



# Porovnání přídavných drátů při svařování metodou MAG

## Bakalářská práce

*Studijní program:* B2301 – Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* 2301R000 – Strojní inženýrství  
*Autor práce:* **Vojtěch Sedláček**  
*Vedoucí práce:* prof. Ing. Iva Nová, CSc.





## Zadání bakalářské práce

# Porovnání přídatných drátů při svařování metodou MAG

*Jméno a příjmení:* **Vojtěch Sedláček**  
*Osobní číslo:* S16000257  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2018/2019**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou svařování kovů, zaměřte se především na svařování elektrickým obloukem – metodu MAG (Metal Activ Gas).
2. Prostudujte možnosti využití přídatných materiálů svařovacích drátů.
3. Pokuste se na vybrané oceli vytvořit svary při různých podmínkách svařování. Při svařování použijte alespoň dva svařovací dráty s různým chemickým složením. Vytvořené svary vyhodnoťte standardním způsobem s využitím příslušných norem.
4. Vyhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: tabulky, grafy  
Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran textu  
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická



### Seznam odborné literatury:

- [1] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2009. 492 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [2] HLAVATÝ, Ivo. *Svařitelnost uhlíkových ocelí*. In *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 9, s 115-122. ISBN 80-85771-85-3.
- [3] OCHODEK, Vladislav. *Struktura svaru*. In *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 7, s. 95-102. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] FOLDYNA, Václav. *Slitiny a fázové diagramy*. In *Materiály a jejich svařitelnost*. Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2. vyd. Ostrava: Zeross, 2000. Kapitola 4, s 67-78.
- [5] MUSIL, M., MORAVEC, J., NOVÁKOVÁ, I, et al. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 4. Část. International European Welding Engineer. DOM-2013, 2017.

Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.  
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce: 31. října 2018

Předpokládaný termín odevzdání: 30. dubna 2020

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan

V Liberci 1. listopadu 2018



doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
vedoucí katedry

## Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS STAG se shodují.

23. 6. 2019

Vojtěch Sedláček

## **Poděkování**

V první řadě bych chtěl poděkovat paní profesorce Ing. Ivě Nové, CSc. za cenné rady, vedení a podporu při vypracovávání bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Petru Malinskému a panu Patriku Vaistaurovi za pomoc při vytváření vzorků pro druhou část této práce.

## Anotace

Cílem této bakalářské práce je ověření pravdivosti tvrzení, že pro vznik kvalitního svarového spoje musí být přídatný a základní materiál stejného nebo velmi podobného chemického složení. V práci je blíže popsána technologie svařování MAG, která v dnešní době patří mezi nejpoužívanější metody svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Velká část této bakalářské práce se zabývá strukturou kovu a vlivem nejpoužívanějších chemických prvků v nerezových ocelích. Experimentální část se mimo jiné zabývá vytvořením vzorků pro tahovou zkoušku a zkouškou samotnou.

**Klíčová slova:** ocel, austenit, ferit, svar, svařování

## Annotation

The aim of this bachelor thesis is to verify the claim that for possibility to create a weld seam with sufficient quality must be additional material with same or very similar chemical composition as main material. The thesis closely describes MAG welding technology, which is one of the most used welding methods for unalloyed and low alloy steels nowadays. Big part of this bachelor thesis deals with the structure of steel and the influence of the most widely used chemical elements in stainless steel. The experimental part deals, among other things, with the creation of tensile test specimens and the tensile test itself.

**Key words:** steel, austenite, ferrite, weld seam, welding

# Obsah

Seznam označení a symbolů.....	9
1 Úvod .....	11
2 Teoretická část práce .....	12
2.1 Historie svařování .....	12
2.1.1 Základní kameny nových metod – 1. polovina 19. století.....	12
2.1.2 Vznik nových metod svařování – 2. polovina 19. století.....	13
2.1.3 Období světových válek – 1. polovina 20. století .....	13
2.1.4 Vytvoření modernějších metod – 2. polovina 20. století.....	14
2.2 Charakteristika svařování .....	14
2.2.1 Rozdělení metod svařování .....	15
2.2.2 Technologie svařování MAG .....	16
2.3 Přídavný materiál pro metodu MAG .....	18
2.3.1 Výrobce přídavných materiálů – firma ESAB .....	20
2.4 Ocel a její složení.....	21
2.4.1 Železo .....	21
2.4.2 Uhlík.....	22
2.4.3 Soustava železo-uhlík .....	23
2.4.3.1 Austenit a ferit .....	24
2.4.3.2 Karbidy .....	26
2.4.4 Křemík .....	26
2.4.5 Mangan.....	27
2.4.6 Chrom.....	28
2.4.7 Nikl .....	29
2.4.8 Vodík.....	29
2.4.9 Síra a fosfor .....	30
3 Experimentální část práce.....	31
3.1 Základní materiál .....	31
3.1.1 Austenitický základní materiál.....	31
3.1.2 Feritický základní materiál .....	32
3.2 Přídavný materiál.....	33
3.2.1 Austenitický přídavný materiál.....	33
3.2.2 Feritický přídavný materiál .....	35
3.2.3 Dvofázový přídavný materiál .....	35
3.3 Výroba svařenců.....	37

<b>3.4 Hodnocení kvality svarových spojů .....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.1 Zkouška tahem.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4.2 Zhotovení vzorků pro tahovou zkoušku .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.3 Tvar zkušební tyče .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4.4 Výsledky tahové zkoušky.....</b>	<b>41</b>
<b>3.4.5 Zhodnocení výsledků.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5 Makroskopická kontrola svarů.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5.1 Zhotovení vzorků pro makroskopickou kontrolu svarů.....</b>	<b>43</b>
<b>3.5.2 Výsledky při sledování makroskopické struktury vzorků .....</b>	<b>44</b>
<b>3.5.2.1 Austenitický základní materiál .....</b>	<b>45</b>
<b>3.5.2.2 Feritický základní materiál.....</b>	<b>46</b>
<b>3.5.3 Zhodnocení výsledků .....</b>	<b>47</b>
<b>4 Závěr.....</b>	<b>49</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>51</b>



## Seznam označení a symbolů

Označení	Význam	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A <sub>2</sub>	Curieho teplota	[°C]
A <sub>3</sub>	Teplota přeměny mezi Fe α/β a Fe γ	[°C]
A <sub>4</sub>	Teplota přeměny mezi Fe γ a Fe δ	[°C]
AA	Vzorek austenitického základního materiálu a austenitického přídavného materiálu	
AD	Vzorek austenitického základního materiálu a dvoufázového přídavného materiálu	
AF	Vzorek austenitického základního materiálu a feritického přídavného materiálu	
Al	Hliník	
Ar	Argon	
b1	Šířka kořene svaru	[mm]
b2	Horní šířka svaru	[mm]
C	Uhlík	
C <sub>E</sub>	Uhlíkový ekvivalent	[hm.%]
Co	Kobalt	
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý	
Cr	Chrom	
Cu	Měď	
FA	Vzorek feritického základního materiálu a austenitického přídavného materiálu	
FD	Vzorek feritického základního materiálu a dvoufázového přídavného materiálu	
Fe	Železo	
Fe α	Železo α	
Fe β	Železo β	
Fe γ	Železo γ	
Fe δ	Železo δ	
Fe <sub>3</sub> C	Cementit	
FF	Vzorek feritického základního materiálu a feritického přídavného materiálu	
H	Vodík	
He	Helium	
L <sub>0</sub>	Původní délka zkušební tyče	[mm]
L <sub>u</sub>	Délka zkušební tyče po zatížení	[mm]
MAG	Metal active gas	
Mg	Hořčík	

MIG	Metal inert gas	
Mn	Mangan	
Mo	Molybden	
N	Dusík	
Ni	Nikl	
O	Kyslík	
P	Fosfor	
r	Poloměr zaoblení hlavy	[mm]
Re	Mez kluzu	[MPa]
Rm	Mez pevnosti	[Mpa]
Rp <sub>0,2</sub>	Smluvní mez kluzu	[Mpa]
S	Síra	
Sb	Antimon	
Si	Křemík	
Sn	Cín	
S <sub>0</sub>	Původní průřez zkušební tyče	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>u</sub>	Průřez zkušební tyče po zatížení	[mm <sup>2</sup> ]
T1	Tloušťka materiálu	[mm]
T2	Převýšení kořene svaru	[mm]
T3	Horní převýšení	[mm]
Ta	Tantal	
Ti	Titan	
TIG	Tungsten inert gas	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
V	Vanad	
W	Wolfram	
WIG	Wolfram inert gas	
Z	Kontrakce	[%]
Zn	Zinek	
Zr	Zirkonium	

# 1 Úvod

Veškeré materiály na zemi mají čtyři základní skupiny vlastností, a ani kov není výjimkou. Tyto vlastnosti jsou chemické (chování kovů v různých prostředích), fyzikální (elektrická vodivost, barva, lesk...), technologické (svařitelnost, prokalitelnost, obrobitelnost...) a mechanické (pevnost, houževnatost, křehkost...). Většinu vlastností lze ovlivnit takzvaným legováním, kdy vyráběný materiál vědomě smícháme s jinými prvky, které nám zajistí požadované vlastnosti. Znalost a celkové povědomí o těchto vlastnostech je velice důležité při volbě materiálů pro výrobky s určitým použitím. Jako příklad mohu uvést, že při výrobě součásti, která bude používána v automobilu blízko motoru, budeme kvůli vysokým teplotám určitě vyhledávat materiál, který je žárupevný. Pokud budeme volit materiál pro výrobu ozubených kol, budeme hledat otěruvzdorný materiál, jelikož jsou zuby kol namáhány třením.

Třemi důležitými tématy této bakalářské práce jsou svařování, svařitelnost a struktura oceli. Svařování je jednou ze strojírenských technologií, díky kterým je možné vytvořit nerozebíratelný spoj mezi dvěma nebo více, ať už kovovými nebo nekovovými, součástmi. V dnešní době je svařování stále nedílnou součástí našeho života a je to vůbec nejvyužívanější metoda k vytvoření nerozebíratelného spoje. V posledních letech se ale na přední pozici dostává, díky stále lepším materiálům, metoda lepení. Můžeme očekávat, že v příštích několika desetiletích se lepení stane nejvýznamnější metodou pro tyto spoje.

Svařitelnost kovu ovlivňuje mnoho prvků, ale tím nejvýznamnějším je uhlík nebo karbon. Výpočet uhlíkového ekvivalentu oceli nám rozděluje materiály na dvě skupiny. První skupinou jsou oceli se zaručenou svařitelností, které lze svařovat při pokojové teplotě bez větších příprav a bez rizika zničení základního materiálu. Druhou skupinou jsou materiály bez zaručené svařitelnosti (s podmíněnou svařitelností). Tyto oceli a litiny musí před svařováním projít přípravným procesem, například předehřátím plamenem nebo v ohřívací peci. A protože jsou tyto materiály křehké, je potřeba je po svařování ochlazovat pomalu, znovu v ohřívací peci, aby se zamezilo vzniku trhlin a celkovému znehodnocení výrobku.

Struktura oceli jde ruku v ruce s jeho mechanickými vlastnostmi. Dvě hlavní struktury, kterými se v této práci zabývám, jsou austenit a ferit, jenž jsou dvě základní fáze ocelí.

## 2 Teoretická část práce

### 2.1 Historie svařování

Historickým vývojem svařování kovů se zabýval například Jean Cornu. Ve své knize uvádí, že pojem "svařování" se poprvé objevilo ve Starém zákoně několik tisíc let před naším letopočtem, tuto metodu svařování dnes nazýváme metodou kovářskou. Před čtyřmi tisíci lety již Egypťané svařování vyvinuli na takovou úroveň, že dokázali vyrábět doslova umělecká díla. Konkrétním důkazem toho, že se jednalo o opravdové umění je například hlava Tutanchamona sarkofágu (obr. 1), jehož hrobka byla objevena v roce 1922 v Údolí králů, která pochází údajně z období mezi 1361 a 1352 před naším letopočtem. Dalším pozoruhodným příkladem z historie je slavný Rhodský kolos, který byl postaven mezi roky 292 a 280 před naším letopočtem. Ve své době se jednalo o jeden ze sedmi divů světa, který měřil na výšku 35 metrů. Také na Ukrajině asi před 1 200 lety řemeslníci svařili velkolepý ocelový meč, který se dodnes dochoval. [1]



*Obr. 1 Sarkofág krále Tutanchamona [2]*

S vývojem výroby železa se vyvíjelo i kovářské svařování, které se v některých případech využívá do dnes, ale jako jediný způsob svařování existoval až do devatenáctého století našeho letopočtu. [3] [4]

#### 2.1.1 Základní kameny nových metod – 1. polovina 19. století

Prvním krokem k vynalezení nové metody svařování bylo objevení elektrického oblouku. Zásluha jeho objevení je připisována anglickému chemiku siru Humphry Davymu,

který vytvořil „krátký pulz“ elektrického oblouku mezi dvěma karbonovými elektrodami pomocí baterie roku 1801. Nezávisle na tom objevil elektrický oblouk i ruský chemik Vasilij Vladimirovič Petrov roku 1803, který vytvořil stabilní elektrický oblouk. [3] [4]

Základní kámen plamennému svařování položil anglický profesor chemie Edmund Davy, mimo jiné bratranec Humhry Davyho, když roku 1836 objevil acetylen, který se nejčastěji používá při této metodě svařování. [3] [4]

### **2.1.2 Vznik nových metod svařování – 2. polovina 19. století**

Roku 1881 došlo k prvnímu spojení dvou železných součástí pomocí tepla získaného z elektrického oblouku, které provedl francouzský vědec Auguste DeMeritens. Patent za svařování uhlíkovou elektrodou dostali nicméně jeho dva žáci, Rusové Nikolaj Bernardos a Stanislaw Olszewski, kteří tuto metodu oproti pokusu pana DeMeritense upravili a rozvinuli pro svařování ocelových plechů. Tuto metodu si nechali patentovat v roce 1885 ve Velké Británii a v roce 1887 v Rusku. [3] [4]

Roku 1889 si nechal patentovat americký vynálezce Charles L. Coffin svařování pod tavidlem, které chránilo roztavenou lázeň před negativními účinky atmosféry. O rok později získal patent pro svařování elektrickým obloukem, ve kterém nahradil uhlíkovou elektrodu za elektrodu ze svařovaného kovu. [3] [4]

Na konci devatenáctého století se Angličan narozený v Americe Elihu Thomson zabýval svařováním elektrickým odporem, ke kterému získal několik patentů. [3] [4]

Mezi tím došlo k průlomům ve svařování plamenem, když v roce 1892 Henri Hoissan objevil metodu průmyslové výroby karbidu vápníku a zejména v roce 1895, kdy francouzský chemik Henry LeChatelier zkoumal hoření kyslíko-acetylenové směsi. [3] [4]

### **2.1.3 Období světových válek – 1. polovina 20. století**

Na začátku dvacátého století byl Charlesem Picarsem v roce 1901 vynalezen svařovací hořák pro svařování plamenem. O dva roky později bylo představeno kyslíko-acetylenové svařování. [3] [4]

Protože mechanické vlastnosti svarů nebyly při svařování holou kovovou elektrodou dostačující, švédský vědec Oscar Kjellberg, mimo jiné zakladatel firmy ESAB, vyvinul v roce 1904 elektrodu, která měla obal z uhlíčitanů a křemičitanů. Tento obal zvýšil kvalitu svarového spoje. [3] [4]

Jedno z velmi mála pozitiv první světové války, která začala v roce 1914, byl velký posun v technologiích obecně. V USA a v Evropě bylo v tu dobu založeno mnoho firem, které se zabývaly svařováním. Obloukové svařování se tehdy používalo hlavně na výrobu a opravu lodí, pláštěů pum, torpéd a jiných zařízení. [3] [4]

V roce 1924 nastal jeden z průlomů, když bylo představeno automatické svařování, které má na svědomí Paul O. Noble, jenž si nechal patentovat svařování stejnosměrným proudem za použití automatického podávání svařovacího drátu, které bylo ovládané velikostí svařovacího napětí. [3] [4]

Na počátku druhé světové války navrhli pánové V.H. Pavlecka a Russ Meredith nový postup svařování, který se v dnešní době nazývá TIG/WIG. Jednalo se tedy o první představení svařování elektrickým obloukem s netavicí se wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře, tehdy hélia. Tato metoda se hojně využívala na svařování hliníku, niklu a hořčíku, nejvíce tedy v letectví. [3] [4]

#### **2.1.4 Vyvíjení modernějších metod – 2. polovina 20. století**

Jelikož bylo svařování v inertním plynu nákladné, pánové Lyubavskii a Novoshilov přišli v roce 1953 se svařováním, kde jako ochranná atmosféra figuroval oxid uhličitý. Tento plyn snížil náklady na svařování a tím umožnil efektivně svařovat i nelegované a nízkolegované oceli. Tento rok byla i představena metoda svařování plazmou, která měla lepší stabilitu oblouku při vyšší koncentraci tepla. [3] [4]

Jako další moderní metody svařování následovaly elektronové svařování, které má na svědomí J. A. Stohrem a laserové svařování, které se používalo nejdříve jako technologie pro řezání a jako svařování jí jako první v automobilovém průmyslu použil General Motors v roce 1976 pro svařování ventilů. [3] [4]

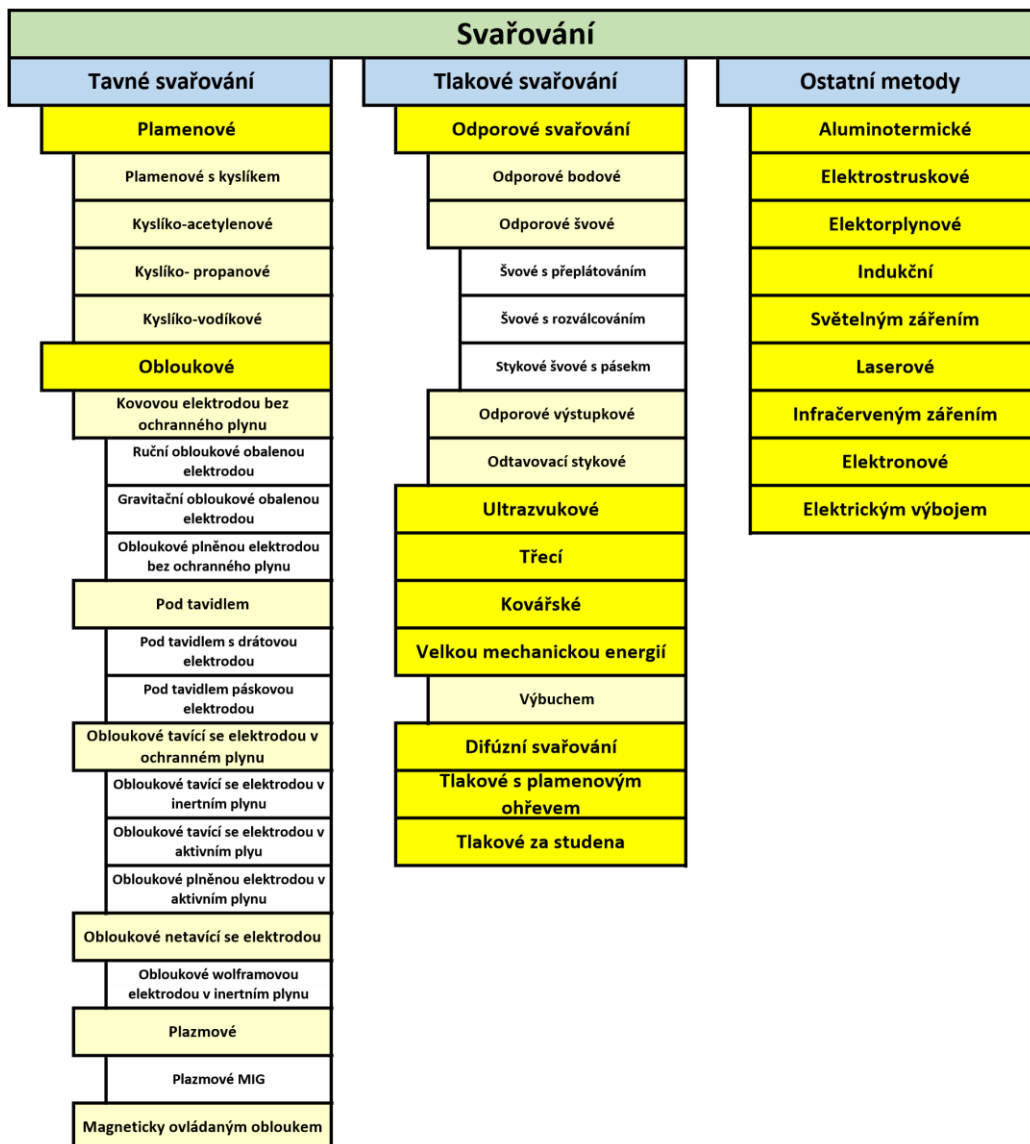
Za jednu z nejnovějších svařovacích technologií se považuje třecí svařování promíšením. Tato metoda byla vynalezena a patentována v roce 1991 institutem TWI v Cambridge. Jako nástroj pro toto svařování se používá profilovaný kolík, který rotuje a pomalu se zanořuje do místa spoje. Díky teplu, které vznikne při tření mezi nástrojem a svařencem se stane, že materiál měkne ještě, než dosáhne teploty tavení. Díky vysoké rotační rychlosti nástroje dojde k promíšení materiálů. [3] [4]

## **2.2 Charakteristika svařování**

Svařování je technologický proces, spojování svařitelných kovů (nejčastěji ocelí), při kterém vzniká nerozebíratelný spoj při dodání určité energie do požadovaného místa vzniku

svarového spoje. Dodávaná energie bývá ve formě tepla, tlaku nebo jejich kombinace. Svarový spoj může vzniknout s přídavným materiálem nebo bez něho. U většiny svařovacích technologií dochází k lokálnímu natavení svářených součástí a případného přídavného materiálu, díky tomu vzniká v součástech nestejnorodost. Jako nevyhnutelné důsledky svařování jsou vznik místních strukturálních změn a vznik vnitřních napětí, které mohou případně vést až k deformaci materiálu. [5]

## 2.2.1 Rozdělení metod svařování



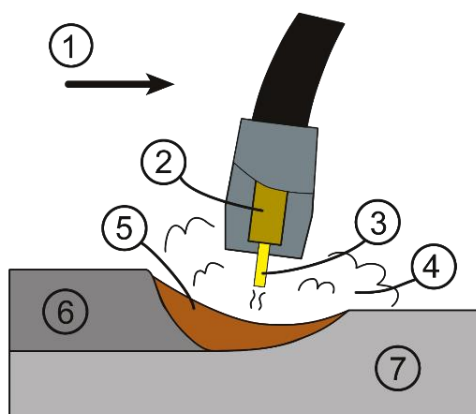
**Obr. 2** Rozdělení svařovacích metod [6]

Jako základní rozdělení svařování používáme rozdělení podle druhu dodávané energie (obr. 2), kdy pro dodávání tepelné energie používáme název tavné svařování, pro dodávání tlakové energie používáme název tlakové svařování a dále ostatní svařování. Dále můžeme technologie dělit podle média, kterým dodáváme určitou energii (například

svařování plamenem, elektrickým obloukem a jiné), podle stupně automatizace (ruční, mechanizované, automatizované a robotické) a jiné. [5]

## 2.2.2 Technologie svařování MAG

Svařování MAG (zkratka anglického názvu **M**etal **A**ctive **G**as), celým českým názvem „Svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu“, se využívá hlavně při spojování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Tuto metodu lze využívat nejen jako poloautomatické svařování, ale lze jí i plně automatizovat a tím jí zefektivnit, což nám umožňuje využívat metodu MAG v sériové výrobě. Automatizace má také příznivý vliv na jakost svařenců, hygienu pracovního prostředí a samozřejmě zlepšení pracovních podmínek personálu, který obsluhuje svařovací zařízení. [5]



(1) Směr svařování, (2) Svařovací hořák (kontaktní špička), (3) Svařovací drát, (4) Ochranný plyn, (5) Svarová lázeň, (6) Svar, (7) Základní materiál

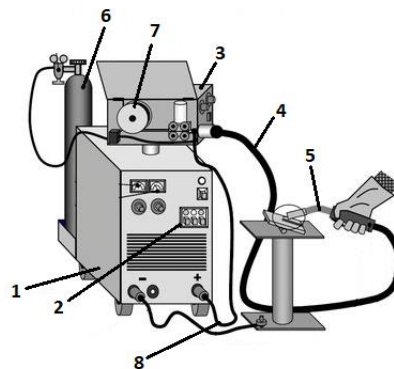
**Obr. 3** Schéma svařování MAG [7]

Tato metoda pro vytvoření svarového spoje využívá tepelnou energii, které je do místa vzniku spojení dvou a více komponentů dodávána elektrickým obloukem, jenž hoří mezi koncem přídavného drátu a základním materiálem, které při této metodě představují elektrody. Stabilita hoření elektrického oblouku je chráněna proudem ochranného aktivního plynu. Jako ochranný plyn se u metody MAG používá jedno komponentní nebo více komponentní plyn. Jako hlavní složku používáme oxid uhličitý –  $\text{CO}_2$ , ke kterému se v případě použití vícesložkového plynu přidá argon – Ar, kyslík –  $\text{O}_2$  nebo hélium – He. Název „aktivní“ plyn nám prozrazuje, že při svařování dochází k aktivní reakci mezi ochranným plynem a roztaveným materiálem. Na poměru jednotlivých složek v ochranném plynu bude záležet změna chemického složení svarového kovu, zejména obsah uhlíku – C, manganu – Mn a křemíku – Si, se kterým souvisí i změna jeho mechanických vlastností.



Použitím směsného plynu mimo jiné zlepšíme také formování svaru a snížíme rozstřík kovu při vytváření svaru. [5]

Svařovací sestava, pro možnost svařování metodou MAG, je tvořena několika základními komponenty. Jako zdroj elektrické energie se používá *svařovací zdroj* stejnosměrného proudu. Pro posuv svařovacího drátu se používá *podavač drátu*, který při ručním svařování bývá součástí svařovacího zdroje. Podavač drátu musí zajistit rovnoměrnou rychlost dodávání elektrody do místa jeho odtavování, aby mohl vzniknout svarový spoj s dostatečnou jakostí při stabilním hoření oblouku. Drát je podáván pomocí několika páru kladek, které rozlišujeme podle jejich funkce na rovnací, hnací a přítlačné. Odtud je svařovací drát veden do *bowdenu*, který má funkci vedení drátu do *svařovacího hořáku*. Svařovací hořák obsahuje dva vysoce namáhané komponenty, které se proto označují za spotřební zboží. Prvním z těchto součástí je *kontaktní špička*, která je nejvíce tepelně namáhaným dílem a měla by mít o 0,2 milimetru větší průměr výstupního otvoru, než je průměr svařovací drátu.



1) Svařovací zdroj, (2) Řídicí jednotka, (3) Podavač drátu, (4) Bowden, (5) Svařovací hořák, (6) Tlaková lahev, (7) Cívka s přídavným drátem, (8) Vodiče elektrického proudu

**Obr. 4** Schéma zařízení pro svařování MAG [8]

Hlavní materiál kontaktních špiček je měď – Cu, která bývá legovaná chromem – Cr. Funkce kontaktní špičky je přenos elektrického proudu na přídavný drát za pomoci jejich vzájemného tření. Druhou součástí je *dýza* neboli svařovací hubice. Rozměry dýzy se volí podle typu použitého svařovacího hořáku a podle podmínek svařování. Skrz dýzu proudí ochranný plyn a jejím úkolem je jeho tvarování do zvonu. Dále máme dva zásobníky, první je zásobník přídavného materiálu, který je dodáván v cívkách nebo pro větší výrobu v sudech a druhý je zásobník plynu. Jako zásobník plynu se používají tlakové láhve a v případě průmyslové výroby tlakové nádrže s centrálním vedením plynu. Další nezbytnou součástí je řídicí jednotka, která zabezpečuje dálkové ovládání svařovacího obvodu a ostatní činnosti zdroje, jako například (tzv. předfuk a dofuk ochranného plynu), nastavení

svařovacích parametrů a jiné. Dále nesmí chybět ani svařovací vodiče a hadice, které spojují základní komponenty svařovacího obvodu. Vodiče jsou ke zdroji a řídicí jednotce zapojovány bajonetovými koncovkami. [5]

## 2.3 Přídavný materiál pro metodu MAG

Nezbytnou součástí svařování metodou MAG je přídavný materiál, který je elektrodou v elektrickém obvodu, konkrétně se svařovací drát zapojuje tak, aby představoval anodu, tedy znamínko +. Kromě toho, že se jedná o součást svařovacího obvodu, plní i jiné funkce, jako například doplňování objemu svarové lázně, čímž zabezpečují požadovaný tvar a objem svaru, nahrazují prvky, které se při svařování vypálí a dodávají vhodné legovací a dezoxidační přísady pro zlepšení mechanických a chemických vlastností. [5]

Přídavný materiál se dodává do svaru v podobě drátu plného kruhového nebo trubičkového průřezu, a to navinuté na cívkách, pro menší spotřebu, nebo v sudech, které mívají mezi 200-250 kilogramů, pro spotřebu větší. [5]

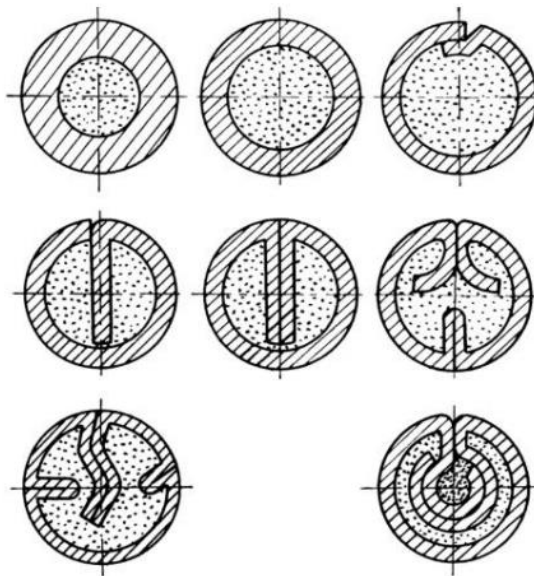


**Obr. 5** Cívka s přídavným materiálem [9] **Obr. 6** Sud s přídavným materiálem [9]

Pro možnost vzniku dostatečně kvalitního svarového spoje, musí mít přídavný materiál stejné, nebo velice podobné chemické složení, jako materiál základní. Musí mít také vhodný průřez, vysokou čistotu a hladkost povrchu, přiměřenou tvrdost a tuhost. [5]

Přídavné materiály plného průřezu pro svařování ocelí se vyrábí od  $\varnothing 0,6$  až  $\varnothing 1,6$  milimetrů, odstupňované po 0,2 milimetrech. Pro svařování neželezných kovů se vyrábí až do  $\varnothing 2,4$  milimetrů. Mohou být také na povrchu pokryty tenkou měděnou vrstvou, aby se zabránilo jejich korozi při transportu a skladování. Měděná vrstva také zlepšuje přívod proudu v kontaktní špičce svařovacího hořáku. Drátové elektrody a obecně přídavné materiály jsou uvedeny a rozděleny například v normě ČSN EN ISO 26304. [5]

Trubičkové elektrody, viz obr. 7, se plní vhodnými přísadami a dělí se podle chemického složení náplně podobně jako obalené elektrody na rutilové, bazické nebo elektrody s kovovou náplní. Dále se dělí podle použití na elektrody pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí (s kovovou, rutilovou nebo bazickou náplní), pro svařování vysokolegovaných ocelí (s rutilovou náplní) a pro opravy a renovace (s kovovou, rutilovou nebo bazickou náplní). Některé druhy trubičkových elektrod mají dokonce vlastní plynovou ochranu, a proto se dělí na elektrody vyžadující externí plynovou ochranu a elektrody s vlastní plynovou ochranou. [5]



**Obr. 7** Průřezy trubičkových elektrod [10]

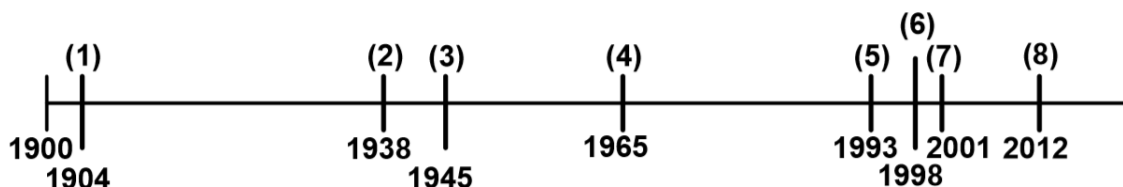
Pro svařování elektrickým obloukem v aktivním ochranném plynu se používají přídavné materiály se zvýšeným obsahem manganu a křemíku. Tyto prvky zajišťují silnější dezoxidační účinky svarové lázně a slučují se s kyslíkem. Vytvořené oxidy se usadí na povrchu svarové housenky a vytvoří strusku. [5]

### 2.3.1 Výrobce přídavných materiálů – firma ESAB

Mezi přední světové společnosti, které se zabývají výrobou přídavných materiálů, se řadí firma ESAB. Tato firma byla založena švédským inženýrem, vynálezcem a vědcem, který se jmenoval Oscar Kjellberg. Celý název firmy zní „Elektriska Svetsnings-Aktiebolaget“ a byla založena v roce 1904 poté, co její zakladatel vynalezl elektrodu obalenou tavidlem, která zlepšila kvalitu vytvořeného svaru, protože se během tavení obal odpařuje a vytváří plyn, který odděluje roztavený kov svaru od vzduchu, a tím brání reakcím, které negativně mění mechanické vlastnosti svarového spoje. Jako poctu ESAB do dnes označuje přídavné materiály iniciály jejího zakladatele „OK“ (Oscar Kjellberg). [11]

Dnešní společnost ESAB je výsledkem sloučení předních firem v odvětví z roku 1989. Mezi tyto společnosti patří ESAB Welding Production, ESAB Automation, Alloy Rods Corporation, ALL-State Welding Products a L-TEC Welding & Cutting Systems. Tyto společnosti představují více než 300 let zkušeností z výroby přídavných svařovacích materiálů a svařovacích zařízení. [11]

Firma ESAB nepatří pouze k předním světovým výrobcům přídavných svařovacích materiálů, ale i svařovacích a řezacích zařízení. Nabízený sortiment produktů a služeb se týká prakticky všech svařovacích a řezacích procesů a aplikací. Mezi odvětví, kterými se zabývá společnost ESAB, patří například automobilový průmysl, energetika, lodní stavitelství a stavby na moři, výroba potrubí, válcovny a mnoho dalších. [11]



(1) Založení firmy ESAB, (2) Zahájení výroby přídavných svařovacích materiálů přesunem z Ostravska, (3) Zahájení výroby obalených elektrod ER, EK a EB, (4) Zahájení výroby přídavného materiálu pro MAG svařování s označením C113, (5) Železářny Vamberk kupuje firma ESAB, (6) Zahájení výroby plněných trubičkových elektrod, (7) Zahájení výroby přídavných materiálů z nerezové oceli pro svařování MIG, (8) Odkoupení společností Colfax Corporation

**Obr. 8** Časová osa milníků pobočky ESAB Vamberk:

Společnost je k dispozici téměř ve všech zemích světa, v České republice sídlí firma ve městě Vamberk, nedaleko Rychnova nad Kněžnou. ESAB Vamberk má 620 zaměstnanců a roční objem výroby přídavných svařovacích materiálů je 120 kT. Na obr. 8 je schéma časové osy s uvedením výrobních a jiných aktivit firmy ESAB.

Od roku 2012 je společnost ESAB Group, Inc. dceřinou společností v úplném vlastnictví Colfax Corporation. [11]

## 2.4 Ocel a její složení

Ocelí nazýváme slitinu železa a uhlíku s hmotnostním obsahem uhlíku do 2,13%. Při překročení této procentuální hranice se již nejedná o ocel, ale o litinu. Výroba oceli na začátku tohoto tisíciletí je odhadována na 800 milionů tun ročně, z toho 98% vyrobené oceli se zpracovává tvářením a zbytek oceli je použit na odlévání. Výroba litiny v tomto období činí 10 % celkové odhadované výroby oceli. [12]

V oceli jsou obsaženy i jiné prvky, než je Fe a C. Jsou to prvky, které se do oceli přidávají účelně, takzvané legování, ale i prvky, které se do oceli přimíchají různými operacemi, kterými ocel prochází. Legování ocelí se provádí hlavně z důvodu zlepšení její mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. Celkově legurami můžeme řídit strukturu finálního materiálu. Mezi nejdůležitější vlastnosti, které od legur požadujeme je zvýšení pevnosti a tvrdosti při zachování houževnatosti, zvýšení prokalitelnosti, žárupevnosti, korozivzdornosti a otěruvzdornosti. [12]

**Svařitelnost:** Při svařování hraje důležitou roli vlastnost svařovaného materiálu, kterou nazýváme „svařitelnost“. Svařitelnost vyjadřuje vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj, který bude zajišťovat požadované mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Svařitelnost se určuje především podle chemického složení jako například podle obsahu uhlíku, nečistot, legujících prvků a vodíku. [5]

**Uhlíkový ekvivalent:** Pro určování svařitelnosti oceli, se nejčastěji používá výpočet uhlíkového ekvivalentu. Existuje více verzí tohoto vzorce, které se používají různě podle hodnoty obsahu uhlíku, ale nejčastěji se uvádí vzorec, který navrhl Mezinárodní svářečský institut (IIW). [13]

$$C_E = C + \frac{M_n}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [hm. \%] \quad (1)$$

Oceli, které mají uhlíkový ekvivalent menší než 0,35, jsou obvykle dobře svařitelné v běžně používaných šířkách. Pokud je  $C_E$  vyšší, znamená to, že se musí počítat s různými operacemi, kterými zajistíme vytvoření kvalitního svaru a zabráníme vzniku trhlin a jiných vad a deformací. Jednou z těchto operací je například přehřev svařovaných dílů. [13]

### 2.4.1 Železo

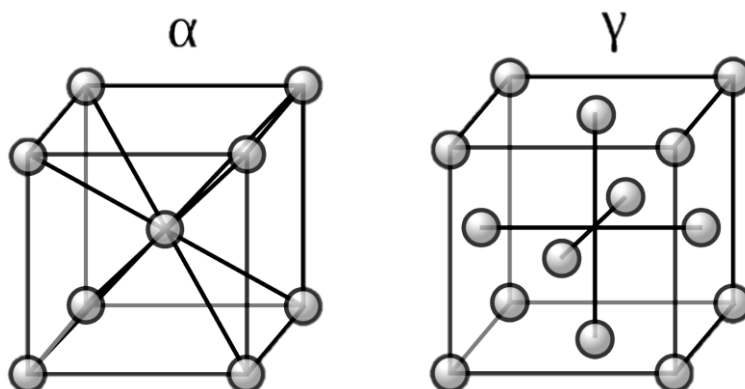
Železo (Fe) je druhý nejrozšířenější kov a čtvrtý nejrozšířenější prvek na zemi. V zemské kůře se vyskytuje pouze ve formě sloučenin. Průměrný obsah železa v zemské kůře je 4,2 % hmotnosti. Železné rudy, které obsahují největší procento železa, jsou

magnetit – 72 %, hematit – 70 %, goethit – 63 % a pyrrhotin – 63 %. V přírodě se také vzácně nachází jako ryzí kov, z minerálů má nejvyšší obsah železa vzácný nerost siderazot (obr. 9), a to 90,88 %. [14]



**Obr. 9** Siderazot [15]

Jedná se o alotropický prvek, který se v závislosti na teplotě vyskytuje ve dvou krystalografických modifikacích. Až do teploty 912 °C jde o stabilní modifikaci s krystalickou mřížkou krychlovou prostorově středěnou (obr. 10), která se označuje jako modifikace „ $\alpha$ “. Železo  $\alpha$  je feromagnetické až do teploty 760 °C, nad touto teplotou ztrácí své magnetické vlastnosti. Druhá modifikace železa se označuje „ $\beta$ “, jehož krystalová mřížka je krychlová prostorově středěná. V intervalu teplot 912 až 1392 °C má železo krychlovou mřížku plošně středěnou (obr. 10), a tato modifikace je označována písmenem „ $\gamma$ “. Nad tímto intervalem až do teploty tavení nabývá železo opět krystalickou mřížku krychlovou prostorově středěnou, která se označuje jako modifikace „ $\delta$ “. [12]



**Obr. 10** Atomové mřížky  $Fe_{\alpha}$  a  $Fe_{\gamma}$  [16]

## 2.4.2 Uhlík

Uhlík (C), je chemický prvek, který je základem všech organických sloučenin na této planetě. Jeho sloučeniny jsou jedním ze základů světové energetiky jako například zemní plyn, uhlí a ropa. Uhlík se dále nachází například v plastické hmotě, umělých vláknech, léčivech a mnoho dalších. [17]

Jedná se o nekovový prvek, který se vyskytuje v přírodě ve dvou alotropních modifikacích. V prvním případě se jedná o grafit, jehož strukturu tvoří šesterečné neboli hexagonální mřížky. Druhá modifikace uhlíku, které se vyskytuje v přírodě je diamant. Struktura diamantu je tvořena krychlovými mřížkami a jedná se o nejtvrděší a velmi cenný přírodní nerost. [17]

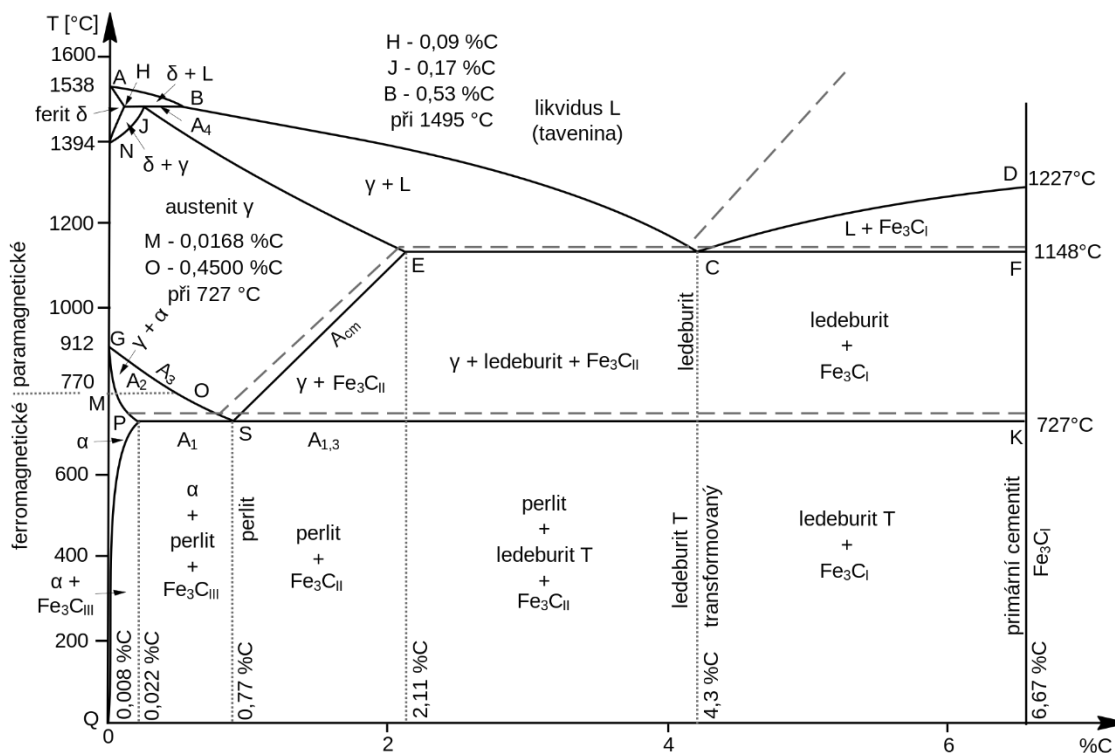
Uhlík je prvkem, který má nejvýraznější vliv na vlastnosti oceli. S rostoucím podílem uhlíku se zvyšuje pevnost a tvrdost materiálu, ale zároveň se zhoršují plastické vlastnosti a houževnatost. Ocel určená ke svařování by měla obsahovat do 0,22 % uhlíku a zároveň platí, že při překročení 0,3 % obsahu uhlíku v kovu se ocel stává nevhodnou pro svařování. [18]



*Obr. 11 Uhlík ve formě grafitu a diamantu [19]*

### **2.4.3 Soustava železo-uhlík**

Uhlík s železem tvoří intersticiální tuhé roztoky s omezenou rozpustností uhlíku. Po překročení rozpustnosti v tuhém roztoku se uhlík vylučuje jako samostatná fáze. Při nízkých obsahách tvoří uhlík intersticiální chemickou sloučeninu  $\text{Fe}_3\text{C}$  (6,67 % C). Tato sloučenina není stabilní (při určitých podmínkách se může rozkládat na grafit a železo). Správně se rozlišuje soustava F-C, stabilní a metastabilní. Soustava metastabilní se často označuje Fe- $\text{Fe}_3\text{C}$ , což po stránce fyzikální metalurgie není správné, neboť Fe je složkou a  $\text{Fe}_3\text{C}$  je fází (diagramy by se měly označovat složkami). Pokud je uhlík vyloučen jako grafit, jedná se o soustavu stabilní, která má svůj význam zejména při posuzování změn při tuhnutí a chladnutí litin. Protože uhlík má významný vliv na vlastnosti slitin železa, můžeme k určení jejich vlastností použít s určitou nepřesností rovnovážný diagram železa s uhlíkem (obr. 12). [12]



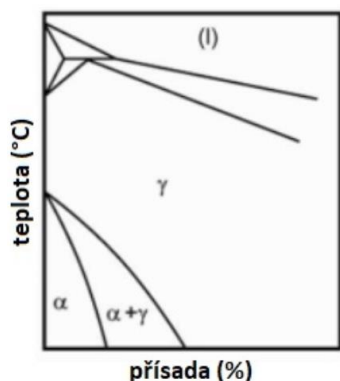
Obr. 12 Rovnovážný diagram soustavy železo-uhlík [20]

### 2.4.3.1 Austenit a ferit

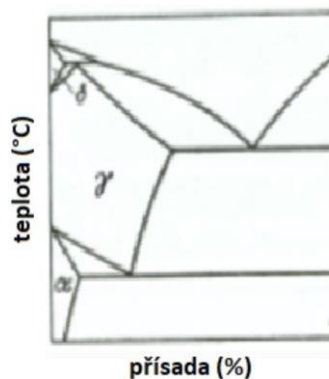
Austenit je intersticiální tuhý roztok uhlíku v železe  $\gamma$ . Jeho krystaly mají světle šedou barvu, jsou měkké, houževnaté a tvárné. Elementární buňka austenitu má čtyři atomy. V uhlíkových a nízkolegovaných ocelích se vyskytuje austenitická struktura jen mezi teplotami 727 a 1496 °C. Pouze v některých vysokolegovaných ocelích, které jsou legovány zejména niklem a manganem, je austenitická struktura přítomna i při nízkých teplotách, tyto oceli se nazývají austenitické oceli. Nejčastěji se s austenitickou strukturou setkáváme u korozivzdorných ocelí. [21]

**Austenitotvorné prvky:** Jsou to prvky, které snižují teplotu  $A_3$  (teplota přeměny mezi Fe  $\alpha/\beta$  a Fe  $\gamma$ ) a zvyšují teplotu  $A_4$  (teplota přeměny mezi Fe  $\gamma$  a Fe  $\delta$ ) a tím rozšiřují oblast stability austenitu (výjimkou je kobalt, který obě teploty zvyšuje). Tyto prvky rozdělujeme do dvou skupin. První skupinu tvoří prvky, které rozšiřují oblast austenitu neomezeně (například Ni, Mn a Co) (obr. 13) a prvky, které rozšiřují oblast austenitu omezeně (například C a N) (obr. 14). Při vyšším obsahu těchto prvků, může u oceli klesnout teplota  $A_3$  až na takovou hodnotu, že si ocel zachová austenitickou strukturu i při teplotě okolí. [12]





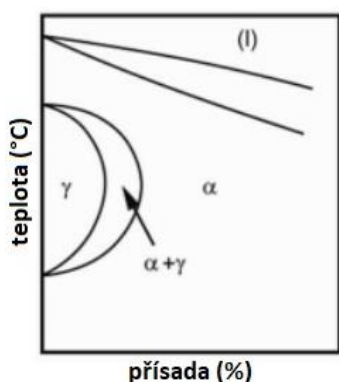
Obr. 13 Diagram austenitotvorných prvků A-1 [22]



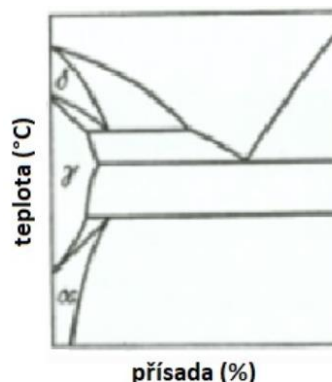
Obr. 14 Diagram austenitotvorných prvků A-2 [22]

Ferit je intersticiální tuhý roztok v železe  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\delta$ , podle toho také ferit rozdělujeme. Ferit, který se nachází v Fe  $\alpha$ , nazýváme ferit  $\alpha$ , který je feromagnetický a vyskytuje se při nižších teplotách, než je Curieho teplota (označována jako  $A_2$ ), která je u železa 768 °C. Při překročení této teploty dojde k přeměně na ferit  $\beta$ , který ztrácí své feromagnetické vlastnosti a stává se paramagnetickým. Ferit  $\beta$  mizí při překročení teploty  $A_3$ , která je u železa 912 °C, kde se přeměňuje na austenit. Při dalším ohřevu železa nad 1394 °C se austenit transformuje zpět na ferit, ale tentokrát ferit  $\delta$ . Krystaly feritu jsou světlé, za studena měkké a tvárné. Jak je obecně známo, elementární buňka feritu má 2 atomy.

**Feritotvorné prvky:** Jsou to prvky, které rozšiřují oblast stability feritu tím, že zvyšují teplotu  $A_3$  a snižují teplotu  $A_4$  (výjimkou je chrom, který obě teploty snižuje). Tyto prvky mohou s určitou koncentrací způsobit úplně uzavření oblasti austenitu (obr. 15). Do této skupiny patří například prvky, jako jsou Si, Al, W, Mo, Ti a V. [12]



Obr. 15 Diagram feritotvorných prvků B-1 [22]



Obr. 16 Diagram feritotvorných prvků B-2 [22]

Tab. 1 Rozdělení austenitotvorných a feritotvorných prvků

	Vliv prvku na teplotu	Prvky	Typ používaného diagramu
Austenitotvorné	↑ A4 ↓ A3	Mn, Ni	A-1
		Cu, N, C, Zn	A-2
	↑ A4 ↑ A3	Co	A-1
Feritotvorné	↓ A4 ↑ A3	Si, Al, W, Mo, P, V, Ti, Ta, Zr	B-1
		S, O, Sn, Sb	B-2
	↓ A4 ↓ A3	Cr	B-1

### 2.4.3.2 Karbidy

Karbidy jsou tuhá fáze, a proto jejich vznik značně mění mechanické vlastnosti oceli. Zvyšují zejména pevnost, tvrdost, odolnost proti opotřebení a žárupevnost. Vznik karbidů závisí zejména na chemickém složení dané oceli a na podmínkách tepelného zpracování. Karbidy dělíme na dvě základní skupiny. [22]

**Karbidy s nižší termodynamickou stabilitou:** Do této skupiny řadíme karbid železa (cementit  $Fe_3C$ ), chromu a manganu. Zmíněné karbidy se snadno rozpouštějí v austenitu a při austenitizaci mají nižší teplotu tání. [22]

**Karbidy s vyšší termodynamickou stabilitou:** Karbidy, které řadíme do této skupiny jsou karbidy titanu, molybdenu, wolframu a vanadu. Tyto karbidy mají jednoduché krystalové struktury a jsou tvrdší než karbidy s nižší termodynamickou stabilitou. Tyto karbidy se při tepelném zpracování rozpouštějí v austenitu velmi pomalu a až při vysokých teplotách. Teploty tání těchto karbidů bývají vyšší než  $2000^{\circ}C$ . [22]

**Karbidotvorné prvky:** Jsou to prvky, které jsou elektropozitivnější (schopnost atomu uvolňovat valenční elektrony) než uhlík, se kterým tvoří sloučeninu, kterou nazýváme karbid. Tyto prvky musí mít také větší afinitu k uhlíku, než má železo. [22]

### 2.4.4 Křemík

Křemík (Si) (obr. 17) zařazujeme do skupiny polokovů. Jedná se o modrošedou látku, která je křehká a značně tvrdá. Za vysokých teplot je křemík vysoce reaktivní a tvoří sloučeniny s 64 prvky periodické soustavy. V přírodě se vyskytuje výhradně ve

sloučeninách. Je to také po kyslíku druhý nejrozšířenější prvek na zemi a tvoří až 26 % hmotnosti zemské kůry. [14]



**Obr. 17** Křemík [23]

Jedná se o leguru, jíž zlepšujeme mechanické vlastnosti oceli, jako jsou pevnost a mez kluzu a zvyšujeme její žáruvzdornost. Obsah křemíku v oceli při svařování by neměl být větší, než 0,3 %. Protože křemík zvyšuje teplotu  $A_3$  a současně snižuje teplotu  $A_4$ , jedná se o takzvaný feritotvorný prvek, který rozšiřuje oblast stability feritu. Oceli s větším obsahem těchto prvků neprochází při ohřevu polymorfní změnou. Takové oceli nazýváme „feritické“. [5] [12]

### 2.4.5 Mangan

Mangan (Mn) (obr. 18) je stříbřitě bílý, lesklý, křehký a značně tvrdý kov. Z běžných kovů má mangan nejnižší hodnotu tepelné vodivosti. V přírodě se mangan vyskytuje značně rozptýlen a většinou doprovází železo, ale vzácně se nachází také jako ryzí kov. Více než 85 % celkové produkce manganu se využívá jako legující přísada do ocelí. Dále se mangan používá také při legování slitin hliníku (95 % Al, 4 % Cu, 0,5 % Mg a 0,5 % Mn), tato slitina se označuje jako „tvrdý hliník“ - **duraluminium**, je díky svým vlastnostem důležitým konstrukčním materiálem v letectví a kosmické technice. [14]



**Obr. 18** Manganová ruda [24]

Mangan se rozpouští ve feritu a díky tomu zvyšuje pevnost, tvrdost a houževnatost při zachování plastických vlastností. Dalším pozitivní vlastností manganu je, že při koncentraci 0,3 až 1 % ovlivňuje příznivě vyloučení sulfidů a tím snižuje nepříznivé

působení na houževnatost oceli. Hodnota zvýšení pevnosti manganem závisí na obsahu uhlíku v dané oceli. U oceli s obsahem uhlíku do 0,15 % je zvýšení největší, naopak u ocelí s obsahem uhlíku mezi 0,7 – 0,87 % je zvýšení pevnosti nepatrné. Mangan rozšiřuje oblast austenitu, protože zvyšuje teplotu  $A_4$  a snižuje teplotu  $A_3$ , z tohoto důvodu ho řadíme mezi austenitotvorné prvky. Pokud ocel obsahuje větší množství těchto prvků, může teplota přeměny austenitu na ferit klesnout až pod teplotu okolí a tím si ocel zachová austenitickou strukturu. Takové oceli nazýváme „austenitické“. [12]

Při svařování mangan omezuje vznik pórů a trhlin za tepla. Poměr křemíku a manganu v oceli by měl být 1 ku 1,5 až 3. Při překročení tohoto poměru můžeme očekávat nekovové vměstky ve svarovém kovu a při nižším poměru je velká pravděpodobnost vzniku trhliny, póry a nedostatečnou vrubovou houževnatost. [12]

## 2.4.6 Chrom

Chrom (Cr) (obr. 19) je bílý, lesklý, křehký a jedná se o nejtvrďší kov ze všech. Vyznačuje se také vysokou chemickou odolností. V přírodě se chrom nejčastěji vyskytuje v rudách chromitu  $FeCr_2O_4$ . K největším „těžitelům“ chromitu patří Jihoafrická republika, kde se ho v roce 2012 vytěžilo 11 megatun. [14]

Chrom má značný význam v metalurgii, kde se jako legura přidává do oceli, kde výrazně ovlivňuje žáruvzdornost, žárupevnost a tvrdost. Má také vliv na kalitelnost, prokalitelnost a odolnost proti opotřebením. Asi největší využití má chrom při výrobě nerezových ocelí. Při obsahu chromu v tuhém roztoku větším než 11,5 % získává ocel schopnost pasivace (tvorba ochranné vrstvy na povrchu kovu), díky tomu je ocel odolná proti chemické a elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Při svařování se chrom vypařuje a vzniká takzvaný šestimocný chrom, který patří mezi významně toxické látky a je zařazen mezi karcinogeny. [14]



*Obr. 19 Chrom [25]*

## 2.4.7 Nikl

Nikl (Ni) (obr. 20) je stříbrobílý, lesklý a tažný kov s feromagnetickými vlastnostmi. V přírodě se vyskytuje jako ryzí kov a v rudách, často doprovázený kobaltem. Nikl a jeho sloučeniny patří mezi významné kožní alergeny a řada jeho sloučenin je zařazena mezi karcinogeny. Nikl se často používá jako ochrana jiných, méně odolných kovů, nanesením tenké vrstvy na jejich povrch. [14]



*Obr. 20 Nikl [26]*

Největší využití má nikl v ocelářském průmyslu, kde patří mezi základní kovy, které se používají jako legury. Značně zvyšuje vrubovou houževnatost i při nízkých teplotách, odolnost proti korozi, kalitelnost a prokalitelnost. Stejně jako u manganu se jedná o austenitotvorný prvek a při obsahu niklu nad 30 % si ocel zachovává austenitickou strukturu i při pokojové teplotě. [5]

## 2.4.8 Vodík

Vodík (H) je nejlehčí a nejjednodušší plynný chemický prvek, který tvoří převážnou část hmoty ve vesmíru. Vodík je plyn, jenž je bez barvy a zápachu. Vytváří sloučeniny se všemi prvky periodické tabulky s výjimkou vzácných plynů, zejména pak s uhlíkem, kyslíkem, sírou a dusíkem, které tvoří základní kameny života na Zemi. Má také široké využití, z nichž asi pro budoucnost nejdůležitější bude využití vodíku jako zdroje energie v energetice a dopravě. Při spalování vodíku vzniká mimo značného energetického zisku pouze ekologicky nezávadná voda. [27]

Vodík se do oceli dostává jak při výrobě v pecích, tak také například při povrchové úpravě nebo svařování. Při změně modifikace z Fe  $\gamma$  na Fe  $\alpha$  se snižuje rozpustnost vodíku v oceli. Při teplotách mezi 200 až 400 °C vyvolává vyloučený vodík v materiálu silné pnutí, které může vést až k jeho porušení. Vodík snižuje plastické vlastnosti oceli, aniž by zvyšoval její pevnost. [12]

Při svařování je vodík jednou z příčin vzniku vad, jako jsou vnitřní póry a trhlin za studena. Je tedy jedním z důvodů, proč je potřeba používat při tavném svařování ochranný

plyn, který zabraňuje vodíku, kyslíku a dusíku kontaktu se svarovou lázní. Kromě atmosféry může být zdrojem také například vlhký obal elektrody, tavidla nebo nevhodná povrchová úprava svařovacího drátu. Obsah vodíku v základním materiálu by neměl překročit hodnotu 2 mililitry na 100 gramů. [5]

### 2.4.9 Síra a fosfor

Síra (S) je nekovový alotropický prvek, který se v hojném množství vyskytuje v přírodě. Je to pevná látka se žlutým zbarvením. Síra se používá převážně k výrobě střelného prachu, zápalek a jako dezinfekční prostředek. [27]

V tavenině se síra vylučuje jako sulfidické vměstky na hranicích zrn. Prvky, které mají k síře větší afinitu než železo, například mangan, působí na vylučování sulfidů při její nižší koncentraci a usměrnění sulfidů do mezidendritických prostor je proto menší. Pokud má tedy ocel vyšší obsah síry, měl by přídavný svařovací materiál obsahovat vyšší procento manganu. [12]

Fosfor (P) je také nekovový alotropický prvek, který se ale v přírodě nevyskytuje volně, nýbrž pouze ve sloučeninách. Nejvýznamnější uplatnění fosfor nachází v zemědělství, kde se používají jeho sloučeniny jako hnojiva fosfáty a superfosfáty. [27]

V oceli přítomnost fosforu zvyšuje pevnost a tvrdost, ale jeho vliv závisí na obsahu uhlíku. Při obsahu uhlíku do 0,01 % se uvádí, že má fosfor vliv také na zvýšení tažnosti. Při vyšším obsahu uhlíku nad 0,05 % fosfor výrazně zvyšuje křehkost. Oceli, které mají obsah fosforu nad 0,12 %, se považují za křehké i při pokojové teplotě. [12]

V oblasti svařování patří tyto prvky (síra i fosfor) ke škodlivým, takzvaným nečistotám, a považují se za hlavní příčinu vzniku krystalizačních a likvačních trhlin za horka, protože spolu se železem tvoří sulfidy a fosfidy, které jsou nízkotavitelné chemické sloučeniny. Pro vznik svarového spoje s požadovanou jakostí by obsah síry a fosforu neměl překročit 0,04 %. [5]



**Obr. 21** Síra a fosfor (vlevo): síra v pevném skupenství [28], (vpravo): červený fosfor [29]

## 3 Experimentální část práce

Jak vyplývá z teorie svařování kovů, pro vznik svarového spoje se zaručenou kvalitou musí mít základní a přídavný materiál stejné nebo velice podobné chemické složení. Toto tvrzení je základním stavebním kamenem tohoto experimentu a ověření výše uvedeného tvrzení je také jeho cílem.

Pro tento experiment jsem si zvolil dva základní materiály. První z těchto materiálů je ocel 1.4301 (austenitická nerezová ocel) a druhý je materiál 1.4509 (feritická nerezová ocel). Pro zhotovení svarového spoje byly jednotlivě použity tři přídavné materiály (ocelový austenitický drát, ocelový feritický drát a austenitický drát s přibližně 10 % feritu).

Svařence byly provedeny v různých kombinacích materiálů (celkem tedy 6 kombinací), následně byly podrobeny zkoušce tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 (ČSN EN ISO 4136 pro svarové spoje) a makroskopické kontrole svarů dle normy ČSN EN ISO 17639.

### 3.1 Základní materiál

#### 3.1.1 Austenitický základní materiál

**Označení materiálu dle ČSN EN ISO 10 027-2:** 1.4301

**Označení materiálu dle ČSN EN ISO 10 027-1:** X5CrNi18-10

**Tvar základního materiálu:** trubka  $\varnothing$  50 mm

**Dodavatel základního materiálu:** Aperam s.r.o.

Ocel 1.4301, viz tab. 2, je známa jako chromniklová nerezová ocel s austenitickou strukturou a někdy je označována také jako „potravinářská“ ocel, která je vhodná k tváření za studena (například ohýbání) a patří k nejpoužívanějším nerezovým ocelím. Austenitická struktura materiálu je zajištěna přítomností legur niklu, který patří mezi austenitotvorné prvky. Nicméně nejvýše obsaženým prvkem v této oceli je chrom, a to s osmnácti hmotnostními procenty. Úkol chromu v této oceli je zajištění odolnosti proti korozi, a protože pro schopnost pasivace musí být chrom v materiálu obsažen více než jedenácti a půl procenty, je ocel 1.4301 zařazována do kategorie nerezových ocelí.

S obsahem uhlíku 0,05 %, jak říká její označení dle normy ČSN EN ISO 10 027-1, patří do skupiny ocelí se zaručenou svařitelností (ve výpočetním vzorci pro uhlíkový ekvivalent hraje uhlík nejvýznamnější roli). Tato ocel neobsahuje v žádném výraznějším množství legury, které by podpořily mechanické vlastnosti. Její mez kluzu se pohybuje pouze mezi 190 až 230 [MPa] (dle rozměru) a mez pevnosti je mezi 500 až 750 [MPa].

Ocel 1.4301 je běžně využívána v potravinářském, farmaceutickém a automobilovém průmyslu.

**Tab. 2** Specifikace základního materiálu 1.4301 [30]

<b>Chemické složení [hm. %]<sup>7)</sup></b>							
C	Si	Mn	P	S <sup>1)</sup>	Cr	Ni	N <sup>8)</sup>
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,5–19,5	8,00–10,5	max 0,11
<b>Mechanické vlastnosti</b>							
Polotovar, norma			C <sup>2)</sup> [1][2][17]	H <sup>3)</sup> [1][2][17]	P <sup>4)</sup> [1][2][17]	T <sup>5)</sup> [1][12][17]	
Rozměr t, d [mm]			≤ 8	≤ 13,5	≤ 75	≤ 160	>160 ≤ 250
Stav			po rozpouštěcím žíhání (+AT)				
Mez kluzu R <sub>p0,2</sub> [MPa] min			230	210		190	
Mez kluzu R <sub>p1,0</sub> [MPa] min			260	250		225	
Mez pevnosti R <sub>m</sub> [MPa]			540–750	520–720		500–700	
Tažnost A [%]	podél min		–			45	–
	příčně min		45			–	35
<b>Fyzikální vlastnosti</b>							
Hustota ρ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Měrná tepelná kapacita c <sub>p</sub> [J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztažnosti α [K <sup>-1</sup> ]		Tepelná vodivost λ <sub>t</sub> [W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> ]		Elektrický odpor při 20 °C [Ω·mm <sup>2</sup> ·m <sup>-1</sup> ]	
7900	500	18,0·10 <sup>-6</sup> (20–500 °C)		15		0,73	

### 3.1.2 Feritický základní materiál

**Označení materiálu dle ČSN EN ISO 10 027-2:** 1.4509

**Označení materiálu dle ČSN EN ISO 10 027-1:** X2CrTiNb18

**Tvar základního materiálu:** trubka Ø 50 mm

**Dodavatel základního materiálu:** Aperam s.r.o.

Zástupcem feritického materiálu bude ocel 1.4509, viz tab. 3. Feritickou strukturu v této oceli zaručuje obsah tří důležitých legur. Nejvíce zastoupeným prvkem je zde chrom (18 %) a to pro získání schopnosti pasivace. Chrom je také prvkem feritotvorným, který snižuje teploty A<sub>3</sub> (teplota přeměny mezi Fe α/β a Fe γ) a A<sub>4</sub> (teplota přeměny mezi Fe γ a Fe δ). Dalšími přítomnými legurami, které jsou též feritotvorné, jsou titan a niob. Na rozdíl od chromu, oba tyto prvky teplotu A<sub>3</sub> zvyšují.

Svařitelnost základního materiálu je zajištěna velice nízkým obsahem uhlíku, který je u této oceli maximálně 0,03 hmotnostních procent. Díky tomu, že ocel 1.4509 obsahuje legury niobu, má materiál zlepšené chemické vlastnosti, jako jsou žáruvzdornost



a žárupevnost a to i přes to, že ho v oceli je pouze do jednoho hmotnostního procenta. Přítomnost titanu mírně zvyšuje mechanické vlastnosti.

Ocel 1.4509 nachází využití například v potravinářském, mlékárenském a automobilovém průmyslu.

**Tab. 3** Specifikace základního materiálu 1.4509 [30]

<b>Chemické složení [hm. %]</b>							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Nb	Ti
max 0,03	max 1,00	max 1,00	max 0,040	max 0,015	17,5–18,5	3xC+ (0,30–1,00)	0,10–0,60
<b>Mechanické vlastnosti</b>							
Rozměr t, d [mm]		≤ 6					
Stav žíhaný		pás válcovaný za studena					
Mez kluzu $R_p$ 0,2 [MPa]	podél min	230					
	napříč min	250					
Mez pevnosti $R_m$ [MPa]		430–630					
Tažnost $A_{80}$ nebo A [%] min		18					
Kontrakce Z [%]		–					
Nárazová práce [J]		–					
Tvrdość HB		–					
Modul pružnosti E [GPa]		220					
Hodnoty modulu pružnosti E [GPa] při zvýšených teplotách							
Teplota [°C]		100	200	300	400		
Modul pružnosti E [GPa]		215	210	205	195		
Min hodnoty meze kluzu $R_p$ 0,2 [MPa] při zvýšených teplotách (stav žíhaný)							
Teplota [°C]		100	150	200	250	300	350
Mez kluzu $R_p$ 0,2 [MPa]		230	220	210	205	200	180
<b>Fyzikální vlastnosti</b>							
Hustota $\rho$ [kg . m <sup>-3</sup> ]	Měrné teplo $C_p$ [J . kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	Teplotní součinitel roztlačnosti $\alpha$ [K <sup>-1</sup> ]	Tepelná vodivost $\lambda_t$ [W . m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	Rezistivita [ $\Omega$ . mm <sup>2</sup> mm <sup>-1</sup> ]			
7 700	460	10,0 . 10 <sup>-6</sup>	25	0,60			

## 3.2 Příkladový materiál

### 3.2.1 Austenitický přídatný materiál

**Výrobce:** ESAB Vamberg

**Obchodní označení:** OK Autrod 16.95

**Typ přídatného materiálu:** plný drát

**Průměr přídatného materiálu:** 1 [mm]

**Balení přídatného materiálu:** sud 250 [kg]

První přídavný materiál, OK Autrod 16.95, viz tab. 4, má austenitickou strukturu, a to i přes vysoký obsah chromu (18 %), který se řadí mezi feritotvorné prvky. Vznik austenitické struktury zajišťují další vysoce obsažené prvky nikl (8 %) a mangan (7 %). Všechny tři nejvíce obsažené prvky snižují svou přítomností teplotu  $A_3$ , kterou označujeme jako teplotu přeměny mezi Fe  $\alpha/\beta$  a Fe  $\gamma$ .

**Tab. 4** Specifikace přídavného materiálu OK Autrod 16.95 [11]

Typické vlastnosti v tahu						
<b>As welded</b>						
<b>Mez pevnosti v tahu</b>		<b>Mez skluzu</b>		<b>Prodloužení</b>		
640 MPa		450 MPa		41 %		

Vrubová houževnatost		
<b>Podmíněný příkaz</b>	<b>Testovací teplota</b>	<b>Vrubová houževnatost</b>
As welded	20 °C	130 J

Chemické složení svarového kovu						
<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Cu</b>	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>
7.0 %	0.20 %	0.10 %	0.08 %	0.9 %	8.1 %	18.7 %

Údaje ukládání				
<b>A</b>	<b>Produktivita</b>	<b>Průměr</b>	<b>Rychlost podávání drátu</b>	<b>V</b>
55-160 A	1.0-4.1 kg/h	0.8 mm	4.0-17.0 m/min	15-24 V
65-220 A	1.1-5.4 kg/h	0.9 mm	3.5-18.0 m/min	15-28 V
80-240 A	1.5-6.0 kg/h	1.0 mm	4.0-16.0 m/min	15-28 V
100-300 A	1.6-7.5 kg/h	1.2 mm	3.0-14.0 m/min	15-29 V
230-375 A	5.2-8.6 kg/h	1.6 mm	5.5-9.0 m/min	23-31 V

<b>Typ legování:</b>	Austenitic (18 % Cr - 8 % Ni - 7 % Mn)
----------------------	--

Nízký obsah uhlíku (0,08 %) zajišťuje zaručenou svařitelnost a osmnácti procentní obsah chromu zajišťuje schopnost pasivace a díky tomu můžeme ocel označit jako nerezovou. Co se týče mechanických vlastností, tak ocel má díky vyššímu obsahu manganu zvýšenou mez kluzu na 450 [MPa] (u materiálu 1.4301, který má mimo obsah manganu velice podobné chemické složení, se mez kluzu pohybuje na 210 [MPa]).

### 3.2.2 Feritický přídavný materiál

**Výrobce:** ESAB Vamberk

**Obchodní označení:** OK Autrod 430LNbTi

**Typ přídavného materiálu:** plný drát

**Průměr přídavného materiálu:** 1 [mm]

**Balení přídavného materiálu:** Sud 250 [kg]

Druhý přídavný materiál prodává firma ESAB pod označením OK Autrod 430LNbTi, viz tab. 5. Podle jeho označení, ve kterém jsou obsaženy nejdůležitější legury (mimo chromu) můžeme říct, že se jedná o ideální přídavný materiál pro svařování materiálu 1.4509, který je použit jako jeden ze základních materiálů. Stejně jako u oceli, pro kterou je tento přídavný materiál určen, se jedná o nerezovou ocel s feritickou strukturou, jenž je zajištěna přítomnými legurami chromu, niobu a titanu.

**Tab. 5** Specifikace přídavného materiálu OK Autrod 430LNbTi [11]

Typical Weld Metal Analysis %							
wire composition							
Mn	Mo	Cu	C	Ti	Si	Ni	Cr
0.5 %	0.06 %	0.10 %	0.01 %	0.20 %	0.5 %	0.2 %	18.5 %
<b>Classifications:</b>		EN ISO 14343-A; G Z 18 L Nb Ti; Wire Electrode; Werkstoffnummer; 1.4509 mod; Wire Electrode					
<b>Alloy Type:</b>		18 % Cr - Nb stabilized					

Potřebná pasivace je zajištěna dostatečným množstvím chromu a svařitelnost minimálním množstvím uhlíku. Tento přídavný materiál je vhodný také například ke svařování materiálů 1.4510, 1.4511 a 1.4512.

### 3.2.3 Dvoufázový přídavný materiál

**Výrobce:** ESAB Vamberk

**Obchodní označení:** OK Autrod 309Si

**Typ přídavného materiálu:** plný drát

**Průměr přídavného materiálu:** 1 [mm]

**Balení přídavného materiálu:** cívka 15 [kg]

Jako třetí a poslední přídavný materiál jsem pro tento experiment vybral ocelový drát s označením OK Autrod 309Si, viz tab. 6, který má podle výrobce austenitickou strukturu

s přibližně deseti procenty feritu. Jedná se tedy dvoufázový materiál, čehož je dosaženo vhodným podílem austenitotvorných a feritotvorných prvků, a to většinou především chromem a niklem, stejně jako v tomto konkrétním případě.

**Tab. 6** Specifikace přídavného materiálu OK Autrod 309Si [11]

Typické vlastnosti v tahu		
<b>As welded</b>		
Mez pevnosti v tahu	Mez skluzu	Prodloužení
620 MPa	440 MPa	36 %

Vrubová houževnatost		
Podmíněný příkaz	Testovací teplota	Vrubová houževnatost
As welded	20 °C	100 J
As welded	-60 °C	80 J
As welded	-110 °C	60 J

Chemické složení svarového kovu							
Mn	Mo	Cu	C	Si	Ferrite FN	Ni	Cr
1.8 %	0.20 %	0.15 %	0.08 %	0.9 %	5 %	12.7 %	23.3 %

Údaje ukládání				
A	Produktivita	Průměr	Rychlost podávání drátu	V
50-140 A	0,8-2,7 kg/h	0.8 mm	3,4-11 m/min	16-22 V
80-190 A	1,1-3,1 kg/h	1.0 mm	2,9-8,4 m/min	16-24 V
180-280 A	2,6-4,5 kg/h	1.2 mm	4,9-8,5 m/min	20-28 V
230-350 A	3-5,2 kg/h	1.6 mm	3,2-5,5 m/min	24-28 V
<b>Typ legování:</b>		Austenitic (with approx. 10 % ferrite) 23 % Cr - 13 % Ni - High Si		

Jako ve všech ostatních případech, tak i v tomto materiálu chrom pozitivně ovlivňuje korozivzdornost. Chrom navíc zvyšuje žáruvzdornost a díky jeho vyššímu obsahu, můžeme tuto ocel zařadit do žárupevných materiálů.

### 3.3 Výroba svařenců

Výroba zkušebních vzorků byla provedena v podmínkách firmy Tenneco v Hodkovicích nad Mohelkou (tato firma se zabývá výrobou výfukových systémů a katalyzátorů při podmínkách ekologicky šetrné výroby).

Aby byly podmínky pro vytvoření vzorků co nejpodobnější, zvolil jsem pro jejich výrobu automatické svařování metodu MAG – Metal Active Gas.

**Svařovací buňka:** Flip-over - Yaskawa

**Ovládání svařovacích robotů:** DX200 - Yaskawa

**Ovládání svařovacího zdroje:** Q84 – SKS Welding Systems

**Hořák:** 58-1-45-400 - SKS Welding Systems

**Hubice:** 41-8-13-BXS - SKS Welding Systems

**Kontaktní špička:** 40-4-7-1.0S - SKS Welding Systems

**Přídavný materiál:** dle vzorku - ESAB Vamberk

**Ochranný plyn:** 98% Ar 2% CO<sub>2</sub>, firma MESSER Technogas

Svařence byly vytvořeny ze dvou 15 centimetrových trubek určitého materiálu, které měly vnější průměr 50 milimetrů a tloušťku stěny 1,2 milimetrů. Trubky byly spojeny tupými svary. Protože se jednalo o materiál s malou tloušťkou, nebylo třeba komponenty tvarově upravovat a mohlo dojít ke spojení tupým „I“ svarem bez mezery. Kvůli nemožnosti upnutí obou trubek, bylo potřeba díly nejprve spojit třemi bodovými svary ruční TIG svářečkou.

Svařovací parametry, které byly použity pro vytvoření vzorků pro tahovou zkoušku a makrografickou kontrolu vyplývají ze zkušeností a praxe programátora. Rychlost svařování byla použita pro všechny tři vybrané přídavné materiály stejná, a to 200 m/min. Rozdíl svařovacích parametrů mezi feritickým (viz tab. 7) a austenitickým (viz tab. 8) drátem spočíval ve změně materiálu v řídicí jednotce Q84 a mírné korekci po prvním nepovedeném vzorku.

**Tab. 7** Tabulka použitých parametru pro svařování feritickým drátem

		Start	P2	OFF					Unit
		Wire feed 1	4.0	6.0					m/min
		SynchroWeld OFF							
		Window width	0.0						±%
		Voltage	14.8	16.8					V
		Correction	0.0	-0.8					V
		Welding current	100	134					A
		Char. (Auto)	7.00	5.24					V/100A
		Release	ON	ON					
		Program duration	0.2						s
		Test AutoComp	ON						
		On AutoComp limit	STOP						
		AutoComp limit	3.0						V
		AutoComp filter	1.00						s
		On lost arc	STOP	STOP					
		Arc filter	0.20	0.20					s
		Motor monitoring	ON						
		Motor limit	2.0						A
		Motor filter	1.00						s

Process		MIG/MAGm	Start parameter	
User	Expert		Ignition filter	2.00 s
Operation mode	Extern		T-ign.pulse	3.0 ms
			I-ignition	400 A
			Wire in speed	2.0 m/min

IM02 1.0	
Diameter	1.0 mm

Ar>9%CO2	
Gas pre flow	0.20 s
Gas past flow	0.20 s
Gas quantity	12.0 l/min

Miscellaneous	
Mode	Single wire
Motor 1/2	Motor 1
Lift Arc	OFF
Polwender	OFF
Program Slope	OFF
Master mode	Master
Arc release	after ignition
Gas flow	Don't test
Water pump	OFF
Measure interval	0.10 s
Alarm time	2.00 s

Program parameter	
UpSlope	90.0 %
DownSlope	2.0 %

EndParameter	
T-End pulse	2.0 ms
Burn back	2.0 mm
End crater (P7)	0
End pulse current	370 A

**Tab. 8** Tabulka použitých parametru pro svařování austenitickým a dvoufázovým drátem

		Start	P2	OFF					Unit
		Wire feed 1	4.0	5.3					m/min
		SynchroWeld OFF							
		Window width	0.0						±%
		Voltage	14.6	15.8					V
		Correction	-0.4	-1.0					V
		Welding current	112	126					A
		Char. (Auto)	6.24	5.56					V/100A
		Release	ON	ON					
		Program duration	0.2						s
		Test AutoComp	ON						
		On AutoComp limit	STOP						
		AutoComp limit	3.0						V
		AutoComp filter	1.00						s
		On lost arc	STOP	STOP					
		Arc filter	0.20	0.20					s
		Motor monitoring	ON						
		Motor limit	2.0						A
		Motor filter	1.00						s

Process		MIG/MAGm	Start parameter	
User	Expert		Ignition filter	2.00 s
Operation mode	Extern		T-ign.pulse	3.0 ms
			I-ignition	352 A
			Wire in speed	2.0 m/min

CRNI 2-5	
Diameter	1.0 mm

Ar>9%CO2	
Gas pre flow	0.20 s
Gas past flow	0.20 s
Gas quantity	12.0 l/min

Miscellaneous	
Mode	Single wire
Motor 1/2	Motor 1
Lift Arc	OFF
Polwender	OFF
Program Slope	OFF
Master mode	Master
Arc release	after ignition
Gas flow	Don't test
Water pump	OFF
Measure interval	0.10 s
Alarm time	2.00 s

Program parameter	
UpSlope	90.0 %
DownSlope	2.0 %

EndParameter	
T-End pulse	2.2 ms
Burn back	2.0 mm
End crater (P7)	0
End pulse current	370 A

## 3.4 Hodnocení kvality svarových spojů

Hodnocení kvality svarových spojů bylo hodnoceno dvěma způsoby: zkouškou pevnosti v tahu a metalografickým hodnocením makrostruktury získaných svarových spojů.

### 3.4.1 Zkouška tahem

**Norma:** ČSN EN ISO 6892-1 (za pokojové teploty), ČSN EN ISO 4136 (pro zkoušku svarových spojů)

Tahová zkouška je destruktivní zkouška, která se provádí na zkušebních strojích (trhačka) na zkušebních tyčích zkoušeného materiálu nebo svaru. Tahovou zkouškou zjišťujeme hodnoty několika důležitých veličin. Mezi nejdůležitější zjišťované veličiny patří mezní hodnoty kluzu  $R_e$  a pevnosti  $R_m$ , tažnost  $A$  a kontrakce  $Z$ .

**Princip:** Zkouška spočívá v deformaci zkušební tělesa tahovým zatížením, obvykle až do lomu, za účelem stanovení jedné nebo více mechanických vlastností. Pokud není stanovena teplota, při které se má zkouška provádět, měla by se pohybovat mezi 10 °C až 35 °C. [31]

**Nejčastěji zjišťované veličiny:**

**Mez kluzu  $R_e$  [MPa]:** Jedná se o hodnotu, která nám charakterizuje hranici mezi plastickou a elastickou deformací. Tahovou zkouškou můžeme zjistit hodnoty dvou různých mezí kluzu, a to konkrétně horní a dolní mez kluzu. Horní mez kluzu je maximální hodnota napětí, která odpovídá prvnímu poklesu zatížení. Dolní mez kluzu je nejnižší hodnota napětí v průběhu plastického kluzu.

**Mez pevnosti  $R_m$  [MPa]:** Je maximální hodnota zatížení, po jehož překročení dojde k porušení materiálu.

**Tažnost  $A$  [%]:** Představuje schopnost materiálu se plasticky deformovat. Jedná se o trvalé prodloužení délky materiálu po lomu.

$$A = \frac{L_u - L_o}{L_o} * 100 [\%] \quad (2)$$

$L_u$ .....délka zkušební tyče po zatížení [m]

$L_o$ .....původní délka zkušební tyče [m]

**Kontrakce (zúžení)  $Z$  [%]:** Hodnota, která nám popisuje největší změnu průřezu, kolmého na směr zatížení, ke které došlo během zkoušky.

$$Z = \frac{S_o - S_u}{S_o} * 100 [\%] \quad (3)$$

$S_u$ .....průřez zkušební tyče po zatížení [m<sup>2</sup>]

$S_o$ .....původní průřez zkušební tyče [m<sup>2</sup>]

### 3.4.2 Zhotovení vzorků pro tahovou zkoušku

Po zhotovení svarových spojů došlo k vytvoření vzorků pro tahovou zkoušku. Tyto vzorky mají normalizovaný tvar a rozměry dle normy ČSN EN ISO 4136. Ideálním způsobem pro vyříznutí těchto vzorků by bylo použití řezačky s laserovým nebo vodním paprskem, ale vzhledem k nedostupnosti těchto strojů, došlo na vyříznutí ruční úhlovou bruskou. Protože takové vyřezávání je netrénovanou rukou velice nepřesné, bylo potřeba vytvořit některé předpoklady, díky kterým bylo možné se zaměřit na určité rozměry zkušebních vzorků.

**Předpoklad č.1:** Vzhledem k mechanickým vlastnostem přídavných a základních materiálů by se nemělo stát, že zkoušený vzorek praskne ve svaru (pokud svar neobsahuje žádné objemové vady).

**Předpoklad č.2:** Vzhledem tomu, že při svařování dojde k nahřátí základního materiálu a tím jeho ovlivnění, lze předpokládat, že místo porušení materiálu při tahové zkoušce bude v tepelně ovlivněné oblasti (TOO) nebo na hranici přechodu mezi základním a přídavným materiálem při jejich nedokonalém spojení.

Pro tahovou zkoušku bylo zhotoveno celkem 6 vzorků různých kombinací základního a přídavného materiálu, jejich označení je níže. Protože získané výsledky nebudou porovnávány s tabulkovými hodnotami, ale pouze s výsledky mezi sebou, byly zhotoveny i 2 vzorky pouze základního materiálu.

#### Označení zkušebních vzorků

**F**- Feritický základní materiál (ZM)

**FA** - Feritický ZM + Austenitický přídavný materiál (PM)

**FF** - Feritický ZM + Feritický PM

**FD** - Feritický ZM + Dvoufázový PM

**A** - Austenitický ZM

**AA** - Austenitický ZM + Austenitický PM

**AF** - Austenitický ZM + Feritický PM

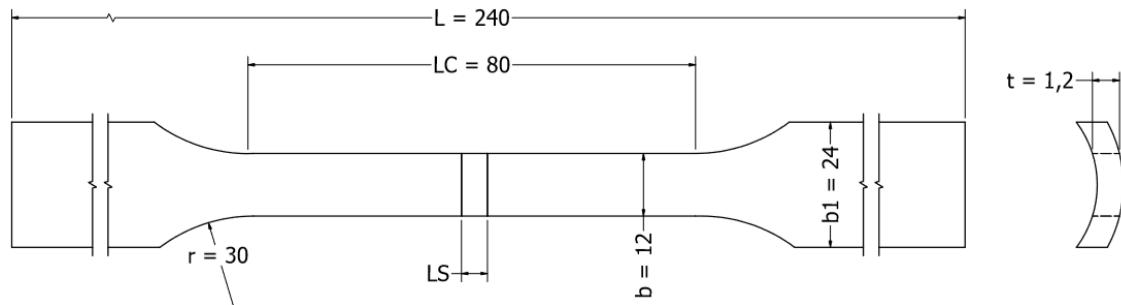
**AD** - Austenitický ZM + Dvoufázový PM

### 3.4.3 Tvar zkušební tyče

Tvar zkušební tyče, viz obr. 22, vychází z normy ČSN EN ISO 4136 (Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Příčná zkouška tahem) z kapitoly 5.5.3.1 Plechy a



trubky. Po určení dvou předpokladů můžeme říct, že nejdůležitější rozměry pro zkoušené vzorky jsou v oblasti svaru a tepelně ovlivněné oblasti. Je proto nezbytné, aby v celé délce zkoušené tyče nebylo místo s menším průřezem.



**Obr. 22** Zkušební tyč pro tahovou zkoušku

- L** - Délka zkušební tyče [mm]
- LC** - Rovnoběžná délka [mm]
- b** - Šířka rovnoběžné délky [mm]
- b1** - Šířka hlavy [mm]
- r** - Poloměr zaoblení u hlavy [mm]
- t** - tloušťka plechu [mm]
- LS** - šířka svaru [mm]

### 3.4.4 Výsledky tahové zkoušky

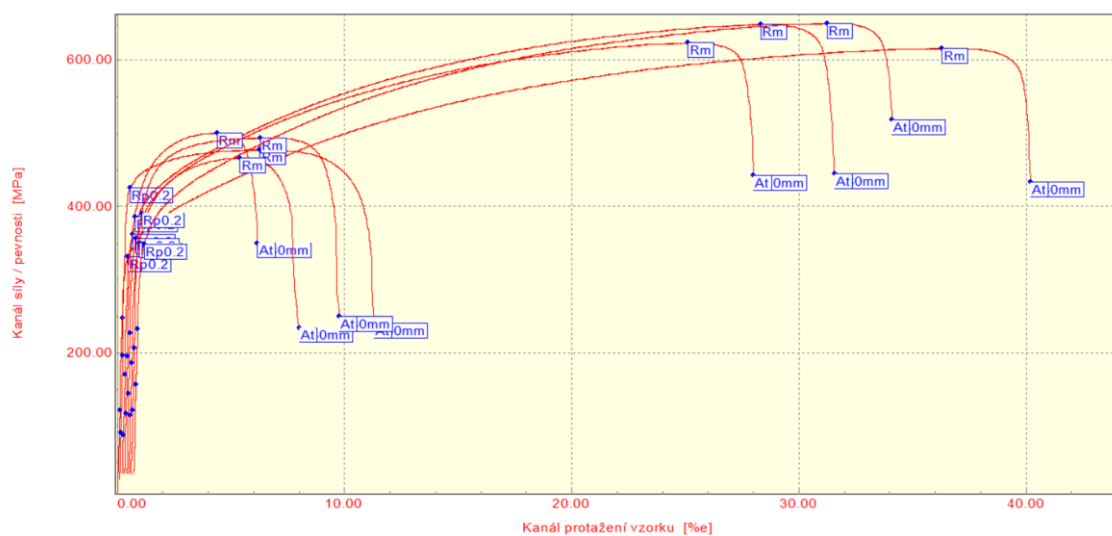
**Stroj:** TIRA TEST 2300

**Software:** LabNET v.4

Tahová zkouška byla prováděna v laboratoři Katedry strojírenské technologie, FS na Technické universitě v Liberci. Zkouška byla provedena postupně na osmi připravených vzorcích na stroji TIRA TEST 2300. Hlavní hodnoty, které byly měřeny jsou mez pevnosti v tahu  $R_m$  [MPa], mez kluzu (v tomto případě smluvní)  $R_{p0,2}$  [MPa] a tažnost  $A_g$  [%], která byla měřena zabudovaným průtahoměrem. Získané hodnoty pevnosti v tahu u jednotlivých vzorků jsou patrné z tab. 9 a z grafických závislostí napětí – deformace na obr. 23. Na obr 24 jsou zkušební vzorky po destrukci vlivem tahové zkoušky.

**Tab. 9** Naměřené hodnoty tahové zkoušky

Zkouška	Vzorek	Mez kluzu Rp [MPa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost Ag [%]
1	AD	348,7	650,7	30,03
2	AA	361,9	648,8	27,65
3	AF	356,1	623,8	24,34
4	A	331,5	616,4	35,79
5	FD	386,1	500,8	3,75
6	FA	390,5	494,2	5,37
7	FF	350,1	466,6	4,55
8	F	425,8	477,8	5,9



**Obr. 23** Výsledky tahových zkoušek sledovaných vzorků



**Obr. 24** Vzorky po tahové zkoušce

### 3.4.5 Zhodnocení výsledků

Získané výsledky ze zkoušky v tahu jsou následující. Největší hodnota meze pevnosti v tahu 651 MPa byla dosažena u vzorku z austenitického základního materiálu svařeného dvoufázovým přídavným materiálem. Napětí na mezi kluzu tento materiál vykazoval 349 MPa a tažnost 30 %. Jen o něco nižší hodnotu pevnosti v tahu byla zjištěna u austenitického základního materiálu s austenitickým přídavným materiálem, která činila 649 MPa. Pevnost na mezi kluzu tento materiál vykazoval 362 MPa a tažnost 28 %. Austenitický základní materiál s feritickým přídavným materiálem vykazoval pevnost v tahu 624 MPa, pevnost na mezi kluzu 356 MPa a tažnost 24 %. Austenitický základní materiál měl mez pevnosti 616 MPa, mez kluzu 332 MPa a tažnost 36 %. Vysoká hodnota tažnosti odpovídá austenitické struktuře. Feritický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem vykazoval pevnost v tahu 501 MPa, hodnotu na mezi kluzu je 386 MPa a tažnost je cca 4 %. Feritický základní materiál s austenitickým přídavným materiálem měl pevnost v tahu 492 MPa, napětí na mezi kluzu 391 MPa a tažnost je cca 5 %. Feritický základní materiál s feritickým přídavným materiálem vykazoval mez pevnosti v tahu 464 MPa, napětí na mezi kluzu 350 MPa a tažnost 4,6 %. Nejnižší mez pevnosti v tahu byla zjištěna u feritického základního materiálu, která činila 478 MPa, avšak napětí na mezi kluzu bylo 426 MPa. Poměr mezi  $R_m$  a  $R_{p0,2}$  je 1,12. Tažnost tohoto základního materiálu je 5,9 %.

## 3.5 Makroskopická kontrola svarů

**Norma:** ČSN EN ISO 17639, ČSN EN ISO 5817

Cílem makroskopické kontroly je hodnocení struktury svarového spoje a odhalení vad vzniklých při svařování, které nejsou viditelné na povrchu vytvořeného svaru.

**Princip:** Makroskopická kontrola se používá k odhalení makroskopických charakteristik svarového spoje, obvykle kontrolou příčného řezu. Toto se provádí vizuální nebo optickou kontrolou připraveného povrchu, před nebo po naleptání. [32]

### 3.5.1 Zhotovení vzorků pro makroskopickou kontrolu svarů

Při odběru vzorků ze svařenců nesmí dojít k jejich deformaci a jeho teplota nesmí přesáhnout teplotu fázové přeměny materiálu. Protože je svařenec z měkkého kovu s malou tloušťkou, bylo možné odebrat hrubý vzorek úhlovou bruskou. Pro vykonání příčného řezu byla použita stolní rozbrušovací pila Labotom-5 od firmy Struers.

V případě, že by bylo důležité vzorky uchovávat nějakou dobu nepoškozené, následovala by operace „preparace“, kdy se vzorek vloží do formy tak, aby plocha, která je určena ke zkoušení byla ve styku se dnem formy. Poté se vzorek zalije hmotou (například

pryskyřice), která po určitém čase ztvdne a tím chrání vzorek před působením okolí. V tomto případě vzorky není potřeba uschovat, a proto byl proces preparace vynechán.

Následujícím krokem je broušení a následné leštění, které slouží k odstranění nerovností na zkoumaném průřezu svarového spoje. Tyto operace byly provedeny na stroji LaboPol-25 (obr. 25) od firmy Struers. Jedná se o dvoukotoučový stroj s vodním chlazením určený pro ruční broušení a leštění. Pro broušení byl použit brusný SiC papír s drsností 120  $\mu\text{m}$  a pro leštění diamantový brusný disk s drsností 1200  $\mu\text{m}$ .

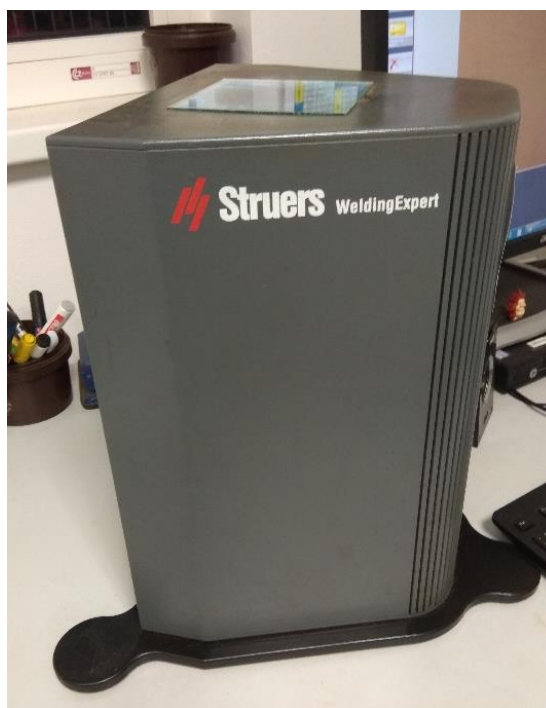


**Obr. 25** LaboPol-25

Finální operace pro přípravu metalografických vzorků je leptání (většinou chemická reakce). Leptáním dokážeme vyvolat strukturu vzorků pro lepší viditelnost a kontrast pod makroskopem. Leptadla se volí podle použitých materiálů. Pro tyto materiály bylo použito leptadlo Adler, který je určen pro vysoce legované a korozivzdorné oceli.

### **3.5.2 Výsledky při sledování makroskopické struktury vzorků**

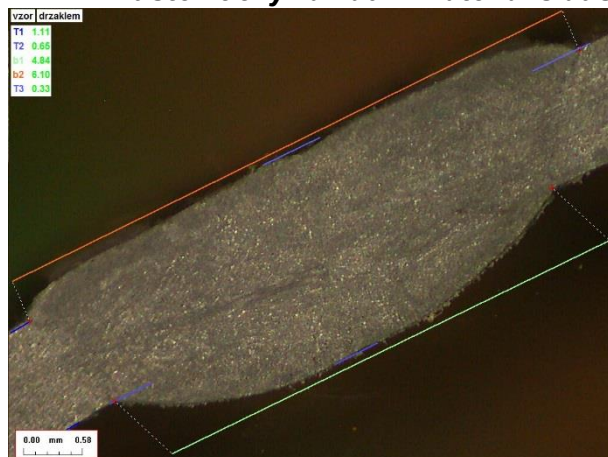
Kontrola kvality proběhla dle normy ČSN EN ISO 5817, což je norma pro posuzování vad svarových spojů vzniklé tavným svařováním na oceli, niklu, titanu a jejich slitinách. Základní měřené rozměry byly šířka svaru a převýšení a dále byla také kontrolována přítomnost jiných (hlavně objemových) vad, při padesátinásobném přiblížení. Fotografie vzorků byly pořízeny na makroskopu WeldingExpert (obr. 26) a softwarem WeldingExpert-5 od firmy Struers.



Obr. 26 WeldingExpert

### 3.5.2.1 Austenitický základní materiál

#### Austenitický základní materiál s austenitickým přídavným materiálem

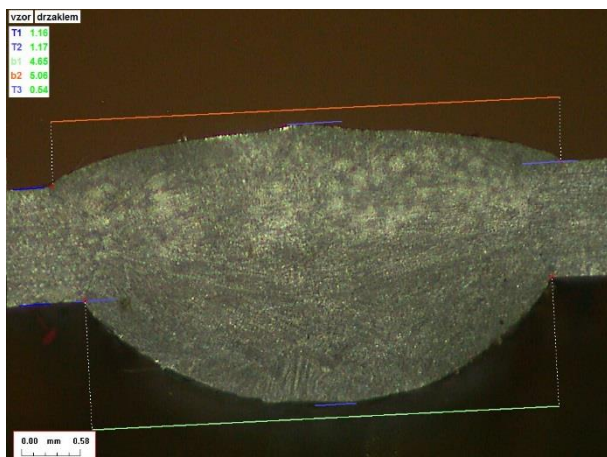


#### Vzorek AA [mm]

**Základní materiál - austenit**  
**Přídavný materiál - austenit**  
**Tloušťka materiálu: T1 = 1,11**  
**Šířka kořene svaru: b1 = 4,84**  
**Převýšení kořene: T2 = 0,66**  
**Horní šířka svaru: b2 = 6,10**  
**Horní převýšení: T3 = 0.33**  
**Jiné vady: žádné**

Obr. 27 AA - makroskopický vzorek

### **Austenitický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem**

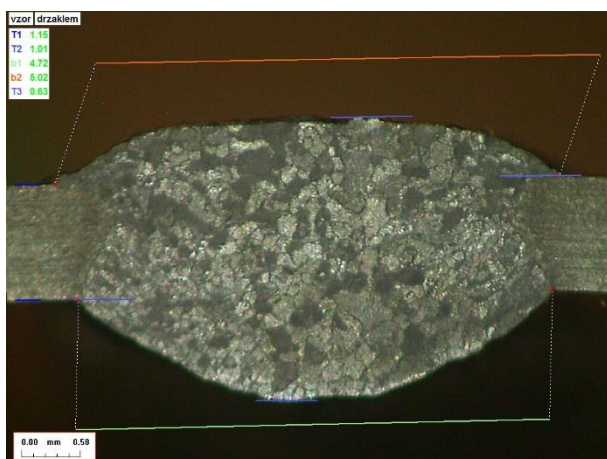


#### **Vzorek AD [mm]**

**Základní materiál** - austenit  
**Přídavný materiál** - dvoufázový  
**Tloušťka materiálu:** T1 = 1,16  
**Šířka kořene svaru:** b1 = 4,65  
**Převýšení kořene:** T2 = 1,17  
**Horní šířka svaru:** b2 = 5,06  
**Horní převýšení:** T3 = 0,54  
**Jiné vady:** žádné

**Obr. 28** AD - makroskopický vzorek

### **Austenitický základní materiál s feritickým přídavným materiálem**



#### **Vzorek AF [mm]**

**Základní materiál** - austenit  
**Přídavný materiál** - ferit  
**Tloušťka materiálu:** T1 = 1,15  
**Šířka kořene svaru:** b1 = 4,72  
**Převýšení kořene:** T2 = 1,01  
**Horní šířka svaru:** b2 = 5,02  
**Horní převýšení:** T3 = 0,63  
**Jiné vady:** žádné

**Obr. 29** AF - makroskopický vzorek

## **3.5.2.2 Feritický základní materiál**

### **Feritický základní materiál s austenitickým přídavným materiálem**

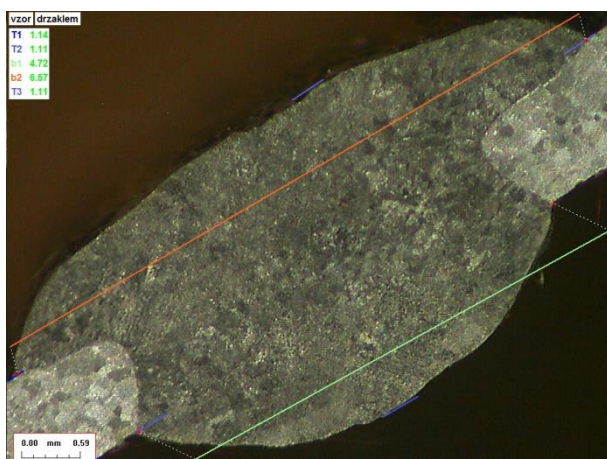


#### **Vzorek FA [mm]**

**Základní materiál** - ferit  
**Přídavný materiál** - austenit  
**Tloušťka materiálu:** T1 = 1,16  
**Šířka kořene svaru:** b1 = 3,42  
**Převýšení kořene:** T2 = 0,67  
**Horní šířka svaru:** b2 = 5,70  
**Horní převýšení:** T3 = 0,98  
**Jiné vady:** žádné

**Obr. 30** FA - makroskopický vzorek

### **Feritický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem**

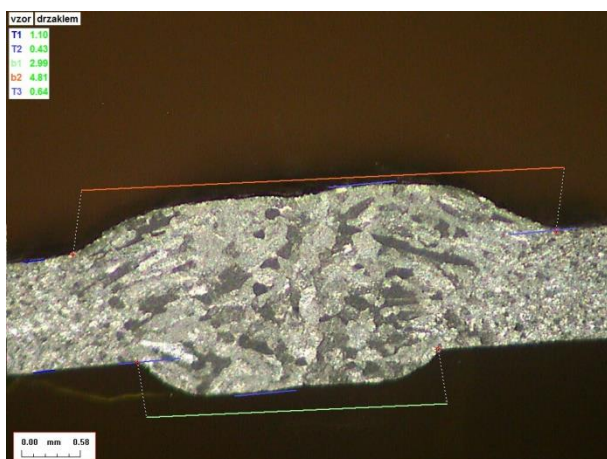


#### **Vzorek FD [mm]**

**Základní materiál - ferit**  
**Přídavný materiál - dvoufázový**  
**Tloušťka materiálu: T1 = 1,14**  
**Šířka kořene svaru: b1 = 4,72**  
**Převýšení kořene: T2 = 1,11**  
**Horní šířka svaru: b2 = 6,57**  
**Horní převýšení: T3 = 1,11**  
**Jiné vady: žádné**

**Obr. 31** FD - makroskopický vzorek

### **Feritický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem**



#### **Vzorek FF [mm]**

**Základní materiál - ferit**  
**Přídavný materiál - ferit**  
**Tloušťka materiálu: T1 = 1,10**  
**Šířka kořene svaru: b1 = 2,99**  
**Převýšení kořene: T2 = 0,43**  
**Horní šířka svaru: b2 = 4,81**  
**Horní převýšení: T3 = 0,64**  
**Jiné vady: žádné**

**Obr. 32** FF - makroskopický vzorek

## **3.5.3 Zhodnocení výsledků**

Na vzorcích, na kterých byla vykonána makroskopická kontrola kvality svarových spojů, se neobjevila žádná objemová (trhlina, póry, vměstky...) vada, která by mohla způsobit zhoršení kvality a předčasné porušení materiálu při zatížení.

### **Převýšení kořene:**

Maximální hodnota převýšení kořene svaru dle normy ČSN EN ISO 5817 a stupně kvality B vyplývá z tloušťky základního materiálu a šířky kořene svaru. Pro tloušťku materiálu 0,5 až 3 milimetry se maximální rozměr převýšení vypočítává vztahem (4).

Převýšení kořene vzorků výrazněji přesáhne hodnotu jednoho milimetru pouze ve dvou případech, a to konkrétně vzorky AD a FD. U vzorku AD je tato hodnota 1,17 [mm] a u vzorku FD 1,11 [mm]. Vzhledem k tomu, že hodnota šířky kořene svaru u obou vzorků je

větší než 4 milimetry, i tyto vzorky můžeme označit jako vyhovující, protože maximální možná hodnota převýšení kořene svaru může být dle vztahu (4) až 1,4 milimetry.

$$h \leq 1\text{mm} + 0,1b \text{ [mm]} \quad (4)$$

**h**.....převýšení kořene svaru [mm]

**b**.....šířka kořene svaru [mm]

#### **Převýšení svaru:**

Pro maximální hodnotu převýšení svaru, na rozdíl od převýšení kořene svaru, není rozhodující tloušťka základního materiálu, ale pouze šířka svaru. I přes to se v tomto případě pro určení maximální hodnoty převýšení svaru použije stejný vztah (4) (pokud by byla tloušťka materiálu větší než 3 mm, byl by pro převýšení kořene použit mírně odlišný vztah).

U převýšení svaru byla hodnota větší než 1 milimetr pouze v jednom případě, u vzorku FD tato hodnota dosáhla 1,11 milimetrů. I tento rozměr vzorku FD je v pořádku, protože má svar široký 6,57 milimetrů a díky tomu maximální hodnota převýšení svaru vzorku FD je 1,65 milimetrů.



## 4 Závěr

Předložená bakalářská práce byla řešena na téma: „Porovnání přídavných drátů při svařování metodou MAG“. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí. V části teoretické je popsáno svařování jako technologie obecně a svařovací metoda MAG (Metal Active Gas) do větších podrobností, protože byla zvolena jako hlavní svařovací metoda pro tuto práci. Velká část teoretické části se zabývá strukturními fázemi ocelí (austenit, ferit) a chemickými prvky, které mají na tyto fáze vliv.

Hlavní část experimentální byla zaměřena na sledování schopnosti vytvoření kvalitního svarového spoje mezi přídavnými a základními materiály s rozdílnou strukturou a chemickým složením. Při řešení této bakalářské práce bylo použito 6 zkušebních vzorků svarových spojů pro tahovou zkoušku a metalografické hodnocení makrostruktury svarových spojů (feritický základní materiál s austenitickým přídavným materiálem, feritický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem, feritický základní materiál s feritickým přídavným materiálem, austenitický základní materiál s austenitickým přídavným materiálem, austenitický základní materiál s dvoufázovým přídavným materiálem a austenitický základní materiál s feritickým přídavným materiálem). Pro zkoušku tahem byly navíc použity dva vzorky základních materiálů (austenitický a feritický) pro konečné porovnání výsledků.

Na základě výsledků řešení této bakalářské práce lze formulovat tyto dílčí závěry:

1. Použité svařovací zařízení, svařovací parametry a navržený postup svařování zajistily vytvoření kvalitních svarových spojů použitých materiálů. Což bylo potvrzeno i průběhem následné zkoušky v tahu, kde nedošlo k porušení materiálu ve svaru.
2. Spojení mezi základním a přídavným materiálem bylo taktéž v pořádku, protože při zkoušce tahem nedošlo k porušení v přechodové oblasti svaru a svarového kovu, ale naopak u všech vzorků došlo k porušení v oblasti základního materiálu.
3. Tahová zkouška přinesla dílčí informace o pevnostních vlastnostech jednotlivých vzorků.
4. Z hlediska hodnocení provedených návarů, největší hodnota meze pevnosti v tahu 651 MPa byla dosažena u vzorku z austenitického základního materiálu svařeného dvoufázovým přídavným materiálem. Napětí na mezi kluzu tento materiál vykazoval 349 MPa a tažnost 30 %. Poměr mezi  $R_m / R_{p0.2} = 1,86$ . Tato hodnota také svědčí o poměrně velkých plastických schopnostech materiálového spoje, což potvrzuje i hodnota tažnosti 30 %.

Naopak nejnižší hodnota meze pevnosti byla stanovena u vzorku z feritického základního materiálu svařovaného feritickým přídavným materiálem, byla dosažena

nejnižší hodnota na mezi pevnosti, která činila 467 MPa, napětí na mezi kluzu bylo 350 MPa a tažnost 4,5 %. Poměr mezi  $R_m / R_{p 0.2} = 1,33$ .

5. Makroskopická kontrola svarů ukázala, že rozměry vytvořených svarových spojů vyhovují normě ČSN EN ISO 5817 a jejímu nejpřísnějšímu stupni kvality „B“.
6. Na žádném z makroskopických snímků také nebyly objeveny žádné objemové vady, a proto mohly být vzorky z makroskopického hlediska označeny jako správné.

V průběhu vypracovávání této bakalářské práce jsem si uvědomil, že téma „možnost vytvoření kvalitního svarového spoje za použití rozdílných základních a přídatných materiálů“ je mnohem komplexnější, než jsem si zpočátku myslel, a proto by bylo vhodné zkoušené svařence podrobit více zkouškám, například rázovou zkouškou Charpyho kladivem pro zkoušku vrubové houževnatosti, zkouškou ohybovou neboli zkouškou lámavosti, a jiné. Protože vybraný feritický materiál se řadí do skupiny žáruvzdorných a žárupevných materiálů, bylo by také vhodné vybrané zkoušky provést, jak za pokojové, tak za zvýšené teploty.

Před případným dalším postupem a volbou zkoušených materiálů je také důležité si říct, co vůbec znamená „podobné chemické složení“, které je potřeba pro vytvoření kvalitního svarového spoje. Na začátku tohoto experimentu jsem si zvolil dva základní a tři přídatné materiály u kterých jsem předpokládal již dostatečný rozdíl v chemickém složení a v jejich struktuře (například X5CrNi18-10 s X2CrTiNb18) s předpokladem že přechod mezi svarovým a základním kovem bude největší slabina vytvořených vzorků. Jak ukázala tahová zkouška, při které u veškerých vzorků došlo k porušení v oblasti základního materiálu, zvolené přídatné materiály na výsledky neměly vliv (mírné rozdíly ve výsledných hodnotách můžeme připsat na vrub vzorkům, které byly vytvořeny ze svařenců ručně a s velkými nepřesnostmi). Se získanými zkušenostmi bych již volil materiály s mnohem rozdílnějším složením, kde pravidlo „podobného chemického složení“ bude více patrné, například ocel se slitinou hliníku.

Z důvodu, že téma bakalářské práce má spíše charakter základního materiálového výzkumu aplikovaného ve svařování, bakalářská práce neobsahuje ekonomické hodnocení.

## Seznam použité literatury

- [1] CORNU, Jean. Fundamentals of Fusion Welding Technology Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1988. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-11049-2>
- [2] Tomb of Tutankhamun [online]  
<https://www.ancientegyptonline.co.uk/tutankhamun-tomb2.html>
- [3] Historical development of welding [online]  
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=186>
- [4] Historie svařování [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Historie\\_svařování](https://cs.wikipedia.org/wiki/Historie_svařování)
- [5] KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a svařovací zařízení: učební texty pro svářečské specialisty, praktiky a inspektory. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, březen 2002. ISBN 80-85771-97-7.
- [6] Metody svařování – přehled (welding processes) [online]  
<http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/indexs.htm>
- [7] Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování\\_v\\_ochranné\\_atmosféře\\_tavící\\_se\\_elektrodou](https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_v_ochranné_atmosféře_tavící_se_elektrodou)
- [8] MIG/MAG (CO<sub>2</sub>) [online]  
<http://automig.cz/o-svarovani/metody/>
- [9] Svařovací dráty MIG/MAG (GMAW) [online]  
<https://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.productsbycategory&catId=54>
- [10] KUBÍČEK, Jaroslav. Syllabus přednášek: Technologie II – část svařování. Brno: VUT FSI, 2006, s. 187. videoklipů 36.
- [11] Oficiální stránky českého zastoupení společnosti ESAB [online]  
<https://www.esab.cz>
- [12] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. Nauka o materiálu II: 2. opravené a rozšířené vydání. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [13] Uhlíkový ekvivalent [online]  
[http://users.fs.cvut.cz/liborbenes/vyuka/svarovani/N1\\_svaritelnost\\_materialu\\_ESAB.pdf](http://users.fs.cvut.cz/liborbenes/vyuka/svarovani/N1_svaritelnost_materialu_ESAB.pdf)
- [14] Chemické prvky Si, Fe, Cr, Ni, Mn [online]  
<http://www.prvky.com/>
- [15] Siderazot [online]  
<https://www.mindat.org/photo-288430.html>
- [16] Atomové mřížky železa  $\alpha$  a železa  $\gamma$  [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Binární\\_diagram\\_železo-uhlík#/media/File:IronAlfa%26IronGamma.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Binární_diagram_železo-uhlík#/media/File:IronAlfa%26IronGamma.svg)
- [17] Uhlík [online]  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Uhlík>
- [18] Vliv chemických prvků na svařování [online]  
<http://sous.sweb.cz/04.html>

- [19] Formy uhlíku [online]  
<http://www.zschemie.euweb.cz/uhlik/uhlik2.html>
- [20] Rovnovážný diagram soustavy železo-uhlík [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD\\_diagram\\_%C5%BEeozo-uhl%C3%ADk#/media/File:Fe-C-cs.svg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bin%C3%A1rn%C3%AD_diagram_%C5%BEeozo-uhl%C3%ADk#/media/File:Fe-C-cs.svg)
- [21] Austenit [online]  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Austenit>
- [22] VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály: 1. vydání. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1
- [23] Close up photo of piece of purified silicon [online]  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C5%99em%C3%ADk#/media/File:SiliconCroda.jpg>
- [24] Manganová ruda [online]  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Mangan#/media/File:PyrolusiteUSGOV.jpg>
- [25] High purity chromium crystals [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Chrom#/media/File:Chromium\\_crystals\\_and\\_1cm3cube.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Chrom#/media/File:Chromium_crystals_and_1cm3cube.jpg)
- [26] A piece of Ni about 3cm in size [online]  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl#/media/File:Nickel\\_chunk.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl#/media/File:Nickel_chunk.jpg)
- [27] Chemické prvky S, P, H [online]  
<http://ucebnicechemie.wz.cz/>
- [28] A sample of sulfur [online]  
<https://cs.wikipedia.org/wiki/S%C3%ADra#/media/File:Sulfur-sample.jpg>
- [29] Červený fosfor [online]  
<https://www.kimyadersi.org/fosfor.html>
- [30] Materiálové listy [online]  
<https://www.techportal.cz/>
- [31] ČSN EN ISO 6892-1 Kovové materiály - Zkouška tahem - Část1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2017
- [32] ČSN EN ISO 17639 Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Vydal Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha 2014