

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**Turek  
Jaroslav**

**2022**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turek** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **473533**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Zvýšení efektivity svařování využitím plněných elektrod při svařování komponent vodních turbín**

Název diplomové práce anglicky:

**Increasing of welding efficiency by using filled electrodes when welding the water turbine components**

Pokyny pro vypracování:

- Popis používaných materiálů a metod svařování pro výrobu vodních turbín
- Podrobný rozbor problematiky použití plněných elektrod
- Návrh experimentu pro porovnání efektivity svařování plněnými elektrodami oproti standardním typům přídavných materiálů
- Vyhodnocení výsledku experimentu, závěr

Seznam doporučené literatury:

- [1] ESAB – Příručka svářeče - Rutilové plněné elektrody pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí ve všech polohách, Vamberk, 2010
- [2] EW 492 – Technical guide - Flux cored Arc Welding, Hobart Institute of welding technology, 2002
- [3] William H. Minnick, Flux cored Arc Welding Handbook, Goodheart-Wilcox Publisher, 2009
- [4] Firemní podklady společnosti Lincoln Electric

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

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

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

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

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

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

V Praze dne: .....

.....

Podpis

## **Poděkování**

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Ladislavu Kolaříkovi, Ph.D., IWE vedoucímu mé diplomové práce za vstřícný přístup, odborné konzultace včetně cenných rad a poznatků. Dále bych chtěl poděkovat firmě Baest Machines & Structures, a.s. Benešov za možnost zpracování tématu diplomové práce a poskytnutí materiálu k uskutečnění experimentu, a v neposlední řadě lidem ústavu strojírenské technologie za pomoc v průběhu experimentu.

Velké poděkování patří i mé rodině a přítelkyni, kteří mě během celého studia podporovali.

## **Anotace**

<b>Název diplomové práce:</b>	Zvýšení efektivity svařování využitím plněných elektrod při svařování komponent vodních turbín
<b>Autor práce:</b>	Bc. Jaroslav Turek
<b>Vedoucí práce:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Akademický rok:</b>	2021/2022
<b>Vysoká škola:</b>	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav:</b>	12133 – Ústav strojírenské technologie
<b>Vedoucí ústavu:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Rozsah práce:</b>	112 stránek, 34 tabulek, 76 obrázků
<b>Klíčová slova:</b>	Svařování, obloukové svařování, MAG, FCAW, MCAW, plněné elektrody, konstrukční ocel, destruktivní a nedestruktivní zkoušky svaru

## **Abstrakt**

Diplomová práce řeší možné použití plněných elektrod namísto standardního svařovacího drátu plného průřezu při výrobě komponent vodních turbín ve firmě Baest Machines & Structures, a.s. Benešov. V teoretické části jsou popsány základní materiály používané při výrobě komponent vodních turbín. Dále je rozebrána teorie obloukového svařování s konkrétním případem svařování v ochranných atmosférách – metoda MAG. Poté je věnována pozornost problematice použití plněných elektrod. V praktické části byly vytvořeny čtyři tupé svarové spoje typu V na základním materiálu z oceli S355J2+N, které byly rozděleny do dvojic podle polohy svařování (PA, PF). V rámci každé dvojice byla porovnávána stávající metoda svařování (MAG) s metodou využívající plněné elektrody (FCAW, MCAW). Svarové spoje byly podrobeny hodnocení kvality na základě provedených vybraných zkoušek předepsaných normou ČSN EN ISO 15614-1. V závěru jsou vyhodnoceny výsledky provedených zkoušek a porovnány náklady na zhotovení svarů.

## Annotation

<b>Title of the final thesis:</b>	Increasing of welding efficiency by using filled electrodes when welding the water turbine components
<b>Author:</b>	Bc. Jaroslav Turek
<b>Supervisor:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Academic year:</b>	2021/2022
<b>University:</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department:</b>	12133 – Department of Manufacturing Technology
<b>Head of department:</b>	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
<b>Extent:</b>	112 pages, 34 tables, 76 pictures
<b>Keywords:</b>	Welding, arc welding, MAG, FCAW, MCAW, filled electrodes, destructive and non destructive weld testing

## Abstract

The diploma thesis deals with the possible use of filled electrodes instead of standard solid welding wire in the production of water turbine components at Baest Machines & Structures, a.s. Benešov. The theoretical part describes the base materials used in the production of water turbine components. In the next part, the theory of arc welding is analyzed with the specific case of welding in protective atmospheres - the MAG method. Then the attention is focused on the issue of using filled electrodes. In the practical part, four V-type butt weld joints were created on the base material of steel S355J2+N, which were divided into pairs according to the welding position (PA, PF). Within each pair, an existing welding method (MAG) was compared with a method using filled electrodes (FCAW, MCAW). Welded joints were subjected to quality assessment based on selected tests prescribed by the ČSN EN ISO 15614-1 standard. At the end, the results of the performed tests are evaluated and the costs of making welds are compared.

## Obsah

1	Úvod a cíl práce .....	14
2	Svařované základní materiály .....	15
2.1	Nízkolegované oceli .....	15
2.1.1	Ocel S355J2 .....	15
2.2	Legované oceli.....	16
2.2.1	Korozivzdorné oceli EN 1.4301 a EN 1.4307.....	16
2.3	Svařitelnost .....	17
2.3.1	Svařitelnost konstrukčních ocelí .....	17
2.3.2	Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí.....	18
3	Obloukové svařování .....	19
3.1	Obloukové svařování v ochranných atmosférách.....	20
4	Svařování metodou MAG .....	21
4.1	Zařízení pro svařování metodou MAG.....	21
4.1.1	Svařovací zdroj.....	21
4.1.2	Kladkový podavač svařovacího drátu .....	22
4.1.3	Hořák.....	24
4.2	Svařovací parametry a podmínky nastavení procesu svařování.....	25
4.2.1	Svařovací proud .....	25
4.2.2	Napětí na oblouku .....	27
4.2.3	Rychlost svařování .....	28
4.2.4	CTWD .....	29
4.2.5	Sklon a vedení hořáku.....	29
4.3	Přenos svarového kovu.....	30
4.3.1	Zkratový přenos .....	30
4.3.2	Kapkový přenos .....	31
4.3.3	Sprchový přenos.....	31

4.3.4	Pulzní přenos.....	32
4.4	Přídavné materiály.....	33
4.4.1	PM pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí.....	33
4.4.2	PM pro svařování korozivzdorných ocelí.....	34
4.5	Ochranné plyny a směsi plynů.....	36
4.5.1	Argon.....	37
4.5.2	Helium.....	37
4.5.3	Oxid uhličitý.....	38
4.5.4	Kyslík, vodík a dusík.....	38
4.5.5	Klasifikace ochranných plynů.....	39
5	Svařování pomocí plněných elektrod (FCAW a MCAW).....	41
5.1	Metoda FCAW.....	41
5.1.1	Rutilové plněné elektrody.....	42
5.1.2	Bazické plněné elektrody.....	42
5.1.3	FCAW-G a FCAW-S.....	42
5.1.4	Klasifikace dle ČSN EN ISO 17632.....	43
5.1.5	Klasifikace dle ČSN EN ISO 17633.....	48
5.2	Metoda MCAW.....	49
5.2.1	Klasifikace dle ČSN EN ISO 17632.....	50
5.2.2	Klasifikace dle ČSN EN ISO 17633.....	51
5.3	Výroba plněných elektrod.....	51
5.3.1	Bezešvé plněné elektrody.....	52
5.3.2	Švové plněné elektrody.....	52
5.4	Rozměry standardně dodávaných plněných elektrod.....	52
5.5	Výhody a nevýhody plněných elektrod.....	52
5.5.1	Výhody.....	52
5.5.2	Nevýhody.....	53



6	Použití keramických podložek.....	54
7	Návrh experimentu .....	57
8	Použitý základní materiál.....	58
9	Použité přídavné materiály .....	59
10	Příprava vzorků a svarových ploch .....	61
11	Vytvoření svarových spojů .....	64
11.1	Vzorek 1A1 .....	66
11.2	Vzorek 2B1 .....	69
11.3	Vzorek 2A1 .....	71
11.4	Vzorek 2A2.....	72
12	Nedestruktivní zkoušky pro vyhodnocení kvality svarů.....	76
12.1	Vizuální kontrola svarů.....	76
12.2	Kapilární zkouška .....	78
13	Destruktivní zkoušky pro vyhodnocení kvality svarů.....	80
13.1	Příčná tahová zkouška .....	80
13.1.1	Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku tahem.....	80
13.1.2	Průběh a výsledky zkoušky tahem .....	83
13.2	Zkouška rázem v ohybu.....	85
13.2.1	Příprava vzorků pro zkoušku rázem v ohybu.....	85
13.2.2	Průběh a výsledky zkoušky rázem v ohybu .....	87
13.3	Makroskopická kontrola svarů.....	89
13.3.1	Příprava metalografických výbrusů .....	89
13.3.2	Výsledky .....	91
13.4	Zkoušení tvrdosti .....	93

14	Technicko-ekonomické hodnocení .....	95
14.1	Mzdové a režijní náklady na svářeče .....	95
14.2	Náklady na přídavný materiál .....	96
14.3	Náklady na ochranné plyny .....	96
14.4	Celkové náklady na zhotovení svaru .....	97
15	Závěr .....	99
	Seznam použité literatury .....	101
	Seznam obrázků .....	108
	Seznam tabulek .....	111
	Přílohy .....	112

## Seznam použitých zkratek a symbolů

Značka	Význam	Popis	Jednotka
t	Tloušťka	-	[mm]
R <sub>emin</sub>	Minimální mez kluzu	-	[N.mm <sup>-2</sup> ]
R <sub>mmin</sub>	Minimální mez pevnosti v tahu	-	[N.mm <sup>-2</sup> ]
R <sub>p0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	-	[N.mm <sup>-2</sup> ]
R <sub>m</sub>	Mez pevnosti v tahu	-	[N.mm <sup>-2</sup> ]
A	Tažnost	-	[%]
CET	Uhlíkový ekvivalent	-	[%]
MKK	Mezikrystalická koroze	-	-
KV	Nárazová práce (V vrub)	-	[J]
MAG	Metal Active Gas	Obloukové svařování v aktivním plynu	-
MIG	Metal Inert Gas	Obloukové svařování v interním plynu	-
TIG	Tungsten Inert Gas	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou	- -
WIG	Wolfram Inert Gas	= TIG (z německého názvu)	-
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	Ekvivalentní označení pro TIG	-
GMAW	Gas Metal Arc Welding	Obloukové svařování v ochranném plynu	-
CTWD	Contact To Work Distance	Vzdálenost mezi kontaktní špičkou a svařovaným materiálem	-
I <sub>s</sub>	Svařovací proud	-	[A]
U	Napětí na oblouku	-	[V]
R	Elektrický odpor	-	[Ω]
p	Převýšení svarové housenky	-	[mm]
h	Hloubka závaru	-	[mm]
b	Šířka svarové housenky	-	[mm]
PM	Přídavný materiál	-	-

ZM	Základní materiál	-	-
FCAW	Flux Cored Arc Welding	Obloukové svařování plněnou elektrodou s příměsí tavidla	-
MCAW	Metal Cored Arc Welding	Obloukové svařování plněnou elektrodou s kovovým práškem	-
Mod(X)	Modus veličiny	Hodnota veličiny s největší četností	[X]
$t_s$	Čas svařování	-	[min]
$v_s$	Rychlost svařování	-	[cm.min <sup>-1</sup> ]
Q	Tepelný příkon	-	[kJ.cm <sup>-1</sup> ]
$T_i$	Teplota interpass	-	[°C]
$\eta$	Účinnost metody	-	[-]
NDT	Non Destructive Testing	Nedestruktivní zkoušení materiálu	-
DT	Destructive Testing	Destruktivní zkoušení materiálu	-
$L_0$	Počáteční měřená délka	-	[mm]
$S_0$	Počáteční plocha příčného průřezu	-	[mm <sup>2</sup> ]
VWS	V: Charpy V-vrub W: vrub ve svarovém kovu S: povrch tyče s vrubem je rovnoběžný s povrchem zkušebního kusu	Pojmenování zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu	-
VHS	V: Charpy V-vrub H: vrub v tepelně ovlivněné oblasti S: povrch tyče s vrubem je rovnoběžný s povrchem zkušebního kusu	Pojmenování zkušební tyče pro zkoušku rázem v ohybu	-
SK	Svarový kov	-	-
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	-	-
HNO <sub>3</sub>	Kyselina dusičná	-	-
$N_{mz}$	Mzdové a režijní náklady na svářeče	-	[Kč.kg <sup>-1</sup> ]

$N_{pm}$	Náklady na přídavný materiál	-	[Kč.kg <sup>-1</sup> ]
$N_{op}$	Náklady na ochranné plyny	-	[Kč.kg <sup>-1</sup> ]
HS	Hodinová sazba svářeče	-	[Kč.hod <sup>-1</sup> ]
$P_t$	Výkon odtavení svarového kovu	-	[kg.hod <sup>-1</sup> ]
$C_{sv}$	Cena přídavného materiálu	-	[Kč.kg <sup>-1</sup> ]
$V_{sv}$	Využití přídavného materiálu	-	[-]
$Q_{plyn}$	Průtočné množství ochranného plynu	-	[l.hod <sup>-1</sup> ]
$C_{plyn}$	Cena ochranného plynu	-	[Kč.l <sup>-1</sup> ]
$N_c$	Celkové náklady	Vztaženy na jednotku hmotnosti	[Kč.kg <sup>-1</sup> ]
$N_{cl}$	Celkové náklady	Vztaženy na jednotku délky	[Kč.m <sup>-1</sup> ]
$m_{sk}$	Hmotnost svarového kovu	-	[kg.m <sup>-1</sup> ]

## 1 Úvod a cíl práce

Diplomová práce vznikla na základě návrhu tématu z firmy Baest Machines & Structures, a.s. Benešov (dále už jen Baest).

Historie firmy Baest se datuje od roku 1979, kdy započala výstavba výrobního závodu pod názvem Stavební stroje Benešov. Tehdejší zaměření závodu bylo na výrobu formovací techniky a komponent pro stavební stroje. V roce 1996 byl podnik privatizován společností Best s.r.o. a došlo ke změně ve výrobním programu. Formovací technika byla nahrazena výrobou nádrží, jeřábů a vrtací techniky. V roce 2002 převzala podnik akciová společnost Baest, která pozměnila výrobní program.

Firma Baest nyní disponuje výrobním programem zaměřeným na výrobu svařovaných ocelových konstrukcí, konkrétně ocelových nádrží (nadzemní, podzemní), akumulčních nádrží, tlakových nádob, sil a zásobníků, technologických celků pro živičné hospodářství, ale také i technologických celků pro vodní turbíny a vodní elektrárny. Při výrobě ocelových konstrukcí je používána celá škála technologií, jako jsou např.: technologie dělení materiálu (CNC pálicí centrum, pily...), technologie svařování (MIG/MAG, TIG, SAW...), technologie tváření (lisy a zkružovačky plechů), technologie obrábění (frézky, soustruhy, horizontální vyvrtávačky...) a technologie povrchových úprav (tryskání a lakování).

Dnešní doba si žádá neustálá zdokonalování a vylepšování technologií za účelem snížení nákladů a zvýšení produktivity (minimálně při zachování nebo zvýšení kvality). Z tohoto důvodu hledá firma Baest možné alternativy, jak výše zmíněných dosáhnout.

Jedním z možných řešení by mohla být změna přídavných materiálů v technologii svařování, což je motivem vzniku této diplomové práce.

Cílem diplomové práce je vyhodnotit možnost náhrady klasických svařovacích drátů plného průřezu pro technologii svařování MAG za plněné elektrody při výrobě komponent vodních turbín.

## 2 Svařované základní materiály

### 2.1 Nízkolegované oceli

Primárně se uskutečňuje výroba komponent vodních turbín z nízkolegovaných ocelí, na které jsou dále aplikovány nátěrové systémy zajišťující jejich ochranu před korozními vlivy vody a vzduchu.

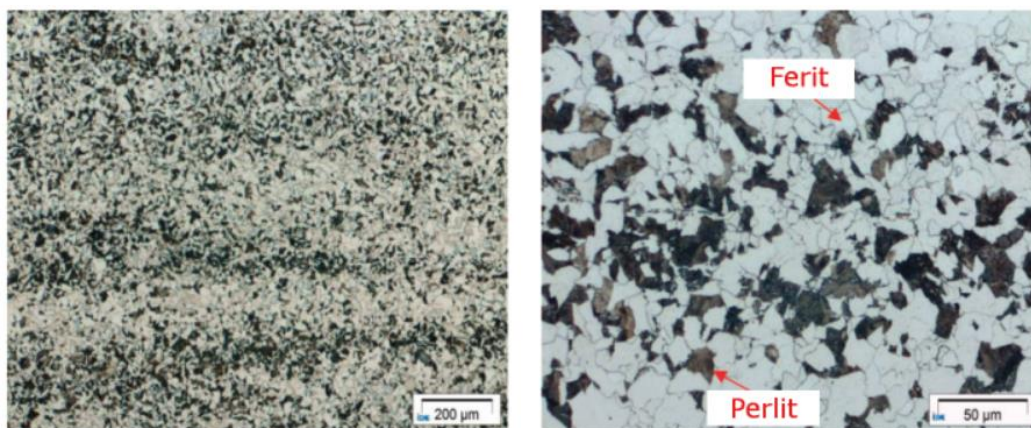
#### 2.1.1 Ocel S355J2

Při výrobě komponent vodních turbín je ve velké míře používána standardní konstrukční ocel S355J2 (označení dle ČSN EN 10027-1 - *Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek oceli*. [1]), resp. 1.0577 (dle ČSN EN 10027-2 *Systémy označování ocelí – Část 2: Systém číselného označování* [2]). Většinou jde o ocel jakosti S355J2+N, tedy oceli při jejíž konečném zpracování bylo použito normalizační žíhání/válcování, které zajišťuje homogenní a jemnozrnnou strukturu. Symbol „J2“ vyjadřuje minimální nárazovou práci 27 J při -20 °C. Používají se různé tloušťky v závislosti na konstrukci a požadavcích zákazníka. Většinou se jedná o tloušťky plechů od 8 mm do 70 mm. Chemické složení této oceli je uvedeno v *tab. 1*. [3]

**Tab. 1 Chemické složení oceli S355J2+N v hm. % [4]**

C max. pro tloušťku v mm			Mn	Si	P	S	N
≤16	>16≤40	>40	max.	max.	max.	max.	max.
0,20	0,20	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-

Jedná se o ocel se zvýšenou mezí kluzu. Vzhledem k nízkému obsahu uhlíku je u této oceli charakteristická feriticko-perlitická struktura. Na *obr. 1* je možné vidět mikrostrukturu oceli po válcování. [5]



**Obr. 1 Mikrostruktura S355J2+N po válcování při zvětšení 50x (vlevo) a 200x (vpravo) [5]**

Díky nízkému obsahu uhlíku je ocel vhodná ke svařování i za použití běžných konvenčních metod svařování. Základní mechanické vlastnosti oceli S355J2+N jsou uvedeny v *tab. 2*.

**Tab. 2 Mechanické vlastnosti S355J2+N [4]**

<b>t [mm]</b>	<b>R<sub>emin</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>R<sub>mmin</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>A [%]</b>	<b>KV při -20 °C [J]</b>
3-100	315-355	490-630	max. 22	27

## 2.2 Legované oceli

Vzhledem k tomu, že se ve firmě Baest uskutečňuje v podstatě zakázková výroba, nemusí být vždy výrobky zhotoveny z nízkolegované nebo nelegované oceli. Mnohdy se stává, že má zákazník požadavek na konstrukci, která je kombinací nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí. Důvodem jsou například hydraulické rázy, které by mohly narušit nátěrový systém nebo spojení přírub vyžadující rozměrovou přesnost, která je v případě následného lakování těžko dosažitelná. Proto je účelné v takových místech nahradit běžnou konstrukční ocel ocelí korozivzdornou.

### 2.2.1 Korozivzdorné oceli EN 1.4301 a EN 1.4307

Ve většině výše zmíněných případů jsou voleny materiály ze skupiny austenitických korozivzdorných ocelí, nejčastěji typy: EN 1.4301 a EN 1.4307. Uvedené austenitické chrom-niklové oceli jsou standardními materiály nabízející skvělou odolnost vůči korozi v přirozeném okolním prostředí – voda a vzduch. Mají velmi dobré vlastnosti i při nízkých teplotách. Rozdíl mezi těmito dvěma ocelmi je především v obsahu uhlíku. Ocel EN 1.4307 má nižší obsah uhlíku než EN 1.4301 (viz *tab. 3*). Tím je zlepšena korozní odolnost po svaření a předchází se precipitaci karbidů, které mají za vinu vznik mezikrystalové koroze. Svařitelnost u obou ocelí je velmi dobrá (při dodržení specifických podmínek svařovacího procesu). Vzhledem k tomu, že kvůli austenitické struktuře ztrácí oceli feromagnetické vlastnosti, není možné použít při defektoskopickém zkoušení magnetickou metodu. Chemické složení obou ocelí je uvedeno v *tab. 3*. a mechanické vlastnosti v *tab. 4*. [6], [7]



**Tab. 3 Chemická složení EN 1.4301 a EN 1.4307 v hm. % [6], [8]**

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
<b>1.4301</b>	max.	max.	max.	max	max	17,50-	8,00-	max
	0,07	1,00	2,00	0,045	0,03	19,50	10,50	0,10
<b>1.4307</b>	max.	max.	max.	max.	max	17,50-	8,00-	max
	0,03	1,00	2,00	0,045	0,03	19,50	10,50	0,10

**Tab. 4 Mechanické vlastnosti EN 1.4301 a EN 1.4307 [6], [8]**

	R <sub>p0,2</sub> [N.mm <sup>-2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N.mm <sup>-2</sup> ]	A [%]	KV při 20°C [J]
<b>1.4301</b>	210	520 - 720	45	60
<b>1.4307</b>	180	450 - 700	40	60

## 2.3 Svařitelnost

### 2.3.1 Svařitelnost konstrukčních ocelí

Svařitelnost konstrukčních ocelí je nejjednodušším způsobem určena vlivem chemického složení. Pro tento druh ocelí je vliv chemického složení vyjádřen pomocí uhlíkového ekvivalentu CET. Uhlíkový ekvivalent je stanoven pomocí vztahu:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \text{ (hm. \%)} \quad (1)$$

Pokud je  $CET \leq 0,35$  jsou oceli obvykle svařitelné v běžně používaných tloušťkách bez problémů. S rostoucím CET je nutné počítat se snížením ochlazovací rychlosti, aby se zamezilo vzniku trhlin. Je tedy vhodné aplikovat předehřev. S narůstajícím CET a tloušťkou materiálu je nutné volit vyšší teplotu předehřevu. Oceli s  $CET \leq 0,41$  není nutné předehřívát. Pro ostatní případy lze nalézt doporučení v materiálových listech příslušných ocelí.

Při svařování oceli S355J2+N se očekává hrubnutí zrna v tepelně ovlivněné oblasti a tím i pokles plastických vlastností. Svařuje se tedy obvykle bez předehřevu. Pokud je předehřev nutný doporučuje se rozmezí teplot 100-150 °C. Důležitý je také nízký obsah síry (max 0,03 hm. %) kvůli náchylnosti ke vzniku trhlin za tepla. Uhlíkový ekvivalent CET oceli je maximálně 0,47. Ocel má dobrou svařitelnost. Při vícevrstvěném svařování nesmí překročit teplota interpass 250 °C. [9]

### **2.3.2 Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí**

Austenitické korozivzdorné oceli mají obecně velmi dobrou svařitelnost za dodržení specifických podmínek. Bohužel jsou náchylné ke vzniku trhlin za tepla a na mezikrystalickou korozi (MKK). Možnostmi jak snížit míru vzniku trhlin za tepla jsou: svařování bez předehřevu, limitace tepelného příkonu, maximální teplota interpass 150 °C při vícevrstevném svařování a 5% obsah feritu  $\delta$ . Dalším problémem je vznik  $\sigma$  fáze při vysokém obsahu Cr, Mo a Si, která způsobuje zkřehnutí oceli. Vliv na vznik MKK mají vyprecipitované karbidy. Důležitá je také volba přídavného materiálu, který musí mít podobné chemické složení jako základní materiál. [9]

### 3 Obloukové svařování

Jedná se o způsob spojování kovových materiálů prostřednictvím elektrického oblouku. Elektrický oblouk vzniká na základě rozdílu elektrických potenciálů mezi dvěma body. V jednom bodě je nadbytek elektronů (záporný elektrický náboj) a ve druhém bodě je naopak elektronů nedostatek (kladný náboj). Díky tomuto rozdílu vzniká napětí. Za jistých podmínek je možné dosáhnout napět'ového průrazu. Při tomto jevu se fyzikální síly snaží vyrovnat nerovnováhu nábojů. Vznikne kanál, ve kterém se mezi póly ionizuje plyn díky působení žáru a vysokého napětí. Takovýto ionizovaný plyn se stává elektricky vodivým plazmatem. V závislosti na zdroji má pak průraz charakter jiskry či blesku. Když se vyrovnají rozdíly nábojů tak buďto zhasnou nebo nadále hoří jako oblouk. Elektrický oblouk je tedy nízkonapět'ový elektrický vysokotlaký výboj vznikající obvykle mezi elektrodou a základním materiálem v prostředí ionizovaného plynu. Předpoklady pro stabilní hoření elektrického oblouku jsou: napětí dostatečné pro ionizaci daného prostředí a proud udržující plazma v oblouku v ionizovaném stavu. [10] [11]

Díky vysokým teplotám elektrického oblouku je možné roztavit přídavný materiál, natavit svarové plochy základního materiálu a po jejich ztuhnutí tím zajistit pevný kvalitní svarový spoj.

Pro svařování je také důležitá polarita. Rozlišují se dva druhy: přímá a nepřímá. U přímé polarity je elektroda připojena na (-) pól a svařovaný materiál na (+) pól svařovacího zdroje. V případě nepřímé polarity je tomu naopak. Elektroda je připojena na (+) pól a svařovaný materiál na (-) pól svařovacího zdroje. Při svařování s přímou polaritou je možné dosáhnout dobrého průvaru u materiálů větších tlouštěk. Na druhou stranu vzniká poměrně rozsáhlá tepelně ovlivněná oblast z důvodu velkého množství vneseného tepla do materiálu. Tato polarita není vhodná pro svařování tenkých plechů.

Nepřímá polarita nabízí velkou míru depozice tavných elektrod. Také je vhodná pro svařování tenkých plechů. Nepřímá polarita podporuje čistící účinek elektrického oblouku, díky čemuž je možné narušit vysokotavitelné oxidické vrstvy (např. při svařování Al, Mg a jejich slitin). Při svařování s nepřímou polaritou může bohužel docházet k nedostatečnému natavení svarových hran a špatnému průvaru u materiálů větších tlouštěk. [12]

Dnes se v průmyslové praxi nejvíce používají metody svařování elektrickým obloukem v ochranných atmosférách jak z důvodu jejich dostupnosti, kvality

provedených svarů, tak i vysoké produktivity a možnosti jejich mechanizace, automatizace/robotizace.

### **3.1 Obloukové svařování v ochranných atmosférách**

Elektrický oblouk je během hoření obklopen atmosférou ochranného plynu, která chrání elektrodu a svarovou lázeň před účinky vnějšího ovzduší. Používá se buďto inertní nebo aktivní plyn. Obloukové svařování v ochranných atmosférách je možné rozdělit na tři základní metody. První je svařování metodou MIG, při níž se používá inertní ochranný plyn, který nereaguje se základním materiálem. Další je svařování metodou MAG, kde se používá aktivní ochranný plyn, který se aktivně podílí na chemických reakcích v tavné lázni. Především této metodě bude v práci věnována pozornost, protože je používána ve firmě Baest v současné době a v práci je zkoumán možný způsob její náhrady. Třetí metodou je svařování TIG (WIG), kde se používá inertní ochranný plyn. Oproti uvedeným metodám výše, se při svařování TIG pracuje s netavicí se wolframovou elektrodou. V předchozích dvou případech se svařuje tavící se drátovou elektrodou, kterou je přímo přídavný materiál.

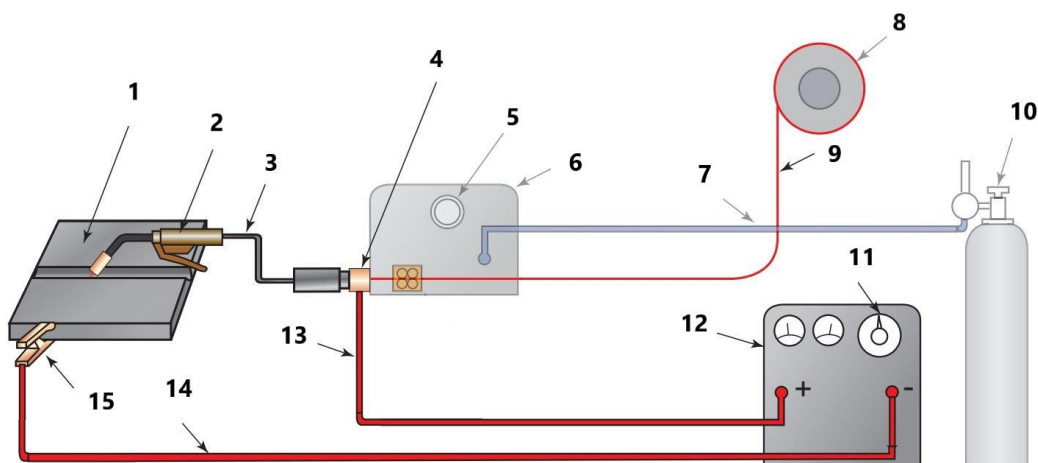
Takovému rozdělení přísluší anglické zkratky GMAW a GTAW. GMAW – Gas Metal Arc Welding znamená v překladu: „Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou“ a GTAW – Gas Tungsten Arc Welding je přeloženo jako: „Svařování netavicí se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu“.

## 4 Svařování metodou MAG

Poloautomatické svařování je dominující technologií pro výrobu svařenců v oblasti hydroenergetiky. Přestože se mnohdy jedná o velké výrobky, není úplně možné nasadit automaty nebo roboty. Jedná se v podstatě o kusovou výrobu. Často se svařuje i ve vynucených polohách. Metoda 135 (označení dle ČSN EN ISO 4063 – *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování* [13]), jejíž anglická zkratka je MAG – Metal Active Gas je druhem svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu. Za pomoci této metody je možné svařovat nelegované, nízkolegované i vysokolegované oceli za použití příslušných přídavných materiálů a ochranných plynů. Jinak metoda svařování MAG má sama o sobě perfektní možnost automatizace a robotizace.

### 4.1 Zařízení pro svařování metodou MAG

Hlavními komponenty zařízení pro svařování metodou MAG jsou: hořák, kladkový podavač svařovacího drátu, zdroj energie a příslušné hadice, vedení a kabely.

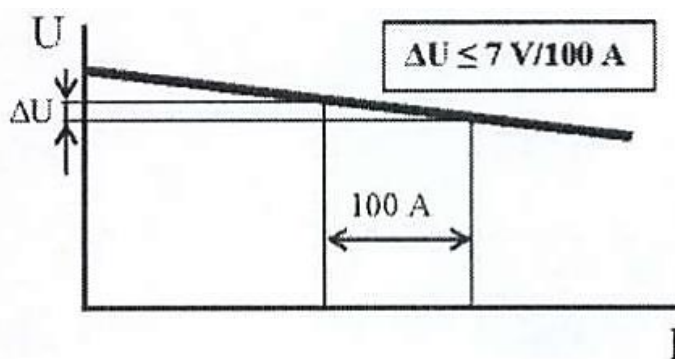


*Obr. 2 Schematické znázornění metody MAG a nutného zařízení a vybavení; 1 – svařenec, 2 – hořák, 3 – hadice hořáku, 4 – energetický terminál, 5 – ovládání rychlosti podávání drátu, 6 – kladkový podavač svařovacího drátu, 7 – hadice pro přívod plynu, 8 – cívka s drátem, 9 – drátová elektroda, 10 – zdroj svařovacího plynu, 11 – nastavení svařovacích parametrů, 12 – zdroj energie, 13 – hlavní vodič, 14 – zemnicí vodič, 15 – zemnicí svorka [14]*

#### 4.1.1 Svařovací zdroj

Hlavním členem, bez kterého se při svařování metodou MAG nelze obejít, je zdroj energie. Může jím být například usměrňovač, přeměňující střídavý trojfázový proud ze sítě na usměrněný proud v rozsahu 40–600 A s napětím 10–40 V. Dalším typem je velice progresivní invertorový svařovací zdroj, který pracuje na principu středofrekvenčního

měníče o frekvenci 20-100 kHz. U přenosných zařízení je použit generátor. U svařovacích zdrojů vhodných pro metodu MAG je typická plochá statická charakteristika. Jde o závislost mezi pracovním napětím zdroje a svařovacím proudem. Při zvýšení svařovacího proudu se napětí zdroje mění jen málo. Průběh této charakteristiky můžeme definovat tak, že pokles svorkového napětí při zvýšení odběru proudu o 100 A je menší než 7 V (viz obr. 3). Proto můžeme tuto charakteristiku označit za charakteristiku s konstantním napětím. [14], [15]



Obr. 3 Plochá statická charakteristika zdroje [15]

Moderní zdroje mají tzv. vnitřní regulaci. Jde o samoregulaci svařovacího zdroje. Pokud dojde ke změně délky oblouku, resp. napětí, mikroprocesor dokáže okamžitě reagovat na změnu navýšením nebo snížením svařovacího proudu. Podmínkou je konstantní rychlost podávání drátu. Vnitřní regulace zastává klíčovou roli při udržení stabilních podmínek svařování. [16]

#### 4.1.2 Kladeč podavač svařovacího drátu

Dalším důležitým členem pro svařování metodou MAG je kladeč podavač svařovacího drátu. Zajišťuje plynulou a spolehlivou dodávku elektrody do místa svaru. Motor podavače bývá většinou stejnosměrný. Existují různé druhy podavačů. Buďto je drátová elektroda tlačena, tažena, nebo tlačena a tažena. V prvním případě se jedná o velmi rozšířené řešení. Podavač funguje jako externí zařízení propojené se svařovacím zdrojem. V dnešní době jsou nabízena na trhu také kompaktní zařízení, která v rámci jednoho zařízení obsahují svařovací zdroj i podavač. Pro případ tažení drátu je podavač umístěn v těle hořáku. Bohužel je tím navýšena hmotnost rukojeti a zhoršena manipulace, proto se tento způsob podávání už běžně nepoužívá. V případě kombinace tlačení a tažení jde o tzv. push-pull systém, který vyžaduje dva podavače.

Obvykle je jeden umístěn u nebo ve zdroji a druhý se nachází v hořáku. Velmi důležitá je synchronizace motorů. Push-pull systém nabízí dobré vedení elektrody na větší vzdálenosti, jde však o nákladnější řešení. [14]

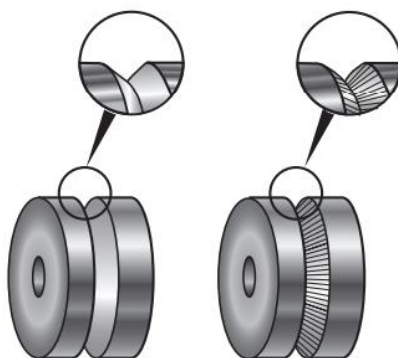


*Obr. 4 Podavač svařovacího drátu umístěn mimo svařovací zdroj včetně zásobníku ve formě cívky [17]*



*Obr. 5 Podavač umístěn v těle hořáku [18]*

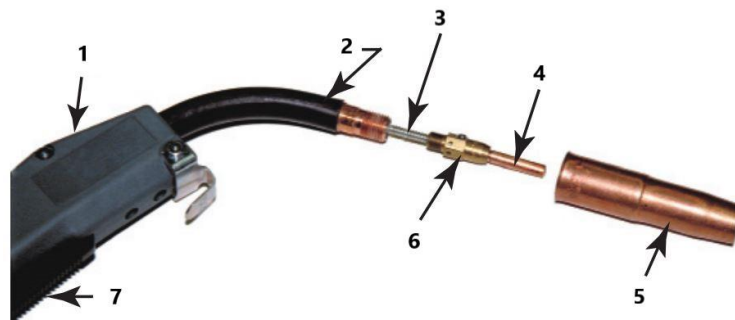
Důležitými součástmi podavače drátové elektrody jsou vodící kladky. Tvar a velikost drážky ve vodících kladkách se odvíjí od použitého svařovacího drátu. Běžně se používají kladky s V-drážkou, na které bývá ještě případně provedeno rýhování. Díky rýhám se kladky do drátu „zakousnou“ a nemůže dojít k prokluzu.



*Obr. 6 Vodící kladky podavače [14]*

### 4.1.3 Hořák

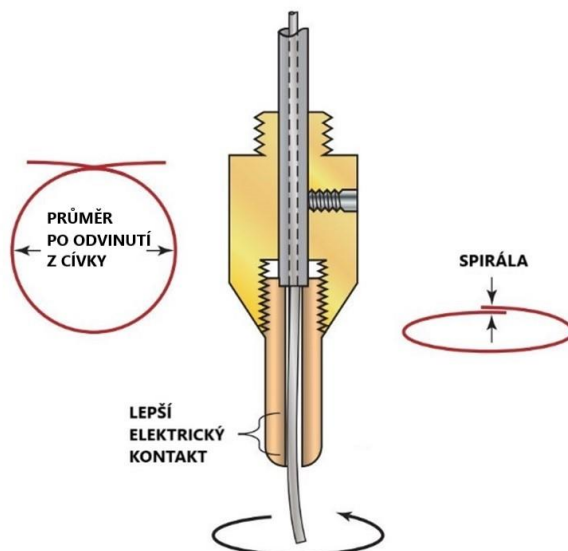
Článkem, který zakončuje sestavu pro svařování metodou MAG je hořák. V terminále je na hořák připojena hadice s ochranným plynem, vedení s drátovou elektrodou a vodič elektrického proudu ze zdroje. Skladba hořáku je uvedena na *obr. 7*.



*Obr. 7 Skladba svařovacího hořáku; 1 – tělo hořáku, 2 – izolovaná vodivá trubice, 3 – příváděcí trubice, 4 – kontaktní špička, 5 – plynová hubice, 6 – plynový difuzor, 7 – spoušť [14]*

Důležitou a spotřební součástí je tzv. kontaktní špička. Nachází se v ní průvlečný otvor pro drátovou elektrodu specifického průměru. Přes kontaktní špičku je ke svařovacímu drátu přiveden elektrický proud ze svařovacího zdroje. Svařovací drát má po odvinutí z cívky tendenci svíjet se do spirály. Při průchodu otvorem kontaktní špičky se drát otáčí kolem své osy. To je způsobeno silami, které se ho snaží svinout zpět do spirály. Drát se uvnitř otvoru vzpírá a tlačí na stěnu otvoru. Tím je zajištěn dobrý kontakt mezi drátem a špičkou a rovnoměrné opotřebení v průvlečném otvoru. Tento proces je uveden na *obr. 8*. Typický materiál pro výrobu kontaktních špiček je na bázi slitin mědi. Měď zajišťuje dobrou tepelnou a elektrickou vodivost a třecí vlastnosti. Kontaktní špička je přes metrický závit uložena v difuzoru. Difuzor má po obvodu šikmo vrtané díry pro rovnoměrné rozvedení plynu, který je dále usměrněn pomocí hubice do místa svařování. [14]





Obr. 8 Průchod drátu přes kontaktní špičku [14]

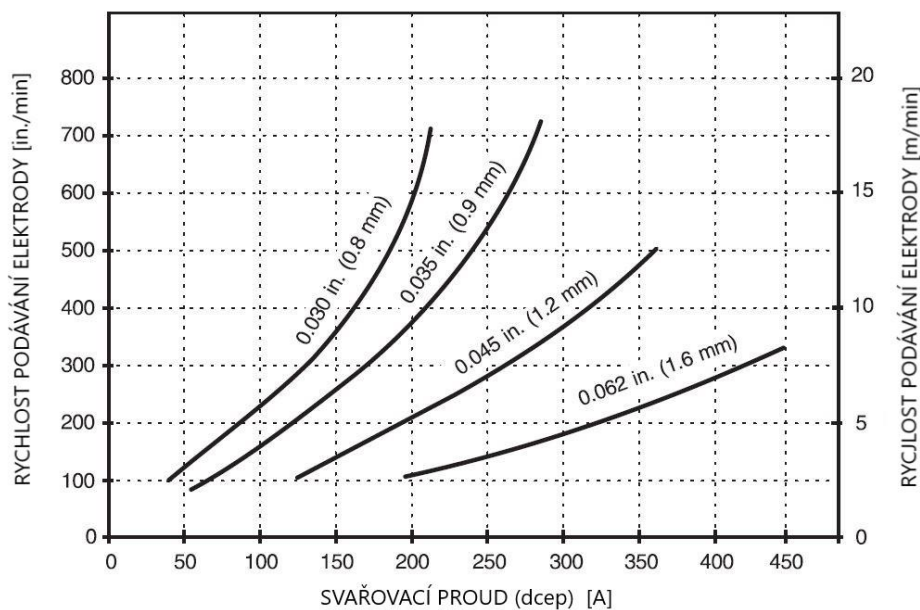
Svařování metodou MAG probíhá v poloautomatickém režimu. Tím je myšleno spuštění motorizovaného posuvu drátu při stisknutí spouště na hořáku, zatímco pohyb hořáku zajišťuje sám svářeč. Při uvolnění spouště se posuv zastaví. Takovýto režim se nazývá dvoutaktní. Další možností je tzv. čtyřtaktní režim. V tomto případě svářeč jedním stisknutím spustí svařovací proces a vede hořák směrem, kterým potřebuje. Pro ukončení procesu znovu stiskne spoušť na hořáku. Tento režim je výhodný pro dlouhé svary, kde se ještě nevyplatí použít jiné, resp. automatizované metody svařování. Navíc se tak uleví svářeči od křečovitého držení rukojeti hořáku.

## 4.2 Svařovací parametry a podmínky nastavení procesu svařování

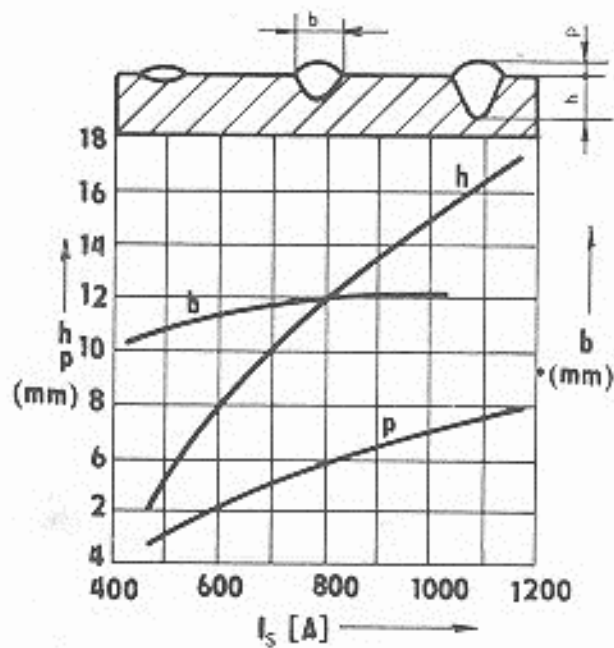
Základními svařovacími parametry při svařování elektrickým obloukem jsou: svařovací proud, napětí na oblouku a rychlost svařování. Podmínkami nastavení procesu svařování jsou: vzdálenost mezi kontaktní špičkou a svařovaným materiálem (Contact To Work Distance – dále jen CTWD), sklon hořáku a jeho vedení, průměr elektrody a průtok ochranného plynu atd.

### 4.2.1 Svařovací proud

Svařovací proud řídí množství přídavného materiálu vloženého do svaru. Je významně propojen s rychlostí podávání drátové elektrody. Když dojde ke zvýšení rychlosti podávání drátu, zvýší se i svařovací proud. Při snížení nastává obdobný efekt. Vliv na závislost proudu a rychlosti podávání má také průměr elektrody (viz obr. 9). [19]



Obr. 9 Závislost svařovacího proudu a rychlosti podávání drátu [20]

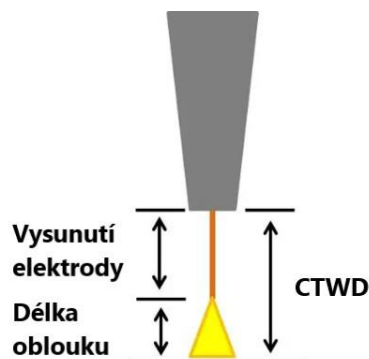


Obr. 10 Vliv svařovacího proudu na geometrii svarové housenky [21]

Na obr. 10 je vidět, jaký má svařovací proud vliv na průřez svarové housenky. Charakteristickými rozměry svaru jsou:  $h$  = hloubka závaru,  $b$  = šířka svarové housenky a  $p$  = převýšení svarové housenky. Svařovací proud nejvíce ovlivňuje hloubku závaru.

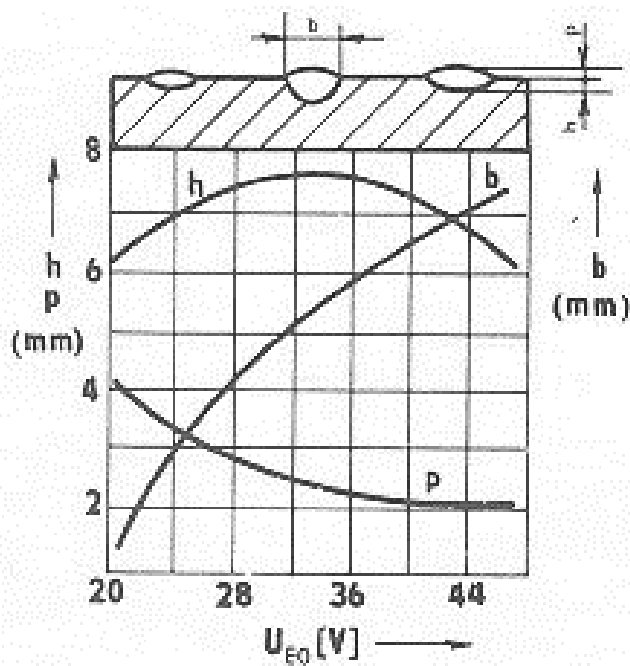
## 4.2.2 Napětí na oblouku

Při změně napětí na oblouku se proporčně mění i délka oblouku, která je popsána jako vzdálenost mezi svarovou lázní a koncem drátové elektrody viz *obr. 11*.



*Obr. 11 Rozbor vzdáleností [19]*

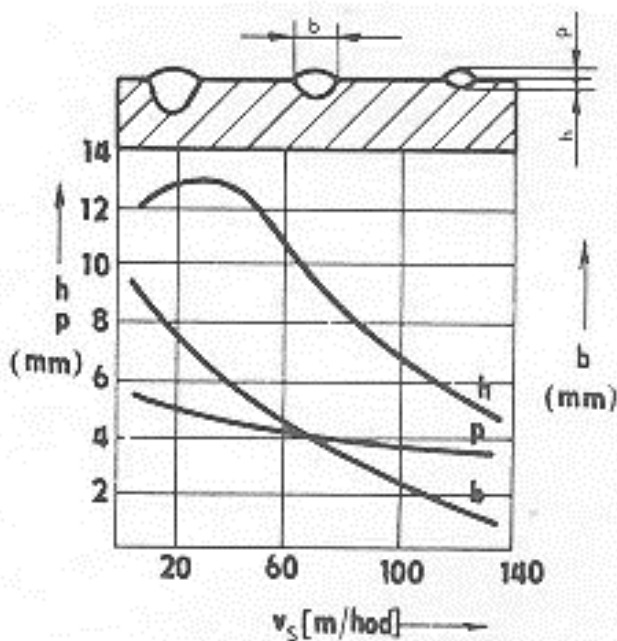
Jakmile zvýšíme napětí, prodlouží se oblouk a zkrátí se vysunutí drátové elektrody. Můžeme říct, že se zkrátí délka vodiče. Obecně je známo, že se změnou délky vodiče se přímo úměrně mění elektrický odpor. Elektrický odpor se v tomto případě bude tedy zmenšovat. Jestliže se zmenší elektrický odpor, tak se zvýší elektrický proud. Tento efekt zapříčiní změnu přenosu svarového kovu. Stejně jako svařovací proud, tak i napětí má vliv na geometrii svarové housenky. Dle *obr. 12* má napětí zásadní vliv na šířku svarové housenky. [19]



*Obr. 12 Vliv napětí elektrického oblouku na geometrii svarové housenky [21]*

### 4.2.3 Rychlost svařování

Rychlost svařování je popsána jako rychlost, kterou se elektrický oblouk, resp. tavná lázeň pohybuje po svařovaném materiálu. S narůstající tloušťkou základního materiálu je nutné svařovací rychlost snižovat, aby byl zajištěn dobrý průvar. Příliš vysoká rychlost by způsobila neprovaření základního materiálu a studené spoje. Druhým extrémním případem je příliš nízká rychlost. Při nízké rychlosti se v jednom místě svarové lázně hromadí velké množství nataveného přídavného materiálu, který nemá šanci pronikat dál do základního materiálu. To opět zapříčiní špatný průvar s hrozbou studených spojů. Bude také neúměrně růst převýšení svarové housenky. Pokud bude ovšem nastavena vysoká rychlost podávání drátu, resp. bude vyšší proud, je výhodné použít i vysokou rychlost svařování. Je tedy nutné rychlost svařování vždy přizpůsobit dané situaci při nastavení daných svařovacích parametrů. Vliv rychlosti svařování na tvar svarové housenky je uveden na *obr. 13*. [22]



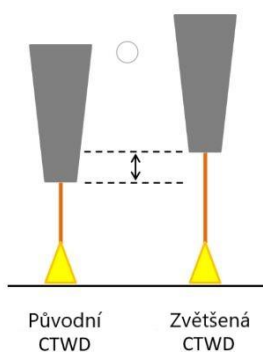
*Obr. 13 Vliv svařovací rychlosti na geometrii svarové housenky [21]*

#### 4.2.4 CTWD

Jedinou možností, jak nezávisle měnit svařovací proud, aniž by se musela měnit rychlost podávání elektrody, je změna CTWD. Klíčovou roli zde sehrává Ohmův zákon.

$$U = R \cdot I \text{ (V)} \quad (2)$$

Když budeme uvažovat konstantní napětí, tak se zvětšením CTWD se zmenší svařovací proud. Vysvětlení se skrývá v délce vodiče a měnícím se elektrickém odporu.

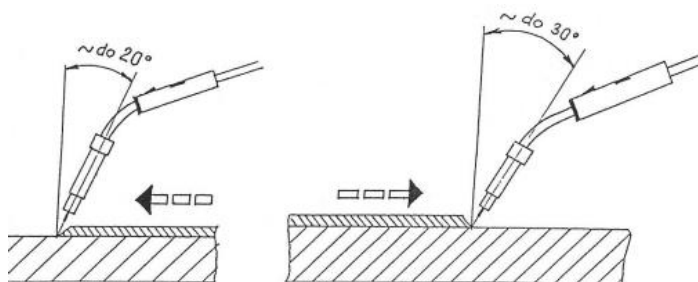


**Obr. 14 Změna CTWD [22]**

Dle *obr. 14* se prodloužilo vysunutí drátové elektrody, prodloužila se tedy délka vodiče a tím se zvětšil elektrický odpor. Kvůli vyššímu elektrickému odporu se snížil svařovací proud. [22]

#### 4.2.5 Sklon a vedení hořáku

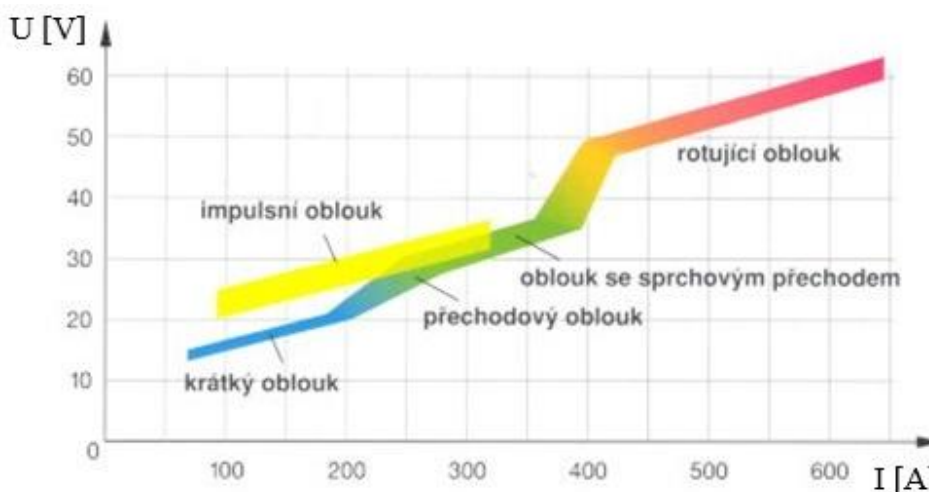
Existují dvě varianty, jak vést svařovací hořák. Buďto ho vést směrem vpřed, nebo vzad. Vedení hořáku směrem vzad umožňuje tvorbu hlubokého a úzkého průvaru. Eliminují se studené spoje a vznik pórů. Na druhou stranu je vyšší převýšení housenky a svářeč si hořákem zakrývá výhled do úkosu svaru. Dopředné vedení hořáku dává za vznik široké svarové housence s malým průvarem a převýšením. Vzniklý svar je však náchylný na vznik studených spojů a pórů. Velkou výhodou je výhled do úkosu svaru. [23]



**Obr. 15 Sklon a vedení hořáku: Vlevo vpřed a vpravo vzad [23]**

### 4.3 Přenos svarového kovu

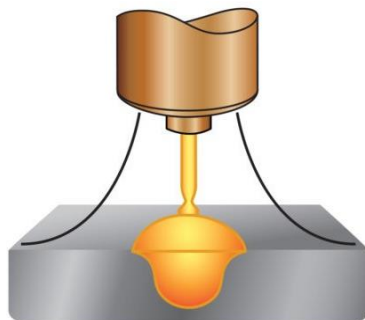
Jedná se o roztavování přídavného materiálu, resp. svařovacího drátu jako elektrody a jeho ukládání do svarové lázně během hoření elektrického oblouku. Vliv na charakter přenosu mají parametry svařování: svařovací proud, resp. proudová hustota, svařovací napětí, složení ochranné atmosféry a samotný přídavný materiál. Čtyřmi základními druhy přenosu svarového kovu jsou: zkratový, kapkový, sprchový a pulzní přenos.



Obr. 16 Pracovní oblasti pro různé typy přenosu kovu v elektrickém oblouku [24]

#### 4.3.1 Zkratový přenos

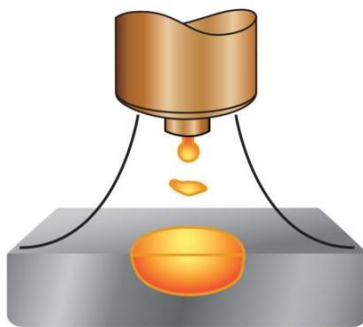
Při zkratovém přenosu dochází k opakujícím se „zkratům“, resp. dotykům mezi základním a přídavným materiálem s obvyklou frekvencí 90 až 200 Hz. Svařovací parametry jsou většinou nižší než u ostatních druhů přenosů. Svařovací proud se pohybuje v rozmezí 40-190 A a napětí v rozmezí 14-22 V. Se zvyšujícím se napětím klesá frekvence odtavených kapek, roste jejich velikost a zvětšuje se rozstřík. Díky nízkým hodnotám proudu je vneseno do svaru relativně malé množství tepla, čímž svarový kov tuhne rychleji. Toho lze využít při svařování ve vynucených polohách (PE, PF...). Na druhou stranu je problém provařit tlustší materiály a zároveň vždy dochází k rozstříku svarové lázně. [25], [26]



*Obr. 17 Zkratový přenos svarového kovu [25]*

### **4.3.2 Kapkový přenos**

Kapkový přenos svarového kovu vzniká při navýšení svařovacích parametrů. Hodnoty svařovacího proudu se pohybují v intervalu od 190 do 250 A a hodnoty svařovacího napětí mezi 22 a 28 V. Charakteristickým znakem jsou poměrně velké odtavené kapky na konci elektrody. Kapky dosahují většího průměru, než který má samotná drátová elektroda. Kapky mají nepravidelný tvar a dobu odtavení. S vyššími svařovacími parametry je možné zvýšit produktivitu svařování, avšak zvyšuje se i rozstřík, který je nutné po provedení svaru odstranit. Jako ochrannou atmosféru je možné použít čistý oxid uhličitý. Svařování je možné pouze ve vodorovných polohách. [25], [26]

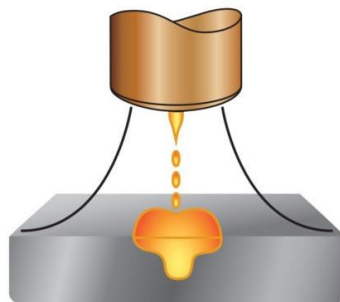


*Obr. 18 Kapkový přenos svarového kovu [25]*

### **4.3.3 Sprchový přenos**

Sprchový přenos se projevuje proudem malých odtavených kapek svarového kovu elektrody postupujících k základnímu materiálu. Vzniká při relativně vysokých hodnotách svařovacích parametrů. Hodnoty svařovacího proudu se pohybují v rozmezí od 200 do 500 A a hodnoty napětí od 28 do 40 V. U sprchového přenosu nedochází ke zkratům, tudíž oblouk neustále nezhasíná a nezapaluje se. Charakteristický je pro sprchový přenos „syčivý“ zvuk, jak se přenáší tekutý kov ve formě velkého množství

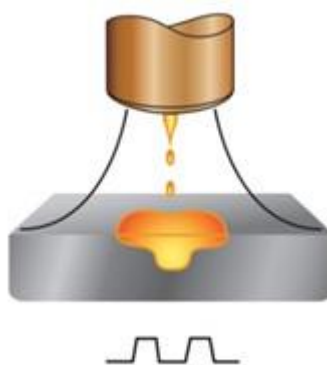
jemných kapek. Mezi výhody sprchového přenosu patří vyšší míra depozice, dobrý průvar, malý rozstřík, dobrý vzhled svarové housenky a možnost použití větších průměrů elektrod. V ideálním případě lze nastavit proces jako bezrozstříkový. To vše platí za předpokladu, že je při svařování použita ochranná atmosféra bohatá na argon. Proces nelze tedy realizovat v čistém oxidu uhličitém. Ten totiž zvyšuje povrchové napětí a tím brání oddělení kapky při malé velikosti. Svařování je možné pouze ve vodorovných polohách. [25], [26]



*Obr. 19 Sprchový přenos svarového kovu [25]*

#### **4.3.4 Pulzní přenos**

Pulzní přenos se vyznačuje cyklickým střídáním vysokých a nízkých hodnot svařovacího proudu. Frekvence je v rozmezí 30–400 Hz. Podstatou jsou dvě hodnoty proudu – základní a pulzní, mezi kterými se neustále mění průběh. Ideálně se při dosažení pulzní hodnoty (vysoké) svařovacího proudu odtaví jedna malá kapka tekutého svarového kovu, která při poklesu na základní hodnotu proudu (nízkou) dopadne do svarové lázně. Pulzním přenosem lze dobře ovládat množství odtaveného svarového kovu a vneseného tepla. Je možné také docílit vyšších svařovacích rychlostí a nízkého rozstříku [25]



*Obr. 20 Pulzní přenos svarového kovu [25]*



## 4.4 Přídavné materiály

Při svařování metodou MAG se používají drátové elektrody plného průměru o různém chemickém složení a vlastnostech. Výběr svařovacího přídavného materiálu (PM) vždy závisí na svařovaném základním materiálu. Volí se zpravidla drát s podobným chemickým složením, jako má základní materiál.

### 4.4.1 PM pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí

Pro nelegované a nízkolegované oceli se používají svařovací dráty označené dle zkráceného chemického složení: G2Si, G3Si1 a G4Si1. Chemické složení těchto běžně používaných PM je uvedeno v *tab. 5*.

*Tab. 5 Chemické složení drátových elektrod podle klasifikačního systému A v hm. % [27]*

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Al	Ti + Zr
<b>G2Si</b>	0,06- 0,14	0,50- 0,08	0,90- 1,30	max 0,025	max 0,025	max 0,15	max 0,15	max 0,02	max 0,15
<b>G3Si1</b>	0,06- 0,14	0,70- 1,00	1,30- 1,60	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15
<b>G4Si1</b>	0,06- 0,14	0,80- 1,20	1,60- 1,90	0,025	0,025	0,15	0,15	0,02	0,15

Drátová elektroda může být klasifikována dvěma způsoby. Buďto podle meze kluzu a nárazové práce 47 J, nebo podle pevnosti v tahu a nárazové práce 27 J. Pro tyto způsoby je rozlišeno značení elektrod. Například pro první způsob, který norma ČSN EN ISO 14341 – *Svařovací materiály – Drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy – Klasifikace* [27] zkracuje jednopísmenným označením „A“, je označení svařovacího drátu G3Si1 následující:

#### **ČSN EN ISO 14341-A-G 46 5 M21 3Si.**

- ISO 14341-A            představuje číslo normy a druh klasifikace;
- G                        označuje drátovou elektrodu či svarový kov navařený obloukovým svařováním v ochranném plynu;
- 46                        je desetinou hodnoty minimální meze kluzu, tedy 460 N.mm<sup>-2</sup>, k ní přísluší minimální tažnost 20 %;

- 5 vyjadřuje minimální nárazovou práci 47 J při teplotě -50 °C;
- M21 popisuje použitý ochranný plyn podle ČSN EN ISO 14175 – *Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*;
- 3Si1 zastupuje chemické složení drátové elektrody.

Aktivní ochranná atmosféra značně ovlivňuje výsledné vlastnosti svaru. Proto jsou mechanické vlastnosti přiřazeny ke konkrétní drátové elektrodě při použití dané ochranné atmosféry. Pro ukázkou jsou v *tab. 6* uvedeny příklady mechanických vlastností. [27]

**Tab. 6 Mechanické vlastnosti drátových elektrod [27]**

	<b>R<sub>emin</sub></b> [N.mm <sup>-2</sup> ]	<b>R<sub>m</sub></b> [N.mm <sup>-2</sup> ]	<b>A<sub>min</sub></b> [%]
<b>42</b>	420	500-640	20
<b>46</b>	460	530-680	20
<b>50</b>	500	560-720	18

Číslice v prvním sloupci vycházejí z dvojčíslí uvedeném v názvu. Jde o desetiny hodnot mezi kluzu.

#### **4.4.2 PM pro svařování korozivzdorných ocelí**

Klasifikace přídavných materiálů pro svařování korozivzdorných ocelí je uvedena v normě ČSN EN ISO 14343 – *Drátové elektrody, páskové elektrody, dráty a tyče pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí – Klasifikace* [28]. Klasifikační systémy jsou tentokrát rozděleny podle jmenovitého složení (A), nebo podle typu slitiny (B). Konkrétně pro svaření austenitické korozivzdorné oceli EN 1.4301 je vhodné použít drátovou elektrodu ISO 14343-A-G 19 9 L Si. Systém značení je podobný jako u normy ČSN EN ISO 14341. V tomto případě jde o klasifikační systém „A“. Rozbor značení elektrody je uveden níže.

##### **ČSN EN ISO 14343-A-G 19 9 L Si**

- ISO 14343-A představuje číslo normy a druh klasifikace;
- G označuje svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou;

19 9 L Si udává chemické složení, včetně uvedeného množství chromu a niklu.

Pro vytvoření heterogenního svaru, tedy svaru korozivzdorné a konstrukční oceli, je pak vhodná elektroda ČSN EN ISO 14343-A-G 23 12 L Si. Chemické složení a mechanické vlastnosti drátových elektrod jsou uvedeny v *tab. 7* a *tab. 8*. [28]

**Tab. 7 Chemické složení v hm. % [28]**

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>
<b>19 9 L Si</b>	0,03	0,65	1,0- 2,5	0,03	0,02	19,0- 21,0	9,0- 11,0	0,5	0,50
<b>23 12 L Si</b>	0,03	0,65- 1,00	1,0- 2,5	0,03	0,03	23,0- 25,0	12,0- 14,0	0,75	0,75

**Tab. 8 Mechanické vlastnosti [28]**

	<b>R<sub>p0,2</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>R<sub>mmin</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>A<sub>min</sub> [%]</b>
<b>19 9 L Si</b>	320	510	25
<b>23 12 L Si</b>	320	510	25

Dnes je možné na trhu nalézt řadu výrobců, kteří si vytvořili vlastní systém značení. Vždy ale uvádějí ekvivalent k normovanému systému dle AWS nebo EN. Mnohdy se systém značení výrobce dostane do povědomí lépe než systém dle norem. Jako příklad je možné uvést dnes již americkou firmu ESAB a její drátové elektrody OK Aristorod a Autrod. Jde o jednoho ze světově známých výrobců nejen přídatných materiálů, ale také svařovacího zařízení. Dále pak italská firma INE a její INEFIL nebo korejský výrobce KISWEL.

Drátové elektrody jsou dostupné v několika průměrech: 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 a 1,6 mm. Volba průměru drátu závisí na tloušťce základního materiálu.

Svařovací drát má svou povrchovou úpravu. Tradičně bývá potažen mědí, aby se především zabránilo korozi svarového kovu, nedocházelo k velkému opotřebením trysky hořáku a byla zajištěna dobrá elektrická vodivost. Tloušťka měděné vrstvy bývá okolo 0,2 - 0,8  $\mu\text{m}$ . Bohužel rozpuštěné částice mědi ve svaru zhoršují jeho mechanické vlastnosti. Především snižují hodnoty nárazové práce a tažnosti při nízkých teplotách. Nebezpečné jsou také výpary, které při svařování vznikají. Negativně působí na lidský dýchací systém. Proto firma ESAB přišla na trh se svařovací drátovou elektrodou, jejíž povrchová úprava není na bázi mědi. Využívají se mastné kyseliny v kombinaci s jemným kovovým práškem. Obchodní název takovýchto elektrod je Aristorod. Řada Aristorod obecně nabízí nižší rozstřík svarového kovu a stabilnější oblouk. Řadu poměděných drátů firma ESAB označuje jako Autrod. [29]

Svařovací dráty se prodávají navinuté na cívce o hmotnosti 5-18 kg v závislosti na typu balení a výrobci (viz *obr. 21*). Případně se prodávají ve velkokapacitních sudových zásobnících o hmotnosti 200-400 kg pro robotizovaná pracoviště.



*Obr. 21 Drátová elektroda [30]*

## 4.5 Ochranné plyny a směsi plynů

Plyny a jejich směsi používané v průběhu svařování vytvářejí ochrannou atmosféru v okolí svaru. Ochránují tak svar především před okolním vzdušným prostředím. Kromě ochrany svaru také ovlivňují kvalitu svaru, přenos svarového kovu v elektrickém oblouku a v poslední řadě rychlost svařování. Jak již bylo zmíněno, plyny se vyskytují ve dvou hlavních skupinách – inertní a aktivní plyny. Inertní plyny jsou stabilní plyny a jsou chemicky netečné. Fungují právě jako ochrana v průběhu svařování, kdy vytlačují přirozenou atmosféru pryč od svarové lázně a nijak zvlášť neovlivňují výsledný svar z hlediska mechanických vlastností. Nejčastěji používanými inertními plyny jsou argon (Ar) a helium (He). Ve druhé skupině se nachází velmi

reaktivní plyny. Účastní se chemických reakcí a metalurgicky ovlivňují kvalitu svaru. Mezi ně se řadí oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ), kyslík ( $\text{O}_2$ ), vodík ( $\text{H}_2$ ) a dusík ( $\text{N}_2$ ). Poslední tři zmíněné se pro účely ochrany používají pouze jako dílčí složky směsných plynů. [31], [32]

#### 4.5.1 Argon

Argon patří mezi vzácné jednoatomové plyny a díky své chemické stabilitě (inertní plyn) je možné s jeho pomocí svařovat reaktivnější materiály. U ochranných plynů jsou důležité ionizační vlastnosti. Argon má nízký ionizační potenciál 15,8 eV. Tím nabízí při svařování vysoké proudové zatížení. Dobře zapaluje elektrický oblouk, který má pak i vysokou intenzitu záření. Argon má též nízkou tepelnou vodivost. Vzniklé teplo při svařování je tak možné usměrnit přímo do místa svaru a zajistit tak lepší průnik do větší hloubky materiálu, aniž by došlo k jeho zbytečnému přehřátí. Vytváří se tak charakteristický tvar průřezu závaru, kdy závar je širší na povrchu a směrem do hloubky se zužuje. Na druhou stranu méně tepla nepřispívá fúzi mezi přídavným a základním materiálem. Může tak docházet ke studeným spojům. Argon je těžší než vzduch. Díky nízké citlivosti na proudění okolního vzduchu přispívá k dobré ochraně svarové lázně (hlavně v poloze vodorovné shora). Argon podporuje sprchový přenos svarového kovu. Jedná se o nejpoužívanější ochranný plyn, i proto že se používá často jako nosná složka do směsných plynů (právě díky ionizačním vlastnostem). Čistý argon tvoří skupinu I1 dle ČSN EN ISO 14175 – *Svařovací materiály – Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy* [33]. [32], [34]

#### 4.5.2 Helium

Dalším inertním plynem je helium. Oproti argonu má helium vysokou tepelnou vodivost, což nabízí vyšší teplotu svarové lázně, širší závar, vyšší rychlost svařování a lepší odplynění lázně. Širší tepelný profil napomáhá fúzi mezi přídavným a základním materiálem. Helium má však horší ionizační vlastnosti. Má vyšší ionizační potenciál 24,6 eV. Kvůli vyššímu ionizačnímu potenciálu se hůře zapaluje oblouk. Je také nutné vyšší napětí na elektrickém oblouku a při větší délce se elektrický oblouk stává nestabilním. Helium je lehčí než vzduch. To snižuje efektivitu plynové ochrany. Pro kompenzaci nižší měrné hmotnosti je nutné nastavit větší průtok plynu. V praxi se helium používá spíše ve směsích s argonem než jako samostatný plyn. Helium podporuje kapkový přenos svarového kovu. Čisté helium tvoří skupinu I2 dle ČSN EN ISO 14175. [32], [34]

### 4.5.3 Oxid uhličitý

Pokud bychom chtěli zvolit nejlevnější variantu pro svařování běžných ocelí v ochranné atmosféře, zvolili bychom čistý oxid uhličitý (skupinu C1 podle ČSN EN ISO 14175). Jeho vysoká tepelná vodivost zajišťuje vysoký přenos tepla do svarové lázně. Má také vyšší měrnou hmotnost než vzduch, a díky tomu nabízí kvalitní ochranu při svařování v polohách PA, PB a PC. Častěji se však používá v kombinaci s argonem do 25 % CO<sub>2</sub>. Oxid uhličitý sám o sobě nabízí hluboký průvar. Toho je možné využít při svařování materiálů o velkých tloušťkách. Díky teplu, které vzniká při oxidačních reakcích, zabezpečuje dokonalé natavení hran s oválným profilem housenky a dobré odplynění lázně.

Je to tzv. aktivní ochranný plyn. Oxid uhličitý hůře ionizuje i přes nízký ionizační potenciál 14,4 eV. Je tedy nutné vyšší napětí. Při použití čistého oxidu uhličitého je nutné dbát na přesné nastavení svařovacích parametrů, počítat s případnou horší udržitelností stabilního oblouku a větším rozstříkem, než jako by tomu bylo v případě směsi s argonem. [34], [35]

### 4.5.4 Kyslík, vodík a dusík

Kyslík, vodík a dusík se vyplatí používat pouze ve směsích s jinými plyny především s argonem. Kyslík sám o sobě podporuje oxidaci a tím tak degradaci svaru. Nicméně přispívá k dosažení vysoké energie a tepla ve svaru, resp. k tekutosti a formování svarové lázně. Díky kyslíku je možné vytvořit přiměřeně široký, nikoliv však hluboký svar. Nejvíce tepla se drží při povrchu svaru. Stejně jako kyslík tak i vodík podporuje vznik širšího svaru, ale také i větší penetraci. Vodík má především největší tepelnou vodivost ze všech používaných plynů. Typické použití je ve směsi při svařování austenitických korozivzdorných ocelí. Dusík je hlavně nosným plynem formovacích směsí, které se používají proti oxidaci kořene svaru a vysokovyhřáté oblasti okolního základního materiálu (ZM). Rizikem je však vznik nitridů. Tyto plyny jsou součástí skupin M, R a N dle ČSN EN ISO 14175. [32], [34]

Koncentrace těchto plynů v používaných směsích se pohybují pod 10 hm. %.

### 4.5.5 Klasifikace ochranných plynů

Požadavky na klasifikaci svařovacích plynů a jejich chemické složení stanovuje norma ČSN EN ISO 14175. Používané plyny a směsi plynů s uvedeným množstvím při svařování metodou MAG jsou uvedeny v *tab. 9*

*Tab. 9 Směsi plynů [33]*

Symbol		Složky v obj. %				
Hlavní skupina	Podskupina	Oxidační		Inertní		Redukční
		CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	He	H <sub>2</sub>
I	1			100		
	2				100	
	3			zbytek <sup>a</sup>	0,5 ≤ He ≤ 95	
M1	1	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5				0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 5
	2	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5		zbytek <sup>a</sup>		
	3		0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek <sup>a</sup>		
	4	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	0,5 ≤ O <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek <sup>a</sup>		
M2	0	5 < CO <sub>2</sub> ≤ 15		zbytek <sup>a</sup>		
	1	15 < CO <sub>2</sub> ≤ 25		zbytek <sup>a</sup>		
	2		3 < O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek <sup>a</sup>		
	3	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	3 < O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek <sup>a</sup>		
	4	5 < CO <sub>2</sub> ≤ 15	0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek <sup>a</sup>		
	5	5 < CO <sub>2</sub> ≤ 15	3 < O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek <sup>a</sup>		
	6	15 ≤ CO <sub>2</sub> < 25	0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 3	zbytek <sup>a</sup>		
	7	15 ≤ CO <sub>2</sub> < 25	3 < O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek <sup>a</sup>		
M3	1	25 < CO <sub>2</sub> ≤ 50		zbytek <sup>a</sup>		
	2		10 < O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek <sup>a</sup>		
	3	25 < CO <sub>2</sub> ≤ 50	2 < O <sub>2</sub> ≤ 10	zbytek <sup>a</sup>		
	4	5 < CO <sub>2</sub> ≤ 25	10 < O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek <sup>a</sup>		
	5	0,5 ≤ CO <sub>2</sub> ≤ 5	10 < O <sub>2</sub> ≤ 15	zbytek <sup>a</sup>		
C	1	100				
	2	zbytek	0,5 ≤ H <sub>2</sub> ≤ 30			

<sup>a</sup> Pro účely této klasifikace může být argon nahrazen částečně nebo úplně heliem.

První skupina „I“ je tvořena pouze inertními plyny a jejich směsmi. Použití těchto plynů je směrodatné v případě metod MIG a TIG. Popis jednotlivých plynů byl již uveden. Pro metodu MAG jsou použitelné skupiny plynů M1, M2, M3 a C včetně jejich podskupin. Jsou to aktivní atmosféry. Například běžně používanou a „univerzální“ směsí plynů pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí je směs spadající do skupiny a podskupiny M21. Jedná se sice oproti čistému oxidu uhličitému o dražší svařovací plyn, ale na oplátku nabízí klidnější a měkčí hoření oblouku, nižší rozstřík a vyšší kvalitu,

jak povrchu, tak i z hlediska čistoty svarové housenky. Snadněji lze také nastavit optimální svařovací parametry. [36]

Směs M21 umožňuje zkratový i sprchový přenos svarového kovu, který díky lepší metalurgické čistotě podává dobré výsledky vrubové houževnatosti. Pro svařování korozivzdorných, žáruvzdorných a žárupevných ocelí je dobré zvolit plyn ze skupiny a podskupin M12 a M13, tzn. s malými podíly aktivní složky ve směsi. Standardně používanými plyny při svařování metodou MAG ve firmě Baest jsou plyny M21 a M13.

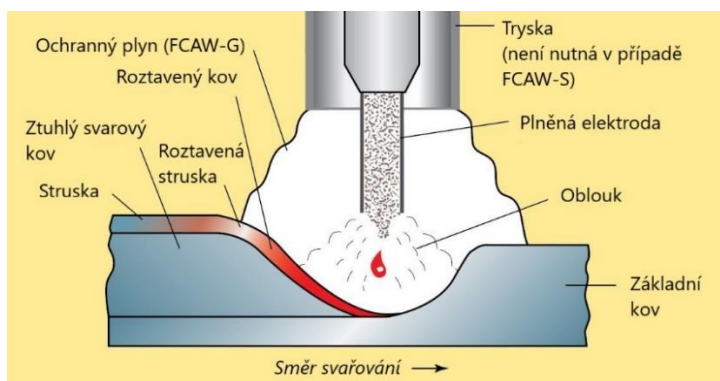


## 5 Svařování pomocí plněných elektrod (FCAW a MCAW)

V 50. letech minulého století přišly na trh plněné drátové elektrody se snahou zlepšit svařovací podmínky. Plněné, případně trubičkové drátové elektrody je možné rozdělit do dvou hlavních skupin podle typu náplně. První skupinou jsou trubičkové elektrody obsahující příměs tavidla. Tato metoda je nazývána pomocí anglické zkratky FCAW – Flux Cored Arc Welding a nese číselné označení 136 dle ČSN EN ISO 4063. Číselné označení poukazuje na použití ochranné aktivní atmosféry. Existují i takové elektrody, které nevyžadují použití ochranného plynu dodaného z externího zásobníku. Plyn se v tomto případě vyvíjí tavením tavidla obsaženém v elektrodě. Druhá skupina je tvořena elektrodami jejichž náplň je kovový prášek. Opět pro tuto skupinu existuje anglická zkratka MCAW – Metal Cored Arc Welding. Číselné označení této metody je 138 dle ČSN EN ISO 4063.

### 5.1 Metoda FCAW

Jak již bylo zmíněno, jedná se o plněné drátové elektrody s příměsí tavidla. Principiálně jde o podobnou technologii svařování jako je MAG (GMAW). I veškerá zařízení a vybavení jsou stejná, rozdíl je v použitém přídavném materiálu, případně v příslušenství podavače atd.



Obr. 22 Svařování metodou FCAW [37]

Při svařování prochází plněná drátová elektroda přes podávací zařízení kabelem k hořáku a následně do místa svaru. Zde je roztavená náplň přivedena přes oblouk daným přenosem do svarové lázně. Oproti metodě GMAW vzniká u FCAW struska. Struska je vedlejším produktem rozpouštění tavidlové náplně elektrody s nekovovými vměstkami při svařování. Stejně jako je tomu i v případě svařování obalovanou elektrodou. Vznikající struska slouží jako mechanická bariéra před působením okolní atmosféry. Zajišťuje ochranu svarového kovu před oxidací a kontaminací nečistotami od okolního

vzdušného prostředí. Struska má nižší hustotu než roztavený svarový kov. V ideálním případě zůstává vyplavena na povrchu svaru. Když je ještě svarový kov v tekutém stavu, pomáhá již vyplavená struska udržet ho na svém místě. Taková vlastnost je hojně využívána při svařování ve vynucených polohách, jako jsou: PE, PF nebo PH. Struska je tvořena oxidem hlinitým, oxidy křemíku a vápníku, dusíkem, vodíkem a uhlíkem. [37], [38]

Plněné elektrody jsou dvojího druhu. Existují buďto rutilové, nebo bazické (zásadité). Případně jejich kombinace. Další dělení je možné ještě dle použití, resp. nepoužití přídavného ochranného plynu.

### **5.1.1 Rutilové plněné elektrody**

Základní složkou rutilové náplně plněných elektrod je oxid titaničitý, který je získáván z minerálu rutil. Dále jsou obsaženy křemík, hliník a zirkon. Plněné rutilové elektrody nabízí dobré podmínky pro svařování, které výrazně ulehčují svářeči práci. Zaručují malý rozstřík a klidné hoření oblouku. Snadno se používají v porovnání s bazickými. Díky vysoké teplotě tání, resp. tuhnutí strusky je s nimi možné svařovat ve vynucených polohách. Na druhou stranu nedosahují takových mechanických vlastností jako bazické plněné elektrody. Typický je sprchový přenos svarového kovu. Proto bývá problém s vytvořením kořene a je třeba používat keramické podložky a specifickou přípravu svarových ploch. [37], [38]

### **5.1.2 Bazické plněné elektrody**

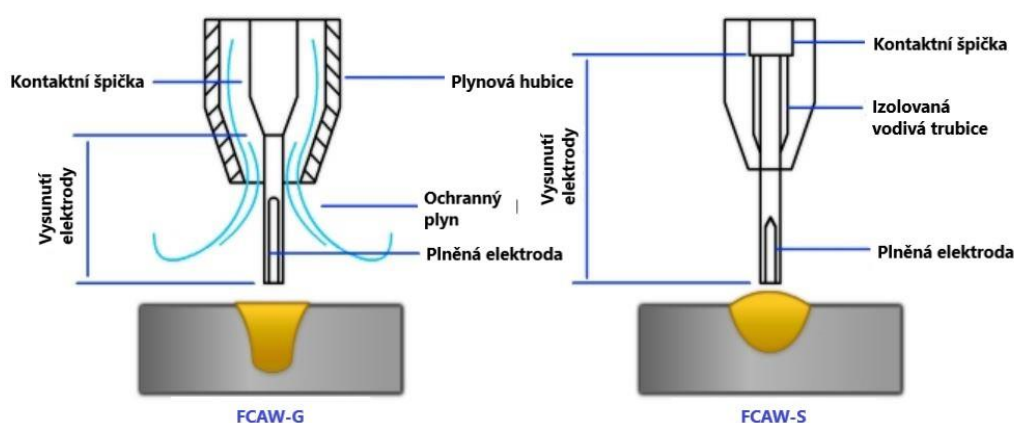
Náplně bazických plněných elektrod jsou založeny na fluoridu vápenatém s příměsí hořčíku. Významné jsou pro bazické plněné elektrody dezoxidační účinky a vynikající houževnatost svarového kovu. Bohužel kvůli nízké teplotě tání, resp. tuhnutí strusky není možné svařovat ve vynucených polohách. Výsledná struska má také větší přilnavost ke ztuhlému svarovému kovu a je tedy hůře odstranitelná v porovnání s rutilovými elektrodami. Typický je kapkový přenos svarového kovu. [37], [38]

V dnešní době se na trhu vyskytují také elektrody, které jsou kombinací předchozích dvou druhů. Spojují skvělé vlastnosti jak rutilových, tak i bazických elektrod.

### **5.1.3 FCAW-G a FCAW-S**

Jak již bylo předesláno, je možné dále rozdělit plněné elektrody podle toho, jestli vyžadují, nebo nevyžadují účast ochranného plynu. Metoda, při níž jsou používány plněné elektrody vyžadující účast ochranného plynu, je označena FCAW-G

(„Gas-shielded“). Označení FCAW-S („Self-shielded“) je pro metodu bez ochranného plynu (metoda 114 podle ČSN EN ISO 4063). FCAW-S přináší výhodu v tom, že není potřeba externí zdroj ochranného plynu a je možné svařovat v exteriéru, kde hrozí odfouknutí ochranného plynu větrem, tzn. při ztížených klimatických podmínkách. Svary této metody vykazují dobré hodnoty nárazové práce při nízkých teplotách. Bohužel oproti FCAW-G produkují velké množství škodlivého kouře a velký rozstřík. Dá se říci, že FCAW-S je produktivní náhradou svařování obalovanou elektrodou. Firma Lincoln Electric má pro tento druh elektrod označení „Innerschild“. Na druhé straně stojí FCAW-G, jež se hodí pro svařování materiálů větších tloušťek. Výhodou je její velká míra depozice, což se projevuje na produktivitě svařování. [39]



Obr. 23 FCAW-G vs FCAW-S [40]

#### 5.1.4 Klasifikace dle ČSN EN ISO 17632

Plněné drátové elektrody pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí jsou klasifikovány dle normy ČSN EN ISO 17632 – *Svařovací materiály – Plněné elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí s ochranou plynu a bez ochrany plynu – Klasifikace*. [41]

Klasifikace probíhá ve dvou systémech stejně, jako je tomu u klasifikace svařovacích drátů plného průřezu. První klasifikační systém je založen na mezi kluzu a nárazové práci 47 J (A). Druhý klasifikační systém je založen na pevnosti v tahu a nárazové práci 27 J (B). Jako příklad zde bude uveden klasifikační systém B.

Klasifikace se skládá z celkem devíti částí:

1. První část (T) představuje metodu svařování plněnou elektrodou.
2. Druhá část obsahuje označení, jenž určuje pevnost a tažnost čistého svarového kovu při vícevrstevném svařování nebo pevnost základního materiálu či svarového spoje při jednovrstevném svařování.
3. Třetí část obsahuje rázové vlastnosti čistého svarového kovu.
4. Ve čtvrté části je uvedeno označení určující charakteristiku a použití elektrody.
5. Pátá část udává svařovací polohu.
6. V šesté části je uveden ochranný plyn.
7. Sedmá část vysvětluje, jestli byly klasifikační zkoušky provedeny ve stavu po svařování nebo ve stavu po tepelném zpracování po svařování (A, resp. P). Při klasifikaci v obou případech je nutné označení AP.
8. Osmá část představuje chemické složení čistého svarového kovu.
9. Devátá část udává obsah vodíku v navařeném kovu. Klasifikace plněných elektrod s ochranným plynem se provádí na elektrodách o průměru 1,2 mm. Pro plněné elektrody s vlastní ochranou je pak důležitý průměr 2,4 mm. [41]

Postup označování a požadavky navazují na výše uvedené části klasifikace. V následující tabulce jsou uvedeny typické mechanické vlastnosti.

**Tab. 10 Mechanické vlastnosti plněných drátových elektrod [41]**

	<b>R<sub>emin</sub></b> [N.mm <sup>-2</sup> ]	<b>R<sub>m</sub></b> [N.mm <sup>-2</sup> ]	<b>A<sub>min</sub></b> [%]
<b>43</b>	330	430-600	20
<b>49</b>	390	490-670	18
<b>55</b>	460	550-740	17
<b>57</b>	490	570-770	17

Číslice v prvním sloupci vycházejí z dvojčíslí uvedeném v označení elektrody. Jde o desetiny minimálních hodnot pevnosti v tahu.

Dále je uvedeno několik příkladů chemických složení dle označení (viz *tab. 11*)

**Tab. 11 Chemické složení plněných elektrod v hm. % [41]**

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Al
<b>Neoznačené</b>	0,18	0,90	2,00	0,030	0,030	0,50	0,30	0,20	2,0
<b>K</b>	0,20	1,00	1,60	0,030	0,030	0,50	0,30	0,20	-
<b>2M3</b>	0,12	0,80	1,50	0,030	0,030	-	0,40- 0,65	-	1,8
<b>N1</b>	0,12	0,80	1,75	0,030	0,030	0,30- 1,00	0,35	-	1,8
<b>CC</b>	0,12	0,20- 0,80	0,60- 1,40	0,030	0,030	-	-	0,30- 0,60	1,8
<b>N1M2</b>	0,15	0,80	2,00	0,030	0,030	0,40- 1,00	0,20- 0,65	0,20	1,8

První sloupec obsahuje značky zastupující dané chemické složení čistého svarového kovu. Hliník je přítomen pouze u elektrod s vlastní ochranou. V dalších tabulkách jsou uvedeny polohy svařování a obsah vodíku dle označení.

**Tab. 12 Označení polohy svařování [41]**

Označení	Poloha svařování <sup>a</sup>
<b>0</b>	PA a PB
<b>1</b>	PA, PB, PC, PD, PE, PF nebo PG
<sup>a</sup> PA = Poloha vodorovná shora PB = Poloha vodorovná šikmo shora PC = Poloha vodorovná PD = Poloha vodorovná šikmo nad hlavou PE = Poloha vodorovná nad hlavou PF = Poloha svislá nahoru PG = Poloha svislá dolů V souladu s ČSN EN ISO 6947 – Svařování a příbuzné procesy – Polohy svařování [42]	

**Tab. 13 Označení obsahu vodíku v čistém svarovém kovu [41]**

<b>Označení</b>	<b>Obsah vodíku</b> ml/100 g čistého svarového kovu max.
<b>H5</b>	5
<b>H10</b>	10
<b>H15</b>	15

Znalost obsahu vodíku ve svaru je důležitá. Svary kvůli vodíku trpí vodíkovou křehkostí. Vodík totiž tím, že se opět spojuje v molekuly zvětšuje svůj objem. Tím způsobuje vnitřní napětí ve svaru, které výrazně zhoršuje mechanické vlastnosti.

Jak již bylo zmíněno, čtvrtá část klasifikace se věnuje označení plněných elektrod podle použití. Elektrody jsou označeny pomocí „T“ s příslušnou číslicí. Každá značka charakterizuje: druh přenosu a náplně, potom v jakých svařovacích polohách je konkrétní druh elektrody použitelný, nutnost ochranného plynu, polaritu, druh svaru (jednovrstvý, vícevrstvý) a v neposlední řadě vzniklé vlastnosti svaru. Norma ČSN EN 17632 klasifikuje celkem 14 druhů. Pro ukázkou je uvedeno prvních 6 druhů. [41]

První skupinou jsou elektrody nesoucí označení „T1“. Obsahují rutilovou náplň a vyžadují účast ochranného plynu. Jsou určeny pro jednovrstvé nebo vícevrstvé svařování využívající nepřímou polaritu stejnosměrného proudu. Jsou vhodné jak pro svařování ve vodorovných, tak i ve vynucených polohách. Pro svařování ve vodorovných polohách je vhodné používat průměry 2 mm a více. Menší průměry (1,6 mm a méně) jsou pak dobré pro svařování v ostatních polohách. Charakteristický je sprchový přenos s nízkým rozstříkem a plochá až mírně vypouklá svarová housenka. Tyto elektrody mají vysokou výtěžnost. [41]

Druhá skupina má označení „T2“. Jedná se o modifikaci první skupiny „T1“. Tyto elektrody jsou obohaceny o mangan a křemík. Primárně jsou určeny pro jednovrstvé svařování tupých a koutových svarů ve vodorovných polohách. [41]

Elektrody ze skupiny „T3“ mají vlastní ochrannou atmosféru (FCAW-S). Polarita při svařování je nepřímá. Typický je sprchový přenos. Poskytují velice produktivní jednovrstvé svařování plechů v poloze PA a PG (sklon max. do 20°). Při svařování těmito elektrodami je zvýšena citlivost na rychlé ochlazování základního materiálu. Proto není vhodné je používat pro T a přeplátované spoje plechů tlouštěk větších než 5 mm. [41]

Skupina „T4“ je tvořena elektrodami s bazickou náplní a poskytuje kapkový přenos při nepřímé polaritě. Nabízí velkou míru depozice a nízký obsah síry ve svaru, což vede k dobré odolnosti proti trhlinám za tepla. Elektrody poskytují menší průvar. Toho se využívá při proměnlivé velikosti svarové mezery. Možné je jak jedno, tak i vícevrstvé svařování. Omezení je v polohách PA a PB. [41]

Elektrody s označením „T5“ vyžadující účast ochranného plynu a používají se pro svařování ve všech polohách. Je možné svařovat jak s přímou, tak i nepřímou polaritou. Charakteristické jsou: kapkový přenos, mírně vypouklá svarová housenka a tenká vrstva strusky, která nemusí pokrývat celý svar. Svarový kov vykazuje vyšší vrubovou houževnatost a odolnost proti vzniku trhlinám za tepla i za studena. [41]

Elektrody ze skupiny „T6“ produkují vlastní ochranný plyn a jsou připojeny na kladný pól zdroje. Pro svařování je typický sprchový přenos. Svarový kov poskytuje dobrou vrubovou houževnatost za nízkých teplot a dobrý průvar. Vzniklá struska u těchto elektrod se dá odstranit bez jakýchkoliv problémů. [41]

Pro ukázkou je uvedeno označení pro plněnou rutilovou elektrodu dle klasifikačního systému B:

**ČSN EN ISO 17632-B – T49 2 T1-1 M21 A-UH10.**

ISO 17632-B	představuje číslo normy a druh klasifikace
T	označuje plněnou elektrodu pro obloukové svařování;
49	vyjadřuje desetinu hodnoty minimální meze pevnosti, tedy $490 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-2}$ a minimální tažnost 18 % dle <i>tab. 10</i> ;
2	značí minimální nárazovou práci 27 J při $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
T1	vyjadřuje skupinu použití;
1	značí polohu svařování, v tomto případě jde o svařování ve všech polohách;
M21	popisuje použitý ochranný plyn podle ČSN EN ISO 14175
A	udává, že klasifikační zkouška této elektrody byla provedena ve stavu po svaření.

U	udává, že svarový kov bude také odpovídat průměrné nárazové práci 47 J při klasifikační zkušební teplotě
H10	určuje maximální množství vodíku ve svarovém kovu, v tomto případě je to 10 ml/100 g.

### 5.1.5 Klasifikace dle ČSN EN ISO 17633

Plněné drátové elektrody pro svařování korozivzdorných ocelí jsou klasifikovány dle normy ČSN EN ISO 17633 – *Svařovací materiály – Plněné elektrody a tyče pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí s přívodem a bez přívodu ochranného plynu – Klasifikace*. [43] Klasifikace probíhá ve dvou systémech stejně, jako je tomu u klasifikace plných drátů. První klasifikační systém je založen na jmenovitém chemickém složení (A). Druhý klasifikační systém je založen na typu slitiny (B). Jako příklady budou uvedeny plněné elektrody pro svaření korozivzdorné oceli EN 1.4301 a pro vytvoření heterogenního svaru korozivzdorné a konstrukční oceli dle klasifikačního stupně B. Pro svařování oceli EN 1.4301 je vhodná plněná drátová elektroda:

#### ČSN EN ISO 17633-B – TS 308L-F C1/M21 1

ISO 17633-B	představuje číslo normy a druh klasifikace
TS	označuje plněnou elektrodu z korozivzdorné oceli pro obloukové svařování;
308L	udává chemické složení;
F	značí typ náplně (rutilová);
M21	popisuje použitý ochranný plyn podle ČSN EN ISO 14175;
1	udává v jakých svařovacích polohách je elektroda použitelná (všechny polohy).



Pro vytvoření heterogenního svarového spoje je vhodná elektroda ČSN EN ISO 17633-B – TS 309L-F C1/M21 0. Opět jde o plněnou elektrodu s rutilovou náplní vyžadující účast ochranné atmosféry. Vhodná je pro svařování v polohách PA a PB. Chemické složení a mechanické vlastnosti obou elektrod jsou uvedeny v *tab. 14* a *tab. 15*. [43]

**Tab. 14 Chemické složení 308L a 309L v hm. % [43]**

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>
<b>308L</b>	0,04	1,00	0,5- 2,5	0,04	0,03	9,0- 12,0	0,75	18,0- 21,0	0,75
<b>309L</b>	0,04	1,00	0,5- 2,5	0,04	0,03	12,0- 14,0	0,75	22,0- 25,0	0,75

**Tab. 15 Mechanické vlastnosti 308L a 309L [43]**

	<b>R<sub>p0,2</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>R<sub>mmin</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>A<sub>min</sub> [%]</b>
<b>308L</b>	320	510	30
<b>309L</b>	320	510	25

## 5.2 Metoda MCAW

Na rozdíl od metody FCAW, jsou při této metodě používány elektrody plněné kovovým práškem. Princip svařování je obdobný jako u metody MAG (GMAW). Jediné, v čem se liší, je použitý druh přídavného materiálu.

Náplň elektrod, které jsou při této metodě používány, je tvořena železným práškem, slitinami, manganem, křemíkem a v některých případech i niklem, chromem a molybdenem. V malém množství jsou také obsaženy stabilizátory oblouku, jako jsou sodík a draslík. Díky způsobu výroby jsou elektrody snadno legovatelné. To je dělá vhodnými pro širokou škálu základních materiálů. [44], [45]

Díky trubičkové koncepci elektrody prochází elektrický proud pouze kovovým obalem namísto celým průřezem. Díky tomu je možné při zachování stejné hodnoty proudu získat vyšší proudovou hustotu. Ta dává elektrodě široký penetrační profil, velkou míru depozice a vysokou výtěžnost pohybující se okolo 96 %. Je také možné svařovat vysokými rychlostmi. Elektrody při svařování disponují dobrým natavením svarových hran a průvarem. Díky širokému svarovému profilu není problém s přemostěním větších

svarových mezer. Výhodou je také svařování tenkých materiálů při vysokých svařovacích prouděch bez propalu. [44], [45]

Při svařování elektrodami plněnými kovovým práškem se nevytváří struska na rozdíl od plněných elektrod s příměsí tavidla. To přináší značné zvýšení efektivity, protože není nutné po každé svarové housence mechanicky odstraňovat vzniklou strusku. Odpadá také očištění povrchu svarových ploch před svařováním. Elektrody plněné kovovým práškem nemají problém s mírnými nečistotami a oxidickou vrstvou na základním materiálu. [44], [45]

Typický je sprchový přenos svarového kovu s minimálním rozstříkem. Pro udržení produktivity je svařování omezeno na polohy vodorovné shora a šikmo shora s použitím ochranné atmosféry Ar+CO<sub>2</sub>. [44], [45]

### 5.2.1 Klasifikace dle ČSN EN ISO 17632

Stejně jako plněné elektrody s příměsí tavidla jsou plněné elektrody s kovovým práškem pro svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí klasifikovány dle normy ČSN EN ISO 17632. V klasifikačním systému B jde o skupinu použití s označením „T15“. Pro ukázkou je uvedeno označení pro plněnou elektrodu s kovovým práškem dle klasifikačního systému B:

#### ČSN EN ISO 17632-B – T49 3 T15-0 M21 A H5

ISO 17632-B	představuje číslo normy a druh klasifikace
T	označuje plněnou elektrodu pro obloukové svařování;
49	vyjadřuje desetinu hodnoty minimální meze pevnosti, tedy 490 N.mm <sup>-2</sup> a minimální tažnost 18 % dle <i>tab. 10</i> ;
3	značí minimální nárazovou práci 27 J při -30 °C;
T15	vyjadřuje skupinu použití;
0	značí polohu svařování, v tomto případě jde o svařování v polohách PA a PB;
M21	popisuje použitý ochranný plyn podle ČSN EN ISO 14175
A	udává, že klasifikační zkouška této elektrody byla provedena ve stavu po svaření.

### 5.2.2 Klasifikace dle ČSN EN ISO 17633

Plněné drátové elektrody s kovovým práškem pro svařování korozivzdorných ocelí jsou klasifikovány dle normy ČSN EN ISO 17633. Například pro svařování oceli EN 1.4301 je vhodná plněná drátová elektroda:

#### ČSN EN ISO 17633-B – TS 308L-M M13 0

ISO 17633-B	představuje číslo normy a druh klasifikace
TS	označuje plněnou elektrodu z korozivzdorné oceli pro obloukové svařování;
308L	udává chemické složení viz. <i>tab. 14</i> ;
M	značí typ náplně (s kovovým práškem);
M13	popisuje použitý ochranný plyn podle ČSN EN ISO 14175;
0	udává v jakých svařovacích polohách je elektroda použitelná (PA a PB).

### 5.3 Výroba plněných elektrod

Plněná elektroda je tvořena pláštěm (obalem) trubičky a náplní. Výroba plněných elektrod je dvojího druhu podle typu obalu drátové elektrody. Vyrábějí se buďto bezešvé drátové elektrody, nebo švové viz *obr. 24*.



Obr. 24 Typy obalů plněných elektrod [46]

### **5.3.1 Bezešvé plněné elektrody**

Postup výroby bezešvých plněných elektrod je ve zkratce následující: Na začátku je „nekonečný“ ocelový pás, který je vytvarován do tvaru „O“. Vzniklý šev je následně vysokofrekvenčně svařen. Vzniklá trubička je dále plněna směsí za pomoci vibračních sil. Poté dochází k rovnoměrnému rozložení směsi v trubičce. Tomu opět napomáhají vibrace. Pak je již plná trubička protažena přes stolicí kladek, kde je žihána a je zmenšen její průměr. Nakonec je plněný drát ve více krocích protažen na konečný požadovaný průměr a navinut na cívku. Výhodou této metody je absolutní zabránění navlhavosti plněné elektrody. [46]

### **5.3.2 Švové plněné elektrody**

Postup výroby švových plněných elektrod je ve zkratce následující: Na začátku je „nekonečný“ ocelový pás, který je vytvarován do tvaru „U“. Následně je plněn směsí. Po rovnoměrném rozložení směsi je pás uzavřen a dostává tvar kruhového průřezu s patřičným druhem švu. Pak je již plná trubička protažena přes stolicí kladek, kde je žihána a je zmenšen její průměr. Nakonec je plněný drát ve více krocích protažen na konečný požadovaný průměr a navinut na cívku. V porovnání s výrobou bezešvých trubek je tento druh výroby levnější. [46]

## **5.4 Rozměry standardně dodávaných plněných elektrod**

Standardně dodávané plněné elektrody jsou dostupné v průměrech od 0,8 do 1,6 mm navinuté na cívkách. Hmotnosti cívek (balení) se pak pohybují od 5 do 16 kg.

## **5.5 Výhody a nevýhody plněných elektrod**

### **5.5.1 Výhody**

Plněné elektrody přináší v porovnání s dráty plného průřezu řadu výhod. Díky plněným elektrodám je možné zvýšit výkon odtavení, zajistit lepší kvalitu svarového kovu a zvýšit hodnoty mechanických vlastností. Plněné elektrody nabízí vyšší rychlosti svařování, méně vad a nízký rozstřík, což se projevuje na produktivitě svařování.

V případě použití plněných elektrod s rutilovou náplní je velice efektivní svařování ve vynucených polohách díky strusce, která brání vytečení svarového kovu. Bazické plněné elektrody poskytují perfektní dezoxidační účinky a vyšší houževnatost svarového kovu. Plněné elektrody s příměsí tavidla (rutilové i bazické) a vlastní ochranou

umožňují svařování bez externí dodávky ochranného plynu. To nachází uplatnění při svařování na stavbách a montážích.

Plněné elektrody s kovovým práškem oproti předchozím typům elektrod nabízí velmi produktivní svařování ve vodorovných polohách bez očištění svarových ploch a nevytvářejí strusku, kterou by bylo nutné později odstraňovat. Tento druh plněných elektrod nemá problém s přemostěním větších svarových mezer.

### **5.5.2 Nevýhody**

Zásadní rozdíl v porovnání s drátem plného průřezu je v ceně. Plněné drátové elektrody jsou o poznání dražší než standardní dráty plného průřezu. Nicméně tento fakt dokážou plněné elektrody při správné aplikaci vykompenzovat vyšší produktivitou a řadou dalších výhod.

Nevýhodami plněných elektrod s příměsí tavidla jsou: nutnost odstranění strusky a odpařování nebezpečných par. Nejsou také moc vhodné pro svařování tenkých materiálů. Plněné elektrody s kovovým práškem zase nejsou vhodné pro svařování ve vynucených polohách.

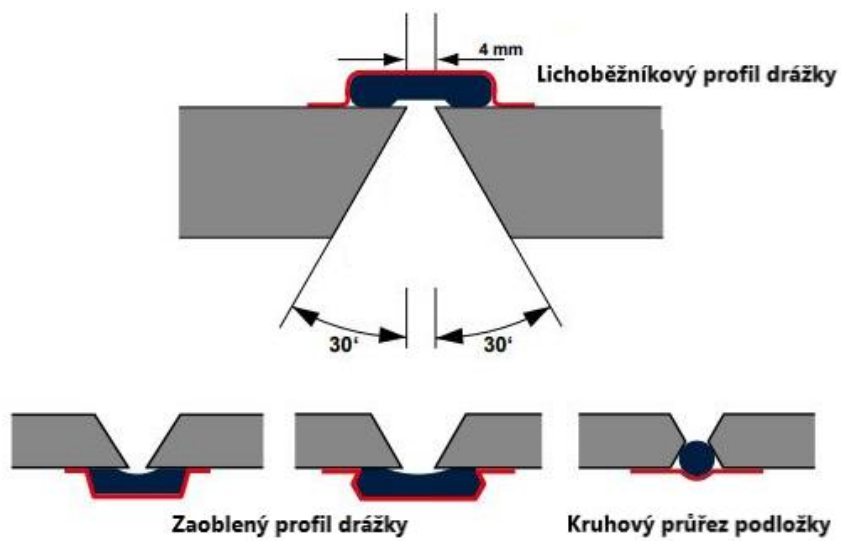
## 6 Použití keramických podložek

Keramické podložky se používají pro vytvoření kořenové vrstvy při jednostranném svařování. Obvykle jde o případy, kdy svařenec nelze otočit, nebo je jeho druhá strana (strana kořene) nepřístupná pro svařování. V případě plněných elektrod, jak již bylo zmíněno, je obecně velmi obtížné bez podložky vytvořit kořen. Při použití keramických podložek není nutné upravovat hrany svarového spoje, tzn. vytvářet otupení. Tím se sníží náklady na potřebné úpravy a také na slícování dílů. Při nesprávném slícování zajišťují spolehlivé provaření kořene. Keramické podložky snižují riziko vzniku vad v kořenové vrstvě, což opět znamená časovou a finanční úsporu. Díky keramickým podložkám je možné vytvořit plynulý přechod mezi povrchem kořenové housenky a povrchem základního materiálu. Použitím keramických podložek je také možné zvýšit parametry svařování a tím tak výrazně zvýšit produktivitu. Povrch keramických podložek chemicky nereaguje se svarem a nenavlhá, proto je lze použít v kombinaci s materiály zaručující nízký obsah difúzního vodíku. [9]

Keramické podložky nachází využití hlavně při vytváření tupých svarových spojů typu V,  $\frac{1}{2}V$  a X. Pro tupé svary typu V se používají ploché keramické podložky s drážkou.

Důležitá je volba profilu drážky, která se odvíjí od použité technologie svařování. Pro svařování elektrodou plného průřezu a plněnou elektrodou s bazickou náplní nebo kovovým práškem je vhodný zaoblený tvar drážky. Pro plněné elektrody s rutilovou náplní je vhodný hranatý tvar drážky. Pro svaření kořene tupého svaru typu X se používají podložky kruhového průřezu.

Keramické podložky se ve většině případů aplikují na svařované díly přilepením pomocí hliníkové lepící pásky, která je již součástí podložek. Podložka je sama o sobě rozdělena do několika segmentů určitých délek dle výrobce. To zajišťuje nastavení potřebné délky podložky. Keramické podložky jsou pouze na jedno použití. [9]



*Obr. 25 Druhy keramických podložek [47]*



*Obr. 26 Detail keramické podložky*

## **PRAKTICKÁ ČÁST**



## 7 Návrh experimentu

Pro posouzení, jestli je možné zvýšit efektivitu svařování použitím plněných elektrod, byly navrženy čtyři tupé svarové spoje typu V, které byly rozděleny do dvojic. V rámci každé dvojice byla porovnávána stávající metoda svařování (MAG) s metodou využívající plněné elektrody (MCAW, FCAW).

Důležitý je také systém značení vzorků. První dvojici tvoří vzorky s označením 1A1 a 2B1, které byly svařeny v poloze vodorovné shora (PA podle ČSN EN ISO 6947). Tato poloha demonstruje ideální případ svařování, kterého je možné docílit pomocí svařovacího polohovadla. Označení 1A1 je pro svařenec, pro nějž byl použit standardní drát plného průřezu (tzn. způsob používaný ve firmě v současné době). Pro svaření vzorku 2B1 byla použita plněná elektroda s kovovým práškem. Ve druhé dvojici jsou vzorky s označením 2A1 a 2A2, které byly svařeny v poloze svislé nahoru (PF podle ČSN EN ISO 6947). Vzorek 2A1 byl opět svařen za použití standardního drátu plného průměru. Pro svaření vzorku 2A2 byla použita elektroda s rutilovou náplní.

Vyhodnocení provedených svarů bylo provedeno v souladu s vybranými zkouškami dle ČSN EN ISO 15614-1 – *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu* [48],

## 8 Použitý základní materiál

Předmětem řešení jsou tupé svary plechů materiálu S355J2+N o tloušťce 22 mm. Chemické složení získané rozbořem tavby, ze které byly vzorky vytvořeny je uvedeno v *tab. 16*. Zjištěné mechanické vlastnosti jsou uvedeny v *tab. 17*. Předchozí zmíněné jsou převzaty z dokumentu kontroly (atestu). Na výchozím polotovaru byla také provedena ultrazvuková zkouška. Materiálový certifikát s protokolem o provedení NDT zkoušky je k dispozici v *příloze 1* (viz příložené CD).

**Tab. 16 Chemické složení oceli S355J2+N v hm. %**

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Cu	Al	V	Mo	Nb
0,12	1,53	0,25	0,004	0,015	0,04	0,03	0,06	0,021	0,051	<0,005	0,035

**Tab. 17 Mechanické vlastnosti**

$R_{eH}$ [N.mm <sup>-2</sup> ]	$R_m$ [N.mm <sup>-2</sup> ]	A [%]
440	545	31

## 9 Použité přídavné materiály

Jako zástupce stávající výroby pro svařování jak v poloze PA, tak i v PF byla vybrána drátová elektroda INEFIL italského výrobce INE, klasifikována jako ČSN EN ISO 14341-A: G 46 4 M21 3Si1. Průměr elektrody je 1,2 mm. Jde o běžně používanou drátovou elektrodu pro svařování konstrukčních ocelí.

Na porovnání pro svařování ve vodorovné poloze shora (PA) byla vybrána plněná elektroda s kovovým práškem KX-706M od korejského výrobce KISWEL. Klasifikace dle příslušné normy je ČSN EN ISO 17632-A – T46 2 M M21 3 H5. Průměr elektrody je 1,2 mm. S touto elektrodou byla použita keramická podložka se zaobleným profilem drážky NST Kerback FR 271009T (bližší popis v kapitole 11.2). Elektroda disponuje dobrým průvarem, smáčivostí a nízkým obsahem vodíku.

Na porovnání pro svařování ve svislé poloze nahoru (PF) byla vybrána plněná elektroda s rutilovou náplní K-71TLF opět od korejského výrobce KISWEL. Klasifikace dle příslušné normy je ČSN EN ISO 17632-A – T46 2 P M21 1 H10. Průměr elektrody je 1,2 mm. S touto elektrodou byla použita keramická podložka s hranatým profilem drážky NST Kerback FS 271412T (bližší popis v kapitole 11.4). Elektroda disponuje stabilním obloukem, nízkým rozstříkem a bezproblémovým tvarem housenky.

Chemické složení, mechanické vlastnosti a doporučené svařovací parametry jsou uvedeny v *tab. 18 až 20*.

**Tab. 18 Chemické složení elektrod v hm. %**

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>S</b>	<b>P</b>	<b>Cu</b>
<b>INEFIL</b>	0,07	1,40	0,80	0,012	0,012	0,15
<b>KX-706M</b>	0,04	1,50	0,60	0,010	0,014	-
<b>K-71TLF</b>	0,03	1,35	0,38	0,010	0,015	-

**Tab. 19 Mechanické vlastnosti svarového kovu při použití daných elektrod**

	<b>R<sub>e</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>R<sub>m</sub> [N.mm<sup>-2</sup>]</b>	<b>A [%]</b>	<b>KV při -20 °C [J]</b>
<b>INEFIL</b>	470	560	26	90
<b>KX-706M</b>	480	540	29	70
<b>K-71TLF</b>	520	570	28	80

*Tab. 20 Svařovací parametry doporučené výrobcí přídavných materiálů*

	Polarita	Svařovací proud [A]		Svařovací napětí [V]	
		Min.	Max.	Min.	Max.
<b>INEFIL</b>	DC+	100	360	18	34
<b>KX-706M</b>	DC+	160	300	24	32
<b>K-71TLF</b>	DC+	180	240	24	28

Jako ochranná atmosféra byla ve všech případech použita směs M21 dle ČSN EN ISO 14175, konkrétně směs 18 % oxidu uhličitého v argonu.

## 10 Příprava vzorků a svarových ploch

V rámci experimentu byly svařovány plechy o délce 300 mm, šířce 150 mm a tloušťce 22 mm. Jde o normované rozměry dle ČSN EN ISO 15614-1 s tím, že celková délka 350 mm byla redukována na 300 mm kvůli nižšímu počtu provedených zkoušek a použití náběhových a výběhových desek. Tloušťka 22 mm byla zvolena jako reprezentativní tloušťka, používaná ve firmě Baest, zastupující plechy větších tlouštěk, na které je experiment zacílen. Tyto jednotlivé plechy byly vyřezány plazmou z velkého formátu na CNC pálicím stroji Vanad Bluester ve firmě Baest.

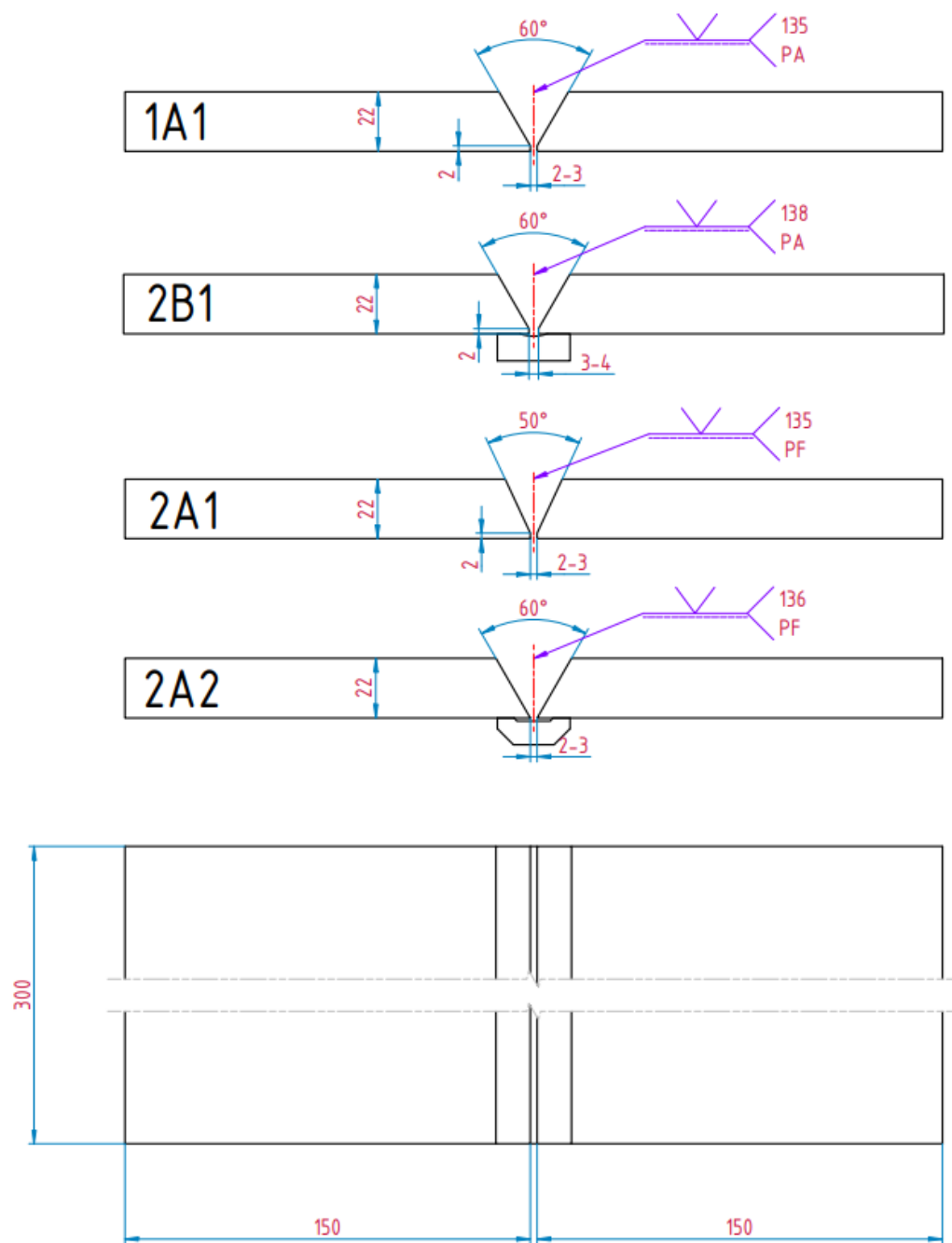


*Obr. 27 CNC pálicí stroj Vanad Bluester ve firmě Baest*



*Obr. 28 Vzorky připravené tepelným dělením plazmou*

Protože měly být vytvořeny tupé svarové spoje, bylo nutné upravit svarové plochy nařezaných vzorků. Proto byly tepelným dělením vytvořeny i úkosity dle obr. 29, a ještě bylo vygravírováno označení. Svarové plochy byly poté před svařením očištěny ruční bruskou kvůli začínající korozi.



Obr. 29 Výrobní výkresy vzorků

Tato úprava svarových ploch byla zvolena kvůli porovnání míry depozice a obecně kvůli potenciálu plněných elektrod. Důvodem byla také unifikace vstupních podmínek pro všechny elektrody.

Pro vzorky 2A1 a 2A2 mělo být úkosování svarových ploch původně obráceně (2A1 – 60° a 2A2 – 50°), bohužel však došlo při svařování k záměně.

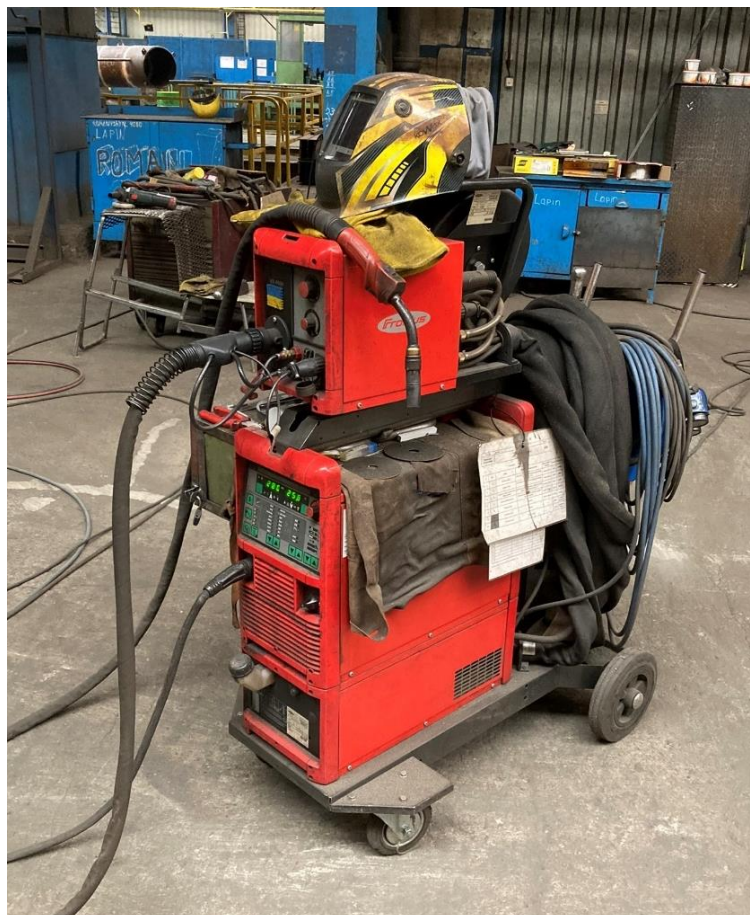
Na *obr. 30* jsou uvedeny pro ukázkou způsoby vytvoření úkosů s otupením a bez otupení.



***Obr. 30 Ukázka úkosů s otupením a bez otupení: Vlevo pro vzorek 1A1  
a vpravo pro vzorek 2A1***

## 11 Vytvoření svarových spojů

Svarové spoje byly vytvořeny svářečem ve firmě Baest. Pro svaření byla použita sestava svařovacího zdroje TransPuls Synergic 5000 a podavače drátu VR 4000 4R/G/W/E od firmy Fronius. V *tab. 21* jsou uvedeny technické údaje svařovacího zdroje.



*Obr. 31 Svařovací zdroj s jednotkou podávání elektrody*



**Tab. 21** Technické údaje svařovacího zdroje *TransPuls Synergic 5000* [49]

Síťové napětí		3 x 400 V
Tolerance síťového napětí		± 15 %
Frekvence sítě		50/60 Hz
Síťové jištění		35 A zpožděný typ
Trvalý primární proud (100 % DZ)		18 -29,5 A
Trvalý primární výkon		13,1 kVA
Účinník		0,99
Účinnost		90 %
Rozsah svařovacího proudu		
	MIG/MAG	3 - 500 A
	Elektroda	10 - 500 A
	WIG	3 - 500 A
Svařovací proud při	10 min / 40 °C (104 °F)	
	40 % DZ	500 A
	60 % DZ	450 A
	100 % DZ	360 A
Svařovací napětí podle normované charakteristiky		
	MIG/MAG	14,2 -39,0 V
	Elektroda	20,4 - 40,0 V
	WIG	10,1 -30,0 V
Max. svařovací napětí		-
Napětí naprázdno		70 V
Krytí		IP 23
Chlazení		AF
Izolační třída		F
Certifikace		CE, CSA
Certifikace bezpečnostní třídy		S
Rozměry d x š x v		625 x 290 x 475 mm 24,6 x 11,4 x 18,7 palců
Hmotnost		35,6 kg 78,5 liber

Pro všechny vzorky byly vytvořeny předběžné specifikace postupu svařování (pWPS) uvedené v příloze č.2 (viz příložené CD).

Vzorky byly svařované postupně podle vytíženosti svářeče v rozmezí několika týdnů. Pořadí vytvoření vzorků bylo následující: 1A1, 2B1, 2A1 a 2A2.

## 11.1 Vzorek 1A1

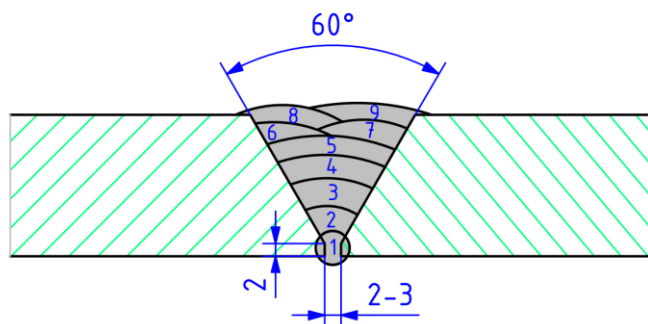
Vzorek 1A1 demonstruje, jakým způsobem se přistupuje ke konstrukčnímu řešení svarových spojů materiálu takové tloušťky v současné době. Pro tupý svar typu V byl navržen úhel rozevření svarové plochy  $60^\circ$  (standardní úhel rozevření) a otupení svarové plochy v místě kořene o velikosti 2 mm pro jeho dobré provaření. Jako přídavný materiál byl použit svařovací drát plného průměru G3Si1 (INEFIL). Vzorek byl svařován v poloze vodorovné shora (PA).

Svářeč si nejprve ustavil plechy úkosem dolů a pomocí měrky vytvořil definovanou mezeru. Mezera mezi svařovanými díly byla 2-3 mm. Následně pak přivařil náběhové a výběhové desky. Tím tak zajistil stálou vzájemnou polohu svařovaných plechů.



*Obr. 32 Příprava mezery mezi plechy*

Nejprve jednou svarovou housenkou svařil kořen svaru a pak pokračoval vyplňováním úkosované svarové plochy. Pro svaření celého vzorku včetně kořene potřeboval sedm vrstev. Druhou, třetí, čtvrtou a pátou vrstvu svařil ve všech případech jednou svarovou housenkou. Poslední dvě vrstvy bylo nutné rozdělit pokaždé do dvou housenek. Celkem bylo tedy potřeba devět svarových housenek v sedmi vrstvách. Způsob kladení svarových housenek je naznačen na *obr. 33*.



**Obr. 33 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 1A1**

Během svařování každé svarové housenky byly měřeny hlavní svařovací parametry – proud a napětí. Dále se měřila doba svařování každé housenky  $t_s$ . Díky těmto již známým veličinám bylo možné dopočítat rychlost svařování  $v_s$  a tepelný příkon  $Q$  (vnesené teplo) dle vztahů (3) a (4). Pro výpočet byla uvažována účinnost metody  $\eta=0,8$  (v souladu s ČSN EN 1011-1- Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování [50]). Před svařením každé následující svarové housenky bylo nutné změřit teplotu interpass, která byla nastavena na 250 °C. Délka svaru činila 300 mm. Záznam naměřených a dopočítaných hodnot je uveden v tab. 22.

**Tab. 22 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 1A1**

housenka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I [A]</b>	130- 150	250- 270	250- 270	270- 290	260- 290	260- 290	260- 300	270- 300	270- 300	
<b>Mod(I)* [A]</b>	140	260	260	280	285	290	295	300	300	
<b>U [V]</b>	16,9- 17,2	25,1- 25,4	24,6- 24,9	27,0- 27,3	26,5- 26,8	26,5- 26,8	26,5- 26,8	25,0- 25,3	25,0- 25,3	
<b>Mod(U)* [V]</b>	17,1	25,3	24,7	27,1	26,6	26,6	26,6	25,2	25,2	
<b>t<sub>s</sub> [min]</b>	1,75	0,68	1,27	1,42	2,13	1,43	1,75	2,32	1,87	
<b>v<sub>s</sub> [cm.s<sup>-1</sup>]</b>	17,14	43,9	23,68	21,18	14,06	20,93	17,14	12,97	16,13	
<b>Q [kJ.cm<sup>-1</sup>]</b>	6,70	7,19	13,02	17,20	25,88	17,69	21,98	27,98	22,50	
<b>T<sub>i</sub> [°C]</b>	35	50	70	100	125	150	180	230		

\*Mod(X) vyjadřuje hodnotu s největší četností

$$v_s = \frac{l}{t} \text{ (cm.min}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

Kde:

$l$  je délka svaru (cm). V tomto případě je  $l = 30$  cm;

$t$  je doba svařování (min).

$$Q = \eta \cdot \frac{I_s \cdot U \cdot 60}{v_s \cdot 1000} \text{ (kJ.cm}^{-1}\text{)} \quad (4)$$

Kde:

$I_s$  je svařovací proud (A);

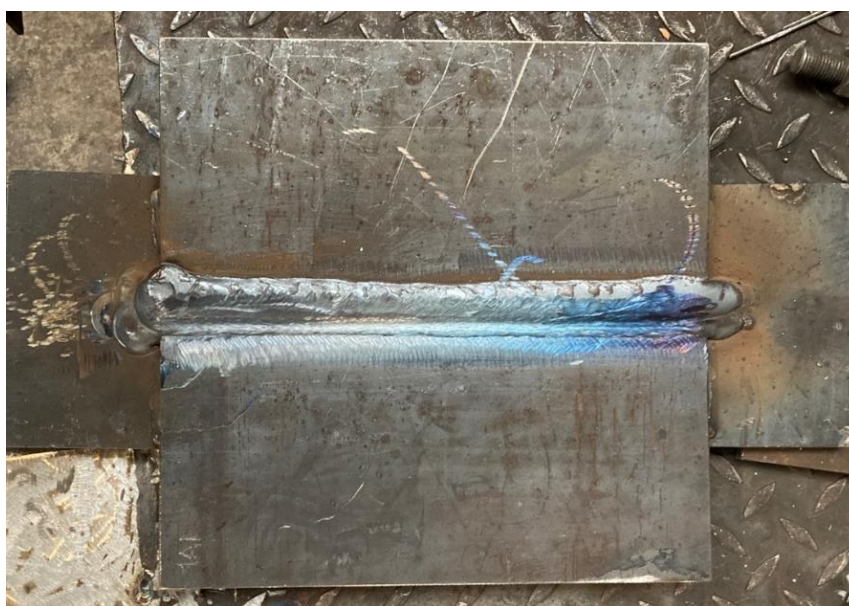
$U$  je napětí na oblouku (V);

$v_s$  je rychlost svařování (cm.min<sup>-1</sup>);

$\eta$  je účinnost metody. Ve všech případech je rovna 0,8.



*Obr. 34 Použitý dotykový teploměr GTH 1150 pro kontrolu teploty interpass*

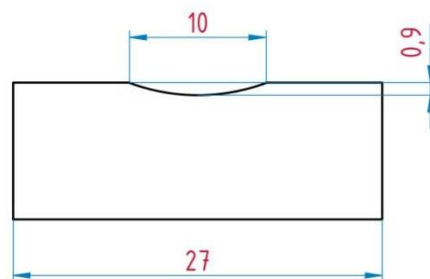


*Obr. 35 Hotový vzorek 1A1 – pohled na krycí vrstvu svarového spoje*

## 11.2 Vzorek 2B1

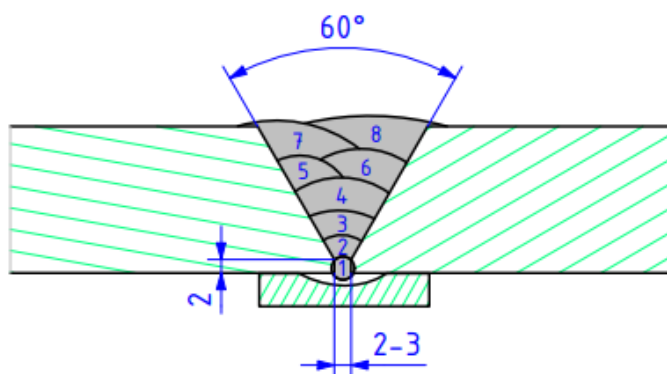
Vzorek 2B1 byl svařován plněnou elektrodou s kovovým práškem (KX-706M). Byl navržen pro srovnání se vzorkem 1A1. Úhel rozevření svarové drážky byl opět  $60^\circ$ . U toho vzorku byla pro svaření kořene použita keramická podložka se zaobleným profilem drážky. Konkrétně byla použita keramická podložka NST Kerback FR 271009T (viz *obr. 36*). Přestože byla použita keramická podložka, bylo z experimentálních důvodů vytvořeno otupení svarové plochy v místě kořene. Vzorek byl opět svařován v poloze PA.

Svářeč postupoval obdobně jako u předchozího vzorku. Ustavil si plechy a vytvořil pomocí měrky mezeru 3-4 mm. Dále přivařil náběhovou a výběhovou desku, aby zafixoval vzájemnou polohu plechů. Pak stranu kořene podlepil keramickou podložkou. Následně vzorek otočil drážkou směrem nahoru a svarový úkos začal postupně vyplňovat svarovými housenkami.



*Obr. 36 Podlepení kořene keramickou podložkou NST Kerback FR 271009T*

Nejprve svařil kořen a pak pokračoval vyplňováním úkosované svarové plochy dalšími pěti vrstvami. Pro svaření celého vzorku včetně kořene bylo potřeba 6 vrstev. Druhou, třetí a čtvrtou vrstvu svařil ve všech případech jednou svarovou housenkou. Poslední dvě vrstvy bylo opět nutné rozdělit pokaždé do dvou housenek. Celkem bylo potřeba osm svarových housenek. Způsob kladení svarových housenek je naznačen na *obr. 37*.



Obr. 37 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2B1

Stejně jako u vzorku 1A1, byly během svařování každé svarové housenky měřeny hlavní svařovací parametry – proud a napětí. Dále se měřila doba, za kterou se podařilo svářeči svařit jednu housenku. Díky těmto veličinám bylo možné dopočítat rychlost svařování a tepelný příkon (vnesené teplo). Před svařením každé následující svarové housenky bylo nutné změřit teplotu interpass, která byla nastavena na 250 °C. Délka svaru činila 300 mm. Záznam naměřených a dopočítaných hodnot dle vztahů (3) a (4) je uveden v tab. 23. Opět se počítalo s účinností metody  $\eta = 0,8$ .

Tab. 23 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2B1

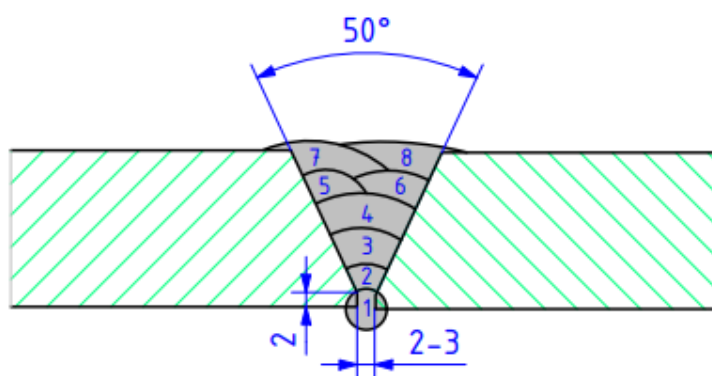
housenka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I [A]</b>	150-180	240-270	290-310	290-310	290-310	290-310	290-310	290-310		
<b>Mod(I) [A]</b>	160	250	290	290	295	300	300	300		
<b>U [V]</b>	17,1-17,8	27,5-27,8	29,5-29,8	29,5-29,8	29,5-29,8	29,5-29,8	29,0-29,3	29,0-29,3		
<b>Mod(U) [V]</b>	17,6	27,6	29,6	29,6	29,6	29,6	29	29		
<b>t<sub>s</sub> [min]</b>	1,48	1,05	1,68	1,93	1,27	1,38	1,53	1,72		
<b>v<sub>s</sub> [cm/min]</b>	20,23	28,57	17,82	15,51	23,69	21,69	19,56	17,48		
<b>Q [kJ/cm]</b>	6,68	11,59	23,12	26,57	17,92	19,65	21,35	23,89		
<b>T<sub>i</sub> [°C]</b>	70	130	210	200	220	230	220			

\*Mod(X) vyjadřuje hodnotu s největší četností

### 11.3 Vzorek 2A1

Vzorek 2A1 představuje způsob svařování ve vynucené poloze, konkrétně v poloze svislé nahoru (PF). Úhel rozevření svarové plochy byl  $50^\circ$  s otupením 2 mm. Jako přídatný materiál byl použit svařovací drát plného průřezu G3Si1 (INEFIL).

Stejně jako v předchozích dvou případech svářeč nejprve ustavil plechy k sobě a měrkou vytvořil svarovou mezeru 2-3 mm. Potom přivařil náběhovou a výběhovou desku. Tentokrát vzorek postavil a za náběhovou desku přivařil k pracovnímu stolu do svislé polohy. Nejprve svařil kořen a pak dál pokračoval s vyplňováním úkosované svarové plochy, kterou vyplnil dalšími pěti vrstvami s tím, že každá z posledních dvou vrstev byla rozdělena do dvou svarových housenek. Celkem bylo tedy potřeba na svaření vzorku osm svarových housenek. Způsob kladení svarových housenek je uveden na obr. 38.



Obr. 38 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2A1

Během svařování byly opět zaznamenávány hodnoty svařovacích parametrů. Hodnoty rychlosti svařování a vneseného tepla byly opět dopočítány dle vztahů (3) a (4). Záznam naměřených a dopočítaných hodnot je uveden v tab. 24. Opět se počítalo s účinností metody  $\eta = 0,8$ .

**Tab. 24 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2A1**

housenka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I [A]</b>	80- 110	130- 150	110- 130	110- 150	110- 140	110- 130	110- 130	110- 130		
<b>Mod(I) [A]</b>	90	140	120	130	120	120	120	120		
<b>U [V]</b>	15,0- 15,4	16,1- 16,5	15,1- 15,7	15,1- 15,7	15,1- 15,7	15,1- 15,7	15,1- 15,7	15,1- 15,7		
<b>Mod(U) [V]</b>	15,2	16,3	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5		
<b>t<sub>s</sub> [min]</b>	1,62	3,67	7,28	7,25	4,33	5,17	5,3	5,08		
<b>v<sub>s</sub> [cm/min]</b>	18,56	8,19	4,1	4,14	6,92	5,81	5,66	5,9		
<b>Q [kJ/cm]</b>	3,54	13,37	21,78	23,36	12,90	15,37	15,78	15,13		
<b>T<sub>i</sub> [°C]</b>	50	60	120	150	160	170	180			

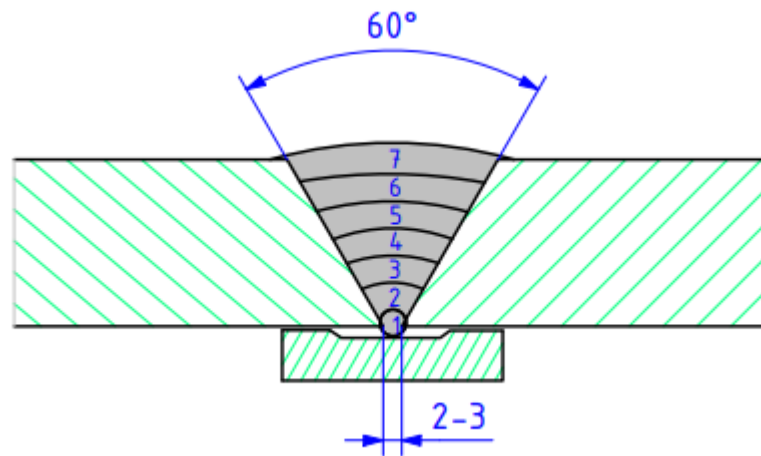
\*Mod(X) vyjadřuje hodnotu s největší četností

## 11.4 Vzorek 2A2

Vzorek 2A2 byl svařován plněnou elektrodou s rutilovou náplní (K-71TLF). Byl navržen pro srovnání se vzorkem 2A1. Úhel rozevření svarové plochy byl 60°. U toho vzorku byla pro svaření kořene použita keramická podložka s hranatým profilem drážky. Konkrétně byla použita keramická podložka NST Kerback FS 271412T (viz obr. 41). Vzorek byl opět svařován v poloze PF.

Svářeč postupoval obdobně jako u předchozího vzorku. Ustabil si plechy a vytvořil pomocí měrky mezeru 2-3 mm. Dále přivařil náběhovou a výběhovou desku, aby zafixoval vzájemnou polohu plechů. Pak stranu kořene podlepil keramickou podložkou. Následně vzorek postavil a za náběhovou desku přivařil k pracovnímu stolu. Nejprve svařil kořen a pak pokračoval s vyplňováním svarové drážky dalšími pěti vrstvami. Díky vysoké míře depozice nebylo nutné vrstvy rozdělovat do více housenek. Nutností však bylo každou svarovou housenku očistit od strusky brusným kotoučem. Celkem bylo tedy potřeba sedm svarových housenek. Způsob kladení svarových housenek je načrtnut na obr. 39.

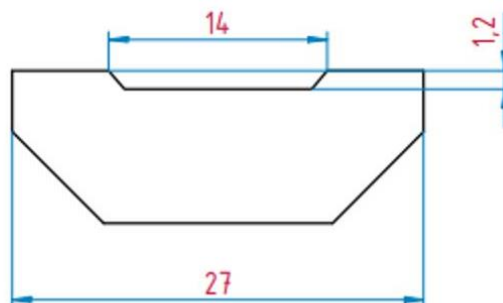
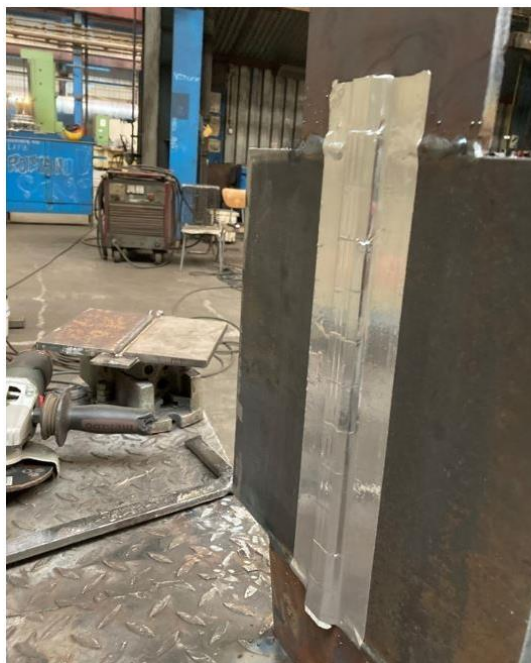




*Obr. 39 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2A2*



*Obr. 40 Příprava vzorku 2A2 na svařování v poloze PF*



**Obr. 41** Podlepení kořene keramickou podložkou NST Kerback FS 271412T

Během svařování byly zaznamenávány hodnoty svařovacích parametrů. Hodnoty rychlosti svařování a vneseného tepla byly opět dopočítány dle vztahů (2) a (3). Záznam naměřených a dopočítaných hodnot je uveden v tab. 25. Opět se počítalo s účinností metody  $\eta = 0,8$ .

**Tab. 25** Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2A2

houseska	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>I</b> [A]	150-170	150-170	180-200	200-220	200-220	200-230	160-190			
<b>Mod(I)</b> [A]	160	165	200	210	210	225	190			
<b>U</b> [V]	18,2-18,7	18,2-18,7	19,6-19,9	20,0-20,4	20,0-20,4	20,0-20,4	17,7-18,6			
<b>Mod(U)</b> [V]	18,4	18,4	19,8	20,3	20,3	20,3	18,5			
<b>t<sub>s</sub></b> [min]	2,22	3,38	2,27	3,00	3,42	3,00	4,37			
<b>v<sub>s</sub></b> [cm/min]	13,53	8,86	13,27	10	8,78	10	6,88			
<b>Q</b> [kJ/cm]	10,44	16,45	14,32	20,46	23,31	21,92	24,52			
<b>T<sub>i</sub></b> [°C]	80	130	110	170	120	170				

\*Mod(X) vyjadřuje hodnotu s největší četností



*Obr. 42 Vybrušování strusky*



*Obr. 43 Průběh svařování vzorku 2A2: Vlevo je viditelná struska vznikající jako vedlejší produkt svařování a vpravo je možné vidět stav po odstranění strusky*

## 12 Nedestruktivní zkoušky pro vyhodnocení kvality svarů

Po vytvoření byly vzorky testovány z hlediska jejich kvality provedení. Byly provedeny základní NDT a DT zkoušky, jejichž výsledky jsou blíže uvedeny v kapitolách 12.1 až 13.4.

### 12.1 Vizuální kontrola svarů

První zkouškou, která byla na vzorcích provedena, byla přímá vizuální kontrola svarů. Provedení zkoušky je v souladu s normou ČSN EN ISO 17637 - *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů* [51]. Jde o jeden ze základních druhů nedestruktivního zkoušení svarového spoje. Při přímé vizuální kontrole se zkoumají přímo vady. Předmětem zkoušky bylo 100 % povrchu. V zásadě se hledaly necelistvosti svarů, tzn.: trhliny, koncové kráterové staženiny, zápaly a vruby mezi housenkami. Také se hodnotila pravidelnost tvaru svarových housenek, jejich kresba, případně převýšení nebo prolákliny. Dále se kontrolovaly průvary. Vadou, se kterou se počítalo již při návrhu vzorků, je úhlová deformace, která vzniká v důsledku objemového smrštění svarového kovu, a která nebyla při experimentu zvláště řešena.

Pro vizuální zkoušku byly použity následující pomůcky: posuvné měřítko, pravítko, měrka na svary CAMBRIDGE a lupa. Intenzita osvětlení v místnosti byla okolo 1000 lx a byla kontrolována luxmetrem Lutron LX 1135.

U žádného vzorku nebyly nalezeny při vizuální kontrole trhliny, které jsou nepřijatelné v jakémkoliv stupni přípustnosti. Každý vzorek vykazoval závar s pravidelnou šířkou a převýšením bez zápalů. Též nebyly nikde nalezeny neprůvary nebo neúplná vyplnění svaru. Společným nálezem pro všechny vzorky byl patrný zásah brusným kotoučem. U vzorků, jejichž poslední krycí vrstva je tvořena dvěma housenkami, byl zaznamenán viditelný vrub mezi housenkami.



*Obr. 44 Vizuální kontrola vzorku 1A1*



*Obr. 45 Vizuální kontrola vzorku 2B1*



*Obr. 46 Vizuální kontrola vzorku 2A1*



*Obr. 47 Vizuální kontrola vzorku 2A2*



*Obr. 48 Vizualní kontrola kořenové vrstvy*

Nicméně pro účely tohoto experimentu byly všechny vzorky po vizuální kontrole vyhodnoceny jako vyhovující.

## **12.2 Kapilární zkouška**

Další nedestruktivní zkouškou, která byla na vzorcích provedena, byla kapilární zkouška. V tomto případě slouží zkouška k nalezení případných povrchových indikací vad, které nejsou viditelné při vizuální kontrole. Kapilární zkouška byla provedena dle normy ČSN EN ISO 3452-1 - *Nedestruktivní zkoušení – Zkoušení kapilární metodou – Část 1: Obecné zásady* [52].

Pro provedení této zkoušky byla použita penetrační sada od výrobce SOPRAS, která obsahuje penetrant RED, vývojku WHITE a čistič CLEANER. Jde o metodu barevné indikace.

Vzorky bylo nutné nejprve očistit a odmastit (pomocí chemického čističe CLEANER). Následně byl aplikován penetrant. Penetrační čas byl 15 min. Po zatečení byl odstraněn přebytečný penetrant pomocí hadříku navlhčeného čističem. Pak byla aplikována vývojka. Vyvolávací čas byl opět 15 min. V ideálním případě se neobjevily žádné indikace vad (viz obr. 49).

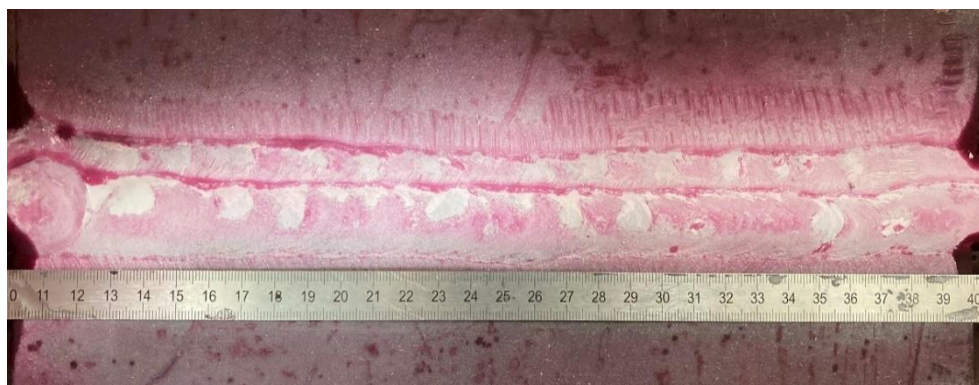


*Obr. 49 Kapilární zkouška vzorku 2A2*

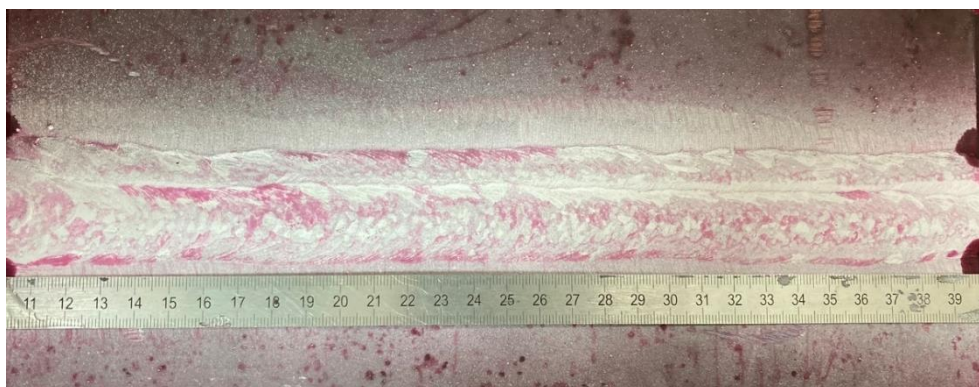


**Obr. 50 Kapilární zkouška vzorku 2A1**

Kvůli členitému povrchu svaru nebylo možné vždy perfektně odstranit přebytečný penetrant. V takových případech byly indikace vyhodnoceny jako falešné (viz obr. 50). Podobně tomu bylo i u ostatních vzorků.



**Obr. 51 Kapilární zkouška vzorku 1A1**



**Obr. 52 Kapilární zkouška vzorku 2B1**

Další NDT (pro kontrolu vnitřních vad) nebyly na vzorkách aplikovány z časových důvodů.

## 13 Destruktivní zkoušky pro vyhodnocení kvality svarů

Po NDT následovaly vybrané destruktivní zkoušky pro ověření požadovaných mechanických vlastností svarových spojů.

### 13.1 Příčná tahová zkouška

První z destruktivních zkoušek svarů byla provedena příčná tahová zkouška podle normy ČSN EN ISO 4136 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem* [53]. Pro tuto zkoušku byly odebrány zkušební vzorky příčně od svarového spoje s tím, že po opracování zůstala osa svaru ve středu zkušební tělesa.

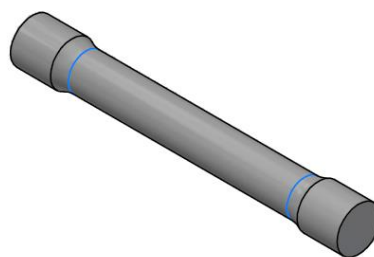
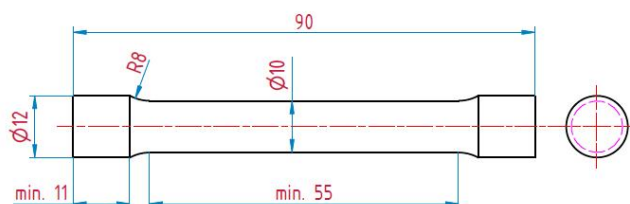
#### 13.1.1 Příprava zkušebních vzorků pro zkoušku tahem

Pro tuto zkoušku bylo potřeba odebrat z každého svaru čtyři zkušební vzorky. Příprava zkušebních vzorků byla poměrně časově náročná vzhledem k technologickým možnostem halových laboratoří školy a požadavkům s ohledem na trhací zařízení. Pro zjednodušení výroby vzorků a na základě možností trhacího zařízení byl, po domluvě se specialistou na mechanické zkoušky, stanoven konečný rozměr zkušebních vzorků, který odpovídá poměrné zkušební tyči kruhového průřezu. Počáteční měřená délka  $L_0 = 50 \text{ mm}$  byla stanovena pomocí počáteční plochy příčného průřezu  $S_0$  dle vztahu (5). Počáteční průměr měřené části byl 10 mm.

$$L_0 = k \cdot \sqrt{S_0} \quad (\text{mm}) \quad (5)$$

kde  $k = 5,65$

Výkres zkušební vzorku je ukázán na *obr. 53*.



*Obr. 53* Výkres zkušební vzorku pro tahovou zkoušku



Výroba polotovarů pro tahovou zkoušku proběhla z velké části na pásových pilách Pilous a Ergonomic. Šířka řezů byla zvolena stejná jako tloušťka svařovaných plechů, tzn. 22 mm. Přestože má hotové zkušební těleso konečný maximální průměr 12 mm, bylo nutné dodržet co nejlepší přibližný čtvercový průřez polotovaru kvůli lepší obrobiteľnosti.



*Obr. 54 Výroba polotovarů zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku*

Dále byly polotovary předobroběny na frézce. Byly sraženy hrany a dosáhlo se průřezu tvaru mnohoúhelníku. Následně byly polotovary hrubovány na kruhový průřez již na soustruhu, kde pak byla vytvořena i konečná kontura dle výkresu na *obr. 53*.



*Obr. 55 Soustružení zkušebních vzorků*



*Obr. 56 Stav zkušebního vzorku po hrubování a po obrobení na konečný tvar*



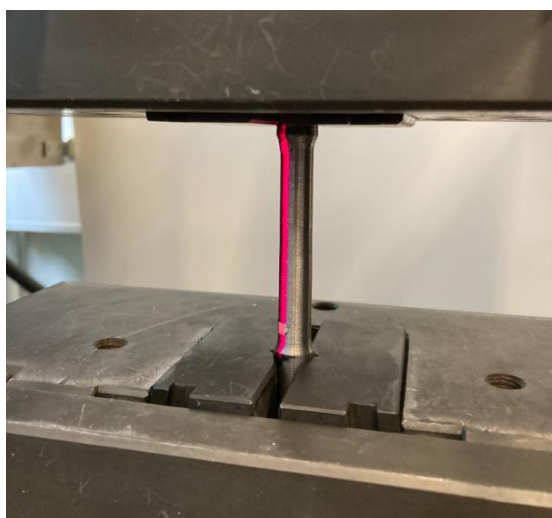
*Obr. 57 Hotové zkušební vzorky pro tahovou zkoušku*

### 13.1.2 Průběh a výsledky zkoušky tahem

Zkouška tahem byla provedena za pokojové teploty 23 °C při zkušební rychlosti 2 mm.min<sup>-1</sup> na univerzálním zkušebním stroji **LabTest Model 5.100SP1** s jmenovitým zatížením 100 kN. Technické údaje zkušebního zařízení jsou uvedené v tab. 26. Vzorky byly upnuty do klínových samosvorných čelistí. Předtím ještě bylo nutné vzorky proměřit a opatřit reflexními páskami, jejichž vzájemná vzdálenost byla rovna počáteční měřené délce  $L_0 = 50 \text{ mm}$ . Reflexní pásky byly nutností pro měření protažení pomocí laserového průtahoměru.



*Obr. 58 Zkušební stroj LabTest a způsob upnutí vzorků*



*Obr. 59 Detail upnutí vzorku při zkoušce tahem*

**Tab. 26 Technické údaje zkušebního stroje LabTest Model 5.100SP1**

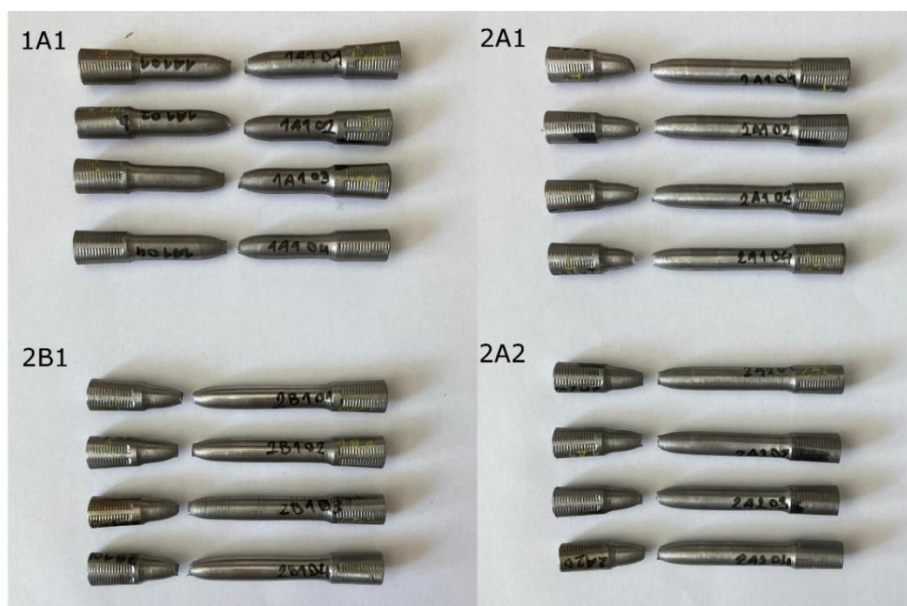
Technická data	Jednotky	5.1002P1
Jmenovité zatížení	kN	100
Min. zkušební rychlost	mm.min <sup>-1</sup>	0,001
Max. zkušební rychlost	mm.min <sup>-1</sup>	600
Návratová rychlost	mm.min <sup>-1</sup>	600
Přesnost řízení rychlosti	%	±0,5
Rozlišení polohy příčnicku	µm	1
Opakovatelnost změny	µm	2
Výška pracovního prostoru	mm	1130
Šířka pracovního prostoru	mm	400
Rozměry stroje V x Š x H	mm	2373x920x880
Hmotnost stroje	kg	533
Tuhost rámu	mm.N <sup>-1</sup>	1,6x10 <sup>-6</sup>
Barevná úprava	RAL	9005 elox
Teplota pracovního prostředí	°C	10 – 35
Vlhkost pracovního prostředí	%	20 – 70
Napájecí napětí	V	230V 50/60Hz
Příkon stroje	VA	2200

Shrnuté výsledky tahové zkoušky jsou uvedeny v *tab. 27*, kde jsou porovnány s přípustnými hodnotami. Kompletní tabulky s výsledky jsou uvedeny v *příloze č. 3* (viz příložené CD).

**Tab. 27 Výsledky příčné tahové zkoušky svařů**

Vzorek	Přídavný svařovací materiál	Poloha svařování	Změřené R <sub>m</sub> [N.mm <sup>-2</sup> ]	Přípustné hodnoty R <sub>m</sub> [N.mm <sup>-2</sup> ]	Vyhovuje	Místo lomu
1A1	INEFIL	PA	553	490-630	ano	SK
2B1	KX-706M	PA	564	490-630	ano	ZM
2A1	INEFIL	PF	562	490-630	ano	ZM
2A2	K-71-TLF	PF	564	490-630	ano	ZM

Všechny vzorky splňují kritérium přípustnosti. U plněných elektrod vychází hodnoty pevnosti o něco málo lépe (porušení u plněných elektrod je vždy v ZM)



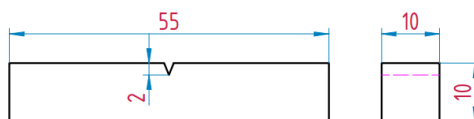
Obr. 60 Zkušební vzorky po provedení příčné zkoušky tahem

## 13.2 Zkouška rázem v ohybu

Další provedenou destruktivní zkouškou byla zkouška rázem v ohybu v souladu s normou ČSN EN ISO 9016 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkouška rázem v ohybu – Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení* [54]. Pro tuto zkoušku byly odebrány zkušební tělesa s V vrubem ve středu svaru (série tři vzorků) a v tepelně ovlivněné oblasti (série tří vzorků).

### 13.2.1 Příprava vzorků pro zkoušku rázem v ohybu

Pro tuto zkoušku bylo nutné odebrat z každého svaru celkem šest zkušebních vzorků – tři s vrubem ve středu svaru (VWS, kde: V = V vrub, W = umístění vrubu v SK, S = poloha) a tři s vrubem v tepelně ovlivněné oblasti (VHS, kde: V = V vrub, H = umístění vrubu v TOO, S = poloha). Byla zvolena varianta, kde je povrch tyče s vrubem rovnoběžný s povrchem zkušebního kusu (poloha S). Standardní zkušební tyč má délku 55 mm a čtvercový průřez o stranách 10 mm. Ve středu délky se nachází vrub tvaru V o hloubce 2 mm. Výkres zkušebního vzorku je uveden na obr. 61.



Obr. 61 Výkres zkušebního vzorku pro zkoušku rázem v ohybu

Polotovary zkušebních tyčí byly vyrobeny na pásových pilách Pilous a Ergonomic (viz obr. 62). Snahou bylo získat polotovary s co nejmenšími přídávky na obrábění.

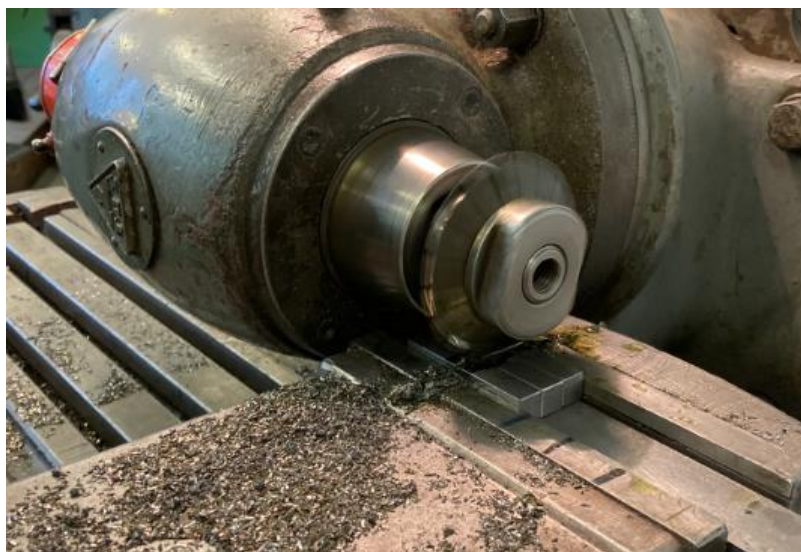


*Obr. 62 Polotovary zkušebních vzorků pro zkoušku rázem v ohybu vyrobené řezáním*

Následně byly polotovary frézovány a broušeny. Na závěr byl vyroben V vrub tvarovou frézou.



*Obr. 63 Obrábění polotovarů pro zkoušku rázem v ohybu: Vlevo frézování a vpravo broušení na plocho*



*Obr. 64 Výroba vrubu frézováním*



*Obr. 65 Hotové zkušební vzorky pro zkoušku rázem v ohybu*

### **13.2.2 Průběh a výsledky zkoušky rázem v ohybu**

Vhledem k tomu, že je základní materiál jakosti S355J2+N, bylo nutné provést zkoušku rázem v ohybu při zkušební teplotě  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Proto byly zkušební vzorky uloženy přes noc do mrazícího boxu, kde byly temperovány na požadovanou teplotu.

Během samotné zkoušky byla důležitá rychlá a přesná manipulace se vzorky při vkládání do zkušebního zařízení. Byla snaha o to, aby se vzorky během manipulace „neohřály“. Zkušebním zařízením pro tuto zkoušku bylo Charpyho kladivo o nominální energii 300 J (viz obr. 66).



**Obr. 66 Zkušební zařízení pro zkoušku rázem v ohybu s uložením zkušebního vzorku**

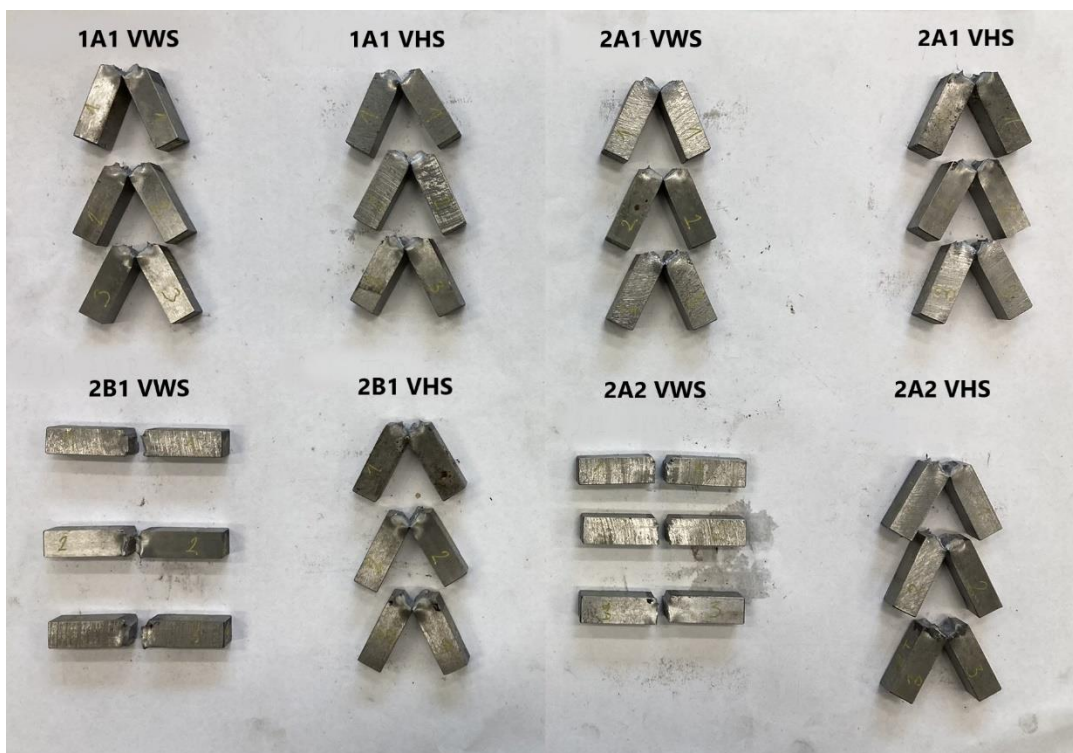
V tab. 28 jsou shrnuty výsledky zkoušky rázem v ohybu. Pro porovnání jsou uvedeny i přípustné hodnoty. Kompletní tabulky jsou uvedeny v příloze č.3 (viz příložené CD).

**Tab. 28 Výsledky zkoušky rázem v ohybu**

Vzorek	Umístění vrubu	KV při -20 °C [J]	Minimální KV při -20 °C [J]
<b>1A1</b>	VWS (SK)	111	27
	VHS (TOO)	177	27
<b>2B1</b>	VWS (SK)	70	27
	VHS (TOO)	150	27
<b>2A1</b>	VWS (SK)	115	27
	VHS (TOO)	138	27
<b>2A2</b>	VWS (SK)	30	27
	VHS (TOO)	121	27



Všechny vzorky splňují kritérium přípustnosti. Skoro ve všech případech výsledky svědčí o tom, že jde o velmi houževnaté spoje. Nicméně u plněných elektrod vycházely podstatně nižší hodnoty nárazové práce, například svarový kov vzorku 2A2, který byl svařován v poloze svislé nahoru elektrodou s rutilovou náplní. Tam byla zaznamenána poměrně nízká, byť stále přípustná hodnota nárazové práce.



*Obr. 67 Zkušební vzorky po provedení zkoušky rázem v ohybu*

### **13.3 Makroskopická kontrola svarů**

Dle normy ČSN EN ISO 17639 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů* [55] byla provedena makroskopická zkouška svarů. Předmětem makroskopické kontroly byly příčné řezy svarů zahrnující svarový kov, tepelně ovlivněnou oblast a základní materiál.

#### **13.3.1 Příprava metalografických výbrusů**

Nejprve byly nahrubo nařezány plátky svařených vzorků na pásové pile Pilous – od každého svařeného vzorku vždy jeden plátek. Tyto plátky byly následně zakráčeny z obou stran metalografickou kotoučovou bruskou Struers Labotom-3, aby je bylo možné umístit do formy pro zalití akrylovou pryskyřicí. Následovalo zalití zkušebních vzorků akrylovou dvousložkovou pryskyřicí VersoCit-2. Po dokonalém vytvrzení pryskyřice přišlo na řadu broušení. Pro broušení byla použita brusná plátina s odstupňovanými

zrnitostmi: 80, 180, 1200 a 2000. Po broušení byly vzorky leštěny pomocí sady leštících kotoučů, na něž byly postupně nanášeny leštící suspenze – diamantová suspenze Masterprep. Pro broušení a leštění byla použita bruska Beta Grinder-Polisher od firmy Buehler. Po řádném vyleštění neobsahující škrábance byly vzorky máčením leptány. Použitým leptadlem byl Nital (2% roztok  $\text{HNO}_3$  v ethanolu).



**Obr. 68** Nařezané plátky (vlevo) a postup zakracování vzorků na metalografické kotoučové pile (vpravo)



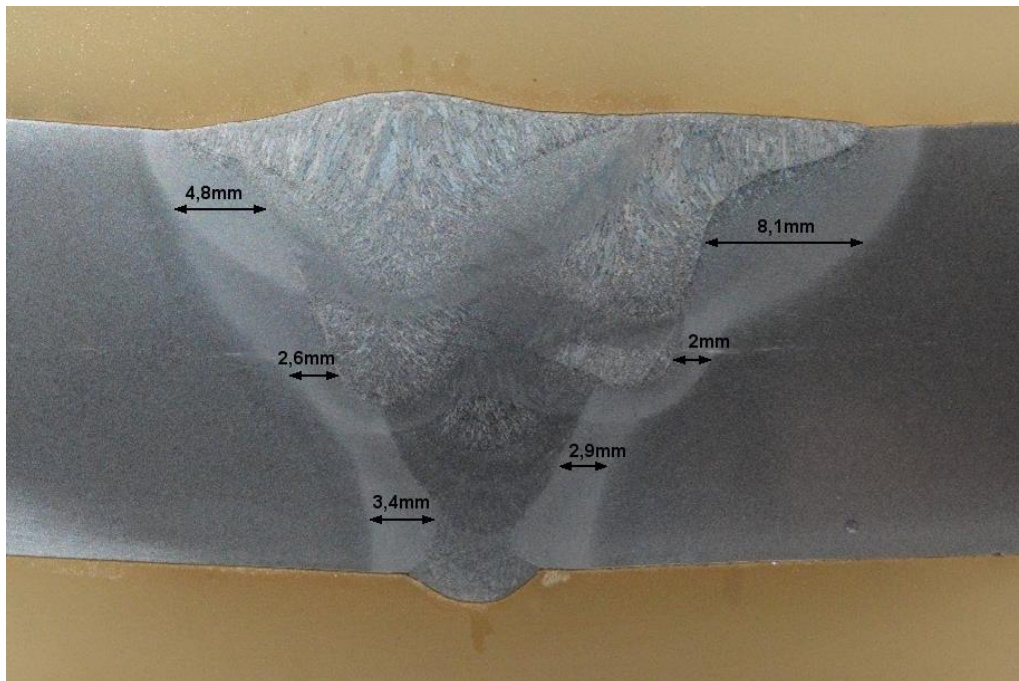
**Obr. 69** Vzorky připravené pro zalití akrylovou pryskyřicí VersoCit-2 (vlevo) a broušení vzorků (vpravo)



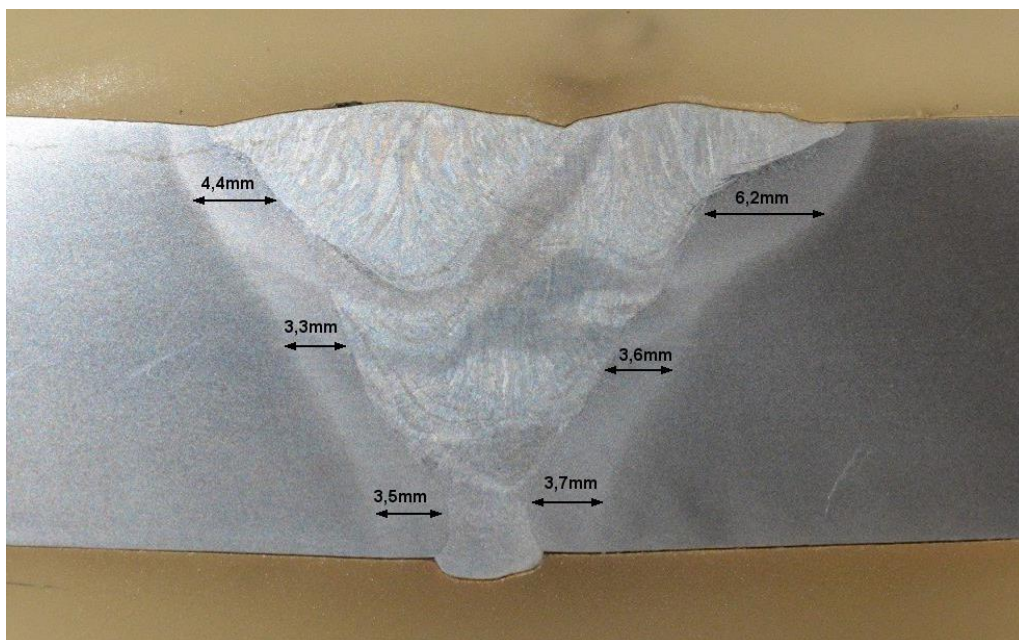
**Obr. 70** Hotové metalografické výbrusy svarových spojů

### 13.3.2 Výsledky

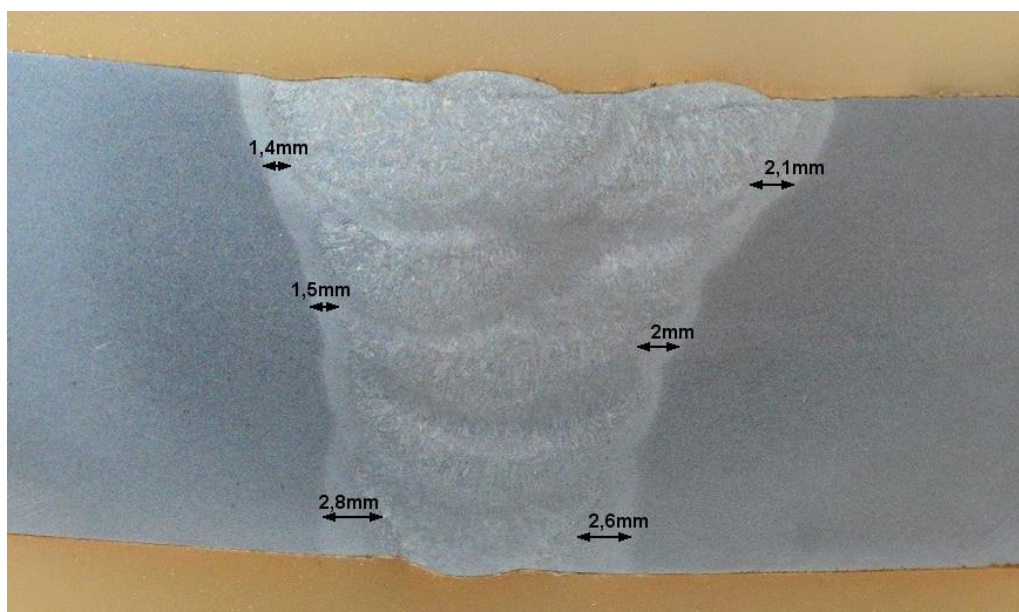
Pro makroskopické vyhodnocení metalografických výbrusů svarových spojů byly pořízeny digitální zrcadlovkou fotografie (viz obr. 71 - 73).



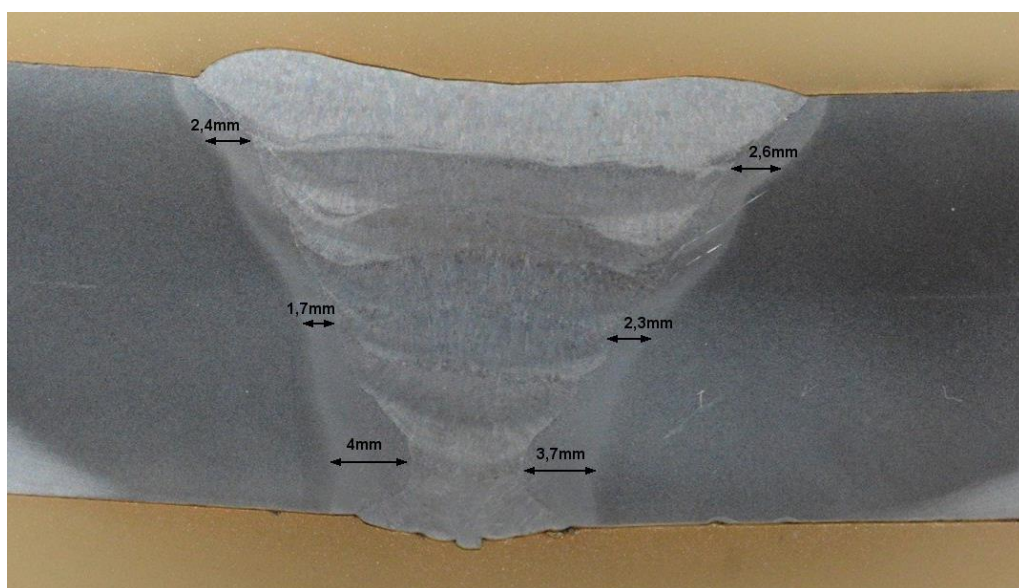
*Obr. 71 Makro vzorku 1A1*



*Obr. 72 Makro vzorku 2B1*



*Obr. 73 Makro vzorku 2A1*



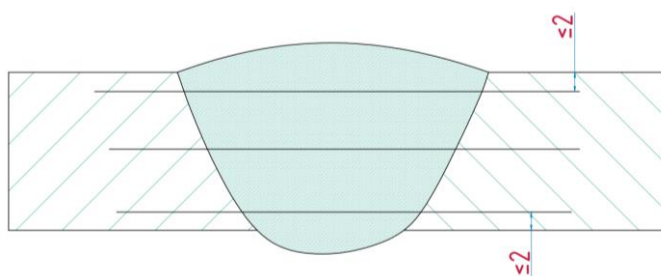
*Obr. 74 Makro vzorku 2A2*

Díky makroskopické kontrole bylo možné prohlédnout vnitřní makrostrukturu svarů. Byl kontrolován způsob kladení svarových housenek, hranice ztavení, šířka tepelně ovlivněné oblasti a možnost výskytu vnitřních vad. Vyjma svaru 1A1 vykazují ostatní svary pravidelnou hranici ztavení. U svarů 1A1 a 2B1 je také pozorovatelná podstatně větší tepelně ovlivněná oblast v porovnání s ostatními svary. To je způsobeno větším tepelným příkonem. V kořenové části svaru 2B1 je pozorovatelný strmý přechod mezi povrchem kořene svaru a základním materiálem, pravděpodobně způsobený kombinací

nadbytečného otupení svarových ploch a použití keramické podložky. Dle přiložených fotografií lze říci, že se ve svarech nenachází žádné vnitřní vady.

### 13.4 Zkoušení tvrdosti

Na vytvořených makrovýbrusech svarových spojů byla provedena zkouška tvrdosti podle Vickerse HV10 v souladu s normou ČSN EN ISO 9015-1 - *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Zkoušení tvrdosti – Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním* [56]. Zkouška tvrdosti byla provedena ve zkušební laboratoři JETE TARC. Aby mohla být tvrdost vyhodnocena, bylo nutné provést celkem tři linie vpichů napříč celým svarem. První linie vedla pod povrchem svaru ve vzdálenosti ne větší než 2 mm od povrchu svaru. Druhá linie vedla prostředkem svaru. Poslední linie vedla kořenovou částí svaru ve vzdálenosti opět ne větší než 2 mm od povrch svaru ze strany kořene. V každé linii bylo provedeno 19 vpichů. Vedení linií je nastíněno na obr. 75.



Obr. 75 Linie vtisků

Pro vyhodnocení byl použit automatizovaný tvrdoměr Wilson VH3100 od firmy Buehler s indentorem 256 HV 10.



Obr. 76 Tvrdoměr Wilson VH3100

V *tab. 29* jsou uvedeny střední hodnoty naměřených tvrdostí svarového kovu, tepelně ovlivněné oblasti (oboustranně) a základního materiálu (oboustranně). Maximální přípustná hodnota tvrdosti podle Vickerse pro ocel S355J2+N je 320 HV10. Zprávy o provedení zkoušek se zobrazenými místy vpichů jsou uvedeny v *příloze č.3* (viz příložené CD).

**Tab. 29 Střední hodnoty tvrdostí svarů podle Vickerse HV10**

	Linie	Levý ZM	Levá TOO	SK	Pravá TOO	Pravý ZM	Přípustná hodnota
<b>1A1</b>	<b>1.</b>	159	201	198	202	167	320
	<b>2.</b>	166	192	181	206	180	320
	<b>3.</b>	175	185	167	186	175	320
<b>2B1</b>	<b>1.</b>	153	201	228	220	163	320
	<b>2.</b>	162	192	203	207	172	320
	<b>3.</b>	165	184	206	180	171	320
<b>2A1</b>	<b>1.</b>	157	211	210	208	158	320
	<b>2.</b>	170	208	193	207	167	320
	<b>3.</b>	166	213	187	203	166	320
<b>2A2</b>	<b>1.</b>	162	211	227	212	169	320
	<b>2.</b>	166	194	210	203	182	320
	<b>3.</b>	174	203	209	200	173	320

V žádné z uvedených oblastí vzorku nebyla naměřena větší hodnota tvrdosti, než je maximální přípustná hodnota 320 HV10. Svary tedy v tomto ohledu vyhovují.

## 14 Technicko-ekonomické hodnocení

Bylo provedeno technicko-ekonomické hodnocení všech použitých metod svařování. Pro kalkulace byly použity ceny a sazby s ohledem na dění na dnešním trhu.

Náklady na zhotovení svarů se skládají ze tří složek: mzdové a režijní náklady vztažené na svářeče ( $N_{mz}$ ), náklady na přídavný materiál ( $N_{pm}$ ) a náklady na ochranné plyny ( $N_{op}$ ).

### 14.1 Mzdové a režijní náklady na svářeče

Mzdové a režijní náklady na svářeče  $N_{mz}$  jsou stanoveny dle vztahu:

$$N_{mz} = \frac{HS}{P_{tav} \cdot t_{využ}} \text{ (Kč.kg}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

Kde:

$HS$  je hodinová sazba svářeče (Kč.hod<sup>-1</sup>). Hodinová sazba je dána mzdovými náklady; odvody z mezd a režijními náklady. V našem případě je to přibližně 500 Kč.hod<sup>-1</sup>;

$P_{tav}$  je výkon odtavení svarového kovu (kg.hod<sup>-1</sup>), který závisí na použité metodě, svařovacích parametrech a velikosti, resp. průměru elektrody;

$t_{využ}$  je časové využití fondu pracovní doby pro svařování. Pro poloautomatické svařování metodami MAG, FCAW a MCAW se pohybuje okolo 30 %.

Pro svaření vzorků byly stanoveny výkony odtavení a následně vypočítány mzdové a režijní náklady na svářeče dle vztahu (6) (viz tab. 30).

**Tab. 30 Časy svařování, výkony odtavení, mzdové a režijní náklady na svářeče**

vzorek	$t_s$ [min]	$P_{tav}$ [kg.hod <sup>-1</sup> ]	$N_{mz}$ [Kč.kg <sup>-1</sup> ]
<b>1A1 (INEFIL)</b>	14,62	4,27	373
<b>2B1 (KX-706M)</b>	12,04	5,65	272
<b>2A1 (INEFIL)</b>	39,70	1,74	958
<b>2A2 (K-71TLF)</b>	21,66	3,24	514

## 14.2 Náklady na přídavný materiál

Náklady na přídavný materiál  $N_{pm}$  jsou stanoveny dle vztahu:

$$N_{pm} = \frac{C_{sv}}{V_{sv}} \text{ (Kč.kg}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Kde:

$C_{sv}$  je cena přídavného materiálu (Kč.kg<sup>-1</sup>). Ceny byly zjištěny dle aktuálního ceníku;

$V_{sv}$  je využití přídavného materiálu. Závisí na konkrétním druhu PM.

Ceny přídavných materiálů, jejich využití a dopočítané náklady na PM dle vztahu (7) jsou uvedeny v *tab. 31*.

**Tab. 31 Ceny přídavných materiálů, využití PM a náklady na PM**

vzorek	$C_{sv}$ [Kč.kg <sup>-1</sup> ]	$V_{sv}$ [-]	$N_{pm}$ [Kč.kg <sup>-1</sup> ]
<b>1A1 (INEFIL)</b>	100	0,96	104
<b>2B1 (KX-706M)</b>	180	0,93	194
<b>2A1 (INEFIL)</b>	100	0,96	104
<b>2A2 (K-71TLF)</b>	176	0,86	204

## 14.3 Náklady na ochranné plyny

Náklady na ochranné plyny  $N_{op}$  jsou stanoveny dle vztahu:

$$N_{op} = \frac{Q_{plyn} \cdot C_{plyn}}{P_{tav}} \text{ (Kč.kg}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

Kde:

$Q_{plyn}$  je průtočné množství ochranného plynu (l.hod<sup>-1</sup>). Při svařování všech vzorků byl průtok plynu 15-16 l.min<sup>-1</sup>. Při přepočtu na hodinový průtok byla použita horní hranice, tedy 60x16=960 l.hod<sup>-1</sup>;

$C_{plyn}$  je cena plynu (Kč.l<sup>-1</sup>). Cena směsi M21 dle ČSN EN ISO 14175 (18 % CO<sub>2</sub> + 82 % Ar) je 0,49 Kč.l<sup>-1</sup>. (Zisk ze svazku 16 lahví s cenou 95 800 Kč je 196 000 l. Podělením těchto dvou hodnot je získána cena plynu v Kč.l<sup>-1</sup> )

$P_{tav}$  je výkon odtavení svarového kovu (kg.hod<sup>-1</sup>). Hodnoty jsou uvedeny v textu výše.

Průtočné množství plynu, cena plynu a dopočítané náklady na ochranné plyny dle vztahu (8) jsou uvedeny v *tab. 32*.



**Tab. 32 Průtočné množství plynu, cena plynu a náklady na ochranné plyny**

vzorek	$Q_{\text{plyn}} [\text{l.hod}^{-1}]$	$C_{\text{plyn}} [\text{Kč.l}^{-1}]$	$N_{\text{op}} [\text{Kč.kg}^{-1}]$
1A1 (INEFIL)	960	0,49	105
2B1 (KX-706M)	960	0,49	77
2A1 (INEFIL)	960	0,49	270
2A2 (K-71TLF)	960	0,49	145

#### 14.4 Celkové náklady na zhotovení svaru

Celkové náklady na svar  $N_c$  jsou součtem dílčích položek.

$$N_c = N_{mz} + N_{pm} + N_{op} \quad (\text{Kč.kg}^{-1}) \quad (9)$$

Celkové náklady na zhotovení svarů jsou shrnuty v *tab. 33*.

**Tab. 33 Celkové náklady na zhotovení svarů**

vzorek	$N_{mz} [\text{Kč.kg}^{-1}]$	$N_{pm} [\text{Kč.kg}^{-1}]$	$N_{op} [\text{Kč.kg}^{-1}]$	$N_c [\text{Kč.kg}^{-1}]$
1A1 (INEFIL)	373	104	105	582
2B1 (KX-706M)	272	194	77	543
2A1 (INEFIL)	958	104	270	1332
2A2 (K-71TLF)	514	204	145	863

Celkové náklady jsou vztaženy na jednotku hmotnosti svaru. Protože byly vytvořeny svary s různými úpravami svarových ploch, je směrodatné přepočítat výsledné celkové náklady na jednotku délky ( $N_{cl}$ ).

$$N_{cl} = N_c \cdot m_{sv} \quad (\text{Kč.m}^{-1}) \quad (10)$$

Kde:

$N_c$  jsou celkové náklady na výrobu svaru ( $\text{Kč.kg}^{-1}$ ) (viz *tab. 33*).

$m_{sk}$  je hmotnost svarového kovu vztažena na jednotku délku ( $\text{kg.m}^{-1}$ ). Hmotnost svarového kovu je závislá hlavně na úpravě svarových ploch, resp. objemu svarového kovu.

Při svařování vzorků 2B1 a 2A2 byly použity keramické podložky. Jejich cena se pohybuje okolo  $70 \text{ Kč.m}^{-1}$ . Tuto cenu je nutné přičíst k celkovým nákladům  $N_{cl}$ .

Stanovené hmotnosti dle úpravy svarových ploch vzorků společně s přepočítanými náklady dle vztahu (8) jsou uvedeny v *tab. 34*.

**Tab. 34 Hmotnosti svarových kovů a náklady vztažené na jednotku délky**

<b>vzorek</b>	<b><math>m_{sv}</math> [kg.m<sup>-1</sup>]</b>	<b><math>N_{el}</math> [Kč.m<sup>-1</sup>]</b>
<b>1A1 (INEFIL)</b>	2,47	1438
<b>2B1 (KX-706M)</b>	2,66	1514
<b>2A1 (INEFIL)</b>	2,09	2784
<b>2A2 (K-71TLF)</b>	2,88	2555

Dle vypočítaných nákladů se plněná elektroda s kovovým práškem (KX-706M) nejeví jako vhodná volba, která by mohla nahradit drát plného průřezu (INEFIL). Nicméně rozdíl mezi náklady není tak velký. Díky dobrým vlastnostem plněné elektrody by bylo možné zmenšit úhel rozevření svarových ploch se zachováním stejných kvalit výsledného svaru, a tím tak snížit objem svarového kovu, resp. jeho hmotnost, což by se projevilo i snížením nákladů.

V případě plněné elektrody s rutilovou náplní (K-71TLF) je rozdíl nákladů markantnější. Plněná elektroda se v porovnání s drátem plného průřezu jeví jako levnější varianta. Opět by bylo možné ještě snížit náklady patřičnou úpravou svarových ploch. Při svařování s plněnými elektrodami s rutilovou náplní je ovšem nutné počítat s úpravami po svaření (odstranění strusky), což se projevuje zvýšením nákladů na svar. Nicméně nepůjde o tak zásadní navýšení, které by postavilo plněné elektrody do nevýhodné pozice proti drátům plného průřezu.

## 15 Závěr

V teoretické části byly popsány základní materiály používané při výrobě komponent vodních turbín ve firmě Baest. Dále byla vysvětlena teorie obloukového svařování s konkrétním případem svařování v ochranných atmosférách – metoda MAG. V teoretické části byla také dopodrobna rozebrána problematika použití plněných elektrod (metody FCAW a MCAW).

Pro posouzení, jestli je možné zvýšit efektivitu svařování použitím plněných elektrod, byly v praktické části vytvořeny čtyři tupé svarové spoje typu V oceli S355J2+N, které byly rozděleny do dvojic podle polohy svařování (PA, PF). V rámci každé dvojice byla porovnávána stávající metoda svařování (MAG) s metodou využívající plněné elektrody (FCAW, MCAW).

Pro kvalitativní vyhodnocení svarových spojů byly vybrány základní nedestruktivní a destruktivní zkoušky, které předepisuje norma ČSN EN ISO 15614-1, Z nedestruktivních zkoušek byly provedeny: vizuální zkouška a kapilární zkouška. Z destruktivních zkoušek byly provedeny: příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu, makroskopická kontrola svarů a zkouška tvrdosti dle Vickerse HV10.

Ve všech případech provedených výše zmíněných zkoušek, byly svarové spoje vyhodnoceny jako vyhovující. Nicméně v případě tahových zkoušek vyšly u vzorků svařovaných plněnými elektrodami o něco málo vyšší hodnoty meze pevnosti než u vzorků svařovaných standardním drátem plného průřezu. Na druhou stranu při zkoušce rázem v ohybu vyšly u plněných elektrod nižší hodnoty nárazové práce a vyšší hodnoty tvrdosti než u drátu plného průřezu. To může být zapříčiněno poměrně velkým tepelným příkonem během svařování v důsledku vyšších svařovacích parametrů.

Na úkor horších výše zmíněných mechanických vlastností se podařilo u plněných elektrod zvýšit rychlost svařování, resp. snížit počet svarových housenek. Což vede ke zvýšení produktivity při svařování.

Dále bylo provedeno technicko-ekonomické hodnocení, které stanovuje náklady na zhotovení svarových spojů. Dle dosažených výsledků lze konstatovat, že pro svařování v poloze PA byly náklady na výrobu svarů plněnou elektrodou s kovovým práškem nepatrně vyšší než při použití drátu plného průřezu. Pokud změním úpravu svarových ploch, resp. zmenšíme úhel rozevření, snížíme tím objem svarového kovu, resp. jeho hmotnost, což se projeví snížením nákladů při zachování kvalit výsledného svaru.

V případě vzorků svařovaných v poloze PF byl rozdíl výsledů markantnější. Náklady na svařování plněnou elektrodou s rutilovou náplní vychází nižší než u drátu plného průřezu. Náklady by bylo možné ještě snížit patřičnou úpravou svarových ploch. Je však nutné počítat s úpravami po svaření (odstranění strusky), které se projeví mírným zvýšením nákladů na svar. Nicméně svařování pomocí plněné elektrody s rutilovou náplní ve vynucené poloze bude ve výsledku stále výhodnější variantou.

Závěrem lze říci, že je možné použitím plněných elektrod, i přes jejich vyšší cenu, zvýšit efektivitu svařování, ale pouze za předpokladu vhodně navržené úpravy svarových ploch. S případnou změnou přídavných materiálů ve výrobě je nutné provést novou kvalifikaci svarových spojů (WPQR).

## Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 40 s. Třídící znak 42 0011.
- [2] ČSN EN 10027-2. *Systémy označování ocelí - Část 2: Systém číselného označování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016, 24 s. Třídící znak 42 0011.
- [3] S355J2+N Steel Plates. In: *Prosaic: Steel and Alloys* [online]. 2010 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: [https://www.prosaicsteel.com/s355\\_j2\\_n\\_en10025\\_2\\_structural\\_steel\\_plates.html](https://www.prosaicsteel.com/s355_j2_n_en10025_2_structural_steel_plates.html)
- [4] Přehled vlastností oceli S355J2. In: *Bolzano* [online]. 2020 [cit. 2022-07-12]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [5] LIAN, J, J WU a S MÜNSTERMANN. Evaluation of the cold formability of high-strength low-alloy steel plates with the modified Bai–Wierzbicki damage model. *International Journal of Damage Mechanics* [online]. 2015, **24**(3), 383-417 [cit. 2022-07-12]. ISSN 1056-7895. Dostupné z: doi:10.1177/1056789514537587
- [6] DIN EN 1.4301 Stainless Steel X5CrNi18-10 Material Equivalent, Properties, Chemical Composition. In: *The World Material* [online]. 2022 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.theworldmaterial.com/din-en-1-4301-material-x5crni18-10-stainless-steel/>
- [7] Stainless Steel 304L - 1.4307 Data Sheet. In: *Thyssenkrupp Materials (UK) - engineering. tomorrow. together* [online]. 2022 [cit. 2022-07-13]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials.co.uk/stainless-steel-304l-14307.html>

- [8] X2CrNi18-9 / 1.4307 - SteelNumber - Chemical composition, equivalent, properties. In: *EUROPEAN STEEL AND ALLOY GRADES* [online]. [cit. 2022-07-13]. Dostupné z:  
[http://www.steelnumber.com/en/steel\\_composition\\_eu.php?name\\_id=97](http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=97)
- [9] *Katalog přídatných materiálů pro svařování* [online]. 5. přepr. Vamberk: ESAB VAMBERK,s.r.o., 2012 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z:  
[http://www.nastrojecz.cz/dodavatele/nastrojecz\\_katalog-esab.pdf](http://www.nastrojecz.cz/dodavatele/nastrojecz_katalog-esab.pdf)
- [10] Co je to oblouk a jak funguje obloukové svařování?. In: *Perfect Welding Blog* [online]. 2021 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z:  
<https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/funguje-obloukove-svarovani/>
- [11] KOLAŘÍK, Ladislav. *Elektrický oblouk*. [přednáška]. ČVUT, Ústav strojírenské technologie - Technologie svařování, 2016.
- [12] Polarity in Arc Welding – Straight, Reverse & Alternating Polarity. In: *Minaprem.com* [online]. 2018 [cit. 2022-08-07]. Dostupné z:  
<http://www.minaprem.com/joining/welding/polarity/polarity-in-arc-welding-straight-reverse-alternating-polarity/>
- [13] ČSN EN ISO 4063. *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 24 s. Třídící znak 050011.
- [14] JEFFUS, Larry. *Welding: Principles and Applications*. 8th ed. USA: Cengage Learning, 2016. ISBN 978-1-3054-9469-5.
- [15] KOLAŘÍK, Ladislav. *Zdroje pro svařování elektrickým obloukem*. [přednáška]. ČVUT, Ústav strojírenské technologie - Technologie svařování, 2016.
- [16] Handbook - Power Supply. In: *Welding Equipment ESAB North America* [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z:  
[https://www.esabna.com/euweb/mig\\_handbook/592mig3\\_1.htm](https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig3_1.htm)
- [17] SEMA 2011: Lincoln Electric Expands Enthusiasts' Options. In: *Dragzine* [online]. [cit. 2022-08-04]. Dostupné z:  
<https://www.dragzine.com/features/sema-2011-lincoln-electric-expands-enthusiasts-options/>

- [18] UNIMIG 8M 360 AMP AIR COOLED PUSH PULL MIG TORCH GUN - 24V. In: *HAMPDON: Welding and gas supplies* [online]. [cit. 2022-08-04]. Dostupné z: <https://www.hampdon.com.au/Unimig-Air-Cooled-Push-Pull-Suregrip-Series-MIG-Torch-360AMP>
- [19] Gas Metal Arc Welding Basics:: Welding Current & Welding Voltage. In: *EWI* [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-welding-current-welding-voltage/>
- [20] MYERS SR, L. W. *Everyday Pocket Handbook for Gas Metal Arc Welding (GMAW) and Flux Cored Arc Welding (FCAW)* [online]. USA: American Welding Society (AWS), 1997 [cit. 2022-07-19]. ISBN 978-1-61344-490-0. Dostupné z: <https://app.knovel.com/kn/resources/kpEPHGMAW1/toc>
- [21] KRUNCIPÁL, J. *Teorie svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1986, 272 s.
- [22] Gas Metal Arc Welding Basics: Travel Speed and Contact to Work Distance (CTWD). In: *EWI* [online]. [cit. 2022-07-20]. Dostupné z: <https://ewi.org/gas-metal-arc-welding-basics-travel-speed-and-contact-to-work-distance-ctwd/>
- [23] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [24] KOLAŘÍK, Ladislav. *Svařování metodou MIG / MAG*. [přednáška]. ČVUT, Ústav strojírenské technologie - Technologie svařování, 2016.
- [25] Selecting the Right Welding Transfer Modes. In: *HOBART Filler Metals* [online]. 2021 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [doi:10.29391/2021.100.024](https://doi.org/10.29391/2021.100.024)
- [26] WAHAB, M.A. Manual Metal Arc Welding and Gas Metal Arc Welding. *Comprehensive Materials Processing*. Elsevier, 2014, 49-76. ISBN 9780080965338. Dostupné z: [doi:10.1016/B978-0-08-096532-1.00610-5](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00610-5)
- [27] ČSN EN ISO 14341. *Svařovací materiály - Drátové elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí v ochranném plynu a jejich svarové kovy - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 20 s. Třídící znak 05 5311.

- [28] ČSN EN ISO 14343. *Svařovací materiály - Drátové elektrody, páskové elektrody, dráty a tyče pro obloukové svařování korozivzdorných a žáruvzdorných ocelí - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 24 s. Třídící znak 05 5314.
- [29] What's non-copper coated welding wire?. In: *Welder Metals* [online]. [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: <https://www.weldermetals.com/whats-non-copper-coated-welding-wire/>
- [30] ESAB OK AristoRod 12.50 - drát na ocel (G3Si1) - 1,2 mm/18 kg. In: *SVÁŘEČKY-ELEKTRODY.CZ - profesionální e-shop se svařovací technikou* [online]. [cit. 2022-07-19]. Dostupné z: [https://www.svarecky-elektrody.cz/esab-ok-aristorod-12-50-drat-na-ocel-g3si1-1-2-mm-18-kg-cena-za-kg/d-18812?gclid=CjwKCAjwrNmWBhA4EiwAHbjEQL1A10jLGeuOkYWhEQf9uuc9xCkgjuEZaFhbrXE5hn3mrqpr2SqHOhoCVdkQAvD\\_BwE](https://www.svarecky-elektrody.cz/esab-ok-aristorod-12-50-drat-na-ocel-g3si1-1-2-mm-18-kg-cena-za-kg/d-18812?gclid=CjwKCAjwrNmWBhA4EiwAHbjEQL1A10jLGeuOkYWhEQf9uuc9xCkgjuEZaFhbrXE5hn3mrqpr2SqHOhoCVdkQAvD_BwE)
- [31] The role of gas in welding processes. In: *Welding Academy* [online]. 2020 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://weldingacademy.online/2020/01/28/the-role-of-gas-in-welding-processes/>
- [32] Welding Gases: Different Types & Their Uses. In: *Weld Guru* [online]. 2022 [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: <https://weldguru.com/welding-gas/>
- [33] ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 12 s. Třídící znak 05 2510.
- [34] KOLAŘÍK, Ladislav. *Úvod do svařování v ochranných atmosférách*. [přednáška]. ČVUT, Ústav strojírenské technologie - Technologie svařování, 2016.
- [35] Aktivní ochranné plyny pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. In: *Techportál.cz* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR\\_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a\\_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydMpOILsnjdZ575N8MGgz73w](https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydMpOILsnjdZ575N8MGgz73w)



- [36] ISO 14175 - Plyny a směsi plynů pro tavné svařování a příbuzné procesy. In: *STAHLBEN - Svařovací technika a příslušenství* [online]. [cit. 2022-07-04]. Dostupné z: [http://www.stahlben.cz/page.php?id=standard\\_iso\\_14175](http://www.stahlben.cz/page.php?id=standard_iso_14175)
- [37] *Flux Cored Arc Welding*. 3rd ed. Ohio, USA: Hobart Institute of Welding Technology, 2012. ISBN 978-1-936058-18-1.
- [38] Everything You Need To Know About Weld Slag (And Why You Should Know It). In: *Hobart Brothers: Filler Metals* [online]. 2021 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.hobartbrothers.com/>
- [39] Flux Cored Wires - Self Shielded vs Gas Shielded. In: *Welding Industries of Australia - For All Your Welding Needs* [online]. [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.welding.com.au/news/view/flux-cored-wires-self-shielded-vs-gas-shielded>
- [40] Flux Cored Arc Welding. In: *Weld Guru* [online]. 2006 [cit. 2022-07-21]. Dostupné z: <https://www.weldguru.com/support-files/flux-cored-arc-welding.pdf>
- [41] ČSN EN ISO 17632. *Svařovací materiály - Plněné elektrody pro obloukové svařování nelegovaných a jemnozrnných ocelí s ochranou plynu a bez ochrany plynu - Klasifikace*. In: . Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019, 32 s. Třídící znak 05 5501.
- [42] ČSN EN ISO 6947. *Svařování a příbuzné procesy - Polohy svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 24 s. Třídící znak 05 0024.
- [43] ČSN EN ISO 17633. *Svařovací materiály - Plněné elektrody pro obloukové svařování korozivzdorných a žárupevných ocelí s přívodem a bez přívodu ochranného plynu - Klasifikace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 5503.
- [44] Flux-Cored or Metal-Cored Wires: Which is Right for the Job?. In: *Hobart Brothers: Filler Metals* [online]. 2015 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://www.hobartbrothers.com/2015/03/flux-cored-or-metal-cored-wires-which-is-right-for-the-job/>

- [45] Is metal-cored wire the best choice?. In: *ITW Welding Singapore* [online]. 2021 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://sea.itwwelding.com/Article/20/Article-Metal-Cored-Wire-the-Best-Choice-for-Your-Welding-Operations>
- [46] Flux Cored Welding Wire Manufacturing. In: *WESPEC* [online]. 2020 [cit. 2022-08-08]. Dostupné z: <https://wespec.net/production-of-flux-cored-arc-welding/>
- [47] VOESTALPINE BÖHLER WELDING. *Ceramic Backings And Their Application* [pdf katalog]. 2018. Dostupné také z: <https://www.voestalpine.com/welding/content/download/3622/58332/file/Ceramic+Backings+And+Their+Applications.pdf>
- [48] ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 0313.
- [49] Návod k obsluze: Svařovací zdroj MIG/MAG. In: *Fronius* [online]. [cit. 2022-08-12]. Dostupné z: <https://fronius.com/~/.downloads/Perfect%20Welding/Operating%20Instructions/42%2C0426%2C0001%2CCS.pdf>
- [50] ČSN EN 1011-1. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009, 16 s. Třídící znak 05 2210.
- [51] ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018, 16 s. Třídící znak 05 1180.
- [52] ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021, 28 s. Třídící znak 01 5018.

- [53] ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s. Třídící znak 05 1121.
- [54] ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s. Třídící znak 05 1125.
- [55] ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 12 s. Třídící znak 05 1128.
- [56] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s. Třídící znak 05 1134.

## Seznam obrázků

Obr. 1 Mikrostruktura S355J2+N po válcování .....	15
Obr. 2 Schematické znázornění metody MAG a nutného zařízení a vybavení .....	21
Obr. 3 Plochá statická charakteristika zdroje .....	22
Obr. 4 Podavač svařovacího drátu umístěn mimo svařovací zdroj .....	23
Obr. 5 Podavač umístěn v těle hořáku .....	23
Obr. 6 Vodící kladky podavače .....	24
Obr. 7 Skladba svařovacího hořáku .....	24
Obr. 8 Průchod drátu přes kontaktní špičku .....	25
Obr. 9 Závislost svařovacího proudu a rychlosti podávání drátu.....	26
Obr. 10 Vliv svařovacího proudu na geometrii svarové housenky .....	26
Obr. 11 Rozbor vzdáleností .....	27
Obr. 12 Vliv napětí elektrického oblouku na geometrii svarové housenky .....	27
Obr. 13 Vliv svařovací rychlosti na geometrii svarové housenky .....	28
Obr. 14 Změna CTWD .....	29
Obr. 15 Sklon a vedení hořáku: Vlevo vpřed a vpravo vzad .....	29
Obr. 16 Pracovní oblasti pro různé typy přenosu kovu v elektrickém oblouku .....	30
Obr. 17 Zkratový přenos svarového kovu .....	31
Obr. 18 Kapkový přenos svarového kovu .....	31
Obr. 19 Sprechový přenos svarového kovu .....	32
Obr. 20 Pulzní přenos svarového kovu .....	32
Obr. 21 Drátová elektroda .....	36
Obr. 22 Svařování metodou FCAW .....	41
Obr. 23 FCAW-G vs FCAW-S .....	43
Obr. 24 Typy obalů plněných elektrod .....	51
Obr. 25 Druhy keramických podložek .....	55
Obr. 26 Detail keramické podložky .....	55
Obr. 27 CNC pálicí stroj Vanad Bluester ve firmě Baest .....	61
Obr. 28 Vzorky připravené tepelným dělením plazmou .....	61
Obr. 29 Výrobní výkresy vzorků .....	62
Obr. 30 Ukázka úkosů s otupením a bez otupení1 .....	63
Obr. 31 Svařovací zdroj s jednotkou podávání elektrody .....	64
Obr. 32 Příprava mezery mezi plechy .....	66
Obr. 33 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 1A1 .....	67

Obr. 34 Použitý dotykový teploměr GTH 1150 pro kontrolu teploty interpass.....	68
Obr. 35 Hotový vzorek 1A1 – pohled na krycí vrstvu svarového spoje .....	68
Obr. 36 Podlepení kořene keramickou podložkou NST Keback FR 271009T .....	69
Obr. 37 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2B1.....	70
Obr. 38 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2A1 .....	71
Obr. 39 Způsob kladení svarových housenek u vzorku 2A2 .....	73
Obr. 40 Příprava vzorku 2A2 na svařování v poloze PF.....	73
Obr. 41 Podlepení kořene keramickou podložkou NST Kerback FS 271412T .....	74
Obr. 42 Vybrušování strusky .....	75
Obr. 43 Průběh svařování vzorku 2A2.....	75
Obr. 44 Vizualní kontrola vzorku 1A1 .....	76
Obr. 45 Vizualní kontrola vzorku 2B1.....	77
Obr. 46 Vizualní kontrola vzorku 2A1 .....	77
Obr. 47 Vizualní kontrola vzorku 2A2 .....	77
Obr. 48 Vizualní kontrola kořenové vrstvy.....	78
Obr. 49 Kapilární zkouška vzorku 2A2 .....	78
Obr. 50 Kapilární zkouška vzorku 2A1 .....	79
Obr. 51 Kapilární zkouška vzorku 1A1 .....	79
Obr. 52 Kapilární zkouška vzorku 2B1.....	79
Obr. 53 Výkres zkušební vzorku pro tahovou zkoušku .....	80
Obr. 54 Výroba polotovarů zkušebních vzorků pro tahovou zkoušku.....	81
Obr. 55 Soustružení zkušebních vzorků.....	81
Obr. 56 Stav zkušební vzorku po hrubování a po obrobení na konečný tvar.....	82
Obr. 57 Hotové zkušební vzorky pro tahovou zkoušku .....	82
Obr. 58 Zkušební stroj LabTest a způsob upnutí vzorků .....	83
Obr. 59 Detail upnutí vzorku při zkoušce tahem .....	83
Obr. 60 Zkušební vzorky po provedení příčné zkoušky tahem.....	85
Obr. 61 Výkres zkušební vzorku pro zkoušku rázem v ohybu .....	85
Obr. 62 Polotovary zkušebních vzorků pro zkoušku rázem v ohybu vyrobené řezáním.....	86
Obr. 63 Obrábění polotovarů pro zkoušku rázem v ohybu .....	86
Obr. 64 Výroba vrubu frézováním .....	87
Obr. 65 Hotové zkušební vzorky pro zkoušku rázem v ohybu .....	87
Obr. 66 Zkušební zařízení pro zkoušku rázem v ohybu s uložením zkušební vzorku .....	88
Obr. 67 Zkušební vzorky po provedení zkoušky rázem v ohybu.....	89

Obr. 68 Nařezané plátky a postup zakracování vzorků na metalografické kotoučové pile .....	90
Obr. 69 Vzorky připravené pro zalití akrylovou pryskyřicí VersoCit-2 a broušení vzorků.....	90
Obr. 70 Hotové metalografické výbrusy svarových spojů .....	90
Obr. 71 Makro vzorku 1A1 .....	91
Obr. 72 Makro vzorku 2B1 .....	91
Obr. 73 Makro vzorku 2A1 .....	92
Obr. 74 Makro vzorku 2A2 .....	92
Obr. 75 Linie vtisků .....	93
Obr. 76 Tvrdoměr Wilson VH3100 .....	93

## Seznam tabulek

Tab. 1 Chemické složení oceli S355J2+N v hm. % .....	15
Tab. 2 Mechanické vlastnosti S355J2+N .....	16
Tab. 3 Chemická složení EN 1.4301 a EN 1.4307 v hm. % .....	17
Tab. 4 Mechanické vlastnosti EN 1.4301 a EN 1.4307 .....	17
Tab. 5 Chemické složení drátových elektrod podle klasifikačního systému A v hm. % .....	33
Tab. 6 Mechanické vlastnosti drátových elektrod.....	34
Tab. 7 Chemická složení v hm. %.....	35
Tab. 8 Mechanické vlastnosti.....	35
Tab. 9 Směsi plynů.....	39
Tab. 10 Mechanické vlastnosti plněných drátových elektrod .....	44
Tab. 11 Chemická složení plněných elektrod v hm. % .....	45
Tab. 12 Označení polohy svařování.....	45
Tab. 13 Označení obsahu vodíku v čistém svarovém kovu .....	46
Tab. 14 Chemická složení 308L a 309L v hm. % .....	49
Tab. 15 Mechanické vlastnosti 308L a 309L .....	49
Tab. 16 Chemické složení oceli S355J2+N v hm .....	58
Tab. 17 Mechanické vlastnosti.....	58
Tab. 18 Chemická složení elektrod v hm. % .....	59
Tab. 19 Mechanické vlastnosti svarového kovu při použití daných elektrod .....	59
Tab. 20 Svařovací parametry doporučené výrobcí přídavných materiálů.....	60
Tab. 21 Technické údaje svařovacího zdroje TransPuls Synergic 5000 [48] .....	65
Tab. 22 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 1A1 .....	67
Tab. 23 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2B1 .....	70
Tab. 24 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2A1 .....	72
Tab. 25 Záznam naměřených a dopočítaných hodnot při svařování vzorku 2A2 .....	74
Tab. 26 Technické údaje zkušebního stroje LabTest Model 5.100SP1 .....	84
Tab. 27 Výsledky příčné tahové zkoušky svarů.....	84
Tab. 28 Výsledky zkoušky rázem v ohybu .....	88
Tab. 29 Střední hodnoty tvrdostí svarů podle Vickerse HV10 .....	94
Tab. 30 Časy svařování, výkony odtavení, mzdové a režijní náklady na svářeče .....	95
Tab. 31 Ceny přídavných materiálů, využití PM a náklady na PM .....	96
Tab. 32 Průtočné množství plynu, cena plynu a náklady na ochranné plyny .....	97
Tab. 33 Celkové náklady na zhotovení svarů .....	97
Tab. 34 Hmotnosti svarových kovů a náklady vztažené na jednotku délky .....	98

## **Přílohy**

CD-ROM: Elektronická verze diplomové práce

Příloha č. 1

Příloha č. 2

Příloha č. 3