapitoly je nutné přehledně a jasně shrnout informace, které jsou zde napsány. Obr. č. 111 až 114 zobrazuje teplotní pole během svařování. Červené kontury znázorňují roztavenou oblast. Zbytkové napětí von Mises je znázorněno na obr. č. 115 až 124 a jedná se už o redukované napětí von Mises, které v sobě obsahuje jak tlakové napětí, tak i tahové napětí => nelze přesně vyvodit o jaké napětí se přesně jedná (tahové nebo tlakové). Co ale jasné je, že maximální hodnoty redukovaného napětí jsou v tepelně ovlivněné oblasti a v oblasti upínek. Velikost maximálního redukovaného napětí při TIG svařování je 587 MPa a při MIG svařování je 524 MPa. Výsledné deformace T spoje jsou uvedeny na obr. č. 125 až 134. Velikost maximální deformace při TIG svařování 0,47 mm a při MIG svařování 0,45 mm. Obě metody svařování mají tuto deformaci ve směru osy Z. Vyšší napětí a deformace jsou dosaženy TIG svařováním a to je s největší pravděpodobností zapříčiněno rozdílnou dobou svařování. Přehledně lze vidět výsledky níže v tabulce č. 36.

Metoda	Zbytkové napětí (von Mises)	Deformace ve směru osy Z
TIG svařování	587 MPa	0,47 mm
MIG svařování	524 MPa	0,45 mm

Tabulka č. 36: Přehled výsledků numerické simulace zaměřených na zbytkové napětí (redukované napětí von Mises) a deformace po TIG a MIG svařování (po vychladnutí spoje na pokojovou teplotu)

22 Diskuse výsledků

Byly zhotoveny 4 různé svarové/pájené spoje 4 různými metodami svařování/pájení viz tab. č. 37. Z každého spoje se připravily 2 vzorky pro nedestruktivní a destruktivní testování. Celkem tedy bylo 8 vzorků pro testování. Během testování se prokázaly některé vady svarových/pájených spojů. Mezi ně patřily: rozstřík, souvislé zápaly, nedodržení a - rozměru (podkročení velikost koutového svaru), nepravidelnost koutového svaru (asymetrie), pór a nadměrné rozlití pájky.

Před samotným svařováním byly zkontrolovány: uhlíkový ekvivalent $0,42 \leq 0,45$ [hm. %], množství uhlíku obsaženého v oceli $0,17 \leq 0,20$ [hm. %] a tloušťka svařovaného materiálu $5 \leq 25$ [mm] => byly splněny všechny 3 podmínky svařitelnosti a tím je dosažena zaručená svařitelnost viz tabulka č. 38.

V tabulce č. 40 lze vidět navržené rozměry svarového/pájeného spoje. Všechny podmínky jsou splněny a jsou zde přehledně vypsány základní rozměry svaru. Obě podmínky související s účinnou délkou koutového svaru (výška trojúhelníka uvnitř svaru) jsou splněny. Tento rozměr „a“ je roven 3,5 mm. Délka odvěsny trojúhelníka koutového svaru „z“ je rovna 5 mm.

$$3\text{mm} \leq a \leq 3,5$$

$$a \geq \sqrt{t_{max}} - 0,5$$

$$L_{účinná} \geq L_{MIN}$$

$$43\text{ mm} \geq 21\text{ mm}$$

$$43\text{ mm} \geq 30\text{ mm (větší hodnota rozhoduje)}$$

Účinná délka koutového svaru $L_{účinná}$ je větší než minimální délka koutového svaru pro přenášení zatížení L_{MIN} => podmínka je splněna. Tento rozměr musí být větší než šestinásobek účinné tloušťky svaru nebo větší než 30 mm. Podmínka se stanovuje k většímu rozměru z těchto dvou podmínek. Sklon připojovaných částí je taktéž dodržen, protože spojované součásti jsou pod úhlem od 60° - 120° (konkrétně 90°) dle ČSN EN 1993-1-8.

Nejvyšší el. proud 229 ± 11 A byl nastaven rychlostí podávání drátu v případě MIG pájení => nejrychlejší metoda ze všech zmíněných, protože bylo umožněno dosáhnout nejvyšší svařovací rychlosti 6,25 mm/s. Naopak nejmenší proud konst. 105 A a zároveň nejnižší svařovací rychlost byla nastavena v případě TIG pájení a to z toho důvodu, aby nedošlo k vypařování přídavného materiálu a zaručilo se rovnoměrné rozlití pájky. Zajímavostí je, že při MIG pájení byl pájeno vyšší hodnotou el. proudu než při svařování MIG. Logicky by mělo být použito více proudu při svařování než při pájení a to z důvodu, že při svařování se natavuje i základní materiál. Svařovací parametry ostatních metod lze vidět v tab. č. 43.

Základní rozměry spoje byly dosaženy pouze v případě MIG pájení. Naopak největší nedodržení základních rozměrů bylo v případě MIG svařování a TIG pájení.

Největší oblast odpařeného zinku byla v případě MIG a TIG svařování, což se očekávalo vzhledem k dosažení vysokých teplot pro natavení základního materiálu a délce doby svařování. Naopak nejméně zinku se odpařilo v případě MIG pájení. Na spojovaném materiálu č. 1 se odpařila zinková vrstva ve vzdálenosti 0,654 mm od pájeného spoje v příčném řezu. Na spojovaném materiálu č. 2 se odpařila ve vzdálenosti 0,816 mm.

Dále byl spočítán tepelný příkon nutný pro návrh numerické simulace v Sysweld viz tabulka č. 39. Nejvíce tepelného příkonu resp. vneseného tepla, bylo použito při TIG pájení a naopak nejméně tepelného příkonu bylo použito při MIG pájení => nejmenší tepelné ovlivnění

=> nejvhodnější technologie spojování z těchto 4 provedených. Z tabulky lze vyzpozorovat, že při TIG pájení bylo vneseno více tepla než při svařování. Přičemž, se většinou uvádí, že při svařování je potřeba dosáhnout mnohem vyšších teplot než při pájení. V tomto případě je tomu naopak z důvodu vyššího napětí.

Numerická simulace v Sysweld byla provedena pro TIG a MIG svařování a byla zaměřena na zbytkové napětí, průběh teploty a deformace. Zbytkové napětí (= redukované napětí von Mises) a deformace jsou numericky nasimulovány po úplném vychlazení svarového spoje na pokojovou teplotu. Teplotní pole bylo numericky nasimulováno během svařování. Při svařování metodou TIG bylo dosaženo nejvyšší zbytkové napětí (= redukované napětí von Mises) 587 MPa a největší deformace 0,47 mm ve směru osy Z (ve směru svařování). Při svařování metodou MIG bylo dosaženo největší zbytkové napětí (= redukované napětí von Mises) 524 MPa, a největší deformace 0,45 mm ve směru osy Z (ve směru svařování). Zbytkové napětí a deformace u TIG svařování je vyšší z důvodu delší doby svařování. Přehledně tak lze vidět v tabulce č. 42. Zbytkové napětí ve svaru je největší na začátku svaru v tepelně ovlivněné oblasti, přičemž směrem ke konci svaru se napětí snižuje. Je to způsobeno upnutím těchto materiálů a fixací v XYZ. Deformace je naopak nejvyšší na konci svaru a směrem k začátku svaru se zmenšuje. Je to způsobeno směrem svařování a přenosem tepla. TIG svařování bylo v tomto případě vyhodnoceno jako rizikovější než MIG svařování, co se týče těchto 3 sledovaných atributů. Jako možné řešení snížení těchto atributů by bylo zvýšení svařovací rychlosti v případě TIG svařování, což ale může způsobit jiné problémy. Vhodnější řešení než upravovat svařovací parametry by bylo zvolení jiných pozic upínek a fixací v osách. V tabulce č. 41 je přehled vypracovaných (předběžných) specifikací postupu svařování/pájení.

Č. zk. kusu	Metoda	Typ spoje	Typ svaru	Délka spoje [mm]	Poloha	Směr	Typ oceli
1	TIG svařování	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
2	MIG pulsní pájení	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
3	MIG pulsní svařování	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)
4	TIG pájení	T	ss sl FW	50	PB	lw	S235 JR + AR (+Z)

Tabulka č. 37: Přehled použitých metod svařování/pájení, typ spoje, materiál a další podstatné informace

Název/zkratka	C_e [hm. %]	C [hm. %]	Tloušťka svařovaného materiálu [mm]
Hodnoty (vypočtená hodnota ≤ stanovená hodnota z normy)	$0,42 \leq 0,45$	$0,17 \leq 0,20$	$5 \leq 25$
Podmínka (splněna/nesplněna)	splněna	splněna	splněna

Tabulka č. 38: Přehled podmínek zaručené svařitelnosti

Metoda	TIG svařování	MIG svařování	TIG pájení	MIG pájení
Tepelný příkon [J/mm]	1550	1340	1760	720

Tabulka č. 39: Přehled hodnot tepelných příkonů jednotlivých metod procesu svařování/pájení

Rozměr	a – rozměr [mm]	z – rozměr [mm]	Sklon připojovaných částí [°]	L _{účinná} [mm]	L _{MIN} [mm]
Hodnota	3,5 mm	5 mm	90	43	30
Podmínka (splněna/ne-splněna)	splněna	-	splněna	-	-

Tabulka č. 40: Přehled navržených základních rozměrů koutového svarového/pájeného spoje

Metoda	pWPS (ano/ne/-)	pBPS (ano/ne/-)	WPS (ano/ne/-)	BPS (ano/ne/-)
TIG svařování	ano	-	ne	-
MIG svařování	ano	-	ne	-
TIG pájení	-	ano	-	ne
MIG pájení	-	ano	-	ne

Tabulka č. 41: Přehled vypracovaných protokolů pro svařování/pájení

Metoda	Zbytkové napětí (von Mises)	Deformace ve směru osy „Z“
TIG svařování	587 MPa	0,47 mm
MIG svařování	524 MPa	0,45 mm

Tabulka č. 42: Přehled výsledků numerické simulace zaměřených na zbytkové napětí (redukováné napětí von Mises) a deformace po TIG a MIG svařování (po vychladnutí spoje na pokojovou teplotu)

Metoda	Svař. I [A]	Svař. U [V]	Čas procesu [s]	Svař. v [mm/s]	Ø [mm] Elektroda	Ø [mm] Přid. materiál	Výlet drátu [mm]	Podávání drátu [m/min]	Ochr. plyn	Průtok plynu (l/min)
TIG svařování	140 konst.	10,2 ± 0,4	90	0,55	Ø 2,4 WLa 15	Ø2 W3Si1	-	-	Ar 4.6	9
MIG svařování	126 ± 5	15,8 ± 0,4	42	1,19	-	Ø1 G3Si1	12	5	Ar 4.6	15
TIG pájení	105 konst.	15,4 ± 1,5	90	0,55	Ø 2,4 WLa 15	Ø1,5 Ag 20 %	-	-	Ar 4.6	9
MIG pájení	229 ± 11	24,6 ± 5,0	8	6,25	-	Ø1 CuSi3	12	12	Ar 4.6	15

Tabulka č. 43: Přehled použitých svařovacích/pájecích parametrů a další nezbytné informace spojené se vznikem svarových/pájených spojů

Závěr

Z materiálu poskytnutého společností ABADIA, a.s. byly připraveny ručním svařováním a pájením T svarové a pájené spoje oceli S235JR+AR (+Z) metodami MIG a TIG. Z každého zkušebního kusu (spoje) byly zhotoveny 2 zkušební vzorky. Celkem tedy bylo zhotoveno 8 zkušebních vzorků, které byly podrobeny nedestruktivnímu testování ve formě vizuální kontroly a destruktivnímu testování ve formě makroskopické a mikroskopické zkoušky pod světelným mikroskopem. Oba druhy testování byly provedeny za účelem nalezení vad těchto spojů, odpaření zinkového povlaku, rozhraní pájka - základní materiál, kontrole a ověření procesu svařování a pájení.

Všechny procesy svařování a pájení probíhaly pod programovým řízením WeldEye, kde se předem vše nastavilo (svařovací/pájecí parametry, pWPS, pBPS atd.). Z tohoto programově řízeného svařování a pájení byly získány výsledky, které byly zaznamenány do grafů. Podle nich a při pohledu na svarové/pájené spoje lze říci, že zaměřit se na úpravu parametrů procesu není vhodné. Jedná se o ocelové plechy tloušťky 5 mm se zinkovým povlakem a ty je obecně známo obtížné spojovat klasickými metodami. V případě svařování návrh spočívá v přidání úkosů materiálu, přidání dalších svarových housenek (vrstevnatý svar) a případně vytvoření oboustranného svarového T spoje, čímž se zvýší i mechanické vlastnosti tohoto spoje a tím se zvyšuje i jeho využití v praxi.

Proces svařování MIG a TIG byl numericky nasimulován v software Sysweld. Numerická simulace poukázala na důležitost zvolení počátečních a okrajových podmínek a s tím spojený vhodný návrh fixace spojovaných materiálů. Mají významný vliv na rovnoměrné rozprostření zbytkového napětí a deformace. Teplotním polem v materiálu lze odhadnout TOO. Stále je ale nutné mít na mysli, že se jedná o numerickou simulaci svařování, kdy se zanedbává lidský faktor v případě ručního svařování.

Po všech materiálových analýzách provedené v praktické části se jeví jako nejvhodnější metoda MIG pájení s přídavným materiálem CuSi3. Hlavními aspekty tohoto rozhodnutí byly: zachované množství zinkového povlaku v okolí spoje, dodržení rozměrových požadavků spoje a rychlost vzniku spoje. Co se týče mechanických vlastností tohoto spojení, tak s největší pravděpodobností nelze očekávat mechanické vlastnosti jako u svarového spoje, což je samo sebou známé. Je to způsobeno tím, že při pájení nedochází k natavení a spojení základního materiálu s přídavným materiálem.

Tato podsestava bude dále nejspíše spojena s dalšími díly. Na základě jejich použití lze rozhodnout, zda mechanické vlastnosti pájeného spoje postačí nebo naopak je nutno použít jinou metodu spojování materiálu. Zajímavé by bylo na tuto práci navázat a vytvořit na těchto materiálech lepené spoje.

Zdroje

- [1] Česká svářečská společnost ANB [online]. [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=282>
- [2] GALVERY, William L. a Frank M. MARLOW. *Welding Essentials: Questions & Answers*. Industrial Press, 2001. ISBN 0831131517,9780831131517.
- [3] *Factoryautomation.cz* [online]. [cit. 2018-10-22]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/historicky-vyvoj-automatizace-poznejte-12-zasadnich-dat/>
- [4] *Tradeweld.cz* [online]. [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <http://www.tradeweld.cz/cze/produkty/mechanizace-robotizace/>
- [5] PRŮŽA, Štěpán. *Svařování palivových filtrů* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2007 [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30306132.pdf>
- [6] *Svarbazar.cz* [online]. [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2009012402>
- [7] BARTÁK, Jiří, Jaroslav KUBÍČEK, Ladislav DANĚK a Bohumil KANDUS. *Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Plzeň: Česká svářečská společnost ANB, UNO PRAHA, spol. s r.o., Divize WELDING PLZEŇ, 2014.
- [8] *Kuhtreiber.cz* [online]. [cit. 2018-10-25]. Dostupné z: http://www.kuhtreiber.cz/manual_150_170_cz_sk_en_de_pl.pdf
- [9] SEDLÁČEK, Alexander. *Optimalizace procesu svařování násady a výložníku zemního rypadla* [online]. Praha: Čvut v Praze, Fakulta strojní, 2015 [cit. 2019-10-29].
- [10] [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009svarovani/09-141.pdf>
- [11] [online]. [cit. 2019-10-29]. Dostupné z: <http://svv.cz/files/SvaovnTIGproIWS.pdf>
- [12] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování: Studijní opory pro výuku v kurzech 5TE, ETV, ETV-K* [online]. ÚST, odbor svařování a PÚ [cit. 2019-11-01].
- [13] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II - ČÁST SVAŘOVÁNÍ: Díl 1 ZÁKLADNÍ METODY TAVNÉHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. VUT v Brně, 2006 [cit. 2019-11-01].
- [14] *Oenergetice.cz* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/elektricky-oblouk/>
- [15] MARVÁNEK, Ondřej. *Svařování ocelí metodou MIG/MAG* [online]. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2010 [cit. 2019-11-01].
- [16] PAŤHA, Vladimír. *Optimalizace robotizovaného svařování tandemem s využitím laserové kamery* [online]. Brno: VUT v Brně, 2018 [cit. 2019-11-01].
- [17] [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/GTAW-cs.svg>
- [18] [online]. 2015 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1507/svarovani-wolframovou-elektrodou-v-intertni-atmosfere-wig>
- [19] KELČA, Daniel. *Svařování tenkostěnných trubek* [online]. Brno: VUT v Brně, 2010 [cit. 2019-11-01].

- [20] [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://www.svarovani-kolin.cz/Domecek-klestiny-s-plynovou-cockou-pro-horaky-17-18-26-pr-2-4-d818.htm>
- [21] [online]. Vysoká škola Báňská, 2009 [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/TIG%20kompletn%C3%AD%20Brno%20PRIN-CIP%20SVA%C5%98OV%C3%81N%C3%8D%20%20WIG.doc>
- [22] *Mmspektrum.com* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-atmosferach.html>
- [23] [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatic/>
- [24] *Fronius.com* [online]. [cit. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/cs-cz/czech-republic/perfect-welding/vyrobky/ru%C4%8Dn%C3%AD-sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD/tig/accupocket-tig/accupocket-tig/accupocket-150-tig>
- [25] *Prosvareni.cz* [online]. [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: <https://prosvareni.cz/cusi3-1-0mm-5kg-drat-pro-mig-pajeni-pozinkovanych-plechu/>
- [26] KOLAŘÍK, Ladislav. *Automatizace výrobních procesů svařování* [online]. ČVUT v Praze [cit. 2018-11-29].
- [27] ORSZÁGH, V., ORSZÁGH, P., *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, Vydavateľstvo vedeckej literatúry a časopisov, Slovenská akadémia vied, 1998, ISBN 80-88780-21-7
- [28] *Dekmetal.cz* [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://dekmetal.cz/fasadni-systemy/materialy/pozinkovane-plechy>
- [29] *Svetsvaru.cz* [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: http://www.svetsvaru.cz/wp-content/uploads/2015/05/SvetSvaru_2015-1.pdf
- [30] *Konstrukce.cz* [online]. [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/svarovani-slabych-plechu/>
- [31] BARTÁK, J., BUBENÍK, V., BUREŠ, J., BURKOVÍČ, J., MÍŠEK, B., NEUMANN, H., *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*.
- [32] Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, ZEROSS – svářečské nakladatelství, únor 2000, ISBN 80-85771-72-1
- [33] *Istrojirenstvi.cz* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.istrojirenstvi.cz/materialy/precist.php?nazev=automatizace-rotacniho-svarovani-v-podani-hst-creative&id=86>
- [34] *Fronius.com* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/automation/systems/cladding-systems/compact-cladding-cell/compact-cladding-cell>
- [35] *Laseronline.eu* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <http://www.laseronline.eu/spananie-blach.html>
- [36] *Www.schweisshelden.de* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.schweisshelden.de/wolframelektrode-wla-15-gold-2-4-mm-42215>
- [37] *Www.welmet.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/ESAB_Dratove-elektrody.pdf
- [38] *Www.svarecky-elektrody.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarecky-elektrody.cz>

elektrody.cz/esab-ok-tigrod-12-61-tig-drat-na-ocel-2-0-x-1000-mm-baleni-5-kg/d-16335

[39] *Www.eshop.chemweld.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://eshop.chemweld.cz/Pajka-20-Ag-CHEM-WELD-542B-pr-1-50-mm-1-ks-d1353.htm#detail-anchor-description>

[40] *Www.rulik.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.rulik.cz/pro-tvrde-pajeni-a-svarovani/stribrna-pajka-castolin-rb-6110-20-ag-hola-1-5mm-baleni-100gr/>

[41] *Www.svarecky-chrudim.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.svarecky-chrudim.cz/eshop/elektrody_draty/stribrne_pajky/1838-stribrna_pajka_castolin_rb_6110_20_ag_hola_1.5mm_1_kus

[42] *Www.ewm-group.com* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.ewm-group.com/downloads/WM_0924_12_CZ

[43] *Dspace.tul.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2876/bc_19645.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[44] *Www.vutbr.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=5811

[45] *Automig.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>

[46] *Firmy.mmspektrum.com* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/nova-era-svarovaci-techniky-ve-vyrobe-vozidel.html>

[47] *Www.metaweld.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.metaweld.cz/svarovaci-horaky-mig-mag-co2/>

[48] *Www.svarbazar.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009050601>

[49] *Www.svarujte.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarujte.cz/824-svarovaci-drat-sg2-g3si1-0-6mm-5kg-civka>

[50] *Www.omc.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: http://www.omc.cz/files/navody-omi/omi-stars/Nvod_OMI350W-450W.pdf

[51] *Www.oblibene.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.oblibene.cz/user-data/shopimg/gamasvar/File/PDF/NAVODY/Navod%20OMI190D,220D.pdf>

[52] *Core.ac.uk* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/reader/44405286>

[53] *Www.schinkmann.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/redukcniventily>

[54] *Www.spszengrova.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/STT/SVA%C5%98OV%C3%81N%C3%8D-UT.pdf>

[55] *Www.vutbr.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=147963

[56] *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2915156/>

[57] *Fronius.com* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.fronius.com/de/schweisstechnik/kompetenzen/schweissprozesse/cmt>

- [58] *Ust.fme.vutbr.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf
- [59] *Svarovaci-technika.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarovaci-technika.cz/drat-ok-autrod-12-51-pr--0-8-mm--marathon-pac/>
- [60] *Svarbazar.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101201>
- [61] *Prosvareni.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://prosvareni.cz/cusi3-1-0mm-5kg-drat-pro-mig-pajeni-pozinkovanych-plechu/>
- [62] *Welmet.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.welmet.cz/wp-content/uploads/2019/04/ESAB_Dratove-elektrody.pdf
- [63] *Esab.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.esab.cz/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/copper-based-alloys/ok-autrod-19-30.cfm>
- [64] *Svarbazar.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2007101201>
- [65] *Dspace.vsb.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/88106/HAM133_FS_N2301_2303T002_2011.pdf?sequence=1&isAllowed=n
- [66] *Esab.co.uk* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.esab.co.uk/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1.cfm>
- [67] *Pasovaocel.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.pasovaocel.cz/vyro_tep2.htm
- [68] *Opi.zcu.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/evropske_normy.pdf
- [69] *Online.ferona.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/znaceni-oceli/?typ=2>
- [70] *Eurometal.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.eurometal.cz/magazin/rozdil-mez-zarovym-a-galvanickym-zinkovanim-detail-60>
- [71] *Zarova-zinkovna.mea.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://zarova-zinkovna.mea.cz/upload/ck/files/prirucka-zaroveho-zinkovani.pdf>
- [72] *Acsz.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.acsz.cz/clanek/zarove-zinkovani-ponorem-zakladni-informace-pro-uzivatele/>
- [73] BAKSA, Zdeněk. *Elektrochemická ochrana kovů proti korozi* [online]. Brno: Mendelova univerzita, 2011 [cit. 2020-07-17].
- [74] *Tribotechnika.sk* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12013/povlaky-zaroveho-zinku-a-jejich-zivotnost.html>
- [75] *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2286>
- [76] *Web.natur.cuni.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: https://web.natur.cuni.cz/~zus-kova/el_2_1_so.pdf
- [77] *Arc-h.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.arc-h.cz/files/ja/weldeye-documentation-mng.pdf>

[78] *Vseprosvarovani.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <https://www.vseprosvarovani.cz/blog/view/komplexni-reseni-pro-kontrolu-a-spravu-svarovani-weldeye/>

[79] *Firmy.mmspektrum.com* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/numericke-simulace-svarovani.html>

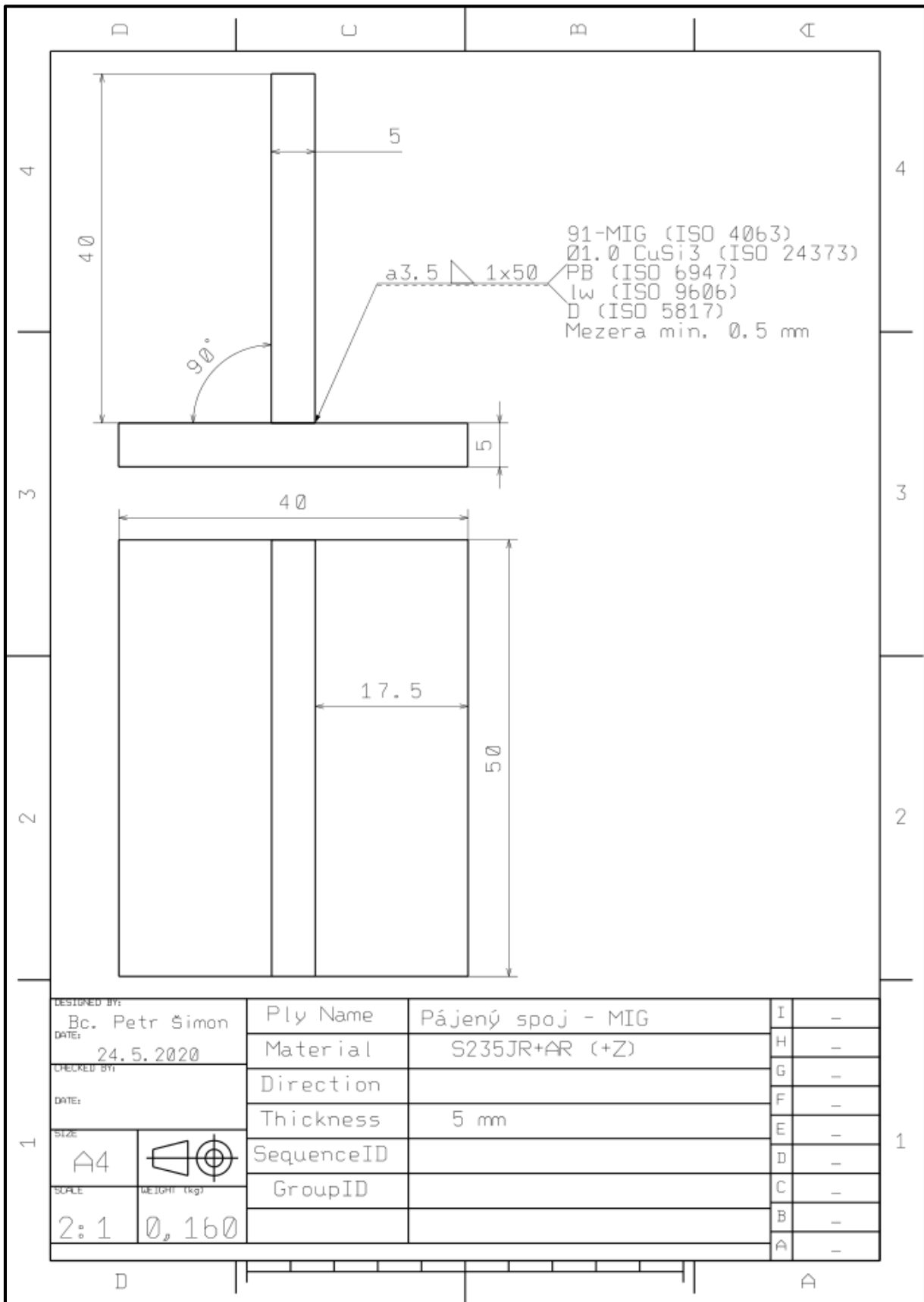
[80] *Vitkovice.cz* [online]. [cit. 2020-07-17]. Dostupné z: <http://www.vitkovice.cz/sysweld-test>

[81] KŘEPELA, František a Stanislav WIENS. *Výhody moderních softwarových řešení pro vaši výrobu* [online]. ARC-H a.s., Plzeň: Kempfi, 2018 [cit. 2020-07-22].

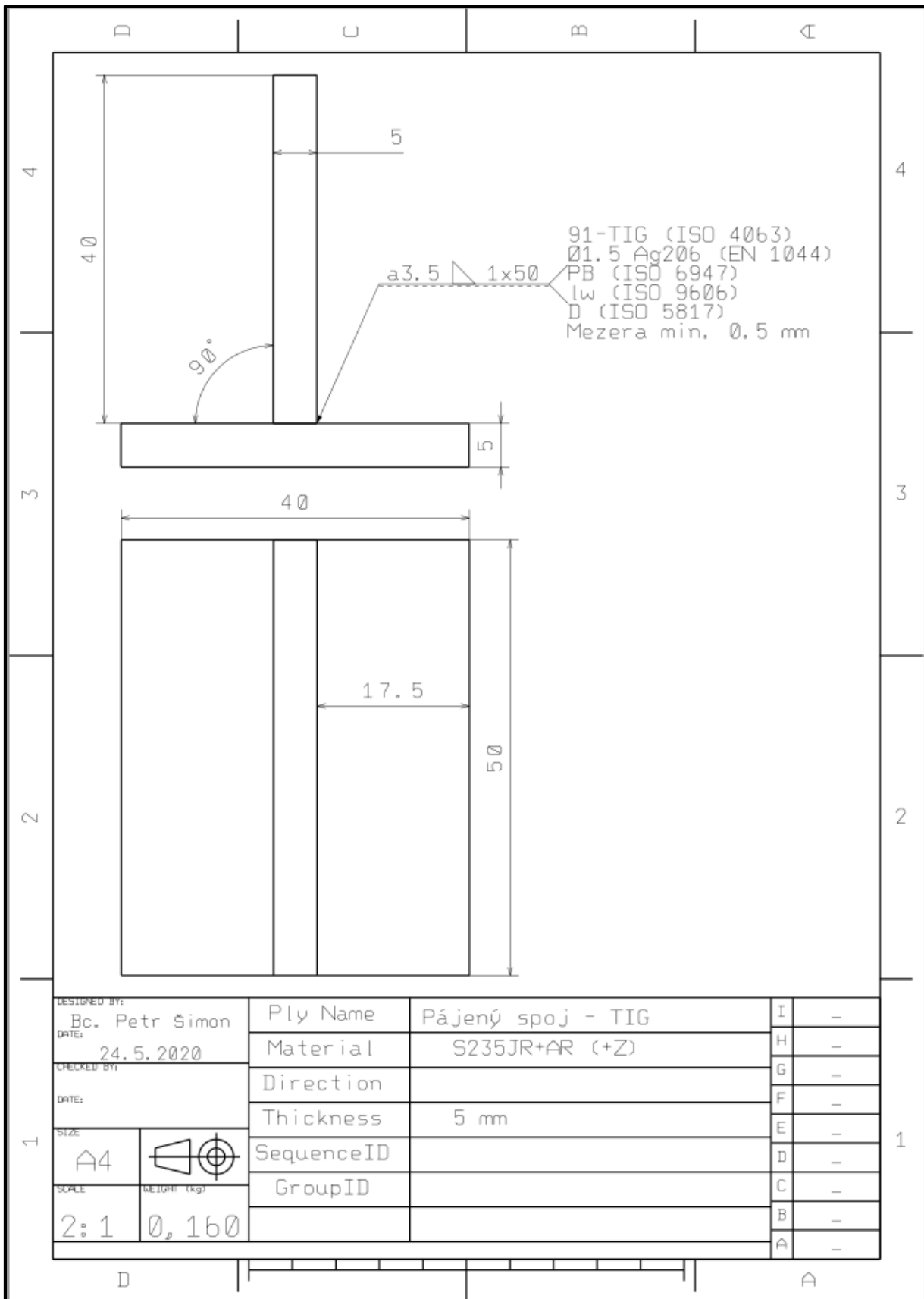
PŘÍLOHA

Výkresová dokumentace

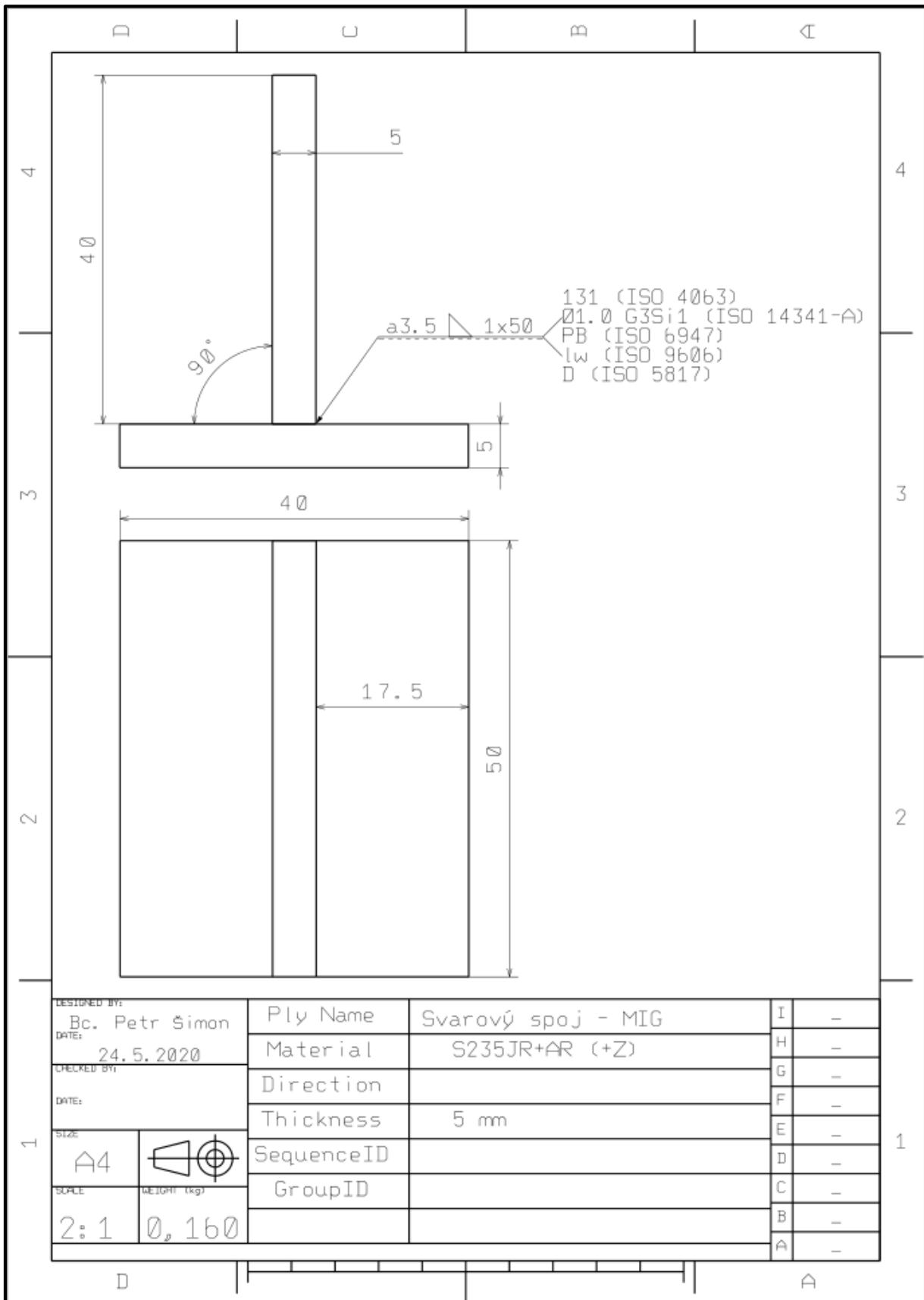
Příloha č. 1 – Výkresová dokumentace - Pájený spoj - MIG



Příloha č. 2 - Výkresová dokumentace - Pájený spoj - TIG



Příloha č. 3 - Výkresová dokumentace - Svarový spoj - MIG



Příloha č. 4 - Výkresová dokumentace - Svarový spoj - TIG

