



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ TEPELNÉHO OVLIVNĚNÍ U TIG METODY

COMPARISON OF THE THERMAL INFLUENCE BY TIG METHOD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Pavlas

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Jan Pavlas
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Porovnání tepelného ovlivnění u TIG metody

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metoda svařování TIG je používána především pro svary u vysokolegované oceli a neželezných kovů. Základní možností svařování je použití konstatního, nebo impulsního proudu. Impulsní proud má dle literatury menší tepelné ovlivnění i deformace. Cílem práce je porovnat tyto předpoklady na korozivzdorné i uhlíkové oceli.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav svařování TIG.
2. Vypracovat literární studii svařování metodou TIG.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky svařování, které mají vliv na TOO a deformace.
4. Navrhnout parametry pro experimentální ověření.
5. Provést a vyhodnotit experiment.

Seznam literatury:

DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2. vyd. CERM Brno, 2004, 237 s. ISBN 80-214-2683-7

PILOUS, V. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

BARTÁK, J. Výroba a aplikované inženýrství, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Plzeň, 2009

KOUKAL, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3

AMBROŽ, O. a KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395 s. ISBN 80-85771-81-0

VEJVODA, S. a KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249 s. ISBN 80-85771-70-5

BARTÁK, J. a KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214 s. ISBN 80-85771-72-1

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

PAVLAS Jan: Porovnání tepelného ovlivnění u TIG metody

Předložená bakalářská práce se zabývá obloukovým svařováním korozi-vzdorných ocelí svařovací metodou TIG. Porovnává vliv pulzního a stejnosměrného proudu na svařovanou součást. Úvodem práce se rozebírá vliv obloukového svařování na kovové materiály, vnesené teplo do svaru a tepelně ovlivněná oblast. Na ocelích S235JR a 1.4301 byli provedeny dva experimenty pro ověření teoretických předpokladů. Pomocí provedení rozboru zkoušek a výpočtu bylo vyhodnoceno působení proudů na materiál a vyvozeny závěry. V poslední řadě jsem provedl doporučení pro praxi a možné pokračování dalšího výzkumu dané problematiky.

Klíčová slova:

Obloukové svařování, korozi-vzdorná ocel, svařovací metoda TIG, pulzní proud, tepelně ovlivněná oblast

ABSTRAKT

PAVLAS Jan: Comparison of the thermal influence by TIG method

The presented bachelor thesis deals with arc welding of stainless steels by welding method TIG. It compares the influence of pulse and DC current on the welded component. Introduction analyzes the influence of arc welding on metallic materials, heat introduced into the weld and the heat affected area. Two experiments on S235JR and 1.4301 steel were performed to verify theoretical assumptions. The effects of current on the material were evaluated using the analysis of the tests and the calculation and the conclusions were made. Finally I made recommendations for practice and possible further research on the issue.

Key words:

Arc welding, stainless steel, TIG welding method, pulse current, heat-affected area

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PAVLAS, Jan. *Porovnání tepelného ovlivnění u TIG metody*. Brno, 2017. 38s, 2 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 25.5.2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Jaroslavu Kubíčkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále také firmě Fronius Česká republika s.r.o., za zhotovení vzorků.

Obsah

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod	9
1 Svařovací metoda netavící se elektrodou	10
1.1 Historie metody TIG	10
1.2 Význam svařovací metody	11
1.3 Současný stav	11
2 Rozbor problematiky	12
3 Svařování elektrickým obloukem	13
3.1 části elektrického oblouku	14
3.2 Voltampérová charakteristika oblouku	16
3.3 Svařovací zdroje	16
4 Svařování metodou TIG	17
4.1 Rozdělení svařovacích způsobů metody 141	18
4.2 Materiál elektrody	20
4.3 Ochranné plyny	20
4.4 Přídavný materiál	21
5 Svar	22
5.1 Tepelně ovlivněná oblast – TOO	22
5.2 Napětí, deformace ve sváru	24
5.3 Svařitelnost	26
5.3.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí	27
5.3.2 Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí – CrNi	27
6 Experiment	28
6.1 Materiálová charakteristika	28
6.1.1 Nelegovaná ocel	28
6.1.2 Austenitická korozivzdorná ocel	28
6.1.3 Přídavný materiál	30
6.2 Svářecí aparát, plyn, elektroda	30
6.3 Porovnávání struktury svaru - část první	31
6.3.1 Výbrusy uhlíkové oceli	35
6.4 Měření deformací - část druhá	37
7 Technické doporučení, vyhodnocení	39
8 Závěry	40

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

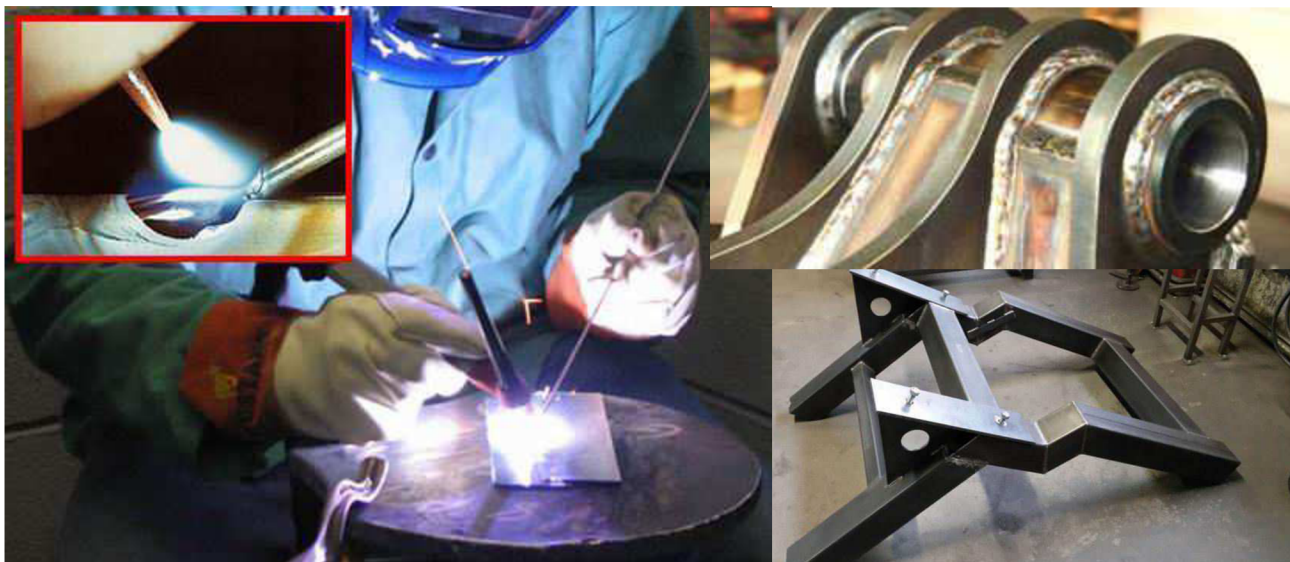
Úvod [4], [7], [16], [17], [19], [21], [29]

Tvorba nerozebíratelných spojení pomocí svaření je jedna velká část strojírenské technologie hned vedle obrábění, tváření a dalších. S rozsahem nezaujímá první místo v technologii, ale drží prvenství ve zpracování největšího objemu kovového materiálu. Z tohoto důvodu vzniká potřeba porozumět samotnému svařovacímu procesu a dále ho rozvíjet.

Metoda svařování netavící se elektrodou pod ochranným plynem byla první použitelná metoda při svařování pod plynem, kdy na ní navazují další metody svařování, třeba jako je svařovací metoda MAG, MIG, popřípadě svařování plazmou.

Jelikož dochází při svaru k tepelnému ovlivnění a lokálnímu natavení základního materiálu a následně relativně rychlému ochlazení. Díky tomu dochází ke změnám mechanických vlastností v základním materiálu v tzv. tepelně ovlivněné oblasti – TOO. Z toho důvodu nepostačuje pouhý výzkum a vývoj nových metod svařování, ale je třeba se také zabývat velikostí, změnou a kvalitou samotného svaru a jeho okolí. Vyhodnocuje se velký objem dat, které charakterizují parametry svaru. Třeba velikost tepelně ovlivněné oblasti, stupeň překrystalizace materiálu, struktura svaru. Z toho vyplývají mechanické vlastnosti a plasticita, vzhled svarové housenky, množství vměstků, pórů a jiných vad.

V současné době má výrazný nárůst objemu svařování pomocí pulzního proudu netavící se elektrodou pod inertním plynem, jenž má řadu výhod a dokáže zastoupit svařování střídavým nebo stejnosměrným proudem téže metody svařování při vhodné zvolených svařovacích parametřích. Teoreticky pulzním proudem lze docílit kvalitního svaru při menší tepelně ovlivněné oblasti. Tvrzení z předešlé věty bylo v této práci ověřeno.



Obr. 1: Ukázky svařování a svařenců [14], [15], [16]

1 Svařovací metoda netavící se elektrodou [4], [10], [17]

Význam a nejširší uplatnění se nachází ve svařování vysokolegovaných ocelí a neželezných kovů jako nástrojová ocel, korozivzdorná ocel, hořčík, hliník, nikl a další. Jedná se o tavnou elektrickou svařovací metodu s charakteristickými rysy. Ochranným inertním plynem, jenž má za úkol izolovat tavnou lázeň a samotné elektrody od atmosféry. Netavící se elektrodou vyrobenou z čistého wolframu, nebo obohacenou o vhodné oxidy.



Obr. 2 Elektrický oblouk chráněn inertním plynem u metody TIG [13]

Mezinárodně uznávané zkratky pro označení svařované metody 141 jsou:

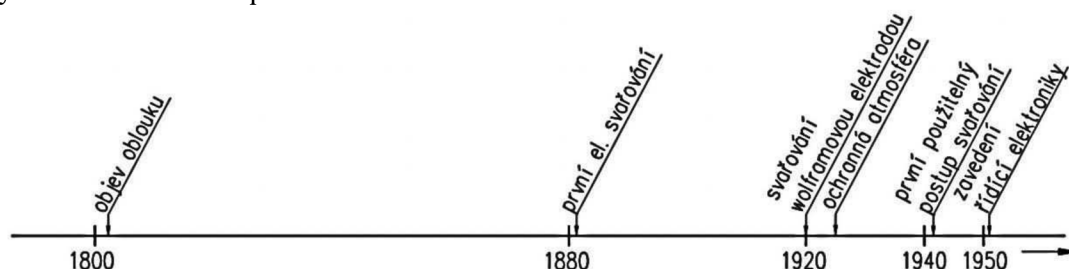
- TIG – *Tungsten Inert Gas*, zkratka z Anglie
- WIG – *Wolfram Inert Gas*, zkratka z Německa
- GTAW – *Gas tungsten arc welding*, zkratka ze Spojených států Amerických

1.1 Historie metody TIG

Vzniku svařovací metody netavící se elektrodou předcházelo dlouhé období výzkumu a vývoje různých metod svařování. Počátek svařování elektrickým obloukem sahá až do roku 1803, kdy byl objeven elektrický oblouk. Ale až kolem roku 1881 ve Francii byl použit elektrický oblouk při svařování olověných desek akumulátoru uhlíkovými elektrodami. Tento postup svařování byl následně patentován a jako zdroje elektrické energie byly využity akumulátorové baterie. Dalším milníkem pro metodu WIG jsou dvacátá léta 20.st, kdy byl navržen postup, při kterém se dosahovalo vysokých teplot při hoření elektrického oblouku mezi dvěma wolframovými elektrodami v atmosféře vodíku (svařování atomárním vodíkem). Následně H.M.Hobard a P.K.Devers roku 1926 získali první patent pro svařování v ochranné atmosféře argonu a helia.

Výše vybrané uvedené důležité body ve vývoji svařování elektrickým obloukem završil rok 1941, kdy V.H. Pavlecka a Russ Meredith z Northrop Aircraft Inc. navrhli první použitelný postup svařování netavící wolframovou elektrodou, která se mohla využít pro svařování slitin hliníku, hořčíku. Tento způsob přinesl nové možnosti svařování dříve nesvařitelných materiálů hlavně do leteckého průmyslu.

Koncem padesátých let 19.st. se patentoval způsob svařování tzv. impulzním proudem, u kterého dochází ke změně velikosti svařovacího proudu v pravidelných a předem definovaných cyklech. Pomocí selenového usměrňovače, jenž umožňoval použít napájení z transformátoru. Byly později upraveny pro generování vysokofrekvenčních proudů.



Obr. 3 Časová osa vývoje svařování

1.2 Význam svařovací metody

Díky svařovací metodě TIG lze spojovat těžko svařitelné materiály, dva rozdílné materiály a svařovat kovy s vysokou afinitou ke kyslíku. Z neželezných kovů to jsou slitiny hliníku, hořčíku, mědi, titanu, zirkonu, molybdenu a dalších. Z ocelí to jsou středně a vysokolegované oceli, především korozivzdorná ocel. Možnost svařit lehké kovy bylo přínosem hlavně v leteckém a automobilovém průmyslu, kdy se docílila nižší hmotnost součástí při stejné nebo i vyšší pevnosti.

Z potřeby mít ekonomicky vhodnější a rychlejší metodu svařování vycházejí mladší metody svařování jako MIG, která byla vyvinuta z metody TIG, kdy byla pouze wolframová elektroda zaměněna elektrodou v podobě odtavovaného drátku. Dále metoda MAG je velmi podobná jak MIG, ale svařuje se již pod aktivním ochranným plynem. Lze ji použít pro svařování korozivzdorných a vysoce legovaných ocelí pouze s obsahem aktivních plynů do 3% kyslíku nebo do 2% oxidu uhličitého. Svařování s metodou MAG s vyšším obsahem aktivních plynů se již používá pouze pro konstrukční ocel.



Obr. 4 Ukázka svarů [16] [28]

1.3 Současný stav

V současné době se svařovací metoda TIG používá při svařování převážně korozivzdorných ocelí ve farmaceutickém, potravinářském, chemickém průmyslu nebo v klasické i jaderné energetice, kdy je vyžadována vysoká kvalita svaru s požadovanými mechanickými vlastnostmi. Ideální stav je, když svar a jeho blízké okolí má totožné materiálové vlastnosti jako základní těleso, nebo dochází k plynulému mírnému přechodu v charakteristikách chování materiálu.

V poslední době našla uplatnění také v oblasti dekorativní, jako je svařování plotů, zábradlí či jiných funkčních nebo pouze okrasných doplňků. Kde záleží převážně na vzhledu a tvaru svarové housenky i na tepelně ovlivněné oblasti.

Vysoce vyvinutá řídicí jednotka svářecího aparátu umožňuje velmi přesně řídit parametry svařování a tím docílit vhodného svaru, nebo svařovat materiály o malé tloušťce. Největší uplatnění nacházejí především invertorové svařovací zdroje, které umožňují svařování několika metodami. Třeba svařování obalovou elektrodou a po přepnutí metodou TIG. Celé zdroje lze už mít předem naprogramované, popřípadě jsou konstruovány pro snadné nastavení, kdy se zadávají základní parametry svařování (proud, časy, frekvence, tloušťka elektrody). Zbytek svařovacích parametrů si určí samotný zdroj. Dále dochází k automatizaci svařování pomocí přidání pojezdů - portálové, orbitální.



Obr. 5 Moderní zdroj pro svařovací metodu TIG [4]

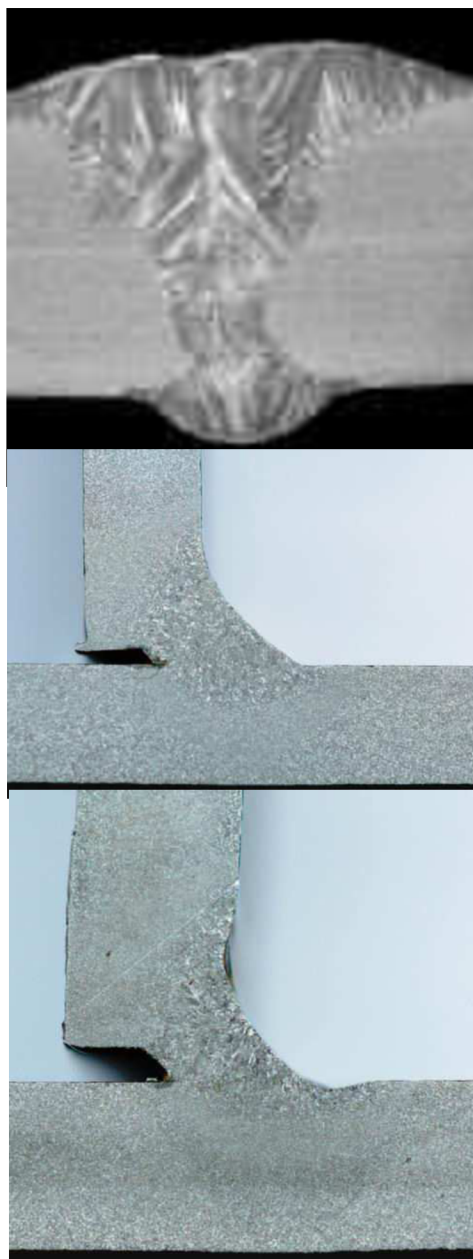
2 Rozbor problematiky [7], [8], [9], [11], [20], [21], [29]

Svařování je velice ekonomický způsob vzniku trvalého nerozebíratelného spojení dvou kovů a slitin s globálním využitím ve všech odvětvích průmyslu. S možností využití vhodné dnes již široce dostupné techniky nenáročné na specializované dílny, prostory. Metoda TIG umožňuje ekonomicky výhodné spojování vysoce legovaných ocelí a neželezných kovů různé tloušťky plechů od 0,1 – 6 mm, při čemž je stále větší důraz kladen na kvalitu a bezchybnost samotného svaru a tepelně ovlivněného okolí.

Při svařování metodou TIG všemi způsoby dochází k natavení základního materiálu, jeho promísení a následné ztuhnutí. To má za následek určitou změnu svařované oblasti, kdy dochází k chemické, mechanické změně základního materiálu a jeho charakteristickým rysem je svar sám o sobě a jeho tepelně ovlivněné okolí. Následkem jsou jiné mechanické vlastnosti, při nichž jsou žádané co nejmenší rozdíly ve vlastnostech materiálu, převážně u meze pevnosti

a plasticity. V poslední řadě dochází i k tepelným deformacím celé svařované součásti z důsledku bodového ohřátí a tepelné roztažnosti svařovaného materiálu.

Svařovací metoda TIG má možnost provádět svary několika způsoby, kdy je hlavním kritériem pro svařování základní materiál svařence a s tím spjatý typ proudu. Nevhodnou volbou proudu a svařovacích parametrů dochází k nežádoucí tepelně ovlivněné oblasti, jenž má za následek v krajních situacích až nevyhovující vlastnosti svařence, při čemž kvalitu sváru nelze přesně a jednoduše ověřit. Z toho vyplývají vysoké požadavky na spolehlivost svařovací metody.

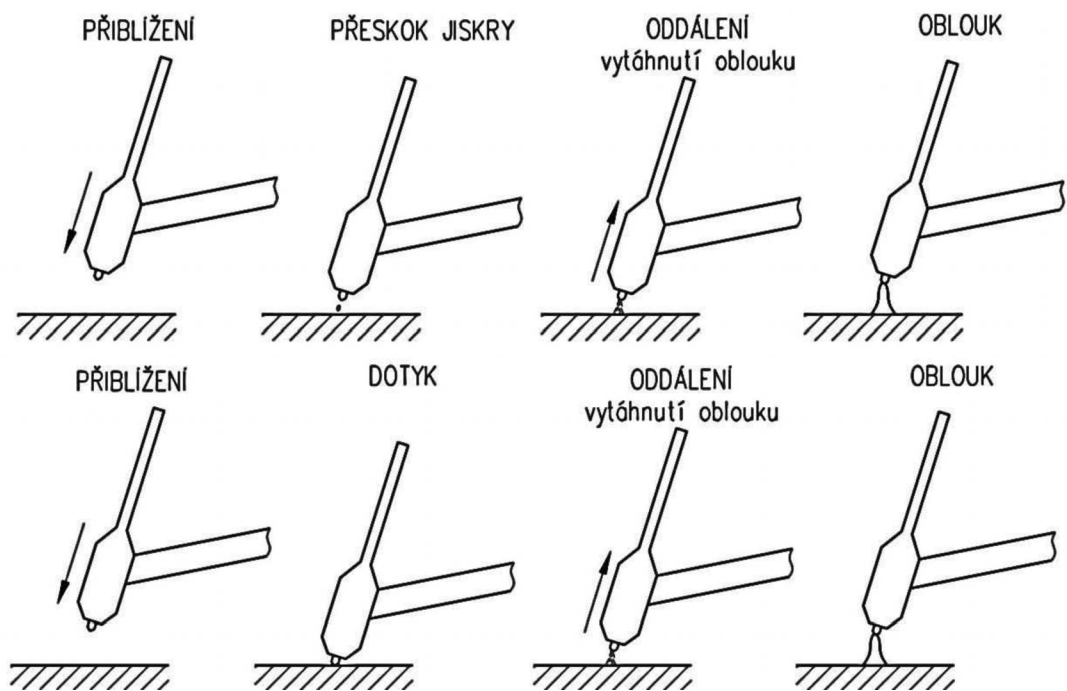


Obr. 6 Makro struktura svarů

3 Svařování elektrickým obloukem [11], [16], [20], [21], [22]

Elektrický oblouk využívaný ve svařování je nízkonapěťový elektrický výboj, který vzniká v ionizovaném plynu. Oblouk stabilně hoří, jestliže jsou dodrženy podmínky napětí dostatečného pro ionizaci prostředí a dostatečně vysokého proudu pro udržení oblouku.

Zapálení probíhá při chodu zdroje naprázdno, kdy je z pravidla vyšší napětí jak při stabilním hoření oblouku. Obvyklé hodnoty napětí a proudu jsou 10-60V a 10-1000A. Zapalování oblouku u svařovací metody TIG se provádí dvěma způsoby. První je dotykovým zapalováním, kdy je použit startovací proud. Lze ho provést za pomoci řízení a kontroly svařovacích parametrů. Počáteční proud je nízký, dosahuje 10 A, jenž ohřeje pouze hrot wolframové elektrody a při postupném oddálení dochází k nárůstu svařovacích parametrů a vytáhnutí oblouku. Jeho výhodou je přesné umístění počátku sváru. Druhý způsob zapalování je za pomoci vysokonapěťového ionizátoru, který umožňuje zapalování oblouku na vzdálenost několika milimetrů. V první fázi dochází k přeskoku elektrické jiskry, která ionizuje okolí, díky které dochází k podmínkám vytvoření elektrického oblouku.



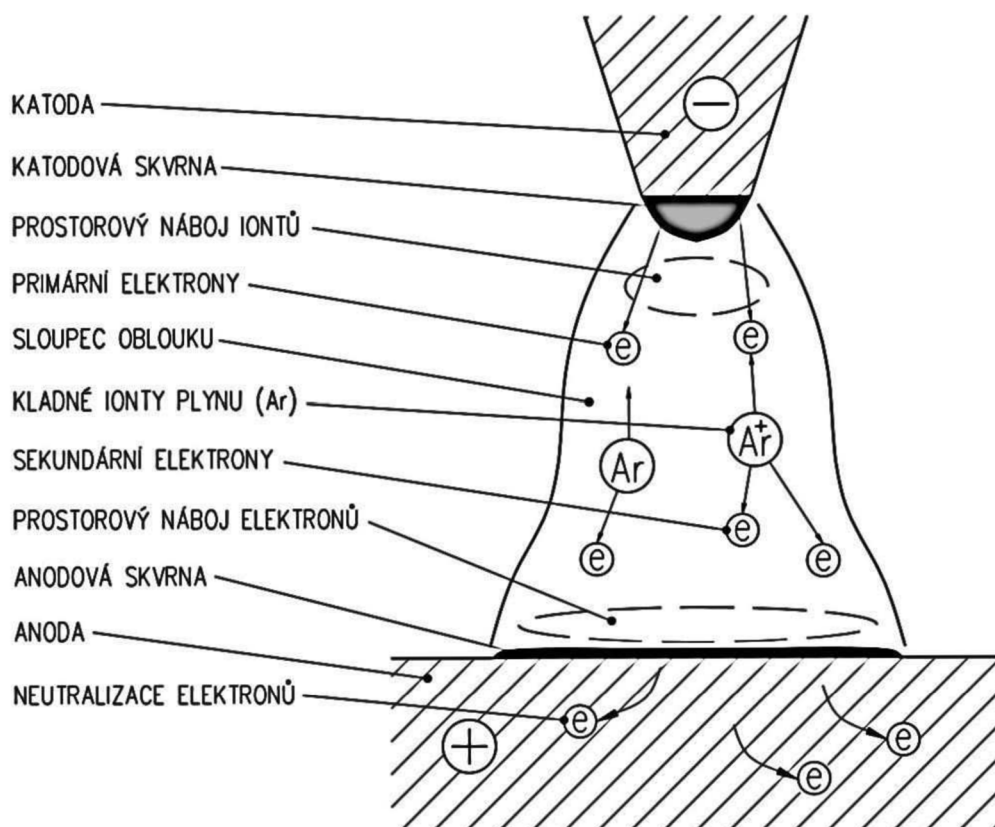
Obr. 7 Způsoby zapálení oblouku

- Charakteristické parametry oblouku
 - Intenzivní vyzařování UV záření
 - Intenzivní vyzařování světla
 - Velká proudová hustota
 - Proud řádově v desítkách až tisících ampér
 - Malý potenciální rozdíl elektrod
- Metalurgické a fyzikální děje
 - Mají vliv na hoření oblouku za přítomnosti vysokých teplot a závisí především na:
 - Tepelné vodivosti základních materiálů, elektrody a ionizovaného okolí
 - Geometrickém uspořádání, popřípadě tvaru elektrody
 - Chemickém složení svařovaného materiálu, elektrody, atmosféry

3.1 části elektrického oblouku

Na stejnosměrném elektrickém oblouku budou popsány jednotlivé části hořícího oblouku mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem v ochranné atmosféře argonu, protože při konstantní délce oblouku se stejnosměrným proudem hoří oblouk velice stabilně.

Samotný oblouk představuje určitý odpor v elektrickém obvodu a jeho samotné části lze popsat do základních oblastí.



Obr. 8 Části elektrického oblouku [20]

a) Katodová skvrna

Jedná se o ostře ohraničenou oblast uvolňující první elektrony důležité pro vytvoření ionizovaného prostředí a tím vytvoří podmínky pro vytvoření a hoření oblouku. Elektrony získávají v části katodového úbytku kinetickou energii, díky které jsou schopny při srážkách s neutrálními atomy ochranného plynu vytrhnout jejich valenční elektrony. Výsledkem srážky je ionizované prostředí a vznik kladných iontů a sekundárních volných elektronů. Skvrna je stabilní, popřípadě se pohybuje v závislosti na teplotě, proudu a geometrii elektrody. Teplota katodové skvrny není stálá vlivem opouštění volných elektronů a pohybuje se v rozmezí 2300 – 3000°C.

K poklesu napětí dochází vlivem spotřebování energie oblouku pro udělení dostatečné kinetické energie volným elektronům k ionizaci sloupu oblouku. Hodnota poklesu napětí je přibližně polovina celkového napětí, s narůstajícím proudem tento úbytek klesá.

Kladné ionty dopadají na katodu, na kterou jsou přitahovány vlivem elektrostatických sil. Při dopadu ionty odevzdávají svou ionizační energii katodové skvrně, tím se neutralizují.

b) Sloupec oblouku

Zářivý svítící ionizovaný ochranný plyn vysoké teploty mezi elektrodami v podobě plazmatu. Velikost teploty závisí na mnoha faktorech. Nejdůležitější je prostředí oblouku a počet srážek volných elektronů s atomy ochranného plynu v oblouku, jenž je určen proudovou hustotou a velikostí napětí.

Elektrická vodivost je ovlivněna počtem částic s kladným nebo záporným nábojem v ionizovaném plynu mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Neutrální částice nacházející se v technickém svařovacím plynu za běžných atmosférických podmínek jsou nevodivé, k vodivosti dojde při prvním uvolnění elektronů z katodové skvrny a zvýšením teploty nebo ohřevem plynu elektrickou jiskrou.

Ionty vzniklé ze srážek z volně letících elektronů vymrštěných z katodové vrstvy a z neutrálních atomů svářečského plynu jsou přitahovány k anodě a katodě. Kladně nabitě částice (ochuzeny o elektrony) jsou vtahovány do katodové skvrny pomocí elektrostatického pole a záporně nabitě částice (volné elektrony a záporné ionty) směrem k anodě. Nositelem proudu ve sloupci oblouku jsou majoritní elektrony, jelikož mají vysokou rychlost a pohyblivost díky nízké hmotnosti.

Jestliže velikost proudu překročí hraniční hodnotu, tak veškeré částice (plazma) tečou od elektrody ke svařovanému materiálu. Síla, která přitahuje jednotlivé nabitě části k určité straně (katodě, anodě) je menší jak intenzita elektromagnetického kruhového pole indukovaného protékajícím proudem. Indukované pole působí na celý sloupec plazmatu určitou silou, která směřuje pokaždé k základně oblouku a závisí na čtverci proudu – I^2 .

Velikost teploty, tlaku a proudové hustoty ve sloupci plazmatu je dána Gaussovou křivkou. Teplota oblouku je rozložena od středu k okraji, kdy střed oblouku těsně pod katodou má maximální teplotu okolo 16 000°C a teplota oblouku u metody TIG se pohybuje v rozmezí 6 500 až 9 000°C.

Při změně délky oblouku musí dojít k navýšení napětí, aby se zamezilo přerušení oblouku. Zvyšováním napětím se tím pádem kompenzuje větší úbytek napětí při prodlužování oblouku, který je asi kolem 2 V na 1 milimetr délky oblouku.

c) Anodová skvrna

Touto skvrnou jsou pohlcovány, neutralizovány a dále odváděny dopadající částice. Její vysoká teplota, která se pohybuje v rozmezí 2 500 – 3 600°C, většinou dosahuje teploty varu svařovaného materiálu a připisuje se kinetické energii dopadajících částic do skvrny, která se přemění na teplo a částečně na světelné záření a elektromagnetické záření. Atomy vypařené z anodové skvrny vstupují do sloupce plazmatu, kde jsou ionizovány.

3.2 Voltampérová charakteristika oblouku

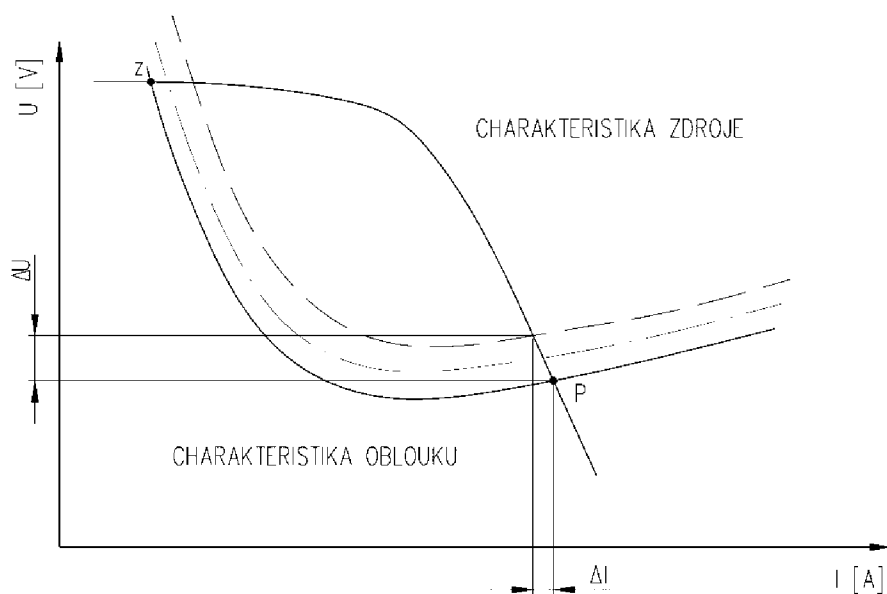
Vyjadřuje statickou charakteristiku oblouku v závislosti proudu na napětí při neměnné délce elektrického oblouku. Její tvar a rozložení závisí na chemickém složení elektrody, geometrie hrotu, složení plazmy, tím pádem i na technickém plynu a průměru elektrody.

Pro orientační výpočet napětí nebo proudu se může použít tzv. *standardní statická charakteristika oblouku*:

$$U = 10 + 0,04 \cdot I \quad (3.1.)$$

U napětí [V]

I..... proud [A]

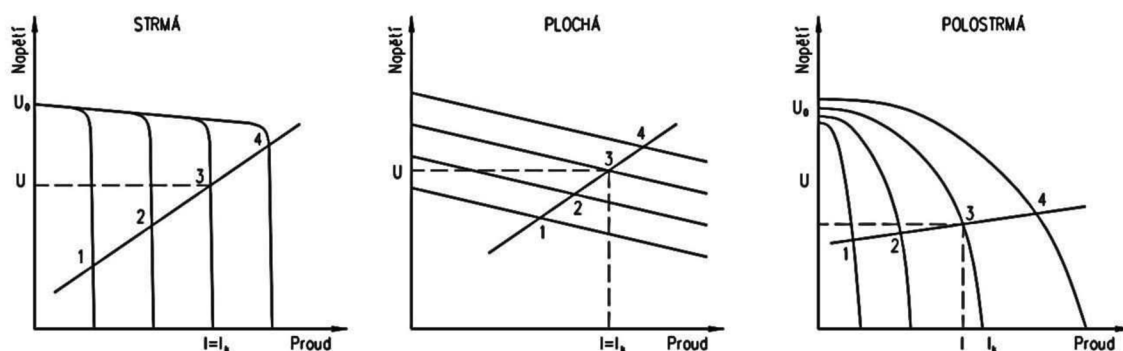


Obr. 9 Charakteristika oblouku a zdroje [20]

3.3 Svařovací zdroje

Jedná se o specializovaný elektrický zdroj určený k dodávání elektrické energie pro samotné svařování s určitými požadavky. Jako je možnost plynulé regulace svařovaného proudu i napětí, stálý výkon a účinnost zdroje odolný proti krátkým zkratům, zajištěný bezpečný provoz, jednoduchá obsluha s vysokou spolehlivostí a dalšími požadavky.

Samotné zdroje lze rozdělit do několika skupin podle způsobu přeměny elektrické energie, druhu dodávaného proudu a tzv. statické zdroje – netočivé.

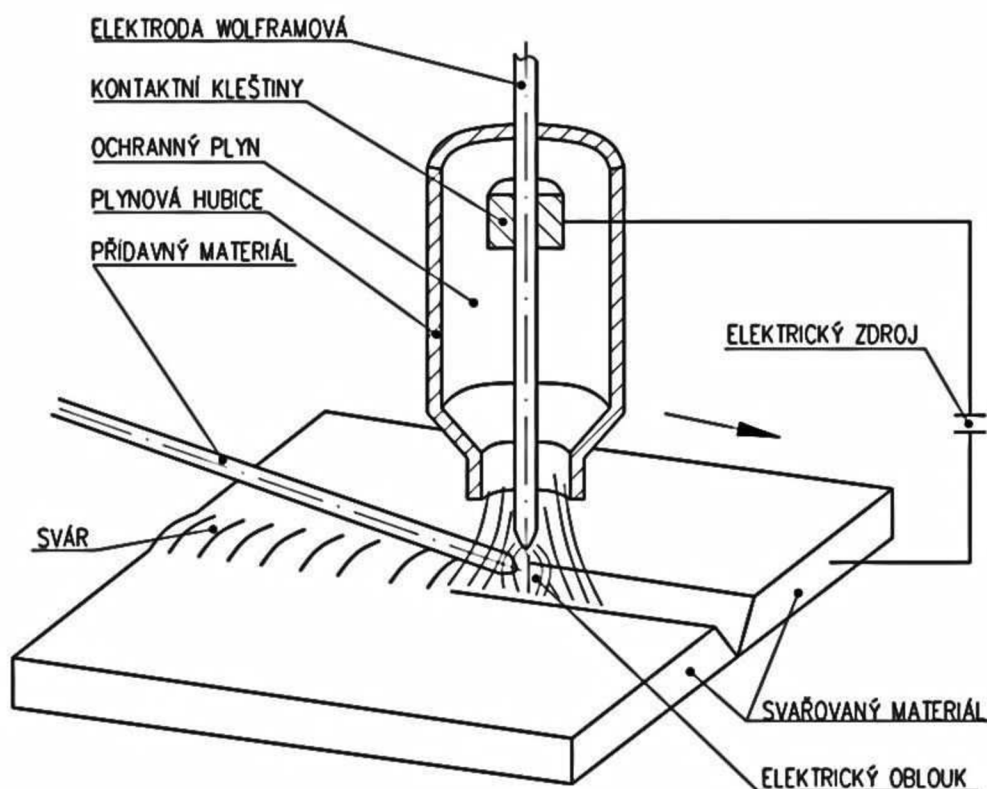


Obr. 10 VA charakteristika zdroje [20]

4 Svařování metodou TIG [1], [11], [17], [20], [21], [22], [23], [24]

Tato technologie je nejrozšířenější v oblasti svařování plechů a trubkových systémů korozivzdorné oceli, jenž je namáhána chemickým a tepelným zatížením. Lze použít způsob ručního přidání přídavného materiálu nebo automatického podávání odtavovaného drátku.

Oblouk při této metodě hoří mezi netavící se elektrodou a základním svařovaným materiálem, při čemž celý svar, tavnou lázeň, elektrodu a sloupec plazmatu chrání inertní plyn vysoké čistoty před účinky atmosféry, hlavně před účinky vzdušného kyslíku, vodíku, dusíku. Svařování lze realizovat s přídavným materiálem v podobě 1 m drátu určitého průměru ručním způsobem nebo automatizovaným způsobem dle postupu svařování, kdy drát je odvíjen podavačem z navinutého bubnu. Samotné svařování lze rozdělit do druhů podle proudu, jako je střídavý proud, stejnosměrný nebo impulzní proud, viz. níže.



Obr. 11 Schématické znázornění svařovací metody TIG [20]

Metalurgické a technologické výhody svařovací metody:

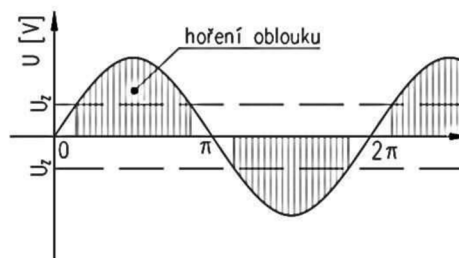
- Inertní plyn zabezpečuje ochranu svarové lázně, elektrody, přehřátého okolí před účinky atmosféry a zároveň zamezuje propalu
- Použití bez tavidel
- Vysoká stabilita elektrického oblouku
- Vysoká flexibilita
- Jednoduché použití a nastavení svařovacích parametrů
- Lze svařovat těžce svařitelné materiály a materiály náchylné na naplynění při svařování

4.1 Rozdělení svařovacích způsobů metody 141

• Střídavý proud

Hoření oblouku při střídavém napětí určité frekvence probíhá tak, že oblouk zhasíná při každém průchodu nulou a je opětovně zapálen při nárůstu napětí opačné polarity. Katoda zahřátá při předchozí polovině křivky střídavého napětí iniciuje prvotní elektrony okamžitě při nárůstu napětí za nulou. Tato tepelná kapacita elektrody dovoluje snadné opětovné zapálení oblouku při průrazném napětí - U_z .

Svařování střídavým proudem se používá pro jeho čistící účinky na slitinách hliníku a hořčíku. U svařování hliníku způsobuje promísení svarové lázně díky vytvoření katodové skvrny na svařovaném materiálu, jenž není stabilní a pohybuje se za oxidy pokrývající hliník i svarovou lázeň a následně dochází k odpaření nežádoucí vrstvičky. Samotný oxid hlinitý (Al_2O_3) má vyšší teplotu tavení a to asi kolem $2050^\circ C$ a k natavení hliníku dochází již při teplotě cca $660^\circ C$. Tím pádem vrstvička oxidu při natavení hliníku dále setrvává na povrchu taveniny a tím zamezuje metalurgickému promísení a spojení svařovaných materiálů. Další čistící účinek způsobuje dynamický děj, který způsobují ionty ochranného plynu při srážce s povrchem tavné lázně, tím dojde k mechanickému narušení oxidační vrstvičky. Druhý účinek dopadajících iontů má za následek stáhnutí oxidační vrstvy k okraji svarové lázně, protože nejvyšší proudová hustota a tím pádem nejvýraznější zastoupení iontů je v ose elektrického oblouku.



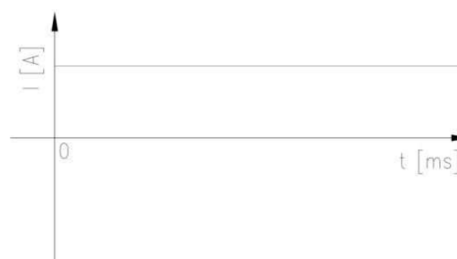
Obr. 12 VA charakteristika střídavého napětí

• Stejnoseměrný proud

Základní způsob zapojení při svařování touto metodou. Wolframová elektroda je připojena na záporný pól zdroje a svařovaný materiál na kladný pól. Z důvodu menšího tepelného namáhání netavící se elektrody a tím docílení delší životnosti elektrody, kdy dochází k rozložení tepla přibližně 1/3 na elektrodu a 2/3 celkového tepla se přenáší na základní materiál. Při tomto zapojení dochází u sváru k velké hloubce závaru díky nerovnoměrným rozložení tepla a dopadajících elektronů s vysokým objemem kinetické energie.

Použití nachází při spojování vysokolegovaných ocelí, mědi, niklu, titanu a jiných slitin. Lze s ním svařovat i hliník za podmínky použití ochranného plynu s obsahem minimálně 75% helia a zbytku argonu. Vysoké množství helia v plynu je zásadní z důvodu jeho dobré tepelné vodivosti, jenž předává velký podíl tepla do svarové lázně, které způsobí roztavení i povrchových oxidů. Tato metoda se používá převážně při renovaci a opravách rozměrných nebo silnostěnných hliníkových odlitků nebo svařenců.

Zapojení s nepřímou polaritou, kdy se na elektrodě nachází kladný pól zdroje a na svařovaném materiálu záporný pól se takřka nevyužívá, až na oblast tenkostěnných hliníkových svařenců a folií svařováním nízkým proudem. Z důvodu velkého tepelného přetěžování elektrody a souvisí její krátká životnost.



Obr. 13 VA charakteristika stejnosměrného proudu

- **Pulzní proud**

Svařování impulzním proudem je nejmladší způsob svařování u metody TIG, která vznikla při rozvoji elektroniky v 50. letech minulého století. Výkonová elektronika řídí přesně v pravidelných časových intervalech velikost proudu mezi dvěma proudovými hladinami skládající se ze základní složky I_z , pulzního proudu I_p a tvar pulzu záleží na charakteru zdroje.

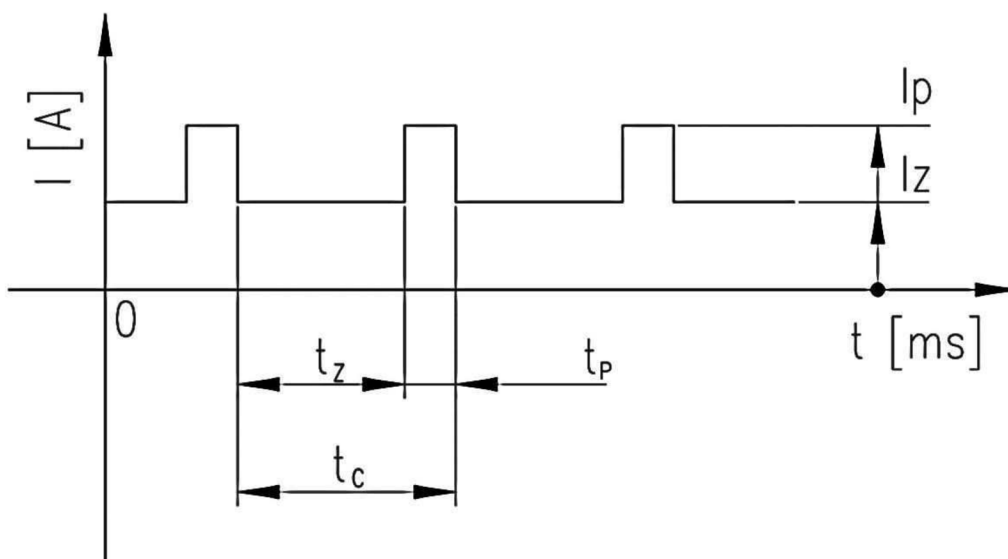
- Základní proud I_z

Jeho hodnota je nízká, má zajistit pouze ionizaci okolí oblouku v čase t_z . Jestliže doba přítomnosti základního proudu je 2x delší jak doba pulsu, dochází k úplnému ztuhnutí svarové lázně, což má teoreticky za následek menší tepelně ovlivněnou oblast. Tato konfigurace základního proudu a pulsu se využívá pro svařování vysokolegovaných ocelí. Při kratším základním proudu dochází pouze k zmenšení tavné lázně. Toto je v praxi využito při požadovaném zvláště hladkém sváru s plynulým přechodem do základního materiálu

- Impulzním proudem I_p

Ve specifikovaném čase t_p dochází k natavení materiálu jak základního tak i přídatného. Amplituda a doba pulsu má hlavní určující charakter na velikost svarové lázně. Při řízení pulzu a jeho času dochází k velice přesné regulaci svařovacího režimu, dávkování tepla vložené do sváru a tvarování svarové lázně. Střední hodnota impulzního proudu je nižší než u běžného svařování konstantním proudem. Z toho důvodu vykazují svary menší tepelnou ovlivněnou oblast i lepší plastické vlastnosti a všeobecně menší náchylnost na praskání a deformaci.

Součet časů základního a pulzního dává čas cyklu t_c , jenž určuje frekvenci pulzního proudu. U tohoto způsobu svařování je velice důležitá správná rychlost svařování, protože zajišťuje překrytí jednotlivých borů svarů. S toho vyplývá všeobecné pravidlo, čím vyšší frekvence tím vyšší možná rychlost svařování.



Obr. 14 VA charakteristika pulzního proudu

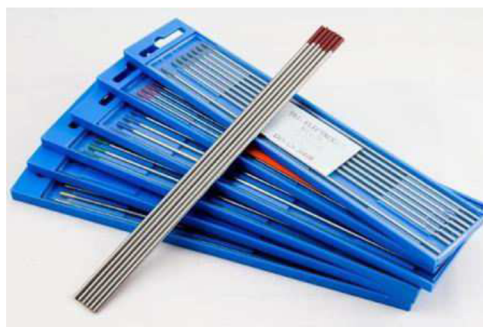
4.2 Materiál elektrody

Netavící elektroda má splňovat požadavky na vysokou schopnost odolávání dlouhodobým vysokým teplotám, mít dostatečnou vodivost a mechanickou stálost. Tyto požadavky nejvhodněji splňuje wolfram. Elektrody se vyrábí pomocí spékaného wolframu, který má teplotu tavení 3380°C, teplotu varu 5700°C, měrný elektrický odpor $5,36 \cdot 10^{-8}$ ohmů.

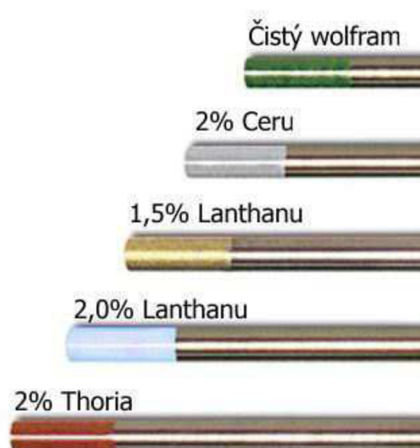
Lze použít elektrody z takřka čistého wolframu o čistotě 99,99%, nebo s oxidy kovů, čímž se elektroda s nosným materiálem wolframu obohatí o legující prvky (thoria, lanthanu, ceru, zirkonu, yttria), které zajistí větší tepelnou odolnost.

Elektrody jsou normalizovány a jejich složení je barevně rozlišeno. Vyráběny jsou v řadě průměrů od 0,5 mm do 10 mm a v délkách 50-175mm.

Druh, průměr a způsob broušení funkčního konce elektrody závisí především na druhu proudu, polaritě na elektrodě, velikosti proudu, typu hloubce a tvaru svařované plochy. Obecně platí, čím ostřejší broušený konec tím menší velikost proudu.



Obr. 15 Wolframové elektrody [2]



Obr. 16 Barevné označení elektrod [2]

4.3 Ochranné plyny

Inertní plyny mají zajišťovat ochranu netavící se elektrody, svařové lázně a blízkého okolí, proti nežádoucím vlivům okolí, především proti oxidaci a zvýšení koncentrace plynů ve svaru. Jejich druhořadý úkol je vytvořit příznivé podmínky pro hoření oblouku a zapálení oblouku. Používají se dva základní plyny, argon, helium a jejich směsi v určitém poměru.

Argon má malou tepelnou vodivost a nízký izolační potenciál. Zajišťuje dobré zapálení oblouku a jeho stabilní hoření na velkou vzdálenost. S vyšší hustotou než vzduch zajišťuje velmi dobrý ochranný obal kolem svařování a je nejběžnější v použití vzhledem i k ceně.

Helium má vysokou tepelnou vodivost s relativně vysokým izolačním potenciálem a je mnohem menší hustoty než atmosféra. Z toho vyplývá, že k zajištění dostatečného ochranného obalu kolem elektrického oblouku se musí volit větší průtok plynu, hůře se pod ním zapaluje oblouk a nehoří tak stabilně jak pod čistým argonem. Svě uplatnění nachází i přes větší cenu v mechanizovaném svařování.

Směsi argonu a helia, u kterých dochází k výhodnému spojení užitečných vlastností samostatných plynů a používají se především pro svařování mědi a hliníku. Dále je používána pro směs argonu s vodíkem pro svařování vysoko legovaných austenitických ocelí.

Tzv. formovací plyny (argon + dusík, argon + vodík) se používají pro ochranu kořene sváru u svařování kovů s vysokou afinitou ke kyslíku.

4.4 Příkladný materiál

Příkladný materiál pro svařovací metodu TIG je dodáván v prutech o délce 1 m různých průměrů. Platí všeobecné pravidlo, čím silnější drát, tím větší vložené teplo do svaru. Dle svařovaného materiálu se volí přídatný materiál, kdy rozhodujícím faktorem je chemické složení. Přídatný materiál se volí se stejným složením jako svařované díly, nebo s co největší shodou ve složení a mechanických vlastnostech.

Odtavovaný konec drátu se musí nacházet po celou dobu svařování v ochranném pásmu plynu, kdy je konec drátu chráněn stejně jak samotný svar. Drát se přikládá do oblasti sloupce oblouku a je nežádoucí se s ním dotýkat wolframové elektrody či ponořit ho do taveniny. Vkládá se až při natavení materiálu a postupně se odtavuje v podobě kapiček kovu, které skapávají do taveniny.

Při ručním svařování drží svářeč drát v ruce a přidává jej do lázně po kapkách podle potřeby. Svařování lze také částečně automatizovat či úplně automatizovat. Při částečné automatizaci svářeč stále ovládá hořák ručně, ale drát je již veden bovdem podavače hnaným elektromotorem. Automatické svařování již probíhá pomocí robotu, pojezdu – vše je řízeno automaticky (vedení hořáku i podávání drátu).

Základní rozdělení přídatného materiálu:

- Pro ocel nelegovanou
- Pro ocel vysokolegovanou (korozivzdornou)
- Pro hliník
- Pro bronz
- Pro obtížně svařitelné oceli a přechodové spoje



Obr. 17: ukázky přídatného materiálu [23]

5 Svar [6], [7], [8], [19], [21], [26], [29], [30]

U metody TIG svar vzniká při dodání velkého množství elektrické energie v podobě elektrického oblouku, jenž je velice intenzivní zdroj tepla. Působí na relativně malém bodě, se schopností účinně přenášet velké množství tepla do svařovaného materiálu. Zároveň lze snadno řídit pomocí vstupních parametrů a tím ovládat množství dodaného tepla.

Při svařování dochází k určitému teplotnímu cyklu, který je ohraničen počátkem vnášení tepla do svaru a končí srovnáním teploty s okolím. Během celého cyklu dochází ke změnám struktury a fáze materiálu, chemickým reakcím a změnou objemu s tepelnou roztažností způsobující deformace.

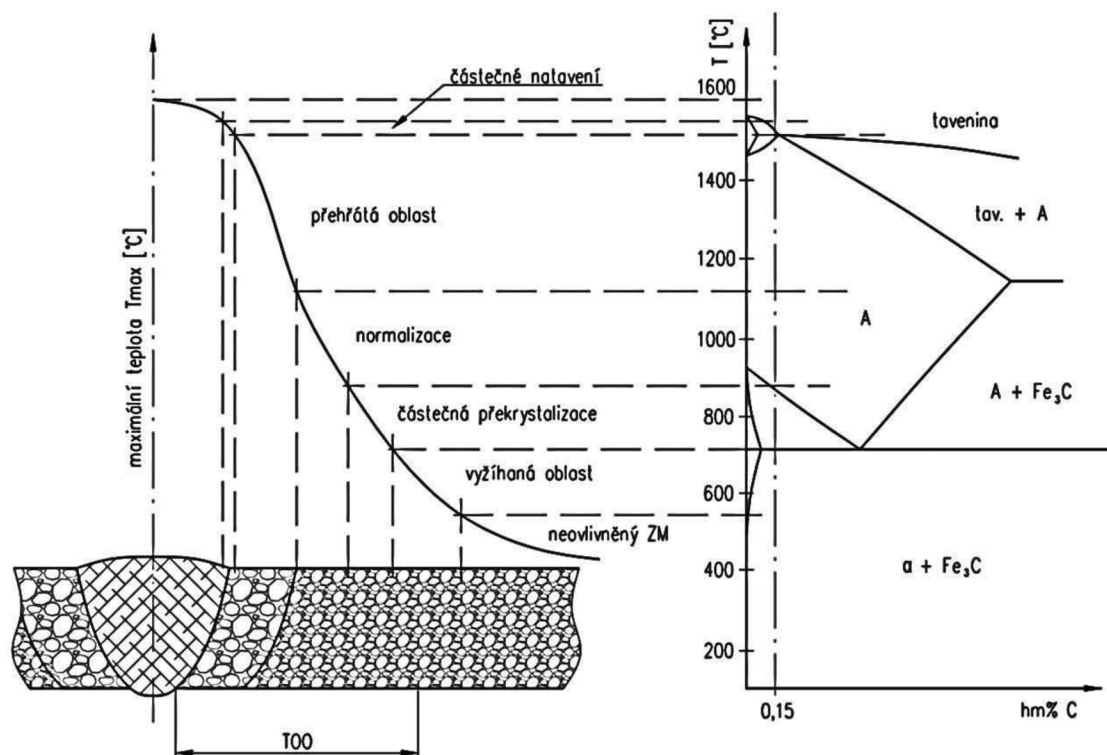
Velikost svarového kovu je přímo úměrná příkonu svařování, kdy hloubka svaru je nejvíce ovlivněna intenzitou proudu a šířka napětím.



Obr. 18: Svařování metodou TIG [13]

5.1 Tepelně ovlivněná oblast – TOO

Svarová oblast se nazývá tepelně ovlivněnou oblastí - TOO, v které dojde ke změnám struktury z důsledku vneseného tepla během svařování. V kovech bez polymorfni přeměny dochází pouze k substrukturním změnám (rekrytalizace a hrubnutí zrna). U kovů a slitin s největším zastoupením u ocelí dochází k polyformni přeměně, která má vliv na vlastnosti svarového spoje. Tepelně ovlivněnou oblast lze rozdělit na pásma, jež charakterizují určitou přeměnu základního materiálu.



Obr. 19 Tepelně ovlivněná oblast [19]

- Oblast částečného natavení znázorňuje přechod mezi taveninou a základním materiálem v tuhém stavu
- Oblast přehřátí, u které dochází k růstu primárních zrn
- Vyhřátá oblast, v které dochází k úplné přeměně struktury
- Oblast částečné překrystalizace, probíhá v ní neúplná polyformní přeměna
- Oblast vyžíhaná, v které probíhají změny substrukturální

Strukturální změny jsou nejvýraznější na polyformních změnách ocelí, kdy struktura oceli je stabilní pouze do teploty A_1 , při vyšších teplotách dochází k postupné transformaci základní struktury na austenit, kdy nad teplotou A_3 je již celá struktura přeměněna. Na strukturální změny má podstatný vliv teplotní cyklus, jehož rychlost, převážně rychlost ochlazení TOO, má za následek nežádoucí struktury.

Vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti

Jedná se nejen o mechanické, ale i fyzikální, chemické, žáruvzdorné a další vlastnosti. Jelikož tepelně ovlivněná oblast je začleněna do svařence, tak proto její vlastnosti mají vliv na celkovou nosnost spoje. Celý soubor vlastností je seřazen dle důležitosti jednotlivých vlastností, na které mají vliv jak konstrukční tak i ekonomické požadavky. Jedna z nejdůležitějších vlastností na svařovaný spoj je odolnost proti křehkému porušení, které lze těžko předvídat, a mají za následek fatální destrukci svařence, je vlastně defekt nejčastěji v podobě trhliny. Vznik tyto vady vyžaduje iniciaci, kterou může zajistit nevhodná konstrukce, geometrie, vrub, špatně provařený kořen svaru, ostré přechody, nebo studený spoj, popřípadě nečistota.

Výsledné vlastnosti svaru jsou dané celým souborem materiálových, technologických faktorů, které lze rozdělit do tří stádií. Rozhraní tuhého a nataveného materiálu určuje tzv. krystalizační vana, která lze vyvolat speciálním leptáním. Velikost a objem vany je přímo úměrný příkonu tepla.

a) Stádium tavby

Během tohoto stádia dochází k ohřevu svarových hran, natavuje se svařovaný materiál a taví se přídavný materiál, jestliže je použit. První úlohou technologie svařování je přivést do budoucího svaru teplo, po natavení materiálu dochází k metalurgickým procesům, kdy natavená lázeň tekutého kovu je zpravidla přehřátá a blíží se k teplotě varu. Ve svarovém kovu probíhají oxidační i redukční reakce, kdy jsou pod ochranným plynem reakce iniciovány z přehřátého kovu.

b) Stádium tuhnutí

Roztavený kov začíná tuhnout vždy na přechodové části tuhá-tekutá fáze. Růst krystalů je kolmo na největší odběr tepla. Kov může ztuhnout dendriticky nebo celulárně. Při dendritickém tuhnutí dochází k segregaci prvků, zejména uhlíku, síry, chromu, molybdenu, niklu. Celulární tuhnutí je výhodnější z hlediska menší segregace a výhodnější celistvosti. Segregační procesy mají vysoký vliv na praskání svarového kovu a dále na mechanické vlastnosti. V tomto stádiu získávají konečnou podobu a polohu nečistoty ve svaru. Většinou se nachází mezi jednotlivými přechody v TOO. Při svařování austenitických CrNi ocelí se velmi často vyskytují oxidační blány, které vnikly do svaru z povrchu základního materiálu.

c) Stádium fázových transformací

Typ struktury i její konfigurace nezávisí pouze na chemickém složení svařovaného kovu, ale i na způsobu krystalizace a rychlosti ochlazování. Z všeobecných poznatků obsah uhlíků ve svaru je nižší než ve svařované oceli, z toho důvodu lze předpokládat, že ve svaru nedochází ke křehkým strukturám – martenzit. Ale dochází k rozpadu austenitu dle diagramu zhotoveného podle Granjonovy metody analýzy rozpadu austenitu nebo podle dilatometrického měření.

Primární zrna jsou často orientována ve směru gradientu teploty. Na hranicích zrna se mohou nacházet řetězce feritu, ve struktuře se mohou nacházet i zrna austenitu či martenzitu. V nenatavené oblasti nad teplotou A_1 dochází k překrystalizaci základního materiálu, jehož výsledná struktura závisí na výchozím stavu.

5.2 Napětí, deformace ve sváru

Při svařování se malá část základního materiálu značně ohřeje a následně relativně rychle ochladí. Tyto prudké změny teploty vzhledem k tepelné roztažnosti základního materiálu mají za následek vnitřní pnutí, které mohou zapříčinit deformaci svařence.

Deformace lze rozdělit na vnitřní (nacházejí se ve vláknech, zrnech materiálu) a vnější, které se projevují jako změna geometrického tvaru a rozměru svařovaných dílců. Můžou být elementární – deformace svarového spoje, lokální – neovlivňují celkový rozměr a tvar svařence a celkové – projevují se jako změna tvaru a rozměrů svařence.

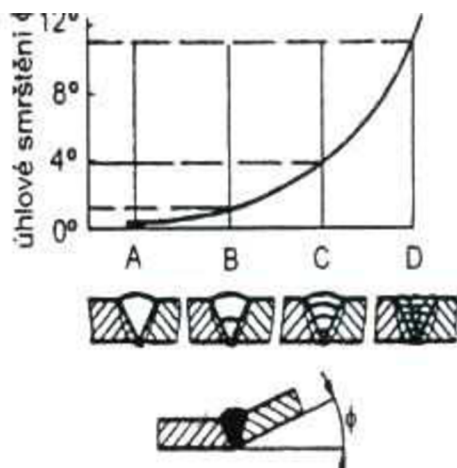
Deformace se dělí na tři základní změny rozměrů:

- Podélné smrštění: jsou to deformace ve směru osy svaru.
- Příčné smrštění: jsou to deformace kolmé na podélnou osu svaru na povrchu svařovaného dílce.
- Úhlová deformace: natočení jedné svařované plochy ke druhé ploše a je vyvolána zejména nerovnoměrným příčným smrštěním.

Napětí a deformace nelze zcela vyloučit, ale lze jim předcházet vhodnou technologií svařování, přípravkami a vhodně navrženou konstrukcí, po případě přidáním operace po svaření svařence (žihání na měkko, rovnání).

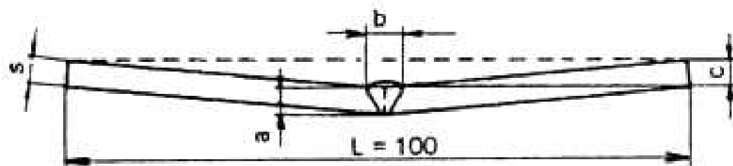
➤ Úhlové deformace

Projevuje se převážně u svařování na několikrát a nesymetrických úkosů. Velikost úhlové deformace závisí na počtu, způsobu tvorby svarových vrstev a na úhlu rozevření svaru. Její závislost lze vidět na obr. 20.



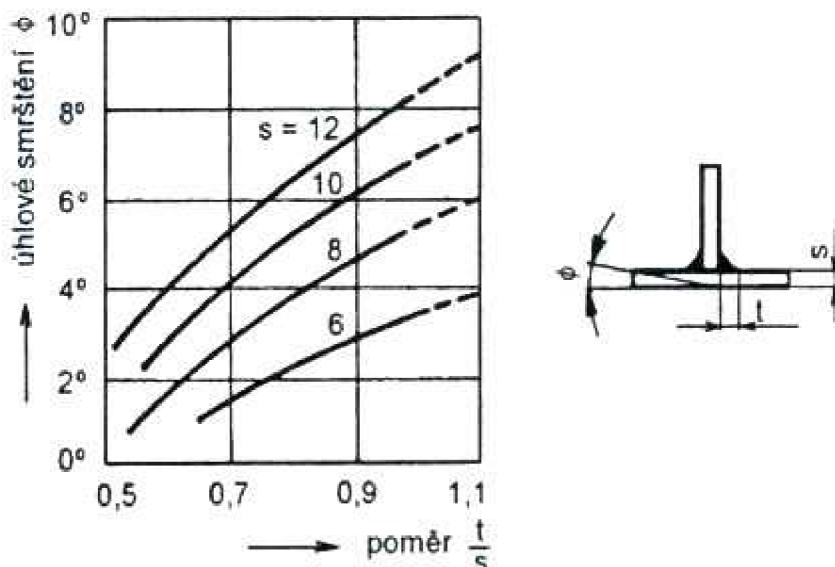
Obr. 20 Závislost úhlových deformací [6]

Jestliže se svařují desky stejné tloušťky, rostou úhlové deformace s přibývajícím počtem svarových vrstev, které způsobují průhyb desky. Tento deformační dej lze schématicky pozorovat na obr.



Obr. 21 Průhyb desky [6]

Úhlové deformace u koutových svarů jsou závislé na poměru velikosti svaru a tloušťky plechu. Informativní hodnoty smrštění pro T spoje svařovaným oboustranným koutovým svarem jsou na obr. 22.



Obr. 22 Úhlové smrštění pro T spoj [6]

5.3 Svařitelnost

Svařitelnost materiálu lze vyjádřit jako schopnost celistvého spojení dvou materiálů při dané svařecí metodě s vhodným svařecím postupem a musí vykazovat požadované vlastnosti spoje. Svařitelnost lze také brát jako komplexní vlastnost vyjadřující vhodnost oceli ke svařování, s požadavky na mechanické, fyzikální, chemické a technologické vlastnosti svaru při určitých konstrukčních, technologických možnostech dosažením požadované jakosti, spolehlivosti a životnosti svaru.

Dle normy ČSN EN 1011-2 ovlivňuje svařitelnost oceli tyto faktory:

- návrh spoje
- vodíkem indukované praskání
- houževnatost a tvrdost tepelně ovlivněné oblasti
- krystalizační praskání
- lamelární praskání
- koroze

Svařitelnost ocelí určuje převážně chemické složení a tloušťka svařovaného materiálu. Chemickým prvkem, který významně ovlivňuje svařitelnost, je uhlík a jeho obsah v materiálu. Obecně lze říci, že do 0,25% hmotnosti uhlíku v oceli lze svařovat. Při svařování nesmí vznikat ve svaru vady (trhliny za horka, za studena, lamelární, žíhací trhliny atd.).

Přídavný materiál volíme dle svařovaného materiálu a velikosti vneseného tepla do svaru. Dále lze svařence tepelně zpracovávat po svařování, jestliže to vyžaduje technologický postup při zachování nebo zlepšení svarových vlastností. Z důvodu možnosti svařování velkého množství materiálů, kdy každý materiál vyžaduje své specifické svařovací parametry a přístup ke svařování, budou níže popsány pouze dvě skupiny materiálu, které byly použity pro experiment.

Vliv chemického složení ocelí na svařitelnosti se nejčastěji vyjadřuje tzv. ekvivalentem uhlíku C_e , jenž vyjadřuje obsah jednotlivých legujících prvků ke kalitelnosti oceli. Při čemž platí, že čím snadnější je zakalitelnost oceli, tím horší svařitelnost má. Do následujících vztahů uhlíkového ekvivalentu se dosazují obsahy prvků obsažené v oceli v hm%.

Dle ČSN 051310

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\%] \quad 5.1$$

Tab. 1 Platnost rovnice 5.1 do obsahu prvků:

C [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	V [%]	Cu [%]
0,22	1,6	1	3	0,14	0,3

Dle mezinárodního svařecího institutu HW, platí pro ocel obsahující C do 0,25%

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [\%] \quad 5.2$$

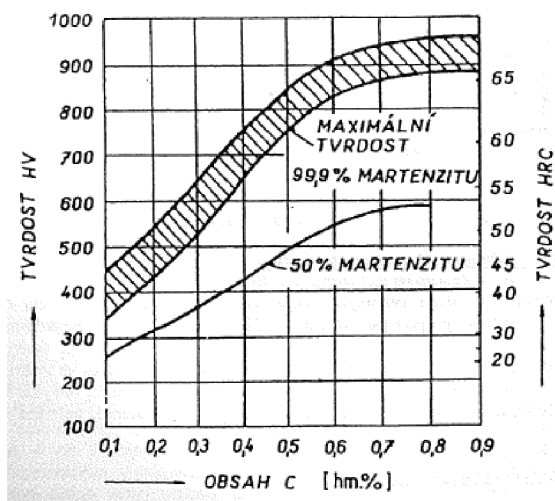
Norma ČSN EN 1011-2 uvádí pro výpočet uhlíkového ekvivalentu dvě rovnice. Vztah dle HW (rovnice 5.2) pro nelegované, jemnozrnné a nízkolegované oceli a výpočet ekvivalentu uhlíku CET dle rovnice pro oceli skupiny 1 až 4 podle TNI EN ISO/TR 15608.:

$$CET = C + \frac{Mn+Mo}{10} + \frac{Cr+Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad [\%] \quad 5.3$$

5.3.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí

Svařitelnost uhlíkových ocelí závisí především na chemickém složení, kdy jsou výrobcem předepsány především obsahy C, Mn, Si, P a S. Největší vliv na svařitelnost z uvedených prvků má uhlík. Se zvyšujícím obsahem uhlíku se také zvyšuje mez pevnosti, kluzu a tvrdost, ale plasticita se snižuje. S rostoucím uhlíkem dochází i k větší náchylnosti k zakalení při svařování a současně se zvyšuje riziko na vznik studených trhlin.

Závislost tvrdosti a obsahu martenzitu ve struktuře TOO na obsahu uhlíku udává obr. 20. Z této závislosti byla stanovena mezní hranice maximální přípustné tvrdosti v TOO svarového spoje uhlíkové oceli 350HV – která odpovídá obsahu uhlíku v oceli 0,25% a 50% obsahu martenzitu v TOO.



Obr. 23 Závislost svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO [8]

5.3.2 Svařitelnost austenitických korozivzdorných ocelí – CrNi

Rozhodující faktor svařitelnosti je především celistvost, odolnost proti korozi a mechanické vlastnosti svařeného spoje, kdy celistvost spoje vysoce legovaných austenitických ocelí je obvykle vysoká. Při správné volbě svařovacích parametrů a podmínek lze svařovat svary požadované celistvosti (tj bez dutin, trhlin).

Tyto ocele obsahují chrom v 17 až 22 %, nikl v obsahu 8 až 12 % a molybden do 3% a pro stabilizování ocele mohou obsahovat také stabilizační přísady titanu, niobu, lanthanu a dalších. Stabilizační prvky mají za úkol na sebe vázat uhlík na stabilní karbidy. Tím zabraňují tvorbě karbidů chromu, což má za následek zaručenou korozivzdornost. Obsah uhlíku v ocelích je nízký, maximálně do 0,12 %. Charakteristickou vlastností austenitických korozivzdorných ocelí je pasivace – odolnost proti korozi a je nemagnetický. Dle svařitelnosti lze ocele dělit do tří skupin.

- Nízkouhlíkové korozivzdorné austenitické ocele s obsahem uhlíku do 0,03 %
- Stabilizované korozivzdorné austenitické ocele s obsahem uhlíku od 0,07 do 0,12 % se stabilizačními přísadami v množstvích měrných k obsahu uhlíku
- Nestabilizované korozivzdorné austenitické ocele s obsahem uhlíku od 0,07 do 0,12 % bez stabilizačních přísad

Při dodržení vhodných parametrů sváření má austenitická korozivzdorná ocel malou náchylnost k praskání za tepla (redukuje se množstvím vneseného tepla a přídavným materiálem s menším množstvím delta feritu). Mechanické spoje vzniklé při svařování metodou TIG jsou srovnatelné se základním materiálem. Korozivzdorná odolnost svaru závisí na materiálových a technologických činitelích.

6 Experiment [1], [4], [5], [10], [17]

V rámci praktické části byl proveden experiment, který lze rozdělit na dvě části. V první části bylo vytvořeno 11 koutových svarů v poloze PB a jeden svar v poloze PF (svislá poloha, svařuje se vzhůru) s rozličnými parametry svařování a následně se pozorovala struktura, tvar a velikost svaru u vybraných vzorků, kde se očekávaly nejvýraznější změny. Druhá část spočívala ve svaření čtyř vzorků, u kterých se následně měřila úhlová deformace. Také byl proveden rozbor vneseného tepla do vzorků a jeho šíření materiálem. Pomocí Schaefflerova diagramu byl proveden grafický odhad struktury svaru v základním materiálu korozivzdorné oceli.

6.1 Materiálová charakteristika

Pro experiment byly zvoleny dvě skupiny ocelí, které nám umožnily u svařování metodou TIG pozorovat vhodnost svařování pro rozdílné materiály s přídavným nebo bez přídavného materiálu. První skupina ocelí podle literatury svařitelná, ale nevhodná dle ekonomického hlediska, byla nelegovaná ocel třídy 11. Pro druhou skupinu ocelí byla zvolená korozivzdorná ocel obvykle svařovaná metodou TIG.

6.1.1 Nelegovaná ocel

Za skupinu uhlíkové oceli byla použita ocel třídy 11 obvyklých vlastností vhodná ke svařování pro ocelové konstrukce s označením S235JR (ČSN 11 373, DIN 17100-80). Využití nachází při konstrukci strojů menší síly stěn, v tavném svařování, staticky i mírně dynamicky namáhaných konstrukcí a ve vodohospodářství (stavidla, jezové konstrukce, atd.).

Tab. 2 Chemické složení oceli 11 373

C [%]	P [%]	S [%]	N [%]
max. 0,17	max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007

Tab. 3 Mechanické vlastnosti

Mez kluzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	225
Mez pevnosti	R_m [MPa]	340-470
Tažnost	A [%]	25
Hustota	ρ [kg.m ³]	7850

6.1.2 Austenitická korozivzdorná ocel

K experimentu byla použita ocel třídy 17, jedná se o nestabilizovanou korozivzdornou ocel s austenitickou strukturou s označením EN ISO 1.4301 (ČSN 17 240, DIN X5CrNi18-10). Nejčastější využití nachází v potravinářském průmyslu díky své zaručené svařitelnosti, korozivzdornosti a vysokého stupně tažnosti (až 50%). Je také vhodná pro chemická zařízení a tlakové nádoby.

Tab. 4 Chemické složení oceli 17 240

C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]
max. 0,07	max. 2,0	Max 1,0	17,0-20,0	9,0-11,5	max. 0,045	max 0,030

Tab. 5 Mechanické vlastnosti

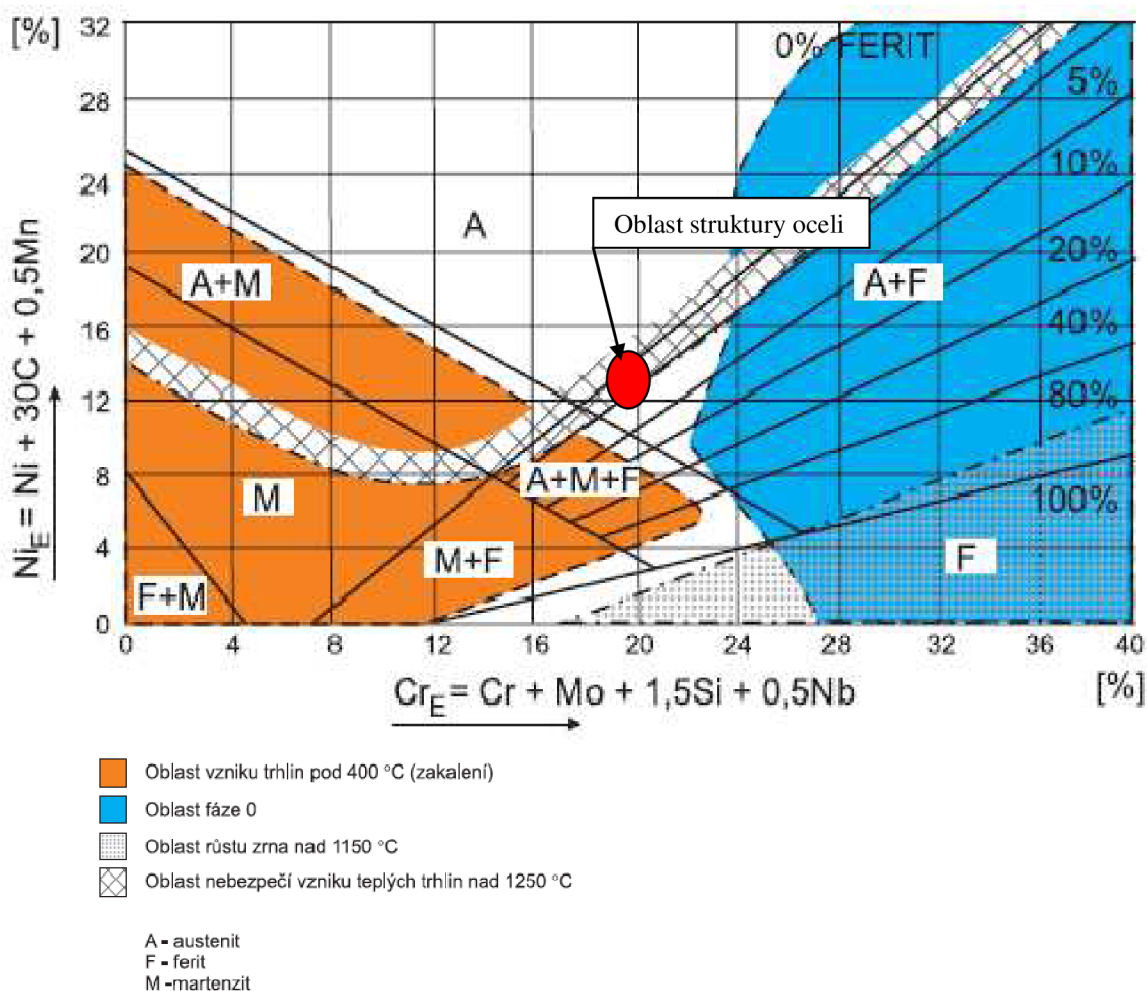
Mez kluzu	$R_{p0,2}$ [MPa]	186
Mez pevnosti	R_m [MPa]	490-735
Tažnost	A [%]	až 50
Hustota	ρ [kg.m ³]	7900
Měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	500
Tepelná vodivost	λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	14,7

Tato ocel má odolnost proti plošné korozi - odolává kyselině dusičné, organickým kyselinám a odolnost lze zvýšit leštěním. Rozpouštěcí žihání se provádí v teplotním rozsahu 1020-1080°C, žihání ke snížení pnutí 850-950°C. Svařitelnost je zaručena. Jestliže je použit přídatný materiál při svařování, tak se doporučuje elektroda VÚS-A3F. Materiál lze hůře obrábět i přes vysokou tažnost.

Výpočet výsledné struktury oceli:

$$Cr_e = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti = 18 + 1,5 \cdot 1 = 19,5\% \quad 6.1$$

$$Ni_e = Ni + 0,5 \cdot Mo + 30 \cdot C + 30 \cdot (N - 0,05) = 10 + 30 \cdot 0,07 = 12,1\% \quad 6.2$$



Obr. 24 Schaefflerův diagram [10]

6.1.3 Přídavný materiál

Přídavné materiály byly použity od výrobce BÖHLER. Pro uhlíkovou ocel je to poměděný desoxydovaný drát s označením ER70 S-6 o průměru 1,2mm určený pro nelegované a nízkolegované oceli. U vysokolegované oceli se zvolil drát s označením ER 308L o průměru 1,6 určený pro korozivzdornou ocel s vyšším obsahem uhlíku.

Tab. 6 Vlastnosti drátu ER70S-6

C [%]	Si [%]	Mn [%]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
0,1	0,9	1,4	430	540	27

Tab. 7 Vlastnosti drátu ER70S-6

C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Ni [%]	R _e [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
max. 0,02	0,5	1,7	20,1	9,8	450	620	38

6.2 Svářecí aparát, plyn, elektroda

- Svářecí aparát byl použit od firmy FRONIUS s označením MagicWave 2200 Job. Jedná se o digitalizovaný, mikroprocesorem řízený invertorový svařovací zdroj s možností bezdotykového zapalování oblouku a s jednoduchým ovládáním přístroje pro nastavení základních svařovacích parametrů s možností přepínání mezi pulzním a stejnosměrným proudem.

Tab. 8 Základní parametry svářečky

Sít'ové Napětí	U	230V
Primární výkon	P	3,7kA
cos φ	-	0,99
Rozsah proudů	I	3-220A
Napětí naprázdno	U ₀	88V
Zapalovací napětí	U _p	9,5kV
Krytí	-	IP23
Rozměry	-	485/180/390
Hmotnost	-	17,4kg
Certifikace	-	C,CE



Obr. 25 Svařecí aparát MagicWave 2200 Job [4]

- Jako ochranný plyn byl použit argon s označením 4.6 – běžné čistoty (99.996%) a jeho využití je obvyklé pro oceli méně náchylné na kyslík. Obsah kyslíku v plynu se pohybuje pod 5 ppm. Průtok plynu při experimentu byl 9 lmin^{-1} .
- Při svařování byly použity elektrody s označením WL15, jedná se o zlaté elektrody s příměsí 1,5% lanthanu, s průměrem 3,2mm, broušené do 30° . Lze je považovat za univerzální, použitelné téměř pro všechny svařovací aplikace. Lanthan usnadňuje zapálení elektrického oblouku. Pro experiment bylo v hořáku umístěné sítko, které umožnilo větší vysunutí hrotu elektrody.

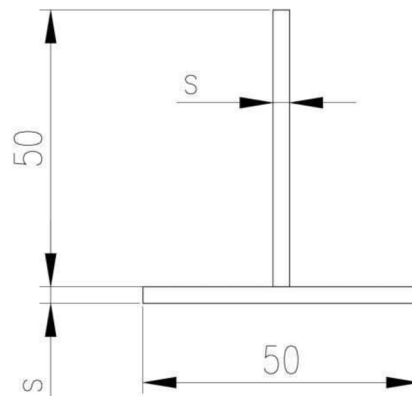
6.3 Porovnávání struktury svaru - část první

V první části se experiment zaměřil na porovnávání různých svařovacích parametrů u vzniklého svaru, především tvar, velikosti a struktury. Bylo svařeno celkem 12 vzorků z toho 11 v poloze PB a jeden vzorek v poloze PF „stoupačka“. Pro experiment byl zvolen jednostranný koutový svar bez úpravy svařovaných ploch, jelikož pro metalurgické výbrusy je vhodnější.

Svary byly zhotoveny po čtyřech o délce cca 50mm na pásech oceli 50x200mm. Během svařování jednotlivých vzorků z důvodu prohřátí základního materiálu se provedly technické přestávky, aby nedošlo k ovlivnění nadcházejícího svaru. Samotné svařování bylo provedeno ručně při snaze udržení rovnoměrné svařovací rychlosti.

Svařování čtyř svarů na uhlíkové oceli tloušťky 4mm. Tři svary byly svařené v poloze PB a u vzorku číslo 12 došlo k jediné změně a to v poloze svařování, kdy se svařoval svar ve svislé poloze - PF.

U korozivzdorné oceli se vytvořilo celkem 8 svařových housenek na materiálu tloušťky 3mm při různých svařovacích parametrech ve vodorovné poloze – PB.



Obr. 26 Pohled na vzorek - boční

- Výpočet střední hodnoty proudu:

$$I_s = \frac{I_p - I_z}{\left(\frac{t_z}{t_p} + 1\right)} + I_z \quad 6.3$$

- I_p pulzní proud [A]
- I_z základní proud [A]
- t_p čas pulzu [%]
- t_z základní čas [%]

- Výpočet rychlosti svařování

$$v_s = \frac{l}{t} \quad 6.4$$

- v_s rychlost svařování [mms^{-1}]
- l délka svaru [mm]
- t čas svařování [s]

- Výpočet vneseného tepla

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$

6.5

Qvnesené teplo [kJmm⁻¹]

η účinnost přenosu tepla [-]

Unapětí [V]

Iproud [A]

v_ssvařovací rychlost [mms⁻¹]

Tab. 9 svařovací parametry pro uhlíkovou ocel

Vzorek	Pulzní proud		Stejnoseměrný proud	
	9.	10.	11.	12.
I _p [A]	140	140	-	-
I _z [A]	49	49	-	-
I [A]	-	-	130	130
f [Hz]	1,5	1,5	-	-
t _p [s]	50%	50%	-	-
t _z [s]	50%	50%	-	-
I _s [A]	95	95	130	130
U [v]	10,2	10,5	10,8	10,8
Drát [mm]	-	1,2	1,2	1,2
l [mm]	60	42	71	48
t [s]	-	55,79	29,63	26
v _s [mms ⁻¹]	-	0,75	2,40	1,85
Q [kJmm ⁻¹]	-	0,88	0,39	0,51

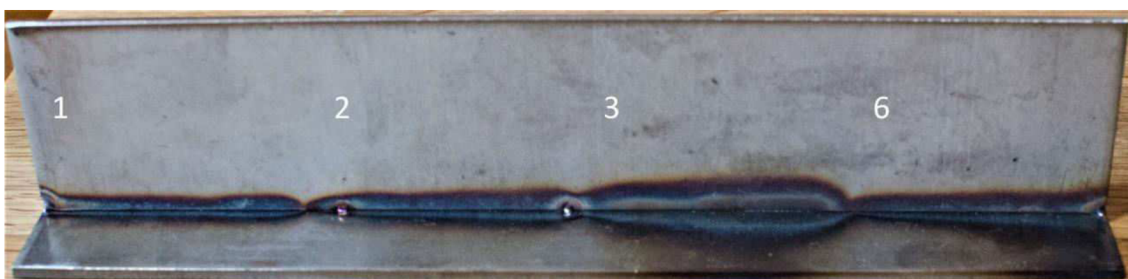
Tab. 10 svařovací parametry pro korozivzdornou ocel

Vzorek	Pulzní proud					Stejnoseměrný proud		
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.
I _p [A]	110	135	170	110	110	-	-	-
I _z [A]	38,5	47,25	59,5	38,5	38,5	-	-	-
I [A]	-	-	-	-	-	90	135	110
f [Hz]	1,5	1,5	1,5	3	0,75	-	-	-
t _p [s]	50%	25%	50%	50%	50%	-	-	-
t _z [s]	50%	75%	50%	50%	50%	-	-	-
I _s [A]	74	69,2	115	71	71	90	135	110
U [V]	9,4	10,7	10,9	9,4	9,4	11	11	11
Drát[mm]	-	-	-	-	-	-	-	1,6
l [mm]	61	64	63	60	61	61	57	57
t [s]	-	-	-	-	-	38	18,16	52,61
v _s [mms ⁻¹]	-	-	-	-	-	1,61	3,14	1,08
Q [kJmm ⁻¹]	-	-	-	-	-	0,41	0,31	0,74

Veškerá fotodokumentace bude zařazena a patřičně popsána v příloze č. 1. Jednotlivé svary se nenachází posoupně na ocelových pásech z důvodu urychlení svařování, kdy se vyplnily delší proluky chladnutí vzorku svařováním na jiném pásu. Z fotografií lze vyčíst velikost a tvar tepelného zbarvení oceli u svaru. Veškeré zbarvení se rozšiřují zprava doleva ve stejném směru svařování a to z důvodu, že dochází k pomalému prohřátí vzorku při svařování. Rychlost rozšiřování zbarvení záleží na svařovaném materiálu, konkrétně na jeho tepelné vodivosti, rychlosti a velikosti vnesení tepla do svaru.



Obr. 27 Celkový pohled na čtyři vzorky – pohled přední



Obr. 28 Celkový pohled na čtyři vzorky - pohled zadní



Obr. 29 Celkový pohled na čtyři vzorky - pohled spodní

Z fotografií obr. 24, 25 a 26 lze vyčíst objem přidaného tepla dle velikosti zbarvení základního materiálu do korozivzdorné oceli. První až třetí vzorek byl svařován pulzním proudem rozdílných svařovacích parametrů. Na vzorku jedna a dva není na oceli takřka patrné postupné rozšiřování tepelného zbarvení a jejich střední hodnota proudu je takřka stejná. U vzorku 3 je již střední proud větší cca o 45A, díky tomu vzrostl objem vloženého tepla do svaru a byl schopen prohřát větší část základního materiálu až došlo k odlupování svrchní vrstvičky oxidů. Vzorek číslo 6 se svařoval stejnosměrným proudem hodnoty 90 A, u tohoto proudu lze pozorovat velké rozšiřování zbarvené oblasti na oceli. Z toho lze usuzovat, že stejnosměrný proud v tomto případě, byl schopen lépe intenzivněji ohřívat svařovaný vzorek.

Příklady detailu svaru:

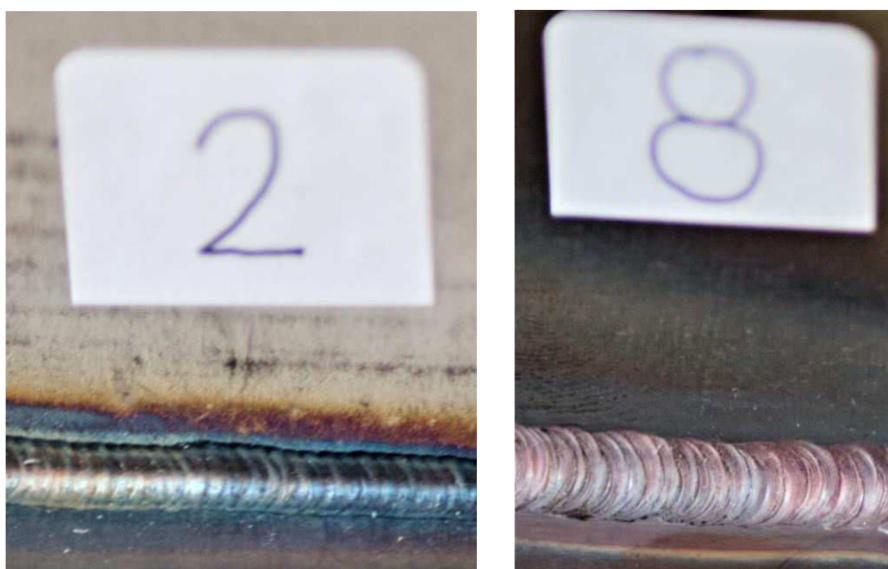
U vzorku číslo 9 lze pozorovat celkovou nevhodnost svařovací metody na uhlíkové oceli bez přídavného materiálu. Docházelo k výrazné pórovitosti a k rychlé degradaci wolframové elektrody, které se cca po 60mm upálila špička a již nešla bez nabroušení použít. Vzorek 10 se vyznačuje hrubou vyčnívající kresbou svaru.



Obr. 30 Detaily svaru uhlíkové oceli - příklady

Při svaření korozivzdorné oceli s číslem 2 při pulzním proudu bez přídavného materiálu vznikl malý lesklý svar s jemnou kresbou. Zde záleží velmi na zručnosti a zkušenostech operátora svářečky při tvorbě svaru a její kresby z důvodu omezeného množství možného natavení materiálu. Vzorek 8 s přídavným materiálem a stejnosměrným proudem se vyznačuje větším matným svarem.

Dělení a řezání vzorků bylo provedeno na rozbrušovací pile určené pro



Obr. 31 Detaily svaru korozivzdorné oceli - příklady

metalografické laboratoře Struers labotom-5 se schopností ochlazování řezu emulzí. Leštění vzorků probíhalo na dvoukotoučové leštičce Saphir 330 s nastavitelnými otáčkami leštícího kotouče. Samotné leštění bylo provedeno pod vodou na brusném papíru 1200. Za pomoci leptadla Nital 1% - kyseliny dusičné byly naleptané vzorky z uhlíkové oceli a pro korozivzdornou ocel bylo použito leptadlo Marble's.

6.3.1 Výbrusy uhlíkové oceli

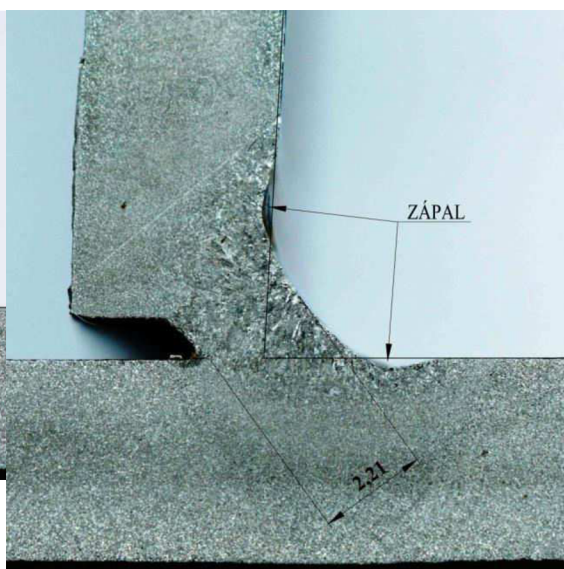
Ze skupiny uhlíkových ocelí byly vybrány tři vzorky svařeny totožným přídavným materiálem. Vzorek číslo 10 byl proveden za pulzního proudu se středním proudem 95A, jenž měl pravděpodobně za příčinu největší provaření základního materiálu - 3,28 mm. Z důvodu intenzivního rychlého dodání tepla do svaru nedošlo k nežádoucímu zápalu i přesto, že bylo dodáno na jeden milimetr délky svaru největší teplo – 0,88kJ. Vzorek číslo 11 a 12 byly svařovány stejnosměrným proudem velikosti 130 v rozličných polohách. Svar číslo 11 byl svařován ve vodorovné poloze - PB, stejně jako svar 10. U tohoto svaru došlo k rovnoměrnému malému zápalu s nejmenším provařením – 2,21mm. Vzorek číslo 12 byl svařen ve svislé poloze – PF. U něho vznikla také malá hloubka provaření – 2,32mm velké šířky svaru a došlo k nerovnoměrnému rozložení zápalu s vysokou hodnotou tepla vloženého do jednoho milimetru svaru.

Tab. 11 výběr - svařovací parametry výbrusů pro uhlíkovou ocel

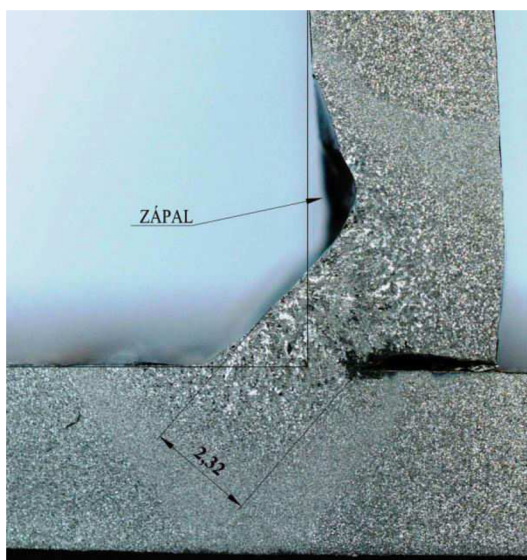
Vz.	I_p [A]	I_z [A]	I_s [A]	U [V]	f [Hz]	t_p [s]	t_z [s]	l [mm]	t [s]	v_s [mm·s ⁻¹]	Q [kJmm ⁻¹]	Drát [mm]
10	140	49	95	10,5	1,5	50 %	50 %	42	55,79	0,75	0,88	1,2
11	-	-	130	10,8	-	-	-	71	29,63	2,4	0,39	1,2
12	-	-	130	10,8	-	-	-	48	26	1,85	0,51	1,2



Obr. 33 vzorek č. 10



Obr. 32 vzorek č. 11



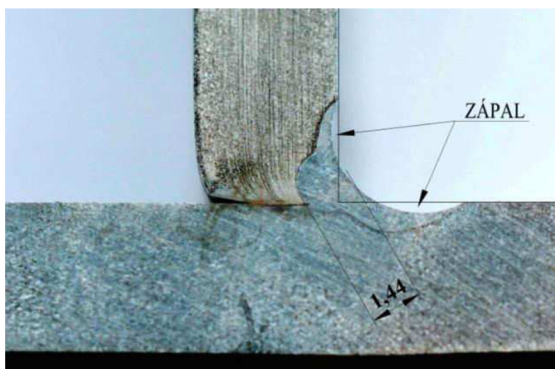
Obr. 34 vzorek č. 12

6.3.2 Výbrusy korozivzdorné oceli

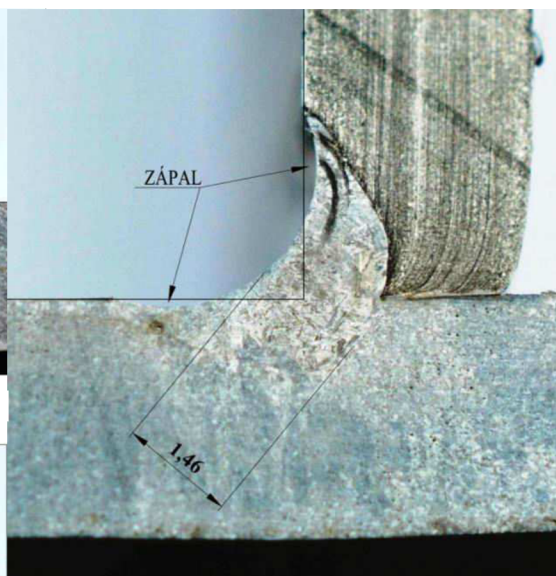
Ze skupiny svařovaných vzorků vysoce legované oceli se provedl výbrus u třech vzorků. Vzorek číslo jedna zastupuje svar se svařovacími parametry pulzního proudu, které by si pravděpodobně nastavila na svářecím aparátu obsluha. Na svaru vznikl malý zápal, kterému nelze bez přídavného materiálu zcela zamezit, ale lze ho v určité míře omezit. Záleží hlavně na konstrukci svařence. Hloubka provaření svaru je vzhledem k síle základního materiálu poloviční – 1,44mm a střed svaru intenzivně zasahuje do středu svařovaného pásu z povrchového natavení svaru díky pulznímu proudu. Vzorky číslo 6 a 8 porovnávají svařování stejnosměrným proudem s přídavným a bez přídavného materiálu. U obou vzorků nevznikl výrazný výstupek, jenž by vyčníval výrazně do základního materiálu jak u pulzního proudu. Vzorek č. 6 má malý rovnoměrný zápal a hloubku provaření 1,46mm, přibližně polovinu co síla pásu. Vzorek 8 s přídavným materiálem se vyznačuje provařením 2,47mm, bez tvorby zápalu a mírný výstupek podobný výstupku u svaru č. 1.

Tab. 12 výběr - svařovací parametry výbrusů pro korozivzdornou ocel

Vz.	I_p [A]	I_z [A]	I_s [A]	U [V]	f [Hz]	t_p [s]	t_z [s]	l [mm]	t [s]	v_s [mms ⁻¹]	Q [kJmm ⁻¹]	Drát [mm]
1	110	38,5	74	9,4	1,5	50%	50%	61	-	-	-	-
6	-	-	90	11	-	-	-	61	38	1,61	0,41	-
8	-	-	110	11	-	-	-	57	52,61	1,08	0,74	1,6



Obr. 36 vzorek č. 1



Obr. 35 vzorek č. 6



Obr. 37 vzorek č. 8

6.4 Měření deformací - část druhá

Tato část měla ověřit předpokládané menší deformace u pulzního proudu z důvodu menšího vložení tepla do svaru tímto proudem. Byly svařeny 4 vzorky na uhlíkové oceli v poloze PA. Byl zvolen svar na tupo bez mezery a bez přídavného materiálu, na pásech uhlíkové oceli 50x200mm tloušťky 2mm. Samotné svařování bylo provedeno ručně při snaze udržení rovnoměrné svařovací rychlosti.

Po vychladnutí vzorků došlo k zakrácení pásu plechu na rozměr cca 50x50mm, kdy se svar nacházel ve středu této destičky a následně se provedl řez kolmo na svar. Tímto se docílilo zhotovení vzorku vhodného pro změření úhlu deformace pod mikroskopem. Svar nebylo nutné k měření brousit.

Tab. 13 svařovací parametry pro uhlíkovou ocel

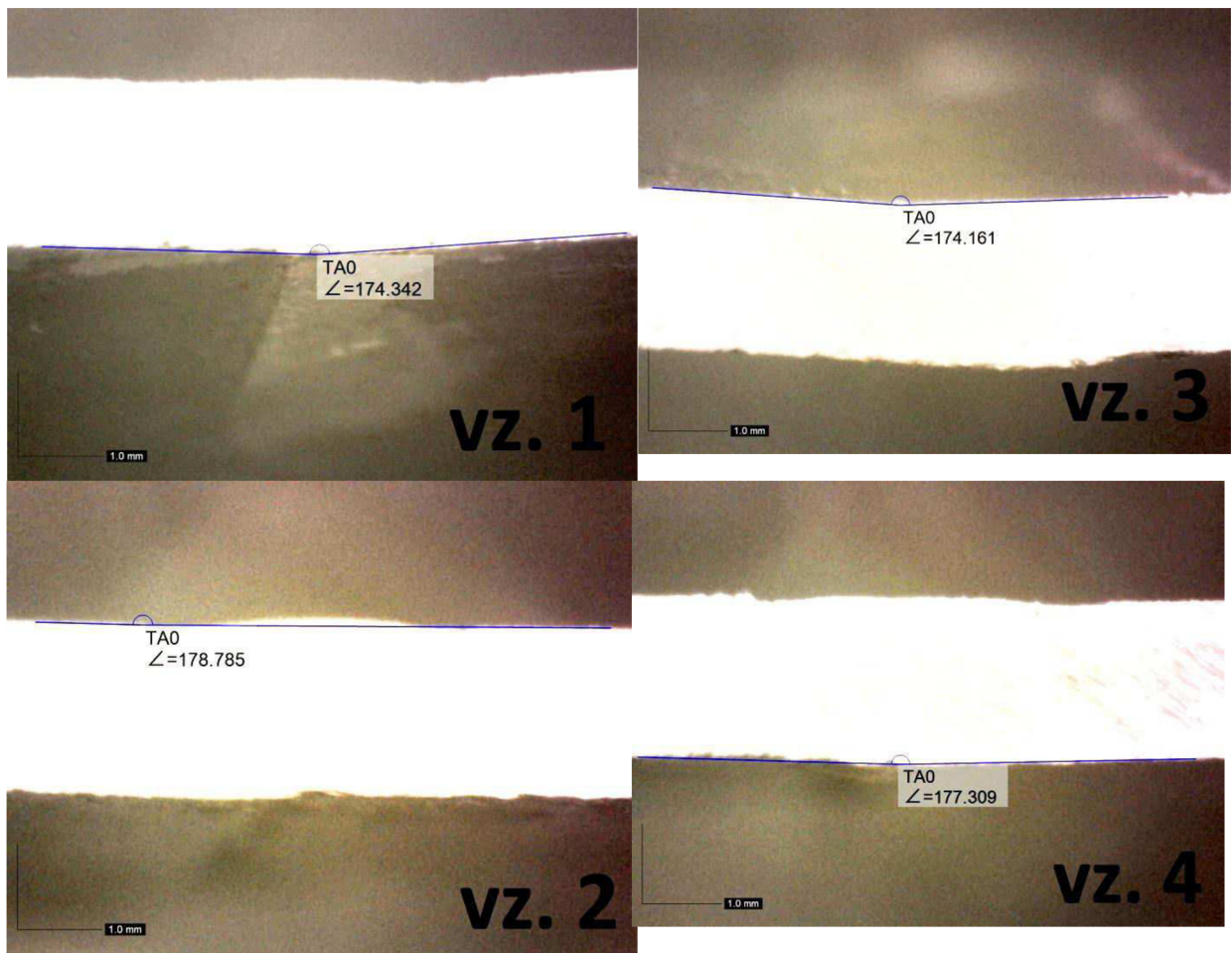
Vzorek	Pulzní proud		Stejnoseměrný proud	
	1.	2.	3.	4.
I_p [A]	80	80	-	-
I_z [A]	24	24	-	-
I [A]	-	-	85	120
f [Hz]	1,2	1,2	-	-
t_p [s]	50%	20%	-	-
t_z [s]	50%	80%	-	-
I_s [A]	52	35,2	85	120
U [v]	10,3	10,4	10,1	11,6
l [mm]	50	50	50	50
t [s]	22,9	30,99	14,64	10,2
v_s [mms ⁻¹]	2,18	1,61	3,42	4,90
Q [kJmm ⁻¹]	0,16	0,15	0,17	0,19
β [°]	174,34	178,79	174,16	177,31

Jestliže by nevznikl na svařeném vzorku žádný deformační úhel, tak by se naměřila hodnota 180° a čím víc by tato hodnota klesala, tím by byla změřena větší deformace na svaru. Po porovnání jednotlivých vzorků mezi sebou, jejich svařovacích parametrů a změřeného deformačního úhlu vyplývá, že u vzorku číslo 4 došlo k ovlivnění svařování vnějšími vlivy, které měly za následek zkreslení velikosti deformace. Jelikož bylo do tohoto svaru vneseno z celého svařování největší teplo na milimetr svaru, jeho deformační úhel je druhý nejmenší.

Při porovnání pulzního a stejnosměrného proudu v závislosti na deformaci s jedním možným zkresleným vzorkem se teoretický předpoklad ověřil. Lze říci, že pulzní proud má menší deformační účinky, ale vzhledem k nízkému počtu svařených vzorků při ručním svařování nelze vyhodnotit rozdíl velikosti deformace.



Obr. 38 Vzorky úhlové deformace



Obr. 39 Úhlové deformace

7 Technické doporučení, vyhodnocení

Uhlíkovou ocel lze svařovat metodou TIG s pulzním i stejnosměrným proudem. Svařit vyhovující svar této oceli bez použití přídavného materiálu je nemožné, z důvodu vzniku silné pórovitosti. Teoreticky k omezení vad u svaru bez přídavného materiálu by šlo provést za pomoci formujícího plynu chránícího kořen svaru, ale tento způsob je z ekonomického hlediska triviálně nevhodný. Svařování s přídavným materiálem lze docílit vyhovujícího svaru. Pulzní proud je pravděpodobně nejvhodnější pro svařování uhlíkové oceli díky menšímu tepelnému ovlivnění, absenci zápalu a nejlepšího vzhledu svaru. Stejnoseměrný proud se může použít také na svařování uhlíkové oceli, ale již u něj dochází k tvorbě zápalu, větší tepelně ovlivněné oblasti.

Metoda TIG se v praxi nejvíce využívá pro korozivzdornou ocel. Svařování lze provést s přídavným i bez přídavného materiálu s využitím pulzního i stejnosměrného proudu, při čemž volba velikosti a typu proudu závisí na daném svaru. Obecně platí pravidlo, že s použitím přídavného materiálu je tepelně ovlivněná oblast větší. U svaru bez přídavného materiálu s pulzním proudem je tepelně ovlivněná oblast menší jak u stejnosměrného proudu, s malým až takřka žádným postupným rozšiřováním tepelně ovlivněné oblasti z důvodu prohřátí materiálu. Také lze s pulzním proudem docílit hezčí kresby svaru.

Na velikosti deformace svařence mají vliv mechanické vlastnosti svařovaného materiálu a objem vneseného tepla. Metoda TIG nám umožňuje volit vhodný typ proudu a jeho parametrů pro omezení velikosti deformace. Při svařování má zásadní vliv na deformaci dodané teplo do svaru. Pulzním proudem lze úspěšně snížit objem tepla vloženého do svaru a tím docílit menších deformací.

8 Závěry

Práce je zaměřená na svařovací metodu TIG s porovnáním vlastností pulzního a stejnosměrného proudu s majoritním zastoupením ve svařování korozivzdorné oceli a neželezných slitin. Stále častěji jsou vyžadované dokonalejší úhlednější svary s minimálními až žádnými deformacemi.

Bakalářská práce v první polovině popisuje teorii svařovací metody TIG a samotný svar s jeho částmi a další potřebné náležitosti pro praktickou část práce, které vedly k experimentu skládající se ze dvou pokusů pro ověření teoretických znalostí a předpokladů.

Byl proveden rozbor a popis svařovacích proudů a jejich schopnost vytvořit svar a tepelně ovlivnit blízké okolí svaru. Dále byli také popsány veškeré další části svařovacího procesu, které by mohly mít vliv na svar. V Schaefflerově diagramu byla zjištěna struktura základního korozivzdorného svařovaného materiálu.

Experiment byl proveden na dvou odlišných materiálech. Konstrukční ocel zastupoval materiál s označením S235JR a materiál 1.4301 zastupuje korozivzdornou ocel. Při vyhodnocení první části experimentu, která byla zaměřena na tvar a velikost tepelně ovlivněné oblasti, došlo se k závěru, že pulzní proud je vhodnější pro větší rovnoměrné provaření materiálu s hezčí kresbou svaru. V druhé části se měřily vzniklé úhlové deformace po svaření materiálu. Celý experiment byl proveden na čtyřech vzorcích uhlíkové oceli s označením S235JR. Pravděpodobně došlo během svařování k ovlivnění jednoho vzorku, který má za následek zkreslení výsledku. Po rozboru a zhodnocení naměřených hodnot se došlo k závěru, že i přes vzniklé ovlivnění experimentu pulzní proud méně tepelně ovlivňuje svařovaný materiál.

Pro lepší pochopení a vyhodnocení vlivu pulzního a stejnosměrného proudu svařování by bylo vhodné provést rozsáhlejší experiment s více vzorky pro měření úhlové deformace svaru a následně z měření určit rozdíl vznikající deformace mezi pulzním a stejnosměrným proudem.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ²

- [1] *Air products* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.airproducts.com>
- [2] *Centrum nářadí* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.centrum-naradi.cz/katalog/tr-weld-sherman-wolframova-elektroda-tyrkysova-3-2-ws20_WS2032/
- [3] *CitacePro* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>
- [4] *Fronius Česká republika* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_ceska_republika
- [5] FÜRBAACHER, Ivan, Karel MACEK a Josef STEIDL. *Lexikon technických materiálů se zahraničními ekvivalenty: aktuální stav listopad - včetně 1. aktualizace* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1998 [cit. 2017-05-21]. ISBN 8086229025.
- [6] HUDEC, Z.: *Deformace a napětí při svařování*. 1.vyd. Technická univerzita v Liberci, listopad 1998, 76 s. ISBN 80-7083-313-0
- [7] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd.* Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 8085771853.
- [8] KOUKAL, Jaroslav, Drahomír SCHWARZ a Jiří HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 9788024820255.
- [9] MAJER, Lubomír. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 8085771705
- [10] MATĚJÍČEK, Josef. *Obloukové svařování korozivzdorných ocelí pro náročné pracovní podmínky*. 2015. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubiček.
- [11] MINAŘÍK, Václav. *Přehled metod svařování*. 3., aktualiz. vyd. Ostrava: ZEROSS, c2011. Svařování. ISBN 8086698181.
- [12] *QUICK - SERVIS, spol. s r.o.* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.svarecky-elektrody.cz/svarovani-tig-zakladni-seznameni/t-124>

- [13] *Read Gur* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://readgur.com/doc/961377/obrazek-svarovani-tig>
- [14] *Roka Ráža, spol. s.r.o.* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.roka-teplice.cz/cs/>
- [15] *Segopal Tech s.r.o* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.segopaltech.cz/portfolio/svarovana-konstrukce/>
- [16] *Svářečské forum* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz>
- [17] *Svařovací materiály* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: http://www.bohler-uddeholm.cz/media/Svary_oceli_Bohler_stare.pdf
- [18] Svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_netavící_se_elektrodou_v_ochranné_atmosféře_inertního_plynu
- [19] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 8021426837.*
- [20] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II, část svařování: Díl 1. Základní metody tavného svařování* [online]. Brno, 2006 [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [21] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování: Studijní opory pro výuku 5TE, ETV, ETV-K* [online]. Brno [cit. 2017-03-15]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [22] *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů.* Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 8085771810.
- [23] *Go Welding* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.gowelding.org/welding/tig-gtaw/>
- [24] BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí : (TIG, WIG, GTAW).* 3. aktualizované vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2013. Svařování (ZEROSS). ISBN 9788085771039.

- [25] BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2000. Svařování. ISBN 8085771721.
- [26] *Vysokorychlostní TIG Svařování austenitické oceli metodou TIG* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/23386325-Vysokorychlostni-tig-svarovani-austeniticke-oceli-metodou-tig.html>
- [27] *Welder Bros* [online]. <http://www.welderbros.com> [cit. 2017-05-20].
- [28] *Welding Tips and Tricks* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.weldingtipsandtricks.com>
- [29] ORSZÁGH, Viktor a Peter ORSZÁGH. *Zváranie TIG ocelí a neželezných kovov*. Bratislava: Polygrafia SAV, 1998. ISBN 8088780217.
- [30] HŘIVŇÁK, Ivan. *Zvariteľnosť Ocelí*. Bratislava: Slovenská technická univerzita: Alfa, 1979, 240 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Austenit	[-]
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý	[-]
Ar	Argon	[-]
C	uhlík	[-]
C _e	Ekvivalent uhlíku dle ČSN 051310	[-]
CE	Ekvivalent uhlíku dle HW	[-]
CET	Ekvivalent uhlíku dle ČSN EN 1011-2	[-]
Cr	Chrom	[-]
ČSN	Česká technická norma	[-]
e	elektron	[-]
F	Ferit	[-]
Fe ₃ C	Karbit železa (cementit)	[-]
HV	Tvrдость	[-]
HW	Mezinárodní institut sváření	[-]
M	Martenzit	[-]
MAG	Metal Active Gas	[-]
MIG	Metal Inert Gas	[-]
Mn	Mangan	[-]
Mo	Molybden	[-]
N	Dusík	[-]
Nb	Niob	[-]
Ni	Nikl	[-]
P	Fosfor	[-]
PA	Poloha svařování	[-]
PB	Svařovací poloha	[-]
PF	Svařovací poloha "stoupačka"	[-]
Si	Křemík	[-]
Ti	Titan	[-]
TIG	Tungsten Inert Gas	[-]
TOO	Tepelně ovivněná oblast	[-]
UV	Ultraviolet	[-]
V	Vanad	[-]
VA	Volt-amperová charakteristika	[-]
WIG	Metal Inert Gas	[-]
ZM	základní materiál	[-]

Symbol	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
A1	Teplota eutektoidní	[°C]
A3	Teplota feritické přeměny	[°C]
cos φ	účinnost	[-]
Cr _e	Chromový ekvivalent	[%]
f	Frekvence	[Hz]
hm%	Hmotnostní procento	[%]
I	Proud	[A]
I _p	pulzní proud	[A]
I _s	Střední hodnota proudu	[A]
I _z	základní proud	[A]
l	Délka svaru	[mm]
Ni _e	Niklový ekvivalent	[%]
P	Výkon	[W]
Q	Teplo	[kJmm ⁻¹]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
s	Tloušťka materiálu	[mm]
T	Teplota	[°C]
t _c	celkový čas	[ms]
t _p	pulzní čas	[ms]
t _z	základní čas	[ms]
U	Napětí	[V]
U ₀	Napětí naprázdno	[V]
U _p	Zapalovací napětí	[V]
U _z	Zapalovací napětí u střídavé charakteristiky	[V]
v _s	rychlost svařování	[V]
β	Úhel deformace	[°]
λ	Tepelná vodivost	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
η	Účinnost	[%]
ρ	Hustota	[kgm ⁻³]
Δ	Rozdíl	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Ukázky svařování a svařenců	9
Obr. 2 Elektrický oblouk chráněn inertním plynem u metody TIG.....	10
Obr. 3 Časová osa vývoje svařování.....	10
Obr. 4 Ukázka svarů	11
Obr. 5 Moderní zdroj pro svařovací.....	11
Obr. 6 Makro struktura svarů.....	12
Obr. 7 Způsoby zapálení oblouku.....	13
Obr. 8 Části elektrického oblouku	14
Obr. 9 Charakteristika oblouku a zdroje	16
Obr. 10 VA charakteristika zdroje	16
Obr. 11 Schématické znázornění svařovací metody TIG	17
Obr. 12 VA charakteristika střídavého napětí	18
Obr. 13 VA charakteristika stejnosměrného proudu	18
Obr. 14 VA charakteristika pulzního proudu.....	19
Obr. 15 Wolframové elektrody	20
Obr. 16 Barevné označení elektrod.....	20
Obr. 17: ukázky přídavného materiálu	21
Obr. 18: Svařování metodou TIG	22
Obr. 19 Tepelně ovlivněná oblast	22
Obr. 20 Závislost úhlových deformací	25
Obr. 21 Průhyb desky	25
Obr. 22 Úhlové smrštění pro T spoj	25
Obr. 23 Závislost svarového spoje na obsahu uhlíku v oceli a na procentu martenzitu ve struktuře TOO	27
Obr. 24 Schaefflerův diagram.....	29
Obr. 25 Svařecí aparát MagicWave 2200 Job	30
Obr. 26 Pohled na vzorek - boční	31
Obr. 27 Celkový pohled na čtyři vzorky – pohled přední	33
Obr. 28 Celkový pohled na čtyři vzorky - pohled zadní.....	33
Obr. 29 Celkový pohled na čtyři vzorky - pohled spodní.....	33
Obr. 30 Detaily svaru uhlíkové oceli - příklady	34
Obr. 31 Detaily svaru korozivzdorné oceli - příklady	34
Obr. 32 vzorek č. 11.....	35
Obr. 33 vzorek č. 10.....	35
Obr. 34 vzorek č. 12.....	35
Obr. 35 vzorek č. 6.....	36
Obr. 36 vzorek č. 1.....	36
Obr. 37 vzorek č. 8.....	36
Obr. 38 Vzorky úhlové deformace	37
Obr. 39 Úhlové deformace.....	38

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Platnost rovnice 5.1 do obsahu prvků:.....	26
Tab. 2 Chemické složení oceli 11 373	28
Tab. 3 Mechanické vlastnosti	28
Tab. 4 Chemické složení oceli 17 240	28
Tab. 5 Mechanické vlastnosti	29
Tab. 6 Vlastnosti drátu ER70S-6	30
Tab. 7 Vlastnosti drátu ER70S-6	30
Tab. 8 Základní parametry svařičky.....	30
Tab. 9 svařovací parametry pro uhlíkovou ocel	32
Tab. 10 svařovací parametry pro korozivzdornou ocel	32
Tab. 11 výběr - svařovací parametry výbrusů pro uhlíkovou ocel	35
Tab. 12 výběr - svařovací parametry výbrusů pro korozivzdornou ocel	36
Tab. 13 svařovací parametry pro uhlíkovou ocel	37

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Fotografie z 1. experimentu
Příloha 2 Fotografie z 2. experimentu