



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI REGULACE VNESENÉHO TEPLA - EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ

POSSIBILITIES OF REGULATION OF STORED HEAT - EXPERIMENTAL VERIFICATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. PAVLA MÁŠOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. LADISLAV DANĚK, CSc.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Pavla Mášová

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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 diplomové práce:

Možnosti regulace vneseného tepla - experimentální ověření

v anglickém jazyce:

Possibilities of regulation of stored heat - experimental verification

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době je svařování velkých tlouštěk materiálů daleko jednodušší, než svařování tenkých plechů, případně fólií. Proto je stále větší důraz kladen na svařovací technologie, u kterých je možno efektivně a přesně regulovat měrné vnesené teplo.

Cíle diplomové práce:

1. Stručný popis současného stavu - svařovacích metod s limitovaným Q_s .
- 2 Na základě experimentálních svarů (jejich makro a mikrostruktury) posoudit klady a nedostatky jednotlivých metod.
3. Závěr - doporučení pro svařování malých tlouštěk.

Seznam odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
2. ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
3. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
4. Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
5. Firemní podklady AGA a LINDE.
6. Firemní podklady ESAB, FRONIUS, KEMPPPI atd.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Mášová Pavla: Možnosti regulace vneseného tepla - experimentální ověření.

Diplomová práce, vypracovaná v rámci magisterského studia oboru Strojírenská technologie, se zabývá různými možnostmi svařování, kterými lze regulovat množství vneseného tepla do svaru. Pro experimentální ověření je zvolen materiál X2CrTi12 (korozivzdorná feritická ocel) svařený vhodnými metodami pro daný materiál. Metody svařování TIG, plazma, laser. Navrženy jsou i další možnosti pro snížení vneseného tepla (pulzní svařování, Rapid, Fast Root, Surface Tension Transfer, Cold Metal Transfer, ColdArc a Wise). V rámci experimentu je porovnáno množství vneseného tepla a jeho vliv na hrubnutí zrna a tvrdost.

Klíčová slova: Specifické vnesené teplo, korozivzdorná ocel, TIG, plazma, laser, tvrdost.

ABSTRACT

Mášová Pavla: Possibilities of regulation of stored heat - experimental verification.

This diploma thesis elaborated within the Manufacturing Technology Master's study program considers various possibilities of welding which can regulate the amount of inputted heat into the welded joint. For experimental testing, material X2CrTi12 (ferritic stainless steel) was chosen, welded by means of methods suitable for the material. Welding methods included TIG, plasma, and laser. Further possibilities of heat input are suggested, such as pulse welding, Rapid, Fast Root, Surface Tension Transfer, Cold Metal Transfer, ColdArc, and Wise. The aim of the experiment is to compare the amount of heat input and its effect on particle growth and hardness.

Keywords: Specific heat input, stainless steel, TIG, plasma, laser, hardness.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MÁŠOVÁ, P. *Možnosti regulace vneseného tepla - experimentální ověření*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 58 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25.5.2011

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a paní Jarmile Houdkové za pomoc při přípravě zkušebních vzorků.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
1 ÚVOD	9
2 VLVIVY VNESENÉHO TEPLA NA SVAROVÝ SPOJ	10
2.1 Šíření tepla ve svarovém spoji	10
2.2 Vlastnosti svarového spoje	12
2.3 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	13
2.4 Specifické vnesené teplo Q_s	16
3 KOROZIVZDORNÉ OCELI	20
3.1 Feritické oceli	21
3.2 Martenzitické a vytvrditelné oceli	22
3.3 Austenitické oceli	22
3.4 Austeniticko-feritické tzv. duplexní oceli	23
4 TECHNOLOGIE POUŽITÉ V EXPERIMENTU	24
4.1 Svařování metodou TIG	24
4.2 Svařování plazmou	25
4.3 Svařování laserem	26
5 DALŠÍ MOŽNOSTI REGULACE VNESENÉHO TEPLA Q_s	27
5.1 Pulzní svařování	27
5.2 Rapid	28
5.3 FastRoot	29
5.4 Surface Tension Transfer (STT)	31
5.5 Cold Metal Transfer (CMT)	33
5.6 ColdArc	34
5.7 Wise	36
5.7.1 WiseRoot	36
5.7.2 WisePenetration	36
5.7.3 WiseFusion	37
5.7.4 WiseThin	37
6 EXPERIMENT	38
6.1 Svařovaný materiál X2CrTi12	38
6.2 Svařování metodou TIG	40
6.3 Svařování plazmou	42
6.3.1 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 2,4$ mm	42
6.3.2 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 1,6$ mm	46
6.3.3 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 1,2$ mm	48
6.4 Svařování laserem	50
6.5 Vyhodnocení experimentu	53
7 ZÁVĚRY	54

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

1 ÚVOD

V průběhu svařování se do místa svaru přivádí velké množství tepla, které slouží k natavení základního i přídavného materiálu. Množství vneseného tepla má výrazný vliv na kvalitu svaru. Pokud je do svaru přivedeno málo tepelné energie může dojít ke vzniku studeného spoje či k tvorbě trhlin. Naopak příliš mnoho tepla, může způsobit zhrubnutí zrna, snížení vrubové houževnatosti, korozivzdornosti, zvýšení tranzitní teploty atd.

Na efektivní a přesnou regulaci vneseného tepla do svaru se zaměřuje stále více pozornosti. V současné době je mnohem snazší svařovat materiály větších tloušťek než tenké plechy, případně fólie. Svařitelnost je také významně ovlivněna druhem svařovaného materiálu.

Pro experimentální ověření vlivu vneseného tepla je zvolena feritická korozivzdorná ocel. Zkušební svary jsou svařeny technologiemi vhodnými pro tento typ materiálu. Jsou to metody svařování TIG, plazma a laser. Vzorky jsou porovnány z pohledu množství vneseného tepla, makro a mikrostruktury, tvrdosti a tažnosti.

Práce nabízí i několik dalších variant řešení jak lze ovlivnit a snížit množství vneseného tepla do svaru. Jsou to především technologie vyvinuté výrobcí svařovacích zdrojů. Jedná se o technologie pulzního svařování, Rapid, Fast Root, Surface Tension Transfer, Cold Metal Transfer, ColdArc a Wise.

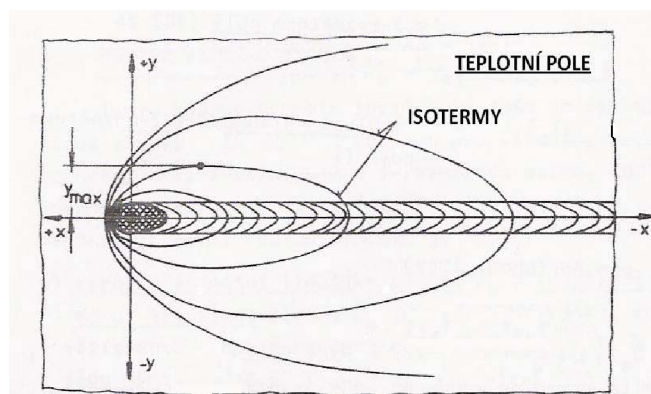
2 VLIVY VNESENÉHO TEPLA NA SVAROVÝ SPOJ [1], [2], [3], [4], [5]

Při svařování se do svarového kovu vnáší tepelná energie pro natavení základního a přídavného materiálu. Natavením vznikne svarová lázeň, která po ztuhnutí vytvoří svarový spoj. Vnesením tepla do svaru se však značně ovlivní struktura a mechanické vlastnosti spoje.

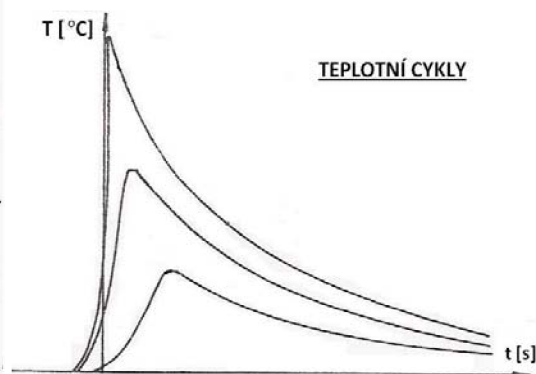
2.1 Šíření tepla ve svarovém spoji

Elektrický oblouk dodává do svarového spoje teplo, které se dále šíří základním materiálem a zvyšuje teplotu v okolí tavné lázně. V závislosti na vlastnostech svařovaného materiálu a na svařovacích podmínkách se zde vytváří **teplotní pole**. Jestliže se zdroj tepla pohybuje po ose svaru konstantní rychlostí, vzniká *nestacionární teplotní pole* (obr. 1). V tomto případě je teplota libovolného bodu závislá na poloze a času. Pokud se zdroj tepla nepohybuje, vzniká *stacionární teplotní pole* (např. při bodovém svařování).

Vynesením závislosti teploty na čase pro určitý bod teplotního pole vzniká **teplotní cyklus** daného bodu (obr. 2). Nejprve teplota v daném bodě prudce narůstá a po dosažení maxima začne teplota pozvolna klesat. Během teplotního cyklu dochází k nežádoucím změnám struktury a mechanických vlastností v tepelně ovlivněné oblasti (v teplotním poli).



Obr. 1 Nestacionární teplotní pole [2]



Obr. 2 Teplotní cykly [2]

Teplotní pole

Šířením tepla ze zdroje do základního materiálu vzniká teplotní pole. Jeho tvar závisí na tloušťce, rozměrech, hustotě, fyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu, specifickém vneseném teple, tepelné vodivosti a na podmínkách přívodu a odvodu tepla. Přenos tepla do svaru je ovlivněn výkonem zdroje tepla, charakteristickými vlastnostmi přenosu a rychlostí svařování.

Šířka teplotního pole je tím širší, čím je přivedeno více specifického vneseného tepla Q_s a čím je vyšší teplotní vodivost materiálu.

Tvar teplotního pole, průběh teplotního cyklu a výchozí stav materiálu ovlivní rozsah a geometrii tepelně ovlivněné oblasti, ve které dochází ke strukturním změnám. Pokud jsou známy výchozí vlastnosti a struktura materiálu, lze předpovědět a posoudit konečné vlastnosti a struktury svaru. Vhodnou úpravou svařovacích parametrů můžeme snížit nebo zabránit riziku vzniku defektů ve svaru. Proto je nutné zabývat se teorií šíření tepla.

Teplo rozložené v teplotním poli nebo jeho časový průběh lze stanovit buď experimentálně pomocí termočlánků či termovize nebo pomocí fyzikálního modelu pohybu tepla a matematických výpočtů. Matematicky lze popsat teplotní pole pouze za použití zjednodušujících předpokladů, např. se uvažuje materiál, který je v tuhém stavu homogenní a izotropní.

Průběh šíření tepla ve svaru

Teplo, které se šíří v základním materiálem lze rozdělit do tří fází (obr. 3):

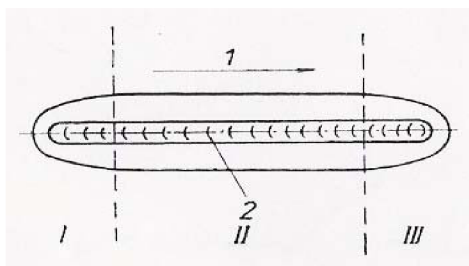
I. Tepelné sycení materiálu – nárůst teploty.

Doba sycení základního materiálu je závislá na:

- tloušťce materiálu,
- tepelně fyzikálních vlastnostech základního materiálu,
- technologii svařování.

II. Tepelná rovnováha – všechna místa ve stejné vzdálenosti od osy svaru jsou stejně tepelně ovlivněné (ustálené pohyblivé teplotní pole – rychlost je rovna rychlosti svařování).

III. Vyrovnávání teplot – po skončení svařování dojde k vyrovnání teploty na průměrnou hodnotu v celém objemu základního materiálu.



Obr. 3 Schéma šíření tepla v okolí svaru [3];

- 1 - směr svařování,*
- 2 - svařovací housenka;*
- I - tepelné sycení,*
- II - tepelná rovnováha,*
- III - vyrovnání teplot.*

Rozhodující vliv na množství vneseného tepla má teplotní poměr ve fázi tepelné rovnováhy. Jejím sledováním je možné zjednodušit složité výpočty teplotního pole a cyklu.

Nejdůležitější parametry ovlivňující vliv vneseného tepla v teplotním poli:

- teplota libovolného bodu TOO,
- maximální dosažená teplota,
- okamžitá rychlost ochlazování.

Teplotní cyklus

Ve většině případu tavného svařování se zdroj tepla i kvazistacionární pole pohybuje konstantní rychlostí (v_s). Zaznamenáním změny teploty pro daný bod v čase a vynesemím do grafu získáme křivku teplotního cyklu (obr. 2).

Z metalurgického pohledu má největší význam takový průběh teplotního cyklu, který svojí maximální hodnotou dosáhne teploty solidu. Hlavním ukazatelem závislosti je celková délka cyklu, tj. doba setrvání nad kritickou teplotou (např. rekrystalizační teplota). Dalším významným ukazatelem je rychlost chladnutí, která ovlivní výslednou strukturu svaru.

Délka a průběh cyklu jsou závislé jak na neovlivnitelných parametrech (např. tloušťka a fyzikální vlastnosti materiálu) tak na parametrech, které technolog může změnit jako např. teplota přehřevu, svařovací proud a rychlost svařování.

Napětové a deformační pole

Během ohřevu svařovaného materiálu vzniká nejen teplotní, ale také napětové a deformační pole. Určení napětového pole je mnohem složitější nežli určení pole teplotního. Při chladnutí základní materiál zabraňuje volné dilataci svarovému kovu a to vyvolá vznik napětí v TOO i v jejím okolí. Tato napětí pak způsobí elastickou a plastickou deformaci.

Ohřevem teplota v TOO vzrůstá až na teplotu tavení, během tohoto procesu se snižuje mez kluzu a tím dochází i k poklesu tepelného napětí. Při chladnutí je děj opačný a hodnota zbytkového tepelného napětí narůstá. V konečné fázi může dosáhnout až hodnoty meze kluzu.

2.2 Vlastnosti svarového spoje

Vlastnosti svarového spoje jsou ovlivněny makrostrukturou, mikrostrukturou a zbytkovým napětím, které se vytvoří během svařování.

Vliv makrostruktury

Makrostruktura svarového spoje je dána stavbou dendritů a je závislá na geometrii tavné lázně. Pokud je lázeň hluboká a šipovitá, nebezpečné dendrity vznikají v centrální části svaru. V široké a rozměrné lázni narůstají dendrity do velkých délek s výrazným dendritickým odmíšením. Při použití svařovacího zdroje s vysokým výkonem má svarová lázeň nepříznivý tvar a horší vlastnosti. Proto je nutné volit vhodné svařovací parametry a postupy svařování.

Plocha příčného průřezu svarové housenky (S_n) má výrazný vliv na mechanické vlastnosti spoje. Tato plocha je závislá na gradientu teploty tavení v tavné lázni, hloubce krystalizační fronty, rychlosti odvodu tepla, rychlosti rekystalizace, a především na rozměrech dendritů. Plocha S_n je téměř úměrná efektivnímu specifickému teplu Q_s , tedy $S_n = f(Q_s)$. Zkouškami byl také prokázán vliv plochy S_n na mez kluzu $R_{p 0,2}$ a na vrubovou houževnatost svarového spoje.

Při navrhování technologie svařování náročnějších konstrukcí je důležité všechny tyto vlivy sledovat, aby byly navrženy takové parametry, které povedou k výrobě svaru s optimální kombinací pevnosti a plasticity.

Vliv mikrostruktury

Jestliže je svar bez defektů, má mikrostruktura rozhodující vliv na vlastnosti spoje. Ovlivňuje ji chemické složení základního i přídavného materiálu, metalurgická čistota a velikost odmíšení.

Nepolymorfní slitiny svoji strukturu téměř nemění, proto se u nich vyžadují jemné dendrity. U těchto materiálů není možné dodatečně zjemnit zrno. Na velikost a tvar zrna nemá vliv plastická deformace vyvolaná smrštěním, ani žíhání, pokud mu nepředchází plastické přetvoření za studena (např. rozválcování, prokování).

Výsledná struktura u **polymorfních slitin** a u slitin s vysokou rozpustností v tuhém stavu závislá především na průběhu ochlazování mezi kritickými teplotami, které jsou ovlivněny teplotním režimem svařování, či následným tepelným zpracováním svaru. Původní dendritická struktura je často ovlivněna sekundární strukturou, působením vměstku a dendritickým odmišením. Na vlastnosti spoje dále negativně působí různé nečistoty (chemické, mechanické, ...).

Vlastnosti svarového spoje jsou určeny především velikostí zrna. Hrubé zrno výrazně snižuje pevnost a plasticitu materiálu. Heterogenní struktura je ovlivněna nejen velikostí, ale také způsobem vylučování daných fází.

Nestabilní strukturní složky ve svaru jsou velmi nebezpečné. Za provozní teploty se začínají transformovat a mění vlastnosti svaru, např. snižují jeho houževnatost nebo protikorozní odolnost.

Optimálních vlastností ve svarovém kovu je dosaženo, pokud má stejnou strukturu jako základní materiál a o něco vyšší odolnost proti křehkému lomu.

Vliv zbytkového napětí

Pokud není proveden vhodný technologický zásah, zbytkové napětí ve svarovém kovu může dosáhnout až meze kluzu. Pro snížení napětí se využívá předehřívání materiálu na vyšší teplotu nebo se po svaření zařadí žihání či působení vibrací.

Vlivem zbytkového napětí jsou vlastnosti spoje značně nepříznivé, snižují únavovou pevnost, přispívají ke vzniku opožděných trhlin a ke snížení korozní odolnosti (koroze pod napětím, obr. 4d). Způsobují také deformace dílce a tím negativně působí na rozměrovou přesnost.

Důležité je posoudit, jakou zvolit aplikaci ke snížení napětí a v jakém rozsahu. Pro daný dílec můžeme zvolit buď experimentální ověření nebo porovnání s podobným svarem. Předehřevem a dodatečným tepelným zpracováním se výrazně zvyšují výrobní náklady na energetickou náročnost a prodlužující se výrobní časy. Některé materiály mohou být dokonce nevhodné pro tepelné zpracování, protože po žihání se u nich ve svarovém kovu začínají tvořit trhliny.

2.3 Tepelně ovlivněná oblast (TOO) – struktura a vlastnosti

Struktura neroztaveného základního materiálu se v okolí svaru mění působením tepelného a deformačního namáhání. Rozsah a druh těchto strukturních změn je závislý na chemickém složení, výchozí struktuře základního materiálu a na průběhu tepelného a deformačního působení v dané oblasti. Na šířku ovlivněné oblasti má vliv teplotní pole. Záleží do jaké vzdálenosti se rozšíří izotermy, které mají prokazatelný vliv na změnu struktury nebo vlastností (obr. 1). Samotná změna struktury nemusí znamenat zhoršení kvality svaru. Problém nastává v okamžiku, kdy je změna provázená degradací vlastností nebo způsobuje tvorbu trhlin.

Položením další housenky u vícevrstvých svarů se působením nového teplotního cyklu mohou měnit strukturní vlastnosti předešlé housenky a jejího okolí.

Strukturní změny

Jejich rozsah závisí především na chemickém složení, strukturním stavu výchozího materiálu a na průběhu teplotního cyklu. Ke změnám dochází vlivem difúze v tuhém stavu a to za všech teplot. Průběh změn se liší ve fázi ohřevu, kde rychlost difúze vzrůstá a snáze se dosahuje rovnovážného stavu. Ve fázi ochlazování naopak rychlost difúze klesá a mohou se vylučovat nerovnovážné, metastabilní i nestabilní struktury.

Nejvyšší teplota teplotního cyklu rozhodne k jaké změně ve struktuře dojde. Je nutné počítat s tím, že skutečné teploty rychlých dějů se mohou výrazně lišit od rovnovážných hodnot. Na rozsah skutečných přeměn má vliv doba, po kterou materiál setrvává na dané kritické teplotě. Čas, může také ovlivnit nukleaci (tvorbu zárodků nové fáze). Strukturní změny jsou také významně ovlivněny difúzními drahami tj. Vzdáleností, o kterou se musí přemístit atomy během difúze.

Odlišnosti mezi strukturou v ovlivněné oblasti a v rovnovážném stavu budou tím větší, čím bude teplotní cyklus kratší.

Strukturní změny ve fázi ochlazování

K těmto přeměnám dochází ve většině případů za značného podchlazení. Poklesem teploty je také snížen koeficient difúze.

Pokud je materiál svařován bez přehřevu, rychlost ochlazování je výrazně vyšší než u běžného tepelného zpracování. To vede ke vzniku nežádoucích nerovnovážných a nestabilních fází. Pomocí přehřevu nebo speciálním režimem svařování můžeme ovlivnit výslednou strukturu ve svarovém spoji.

Strukturní změny ve fázi ohřevu

- přerozdělení intersticiálních atomů (Cottrellovy atmosféry),
- rozpad přesyceného tuhého roztoku,
- rekrytalizace,
- koagulace precipitátů a jemné dispergování částic,
- hrubnutí zrna.

Trhliny v TOO

Trhliny jsou nejzávažnějším defektem vznikajícím v tepelně ovlivněné oblasti. Během nebo krátce po svařování, či při žhání vznikají tyto trhliny:

- likvační trhliny,
- trhliny z poklesu tažnosti,
- lamelární trhliny,
- opožděné trhliny (zbrzděné, za studena),
- trhliny po žhání (důsledek creepu).

Degradace vlastností v TOO

Vlivem teplotně deformačního cyklu může docházet v ovlivněné oblasti ke strukturním či substrukturním změnám. Tyto změny mohou způsobit nežádoucí pokles důležitých hodnot pro bezpečnou funkci spoje jako je například houževnatost a korozní odolnost.

Nepřípustný pokles houževnatosti

Defekty ve svarovém kovu, které mají za určitého napětí a dané teploty nadkritickou velikost, vedou ke křehkému porušení svařované konstrukce, při kterém se trhliny šíří vysokou rychlostí. Snížená plasticita materiálu a teplotně deformačního cyklu vyvolávají nestabilní růst trhlín. Pokud je totiž plasticita příliš nízká, materiál není schopen zastavit šířící se trhlinu. Na růst a rychlost šíření trhlín má vliv lomová houževnatost, stav napjatosti a teplota.

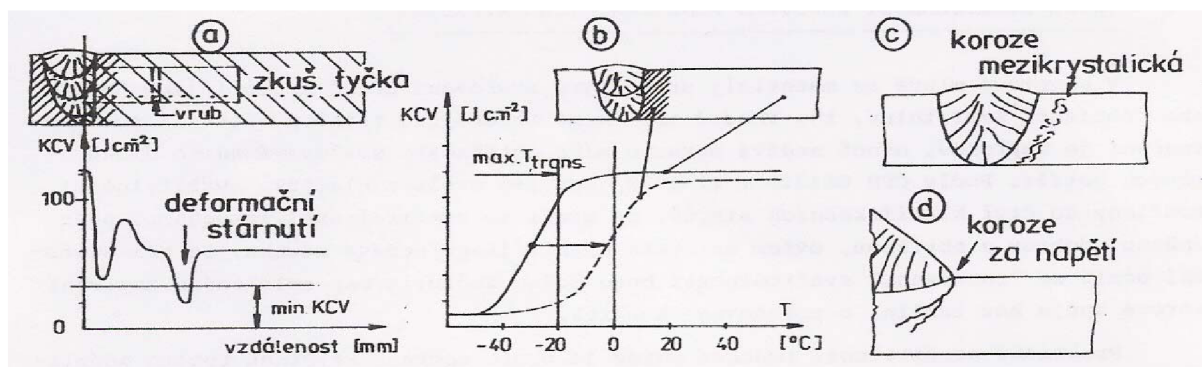
Na pokles lomové houževnatosti může mít vliv:

- zhrubnutí zrna v okolí hranice tavení,
- disperzní nebo precipitační zpevnění matrice,
- nepříznivá morfologie překrytalizované struktury,
- deformační stárnutí.

Tyto strukturní změny jsou vyvolány určitým teplotním cyklem a projeví se v příslušné TOO. Například **deformační stárnutí** může ovlivnit i podstatně vzdálenou oblast od osy svaru, kde sníží vrubovou houževnatost pod přípustnou mez viz. obrázek 4a.

Zvýšení tranzitní teploty

Často také dochází k posunu tranzitní teploty v TOO blíže k vyšším hodnotám, aniž by se za normální teploty 20 °C podstatně změnila vrubová houževnatost (obr. 4b). Tranzitní teplota udává za jaké teploty dochází k přechodu mezi křehkým a tvárným lomem, při působení stejné nárazové práce. To má výrazný vliv především na svařené konstrukce, které jsou vystaveny nízkým pracovním teplotám (např. mosty, dopravní prostředky, ...).



Obr. 4 Změny vlastností v TOO: a) zkřehnutí vlivem deformačního stárnutí, b) zvýšení tranzitní teploty, c) ztráta korozní odolnosti, d) vznik trhlín vlivem koroze za napětí. [2]

Snížení korozní odolnosti

Většina svarových spojů pracuje v korozním prostředí, proto je jejich životnost výrazně ovlivněna odolností proti koroznímu poškození. Během svařování může dojít k poklesu korozní odolnosti pod přípustnou hranici (např. tvorbou karbidů chromu – viz. kapitola 3.). Pokud není materiál dostatečně odolný vůči korozi, může dojít k selhání až destrukci konstrukce.

Mezikrystalická koroze: Vlivem vyloučení cizorodých částic po hranicích zrn jsou vytvořeny podmínky pro vznik elektrochemické koroze (obr. 4c).

Korozní praskání: V oblasti s vyšším zbytkovým tepelným napětím dochází ke koroznímu praskání. Trhliny se šíří kolmo na hlavní tahové napětí. Mají podobný charakter jako trhliny vycházející z vrubu svaru, jsou však rozsáhlejší.

Koroze za napětí: Koroze má také výrazný vliv na snížení odolnosti vůči únavovému poškození (klesá mez únavy, rychleji se šíří únavové trhliny). V tomto případě se hovoří o korozi za napětí (obr. 4d). Dochází zde ke kombinaci strukturních změn a ke změně stavu napjatosti.

2.4 Specifické vnesené teplo Q_s

Ve svarovém kovu a základním materiálu dochází ke složitým metalografickým procesům. Ty jsou vyvolány rychlou změnou teploty během svařování. Výslednou strukturu ve svarovém spoji lze určit pomocí transformačních diagramů. Nevýhodou je, že ne všechny materiály mají své transformační diagramy. Pro dosažení požadované struktury, je tedy nutné sledovat přivedené množství tepelné energie za určité rychlosti svařování. Technolog neurčuje pouze hodnotu specifického vneseného tepla Q_s , musí také určit teplotu předehřevu a postup svařování.

Specifické vnesené teplo Q_s

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \quad (2.1)$$

Q_s specifické vnesené teplo [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$],
 η tepelná účinnost přenosu tepla [-],
 U svařovací napětí [V],
 I svařovací proud [A],
 v_s rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$].

Celková tepelná účinnost η

$$\eta = \frac{Q_{sv}}{Q_{cel}} \quad (2.2)$$

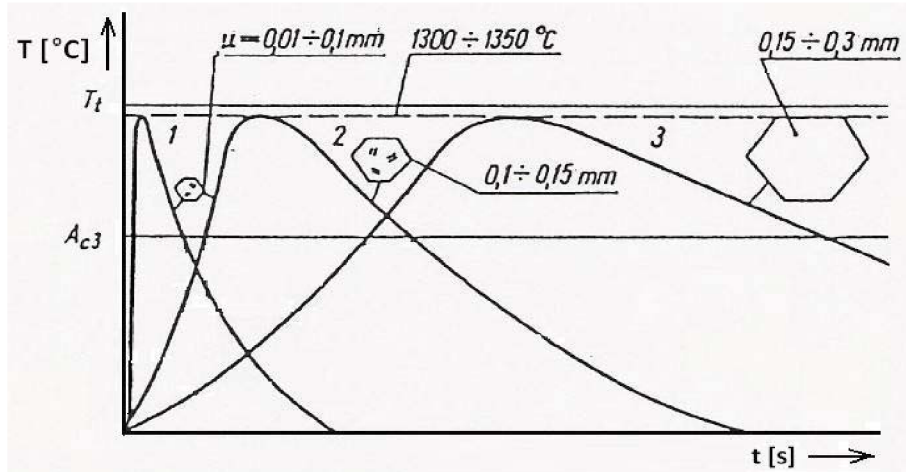
Q_{sv} energie vnesená do svarového spoje [J],
 Q_{cel} celková energie oblouku [J].

Při svařování tavící se elektrodou v aktivní ochranné atmosféře je účinnost vyšší z důvodu přenosu tepla kapkami tavící se elektrody a při vyšším obsahu CO_2 i akumulací tepla do molekul CO_2 . Tepelné ztráty jsou menší u metody ROE nebo APT, kde je oblouk krytý částečně nebo úplně tavícím se obalem nebo tavidlem. Příklady účinností vybraných způsobů svařování viz. tabulka 1.

Tab. 1 Hodnoty koeficientu účinnosti η pro jednotlivé technologie [4]

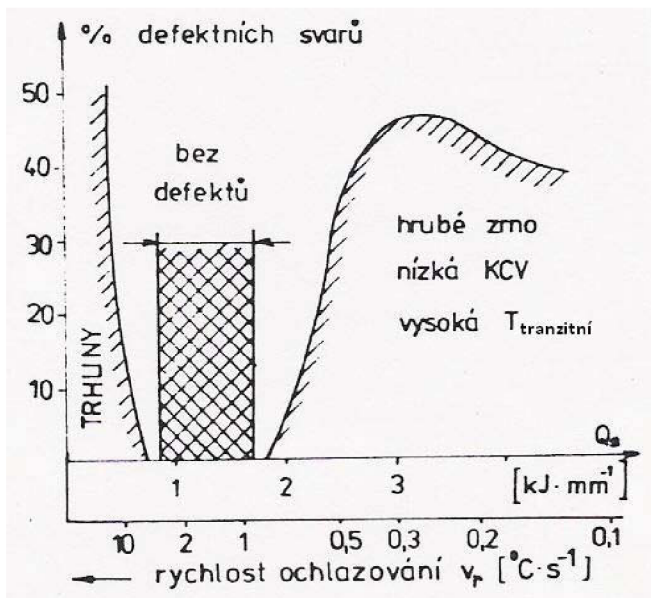
Technologie svařování	η
MMAW (ROE)	0,70 – 0,85
GTAW (TIG,WIG)	0,48 – 0,65
GMAW (MIG,MAG)	0,66 – 0,75
APT (SAW)	0,90 – 0,99
ESS	0,90 – 0,99

Nejkratší teplotní cyklus na obrázku 5 má metoda MIG. Svarový kov zde není izolován vrstvou strusky a průvar má malou hloubku. Není však možné vždy dodržet tento krátký teplotní cyklus. Například pro případy svařování větších průřezů se používají měděné nebo ocelové podložky, které napomáhají rychlejšímu ochlazování. Podložky se používají i při svařování tenkých plechů. Chladí se také ofukováním kořene svaru ochranným plynem s nižší chemickou čistotou. Při pomalém ochlazování hrozí nebezpečí vzniku nežádoucího hrubého zrna. Na obr. 5 je znázorněn růst hrubého zrna v porovnání s různou rychlostí ochlazování u tří různých způsobů svařování.



Obr. 5 Růst zrna při svařování; 1 - svařování ručně obalenou elektrodou (ROE),
2 - svařování pod tavidlem (APT),
3 - elektrostruskové svařování (ESS) [4].

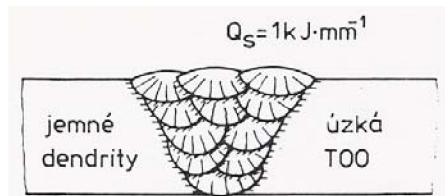
Naopak příliš rychlý krystalizační proces je předpokladem vzniku trhlin (obr. 6). Svařované konstrukce (základní materiál) je tužší oproti svarovému kovu. Ve svarovém kovu tak vznikají tepelná napětí, která překročením meze pevnosti ihned po svaření nebo po mechanickém zatížení vytvoří trhlinu.



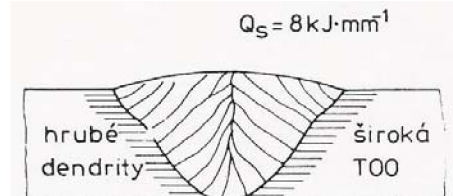
Obr. 6 Vliv rychlosti ochlazování (v_r) a specifického vneseného tepla (Q_s) na jakost svaru [2]

Porovnání různých hodnot specifického vneseného tepla

Na schématických obrázcích 7 a 8 je dobře vidět, jak vnesené teplo ovlivní strukturu svaru. Na obrázku 7 bylo do svaru přivedeno specifické teplo $Q_s = 1 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$, položením 11 svarových housenek. Vznikla menší TOO a menší dendrity, které však mohou způsobit větší deformaci svaru. Na obrázku 8 položením jedné svarové housenky vznikly větší dendrity, které méně deformují svar. Vytváří zde, ale velkou TOO, ve které může dojít k nežádoucím strukturním změnám. V tomto případě je hodnota vneseného tepla $Q_s = 8 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$.



Obr. 7 Jemné dendrity [2]



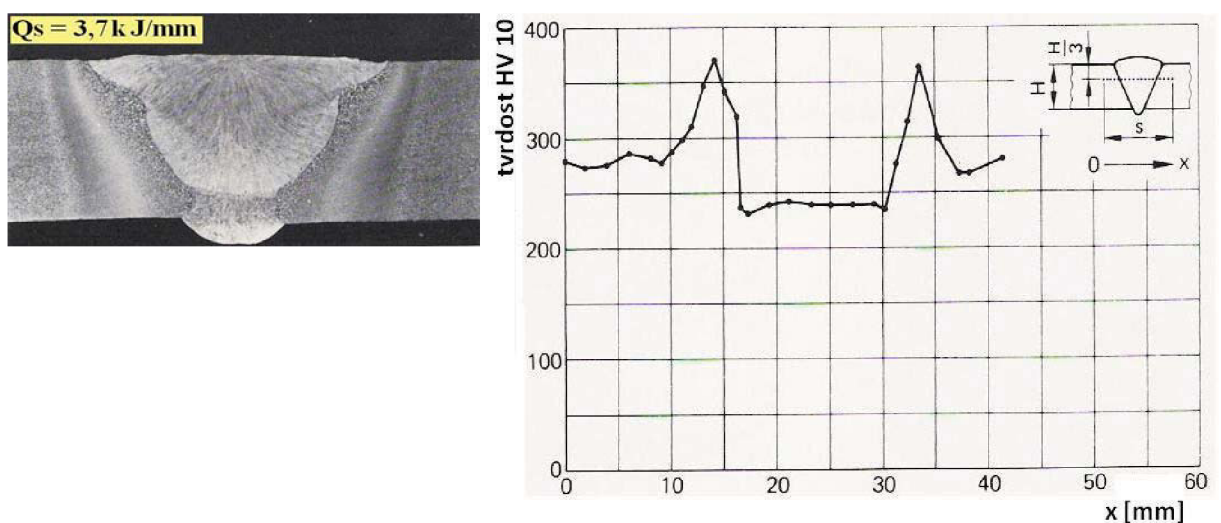
Obr. 8 Hrubé dendrity [2]

Na obrázcích 9, 10, 11 jsou znázorněny reálné situace, jak specifické vnesené teplo ovlivní makrostrukturu a průběh nárůstu tvrdosti ve svaru. Jedná se o stejný materiál NiCrMoB (St E 70) s různými hodnotami vneseného tepla.

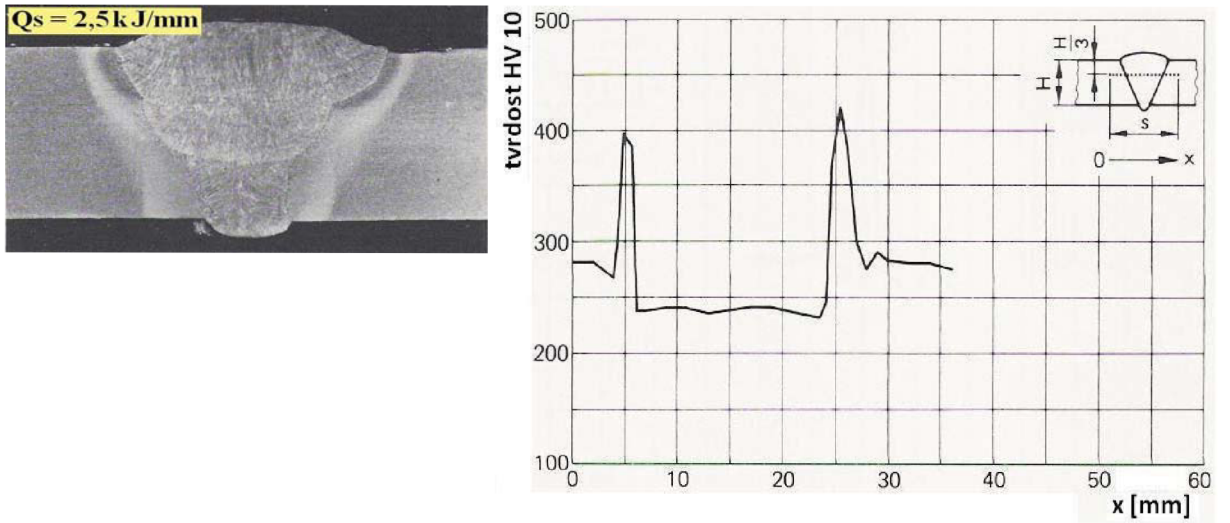
Na obrázku 9 je řez svarem s nejvyšší hodnotou vneseného tepla $Q_s = 3,7 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$. Jsou zde dobře vidět velké dendrity a výrazná, velká TOO.

Nejnižší hodnota vneseného tepla $Q_s = 1,1 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ je na obrázku 11. V tomto případě je TOO znatelně menší než na obrázku 9. Dochází zde k výraznému nárůstu tvrdosti v TOO. Tvrdost se zde zvýšila přibližně o 220 HV10 oproti svarovému kovu. Rozdíl největších tvrdostí v TOO u vneseného tepla $Q_s = 1,1 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ a u $Q_s = 3,7 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ je přibližně 100 HV10.

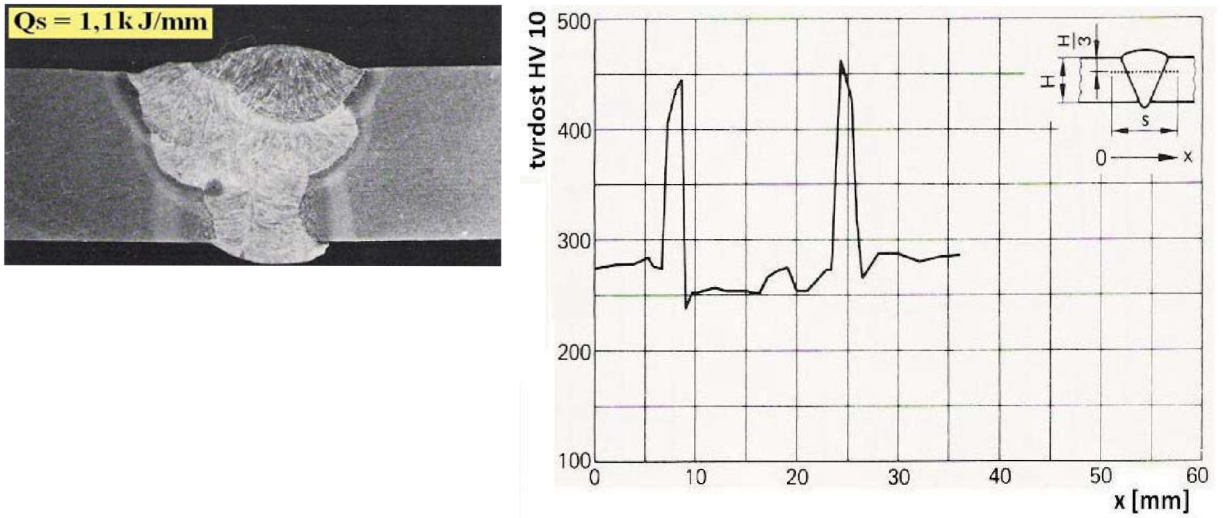
Na obrázku 10 s hodnotou vneseného tepla $Q_s = 2,5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ je nárůst tvrdosti podobný s obrázkem 11, ale maximální tvrdost v TOO je přibližně o 50 HV10 menší.



Obr. 9 Materiál NiCrMoB, vnesené teplo $Q_s = 3,7 \text{ kJ/mm}$, průběh změny tvrdosti [5]



Obr. 10 Materiál NiCrMoB, vnesené teplo $Q_s = 2,5 \text{ kJ/mm}$, průběh změny tvrdosti [5]



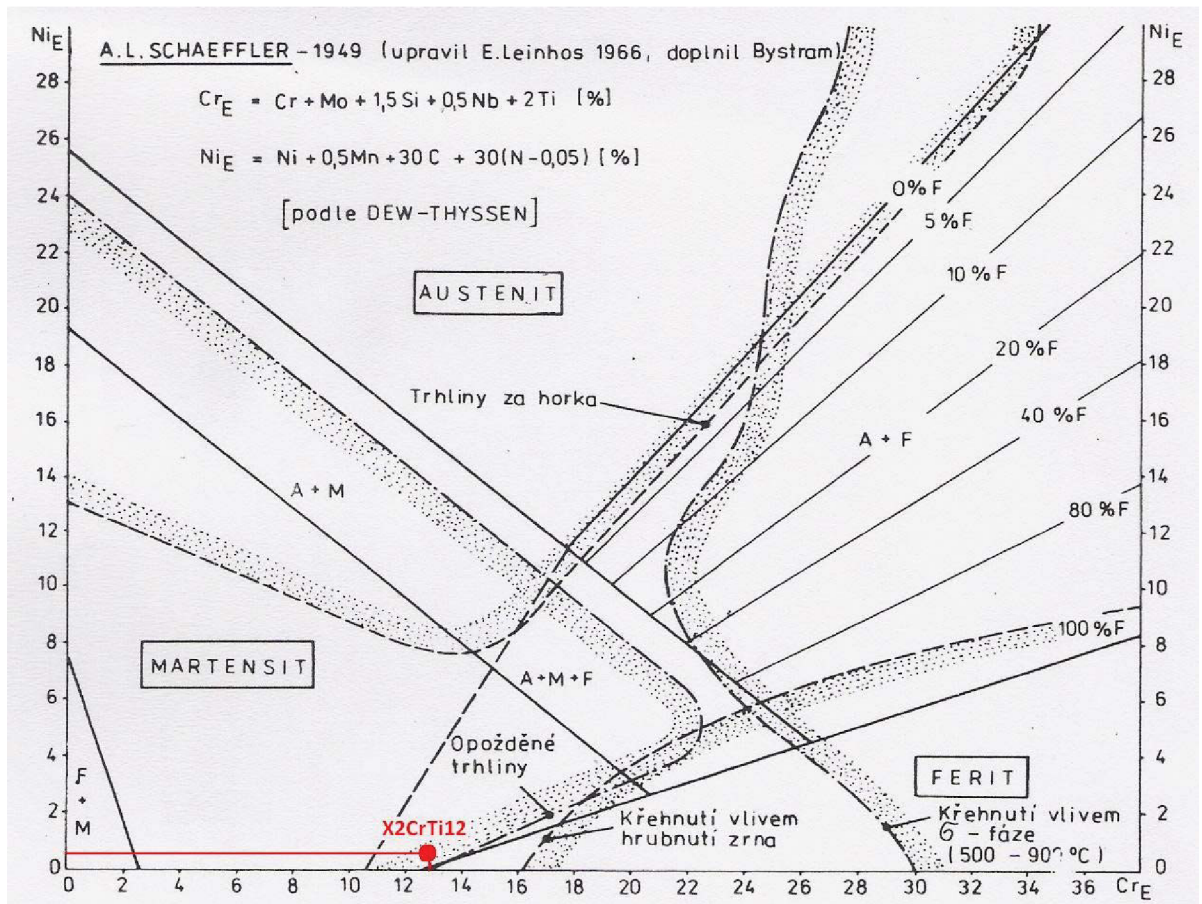
Obr. 11 Materiál NiCrMoB, vnesené teplo $Q_s = 1,1 \text{ kJ/mm}$, průběh změny tvrdosti [5]

3 KOROZIVZDORNÉ OCELI [2], [4], [6], [7]

Nerezavějící oceli se řadí mezi vysokolegované materiály, které obsahují více jak 10 % legujících prvků. Popsány jsou v normě ČSN EN 10088. Základním prvkem vysokolegovaných nerezavějících ocelí je chrom.

Jejich základní vlastností je schopnost pasivace, která umožní oceli odolávat elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. K pasivaci dochází pokud materiál obsahuje v tuhém roztoku více jak 11,5 % chromu. Uhlík tvoří s chromem karbidy a snižuje tak jeho koncentraci, proto záleží i na obsahu uhlíku. Obecně platí, že korozivzdorné oceli obsahují pouze do 0,08 % uhlíku, s výjimkou martenzitických ocelí. Místa ochuzená o chrom pak mají oproti zbytku matrice menší korozivzdornost. Vlivem precipitace karbidů chromu $M_{23}C_6$ na hranici zrn, může docházet k mezikrystalické korozi (obr. 4c), po svařování především v TOO. Ocel je možné před mezikrystalickou korozi chránit, buď snížením obsahu uhlíku nebo legováním prvky s vyšší afinitou k uhlíku než má chrom (např. niob, titan, tantal). Pokud je ocel legovaná těmito prvky, nazývá se stabilizovaná. Další prvek, který přispívá ke korozivzdornosti je nikl, proto je druhým nejdůležitějším prvkem.

Výslednou strukturu svařené korozivzdorné oceli zjistíme pomocí chemického složení výpočtem chromového a niklového ekvivalentu (Cr_E a Ni_E) a vnesením těchto hodnot do Schaeffler-Delongova diagramu (obr. 12). Diagram také znázorňuje oblasti výskytu nejčastějších vad. Jsou to trhliny za horka, opožděné trhliny, křehnutí vlivem zhrubnutí zrna, či křehnutí vlivem σ -fáze.



Obr. 12 Schaeffler-Delongův diagram s vyznačenou korozivzdornou ocelí X2CrTi12 [2]

Podle výsledné struktury rozděluje norma ČSN EN 10088 tyto korozivzdorné oceli:

- feritické, s charakteristicky nízkým obsahem uhlíku a dusíku,
- martenzitické a vytvrditelné,
- austenitické,
- austeniticko-feritické tzv. duplexní oceli.

3.1 Feritické oceli

Feritické oceli obsahují do 30 % Cr a do 0,08 % C. Během tuhnutí se vylučuje z taveniny chromový ferit. Malá rozpustnost uhlíku do 0,01 % způsobí vyloučení zbytku uhlíku ve formě karbidů, které způsobují křehkost. Oceli s vyšším obsahem uhlíku jsou za pokojové teploty křehké. S výhodou se používají jako oceli žáruvzdorné.

Feritické oceli s nízkým obsahem chromu svým chemickým složením zasahují do oblasti feritu a austenitu. Během chladnutí se austenitická struktura přetransformuje na martenzit a vznikne struktura feriticko-martenzitická. Vyloučeným martenzitem se zvýší pevnost a tvrdost. Pro dosažení čistě feritické struktury u ocelí s obsahem uhlíku do 0,1 % je nutné legovat chromem nad 17 %.

Tyto oceli nejsou kalitelné, protože při ohřevu nemění strukturu na austenitickou. Karbidy se pouze rozpouští ve feritu. Díky tomu se při ohřevu snižuje křehkost feritických ocelí s vyloučenými karbidy. Během ohřevu a ochlazování nemění svůj objem. Není možné je zušlechťovat. Zvýšit pevnost nebo zjemnit zrna je možné pouze tvářením. Tepelným zpracováním lze pouze snížit pevnost po tváření či vyrovnat obsah chromu na hranici zrn a snížit tak náchylnost k mezikrystalické korozi.

Svařitelnost feritických ocelí

Svařitelnost klasických feritických ocelí s 0,08 % C se liší od feritických ocelí s velmi nízkým obsahem intersticiálních prvků ($\Sigma C + N \leq 0,04$ %). U klasických feritických ocelí hrozí nebezpečí vzniku martenzitu v TOO, zatímco ve zbytku základního materiálu, který není ovlivněn teplem, zůstane čistě feritická struktura.

Klasické chromové feritické oceli se svařují zásadně s předehřevem. Pomocí předehřevu se sníží rychlost ochlazování ve svarovém kovu i v TOO. Teplotu předehřevu nelze jednoduše určit pomocí vzorců, jako je tomu u nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Pokud by byly tyto vzorce použity, vyšly by pro předehřev nereálně vysoké hodnoty. Teploty předehřevu se určují pomocí experimentů (zkouškou praskavosti). S ohledem na možnost vzniku martenzitu se pro svařování používají přídatné materiály s nízkým obsahem vodíku.

Ohřevem nad 900 °C dochází ke zhrubnutí struktury a k následnému zkřehnutí v TOO. Zkřehnutí může nastat také při teplotách od 350 do 550 °C nebo vznikem σ -fáze. Největší zkřehnutí nastává při teplotě 475 °C vlivem precipitace, často se označuje jako **křehnutí 475**. Toto křehnutí má vliv hlavně při svařování větších tlouštěk. Při svařování menších tlouštěk materiál setrvá na této teplotě pouze krátký čas, který na křehnutí nemá vliv. Tvrdá a křehká intermetalická sloučenina tzv. **σ - fáze**, vzniká ve svarovém spoji mezi teplotami 500 až 800 °C. Vzhledem k těmto dvěma mechanismům křehnutí není vhodné svařovat materiály větších tlouštěk. Při svařování větších tlouštěk se přenáší i větší tepelný příkon, způsobující nežádoucí růst zrna. Následně tepelné zpracování pak vyžaduje delší časy ochlazování.

Přidavné materiály se volí se stejným chemickým složením jako je základní materiál. Svarové spoje pomocí těchto přidavných materiálů, ale vykazují nízké plastické vlastnosti. Je také možné použít dolegované přidavné materiály s přibližně 4 % niklu. Tím jsou vytvořeny svarové spoje s nízkouhlikovým martenzitem, které mají dostatečnou houževnatost a malý sklon ke vzniku studených trhlin. Jako přidavný materiál lze použít i slitiny niklu. Tento svarový spoj je dále nutné žíhat na teplotu od 750 do 850 °C. Žíháním se zvýší plasticita a odolnost proti mezikrystalické korozi.

Při svařování **feritické oceli se sníženým obsahem intermetalických prvků uhlíku a dusíku** získáme v TOO čistě feritickou strukturu. Tyto materiály nemají sklon ke vzniku studených trhlin a svařují se obvykle bez předehřevu. Ke stabilizaci se nejčastěji používá titan, snižuje také riziko vzniku kráterových trhlin. Oceli s menším obsahem než 0,7 % Ti mají i dobrou odolnost vůči trhlínám za horka.

Tyto materiály také vyžadují minimální tepelný příkon, aby v TOO nehrublo zrno a nesnížila se vrubová houževnatost, jestliže pracovní teplota nepřekročí 320 °C nehrozí zkřehnutí 475 ani σ -fáze. Tepelné zpracování se u těchto ocelí používá pouze pro zvýšení korozní odolnosti.

Tyto materiály se doporučují svařovat metodami: laser, MIG, TIG, elektrický odpor (včetně bodového a švového svařování). Svařují se nejčastěji tenkostěnné polotovary do 3 mm.

3.2 Martenzitické a vytvrditelné oceli

Nejčastěji vyráběné martenzitické oceli obsahují do 13 % Cr a do 0,25 % C. Používají se v potravinářství, zdravotnictví a při výrobě vodních strojů. Jsou dobře svařitelné a korozně odolné v zakaleném stavu.

Martenzitické oceli bez niklu obsahují větší množství uhlíku 0,95 až 1,2 % i chromu 17 až 19 % a jsou legovány molybdenem. Mez kluzu je zde závislá na obsahu uhlíku. Malé průřezy jsou svařitelné bez předehřevu pokud obsahují do 0,25 % uhlíku. Oceli s vyšším obsahem uhlíku dosahují po zakalení a popuštění pevnosti až 1 600 MPa, tvrdosti 58 HRC a používají se jako nástrojové oceli nebo na výrobu valivých ložisek.

Martenzitické oceli s niklem mají nízký obsah uhlíku a jejich struktura je tvořena nízkouhlikovým martenzitem a sekundárním austenitem. Austenit zlepšuje plastické vlastnosti, mez únavy a svařitelnost, aniž by došlo k poklesu pevnosti.

Vytvrditelné oceli obsahují navíc měď a hliník jako další legující prvky. Používají se v leteckém a kosmickém průmyslu, na výrobu pancéřů a při výrobě forem na lisování plastů i gumy. Po vytvrzení dosahují pevnosti 1 250 až 1 500 MPa.

3.3 Austenitické oceli

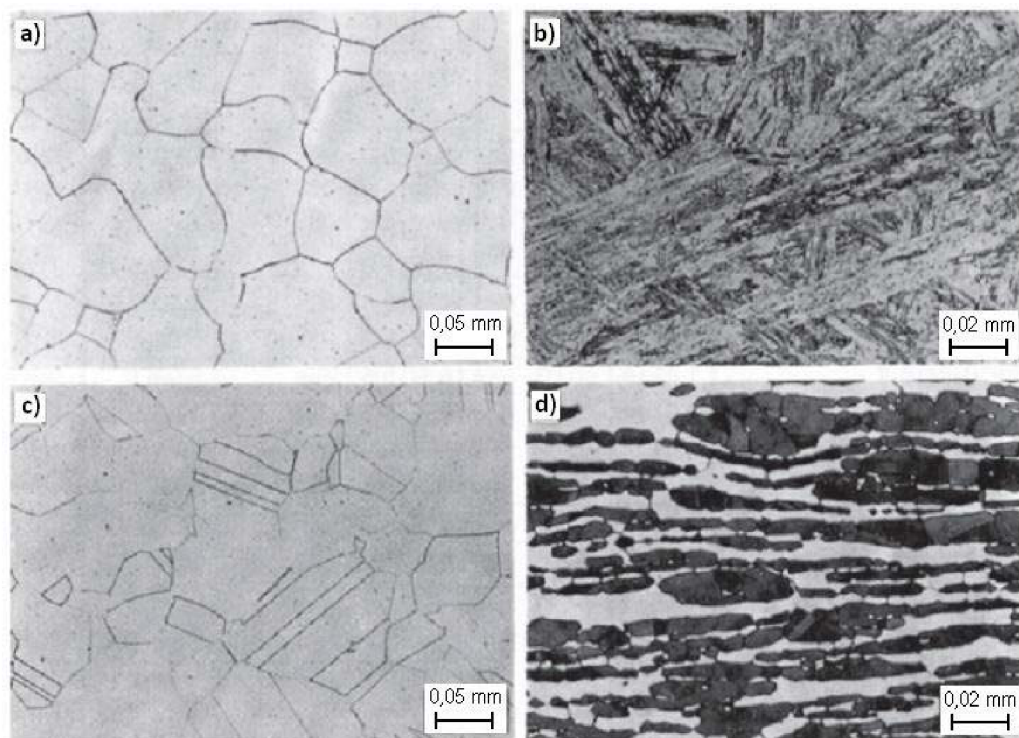
Austenitické oceli nejčastěji obsahují 18 až 20 % Cr a 8 až 11 % Ni. Oceli s vyšším obsahem uhlíku nejsou vhodné pro svařování. V TOO se vylučují karbidy chromu na hranicích zrn, které způsobí mezikrystalickou korozi. Pro zaručení svařitelnosti se austenitické oceli stabilizují niobem, tantalem nebo titanem.

Austenitické oceli jsou houževnaté s tažností až 40 %, mez kluzu mají pouze okolo 200 MPa, pevnost 550 až 650 MPa a jsou hůře obrobitelné. Používají se ve stavu po rozpouštěcím žíhání. Po tepelném zpracování jsou měkké a houževnaté. Tvářením za studena rychle zpevňují.

3.4 Austeniticko-feritické tzv. duplexní oceli

Za duplexní jsou označovány takové oceli, které obsahují 40 až 60 % feritu. Chrom-niklové austeniticko-feritické oceli obsahují 21 až 28 % Cr, 3,5 až 8 % Ni a dosahují vyšší meze kluzu i lepší obrobitelnosti než oceli austenitické. Rozpouštěcím žíháním a rychlým ochlazením se docílí meze kluzu 420 až 530 MPa a tažnost okolo 20 %. Tyto oceli jsou dobře svařitelné a mají dobrou odolnost proti mezikrystalické korozi. Jejich korozní odolnost se však snižuje v prostředí, kde se vyskytují anionty chlóru, jódu a brómu.

Následující obrázek 13 zobrazuje příklady struktur korozivzdorných ocelí.



Obr. 13 Struktury vybraných korozivzdorných ocelí:

a) materiál 1.4511 – feritická struktura,

b) materiál 1.4313 – martenzitická struktura,

c) materiál 1.4301 – austenitická struktura,

d) materiál 1.4462 – austeniticko – feritická struktura [7].

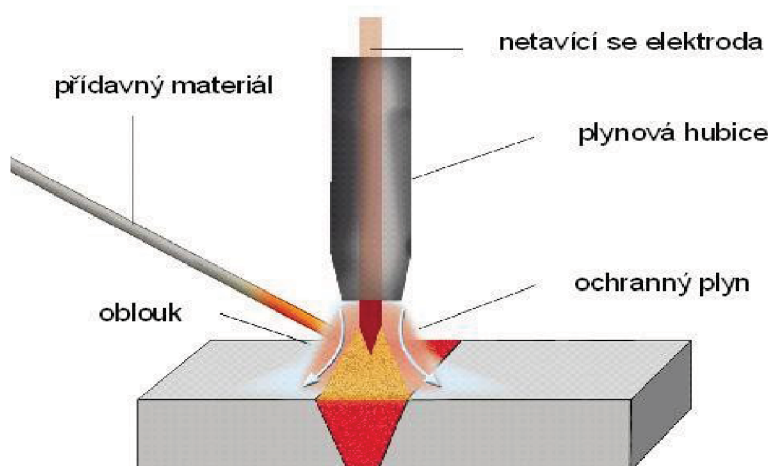
4 TECHNOLOGIE POUŽITÉ V EXPERIMENTU [8], [9], [10], [11]

Při svařování zadané feritické korozivzdorné oceli X2CrTi12 výrazně hrubne zrna, což je nežádoucí zejména pro následné tváření, při kterém dochází k praskání ve svarovém spoji. Z tohoto důvodu byly navrženy metody svařování TIG, plazma a laser, které do spoje vnášejí menší množství tepla. Jednotlivé technologie mají také podobnou svařitelnost a hlavně jsou vhodné pro svařování feritických ocelí.

4.1 Svařování metodou TIG

Anglická zkratka TIG v plném znění Tungsten Inert Gas, v němčině se používá zkratka WIG (Wolfram Inert Gas) se do češtiny překládá jako svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertní (netečné) atmosféře. V zahraniční literatuře se také vyskytuje zkratka GTAW (Gas Tungsten Arc Welding).

Ke vzniku svarového spoje metodou TIG slouží elektrický oblouk, který hoří mezi základním materiálem a netavící se wolframovou elektrodou (obr. 14). Oblouk i tavná lázeň jsou chráněny inertním plynem o vysoké čistotě. Jako ochranný plyn se používají argon (Ar), helium (He) nebo jejich směsi.



Obr. 14 Schéma svařování metodou TIG [9]

Zapojení na střídavý proud se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitiny. Stejnoseměrným proudem se svařují středně a vysokolegované oceli, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další. Uhlíkové oceli se touto metodou nesvařují. Hrozí zde nebezpečí vzniku pórů a také z ekonomických důvodů.

Technologické a metalografické výhody:

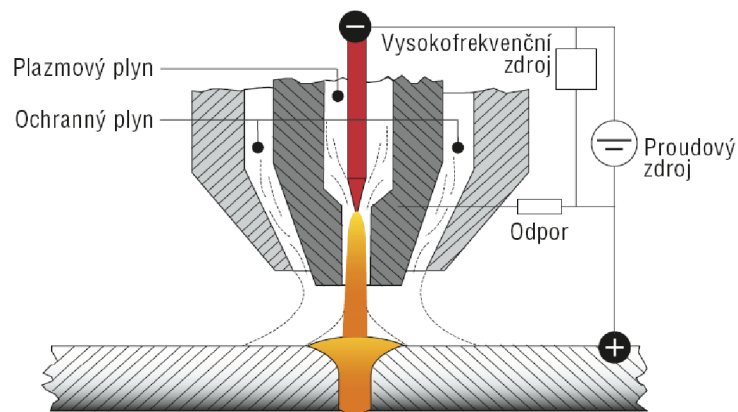
- inertní plyn chrání svarovou lázeň a TOO před vzdušným kyslíkem,
- inertní plyn brání propalu prvků a tak i vzniku strusky – čistý povrch svaru,
- dobré formování svarové housenky na povrchu i na straně kořene,
- tavidlo není nutné, ale lze ho použít,
- vysoce stabilní oblouk v širokém rozmezí svařovacích proudů,
- vysoká operativnost svařování v polohách,
- vysoká celistvost i u materiálů náchylných k naplynění a oxidaci při vyšších teplotách,
- snadná obsluha a regulace svařovacích parametrů,

- malá TOO a minimální deformace svaru,
- viditelná a snadno ovladatelná svarová lázeň,
- **dobrá regulace vneseného tepla do svaru,**
- tvar a směr oblouku lze jednoduše ovládat pomocí magnetického pólu.

4.3 Svařování plazmou

Plazma vzniká ionizací plynu, při průchodu elektrického oblouku. Princip svařování je odvozen od metody TIG. U svařování plazmou je nahrazena keramická hubice kovovou tryskou chlazenou vodou nebo plynem.

Pro svařování se používá závislé zapojení hořáku, kde na wolframové elektrodě je záporný pól a na svařovaném materiálu je pól kladný (obr. 15). Pro zapálení pomocného oblouku slouží vysokofrekvenční ionizátor připojený ke kovové trysce. Po vytvoření dostatečně vodivého prostředí se může zažehnout hlavní oblouk i na poměrně velké vzdálenosti.



Obr. 15 Schéma svařování plazmou [10]

Při svařování plazmou se jako fokusační plyny používají směsi argonu s vodíkem nebo s dusíkem.

Parametry svařování i svařitelnost materiálu při svařování plazmou i u svařování metodou TIG jsou velmi podobné. Plazma, ale dosahuje vyšších rychlostí svařování, výhodnějšího poměru šířky svaru ku hloubce průvaru a spolehlivé provaření kořene. Mohou se svařovat všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl, molybden a jejich slitiny.

Díky vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku, není nutné upravovat svarové plochy. Lze svařovat tupé svary do tloušťek 6 mm i více.

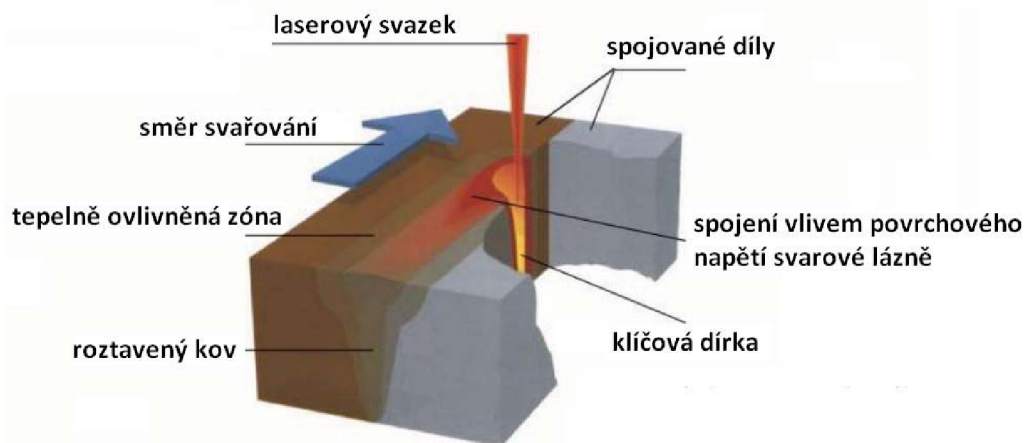
Výhody plazmového svařování:

- snadná úprava svarových ploch středních tloušťek,
- svařování bez nutnosti podložení kořene,
- velmi dobrý tvar i průvar svaru,
- vysoká kvalita svaru bez pórů a bublin,
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje,
- **vyšší rychlost svařování – méně vneseného tepla,**
- možnost svařování střídavým i pulzním proudem.

4.4 Svařování laserem

Svařování laserem pracuje na principu vzniku úzké kapiláry vyplněné parami kovu o vysokém tlaku. Vysokou teplotou se páry ionizují a tak vzniká laserem indukovaná plazma, která vysokou rychlostí tryská z místa svaru. Ofukováním pomocí ochranného plynu (argon, argon + oxid uhličitý, dusík, hélium) se vznikající plazma vychyluje. Ochranný plyn dále slouží jako ochrana tavné lázně a tuhnoucího svarového kovu proti oxidaci vzdušným kyslíkem.

Svařuje se bez přídavného materiálu (obr. 16), vyvíjí se ale nové metody pro použití drátových přídavných materiálů. Svařitelnost materiálů je také podobná metodě TIG.



Obr. 16 Schéma svařování laserem [11]

Geometrie a rozměr svarové lázně jsou ovlivněny hustotou výkonu v dopadové ploše. Před svařováním není nutné klást vysoké nároky na čistotu povrchu. Díky vysoké energetické hustotě se tuky a nečistoty před natavením svarové lázně odpaří. Mezera mezi svařovanými plochami je optimálně 0,05 až 0,2 mm, u tenkých plechů až tisícinny mm.

Díky malému množství vneseného tepla je vysoká rychlost ochlazování, proto nesmí být u ocelí překročen obsah uhlíku 0,2 %. Vynikající výsledky jsou dosahovány u svařování vysokolegovaných ocelí, niklu a molybdenu. Velmi rychlý ohřev umožňuje svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí jako je měď, hliník, stříbro a jejich slitiny a materiály s vysokou teplotou tavení (wolfram, molybden, tantal, zirkon, titan atd.).

Výhody svařování laserem:

- laser lze rychle přizpůsobit změně technologie, snadná automatizace,
- **malé množství vneseného tepla,**
- čistý provoz, zplodiny se snadno a účinně odsávají,
- není potřeba přídavný materiál - není odpadu,
- vysoká přesnost,
- provoz laseru je tichý, hluboko pod hladinou běžných technologií,
- laserový paprsek lze rozdělit soustavou zrcadel na různá pracovní místa,
- lze svařovat tloušťky od několika mikrometrů do 15 mm,
- ohnisková vzdálenost až 1,6 m,
- svařování tenkých plechů v automobilovém průmyslu bez ochranné atmosféry.

5 DALŠÍ MOŽNOSTI REGULACE VNESENÉHO TEPLA Q_s

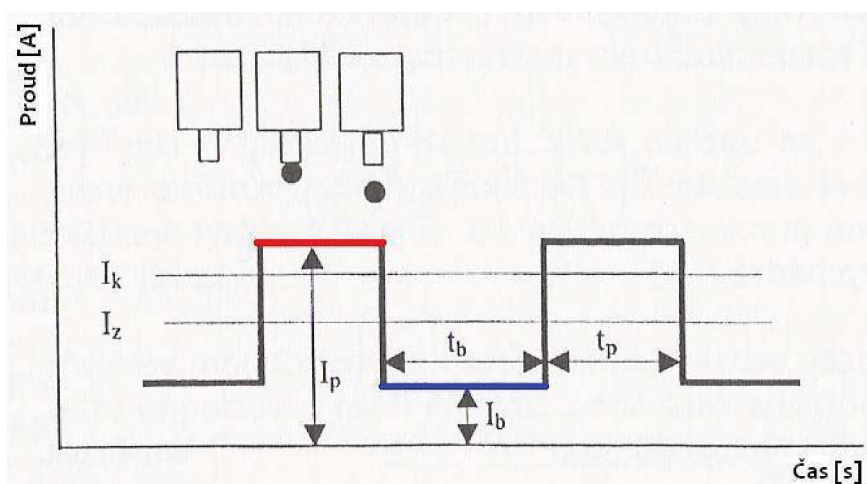
[1], [8], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Množství vneseného tepla je jedním z hlavních parametrů, které ovlivňují kvalitu i mechanické vlastnosti svarového spoje. Proto se touto problematikou zabývají i jednotliví výrobci svařovacího zařízení a snaží se vyvinout nová zařízení a metody jak ovlivnit množství vneseného tepla ve svaru.

5.1 Pulzní svařování

Pulzní svařovací cyklus se používá u nízkouhlíkových ocelí za použití nízkých a středních hodnot svařovacích parametrů. Tento cyklus rozděluje střední energii oblouku na dvě různé energetické hladiny a to impuls a základ. V okamžiku impulsu, svařovací parametry dosahují nadkritických hodnot, kde se tvoří a oddělují kapky tekutého kovu (obr. 17). Po oddělení kapky není nutné setrvávat na nadkritických parametrech. Dojde k výhodnějšímu přechodu na nízké základní svařovací parametry, pomocí kterých se udržuje hoření oblouku, bez významného ohřevu elektrody a základního materiálu. Celková střední energie svařovacího procesu se pohybuje na úrovni hodnot klasického zkratového procesu svařování.

Pro stanovení proudového zatížení elektrody v oblasti impulsu, je nutné zvolit takovou hodnotu, která bude v nadkritické oblasti a současně zaručí dostatečnou energii pro natavení elektrody. V oblasti základu se volí proudové zatížení co nejmenší, ale takové, aby nedošlo k uhasnutí oblouku.



Obr. 17 Schématické znázornění průběhu svařovacího proudu při pulzním svařování:
 I_p – proud impulsu, I_b – proud základu, I_z – střední hodnota proudu, I_k – kritická hodnota proudu, t_p – čas trvání impulsu, t_b – čas trvání základu. [12]

Charakteristické parametry pro pulzní svařování jsou: proud impulsu, proud základu, střední hodnota proudu, kritická hodnota proudu, čas trvání impulsu, čas trvání základu. Pro stabilní průběh svařování se parametry volí v závislosti na rychlosti podávání elektrody, na směsi ochranných plynů, na průměru a chemickém složení elektrody.

Impuls trvá tak dlouho, aby došlo k odtavení kapky přibližně stejné velikosti jako je průměr elektrody. Frekvence mezi impulzy musí zaručit, odtavení vždy jedné kapky za jeden impuls. Proud v úrovni základu působí po takovou dobu, aby se sladila rychlost podávání

elektrody s frekvencí a dosáhlo se tak konstantní délky oblouku. Rychlost přenosu kovu ovládaná frekvencí, musí být stejná s rychlostí tavení.

Pomocí zpětné vazby se udržují konstantní parametry impulzů i změna rychlosti podávání elektrody.

Výhody pulzního svařování:

- lepší mechanické a plastické vlastnosti svaru,
- **menší TOO i deformace,**
- velmi dobrý tvar a vzhled svarové housenky,
- dobrý průřez svaru,
- menší náchylnost ke vzniku mezikrystalické koroze u vysokolegovaných ocelí,
- u svařování plechů tloušťek 0,5 až 5 mm není nutno používat podložky,
- dobrá regulace svařovacího proudu.

Použití pulzního svařování:

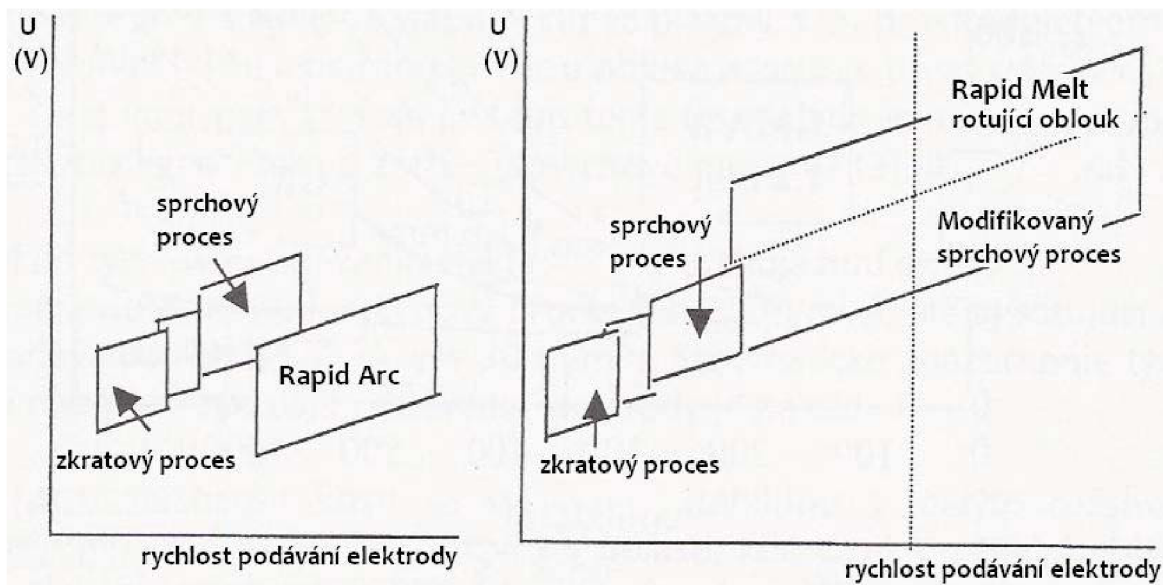
- tenké plechy z legovaných ocelí, mědi a slitiny mědi,
- svary různých tloušťek,
- svary přístupné z jedné strany,
- svary polohové,
- svary z materiálů citlivých na přehřátí,
- kořenové svary trubek větších tloušťek.

5.2 Rapid

Metoda Rapid byla vyvinuta společností AGA AB. Rapid patří mezi vysokorychlostní svařování v ochranné atmosféře a rozděluje se na dvě modifikace Radid Arc a Rapid Melt. Obě metody pracují na principu zvýšené rychlosti podávání elektrody a větším výletu elektrody, tím se zvýší odpor i ohřátí konce elektrody, které způsobí zvýšení výkonu natavení svarového kovu. Jednotlivé modifikace se vzájemně liší použitými parametry a přenosem svarového kovu (obr. 18). Jako ochranný plyn se používají směs argonu a 8 % oxidu uhličitého.

Rapid Arc se pohybuje v oblasti vyššího proudu a nižšího napětí za zkratového přenosu kovu. Oblouk je moderními zdroji „donucený“ chovat se zkratově i v oblasti, kde klasické svařování v CO₂ resp. Ar + CO₂ nelze použít. Zvýší se tak výkon odtavení i ve zkratovém procesu. S výhodou se používá hlavně u svařování tenkých plechů s minimální tloušťkou 1 mm. V porovnání s konvenčním MIG/MAG svařováním dosahujeme nižší tepelný příkon. To způsobuje užší tepelně ovlivněnou oblast a menší deformace.

Rapid Melt do svaru vnáší více vneseného tepla, než při běžném svařování. Proto není vhodná pro použití při svařování zadaného materiálu X2CrTi12.



Obr. 18 Charakteristiky procesů Rapid Arc a Rapid Melt [12]

5.3 Fast Root

Metoda Fast Root byla vyvinuta společností Kemppi. Fast Root využívá krátko-obloukový svařovací proces, vhodný především pro kořenové vrstvy a tenké plechy konstrukčních a nerezavějících ocelí. Svařeči usnadňuje práci, díky tomu, že umožňuje svařování ve všech pozicích s žadáním průvarem a bez rozstříku.

Princip Fast Root

Proces Fast Root digitálně řídí hodnoty proudu a napětí. Monitoruje je zkrat a správné načasování přenosu kapky kovu do svarové lázně. Proces tvoří dva vzájemně odlišné průběhy proudu, lze je označit jako zkrat a nárůst proudu (obr. 19). Fast Root nelze zaměnit s pulsním svařováním. Jedná se o upravený krátko-obloukový proces.



Obr. 19 Proudová vlna procesu Fast Root v okamžiku přenosu kapky kovu do svarové lázně [13]

V první fázi nárůstu proudu dojde k přenosu kapky kovu z elektrody do svarové lázně. Mezi tím v druhé fázi vzroste výkon a zůstane na stanovené hladině (obr. 19). Před první fází dojde ke kontaktu drátu se svarovou lázní, během krátkého nárůstu svařovacího proudu. Prudký nárůst proudu na předepsanou hladinu (tzv. pinch efekt), umožní oddělení kapky v první fázi. Po oddělení se mírně sníží proud. V zářetí následuje nárůst proudu a vznik fáze hoření oblouku. Během druhé fáze se formuje svarová lázeň a přenáší se tepelná energie do základního materiálu a vytváří žadání průvare v kořenové vrstvě. Fáze se neustále střídají a proud mezi nimi klesne vždy na základní úroveň.

Jeden cyklus (obě fáze) přenosu kovu trvá přibližně 5 – 6 ms.

Proces Fast Root se ovládá svařovacím zdrojem FastMIG Synergic, který řídí a kontroluje hoření oblouku pomocí zpětné vazby. Správným načasováním poklesu a nárůstu proudu mezi oblastí zkratu a hořením „otevřeného oblouku“ dochází k bezroztříkovému přenosu kovu. Proces lze snadno kontrolovat díky stabilnímu oblouku. Tvar profilu kořene a plynulý přechod TOO do základního materiálu se ovlivní správnou dynamikou oblouku a hladinou základního proudu.

Tato metoda je vhodná především pro kořenové vrstvy. Po svaření kořene je možné přepnout na běžný synergický program a pokračovat dále ve svařování výplňových a krycích vrstev svarového spoje.

Výhody a vlastnosti Fast Root:

- svařování kořenových vrstev vertikálně shora dolů (poloha PG),
- vynikající svařovací charakteristiky,
- bezroztříkové svařování,
- snížení potřeby dokončovacích prací pro úpravu svaru → méně broušení,
- dobrý průvar,
- svařování ve všech pozicích,
- náročné práce mohou vykonávat i méně zkušení svařeči,
- dovoluje použít větší svarovou mezeru,
- vyšší rychlost svařování při svařování kořenových vrstev (o 10 % rychlejší než při MIG svařování, 3x rychlejší než při TIG svařování),
- **menší množství vnesené tepelné energie do svaru** (méně o 10 až 20 %) → menší deformace,
- nižší zbytkové napětí – vyšší pevnost.

Díky bezroztříkovému svařování a vysoké kvalitě svaru se sníží náklady a čas potřebný na dokončovací a opravárenské operace. Vyšší rychlosti svařování zajistí vyšší produktivitu svařování.

Množství vneseného tepla do svaru je ovlivněno délkou oblouku.

Použití procesu Fast Root

Fast Root byl vyvinut především pro svařování kořenových vrstev, ale je vhodný i pro svařování tenkých plechů. Nejčastěji jsou touto metodou svařovány materiály z konstrukčních a nerezavějících ocelí. V současnosti se používá například v norské společnosti Ormen Lange, což je druhá největší námořní plošina s největší délkou potrubí na světě.

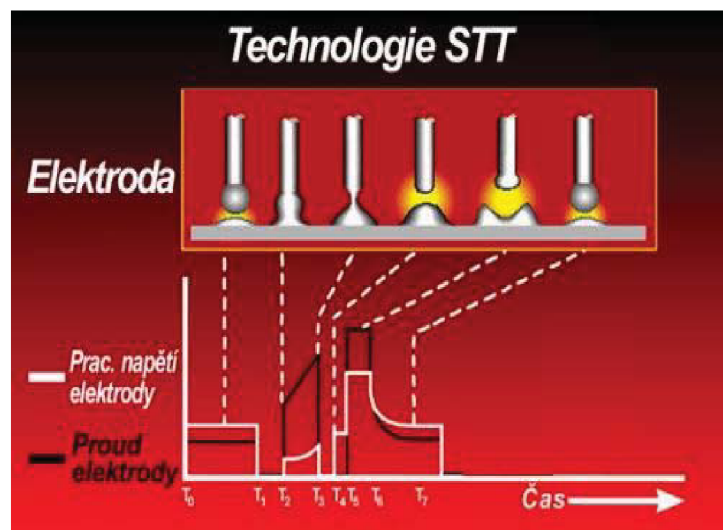
5.4 Surface Tension Transfer (STT)

Metodu Surface Tension Transfer nabízí americká společnost Lincoln Electric jako svůj produkt pro snížení vneseného tepla do svaru. Surface Tension Transfer lze do čestiny přeložit jako přenos kovu řízený povrchovým napětím. Pro tuto metodu se často používá pouze zkrácené označení STT, nebo STT II. Stejně jako Fast Root dosahuje STT vyšší produktivitu než svařování běžnými způsoby MIG/MAG a TIG.

STT má řízený celý svařovací cyklus, využívá řízený přenos svarového kovu do tavné lázně podle předem definovaných parametrů v závislosti na parametrech změřených přímo na oblouku v daný okamžik. Unikátní systém kontroly celého svařovacího cyklu přináší dokonalou regulaci v reálném čase.

Princip STT

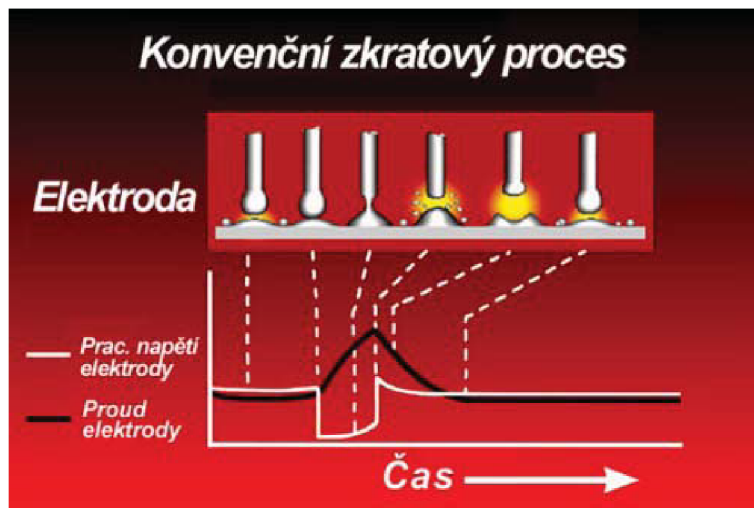
Zdroj STT používá přímou zpětnou vazbu. Nasnímané parametry napětí jsou vyhodnoceny a na jejich základě se řídí svařovací cyklus. Podle skutečných parametrů okamžitě reaguje na každou fázi přechodu svarového kovu do tavné lázně. Změny proudu a napětí jsou znázorněny na obr. 20, je zde také znázorněn přenos kapky kovu.



Obr. 20 Charakteristika technologie STT [14]

Nejprve hoří oblouk stejně jako u běžného svařování a tvoří se kulička roztaveného kovu na konci elektrody. V okamžiku styku kuličky s tavnou lázní zdroj STT tuto situaci vyhodnotí a okamžitě sníží proud na 10 A, tím výrazně sníží rozstřík. Následuje fáze zkratu. V této fázi STT zvyšuje proud podle předem nadefinované křivky. Těsně před oddělením kuličky od tavné lázně se omezí proud na 50 A a tím se maximálně omezí tvorba rozstříku. Jakmile STT rozpozná ukončení přenosu kovu do svarové lázně, začne nový cyklus. Celý cyklus trvá přibližně 5 ms.

Pro lepší srovnání s konvenčním zkratovým procesem je uveden obr. 21. Na tomto obrázku je vidět značný rozstřík, ke kterému u STT téměř nedochází.



Obr. 21 Charakteristika konvenčního zkratového procesu [14]

Možnosti STT:

- zdroj STT mimo jiné obsahuje unikátní obvod nazývaný jako "dV/dt detektor" (tento detektor dokáže identifikovat fázi těsně před ukončením zkratu),
- celý proces probíhá automaticky bez zásahu obsluhy,
- STT je svařovací zdroj pro MIG/MAG svařování,
- nepracuje s konstantními charakteristikami proudu ani napětí,
- široký rozsah regulace svařovacích parametrů,
- nezávislé ovládání rychlosti podávání drátu a svařovacího proudu,
- parametry svařování jsou nastaveny podle skutečné potřeby pro danou fázi cyklu.

Výhody zdroje STT:

- **minimální vnesené teplo do svaru** (menší deformace a menší TOO),
- aplikace tvrdonávarů (minimální promísení se základním materiálem vlivem malého vneseného tepla a tavné lázně),
- až o 90 % menší rozstřík – dobrý vzhled svaru (čisté okolí svaru, není třeba brousit),
- tavná lázeň se nezvětšuje, je stejně velká v jakékoli poloze a situaci svařování (v kořenu svaru, na kraji tenkých plechů, ...),
 - nedochází k propadnutí,
 - svařování kořene svaru u tenkých plechů pod 0,6 mm i s minimálními zkušenostmi v poloze shora dolů,
 - nahrazuje metodu TIG s lepšími výsledky a několikanásobně vyšší produktivitou,
- velká flexibilita
 - svařování i velkých spár (např. plech 3 mm, spára 1,2 mm),
 - použití větších průměrů drátů (úspora přídatného materiálu),
- svařování nelegovaných, nízkolegovaných, vysokolegovaných a galvanicky pokovených ocelí,
- snadné ovládání (krátké zaškolení obsluhy),
- snížení vzniku škodlivých emisí (ochrana životního prostředí).

Využití svařovacího zdroje STT v průmyslu

Pro své dobré vlastnosti se používá metoda STT například při výrobě tlakových nádob, potrubí v energetice, při výrobě potravinářských strojů, zařízení a tvrdonávaru. S výhodou se také používá při svařování karoserií v automobilovém průmyslu například, u sportovních vozů X5 Roadster Z4 značky BMW či u vozu Octavia značky Škoda.

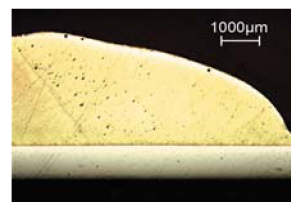
5.5 Cold Metal Transfer (CMT)

V posledních letech je stále častější požadavek na svařování oceli s hliníkem. Svaření těchto materiálů je náročnější. Jsou zde kladeny vysoké nároky na řídicí techniku a lze svařit pouze určitou geometrii spoje.

Postupným přizpůsobováním metody MIG/MAG potřebám spojování oceli s hliníkem vznikla např. metoda Cold Metal Transfer (dále jen CMT) prezentována firmou Fronius a nebo metoda ColdArc od firmy EWM.

Pro spojení různých druhů materiálů s menším množstvím vneseného tepla se může použít také například MIG brazing, kterou nabízí společnost Kemppi. Není to však přímé svařování, ale patří do skupiny tvrdého pájení.

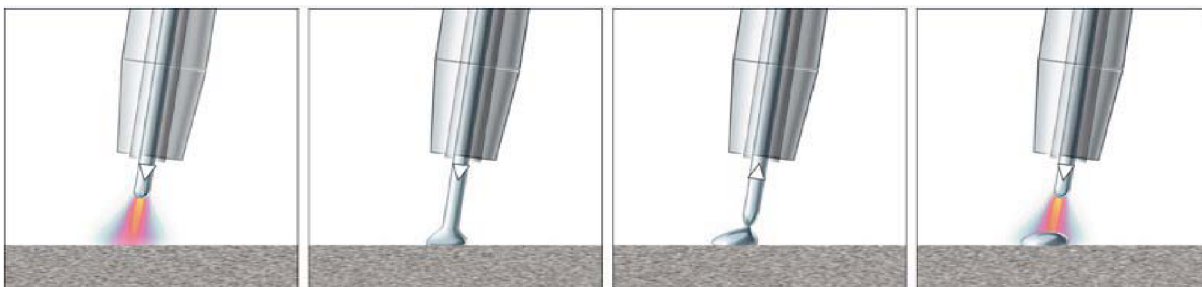
Pozinkovaný ocelový materiál je smáčen, nikoli nataven, roztaveným hliníkovým základním a přídatným materiálem. Dochází k tzv. „svarovému pájení“, kvůli rozdílným teplotám tavení (hliník 660 °C, ocel 1538 °C). Spoj je z pohledu hliníku svařený a ocel je pájená. Na obr. 22 je zobrazen metalografický vzorek spoje ocel-hliník. Aby nedocházelo k tepelné degradaci hliníkových slitin, využívají se technologie s nízkým přenosem tepla.



Obr. 22 Smíšený spoj ocel-hliník [15]

Princip Cold Metal Transfer

CMT řídí přenos materiálu téměř bezproudově. Svařovací drát se pohybuje vysokou rychlostí proti směru posuvu podávání v určitých časových intervalech (obr. 23). Přesně definovaným zpětným zatažením drátu se kontroluje uvolnění kapky do svarové lázně. Dochází tak k čistému, bezrostríkovému přechodu materiálu. Vysokofrekvenční pohyb drátu vyžaduje rychle reagující pohon přímo na hořáku. Samotný podavač není schopen tyto pohyby sledovat. Transportní hadice je proto vybavena tzv. pufrem (vyrovnávacím členem), který vyrovnává přídatné pohyby drátu v obou směrech.



Obr. 23 Zpětný pohyb drátu [15]

V okamžiku identifikace zkratu svařovací zdroj spustí zpětný pohyb drátu a sníží svařovací proud. Dochází k přesně definovanému uvolnění kapky bez známek rozstříku. Cyklus se začne opakovat v okamžiku pohybu drátu vpřed. Vysoká frekvence pohybu drátu a mimořádná preciznost jsou předpokladem přesně řízeného přechodu materiálu.

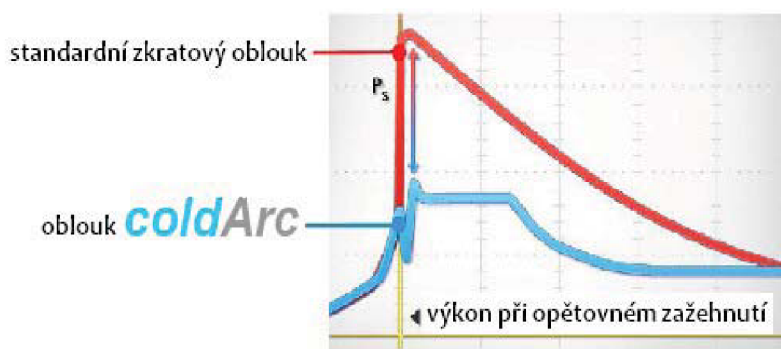
Díky nízkému tepelnému zatížení CMT se nemusí používat svarové podložky. Nedochází k protavení svaru.

Aplikace a přednosti

CMT není vhodný pouze pro spoje ocel-hliník, ale i pro řadu jiných aplikací. Například bezroztříkové pájení žárově nebo elektrolyticky zinkovaných plechů za použití svařovacího drátu slitiny mědi s křemíkem. Dobře probíhá i svařování ušlechtilých ocelí s hořčíkem.

5.6 ColdArc

Metoda ColdArc je stejně jako CMT zaměřená především na svařování oceli s hliníkem. Řadí se mezi obloukové svařování MIG/MAG s energetickou regulací oblouku. ColdArc využívá krátký oblouk s nižšími hodnotami proudu a napětí oproti klasickému způsobu MIG/MAG jak je patrné z obr. 24.



Obr.24 Porovnání klasického krátkého oblouku a ColdArc [16]

Na rozdíl od CMT, kde je svařovací cyklus upraven pomocí mechanického zásahu do posuvu drátu, ColdArc je možné použít i u ručního svařování, protože k úpravě svařovacího cyklu dochází přímo v proudovém zdroji. Díky konstantnímu podávání drátu ($v_{\text{drát}} = \text{konst.}$) lze použít klasické hořáky.

Princip ColdArc

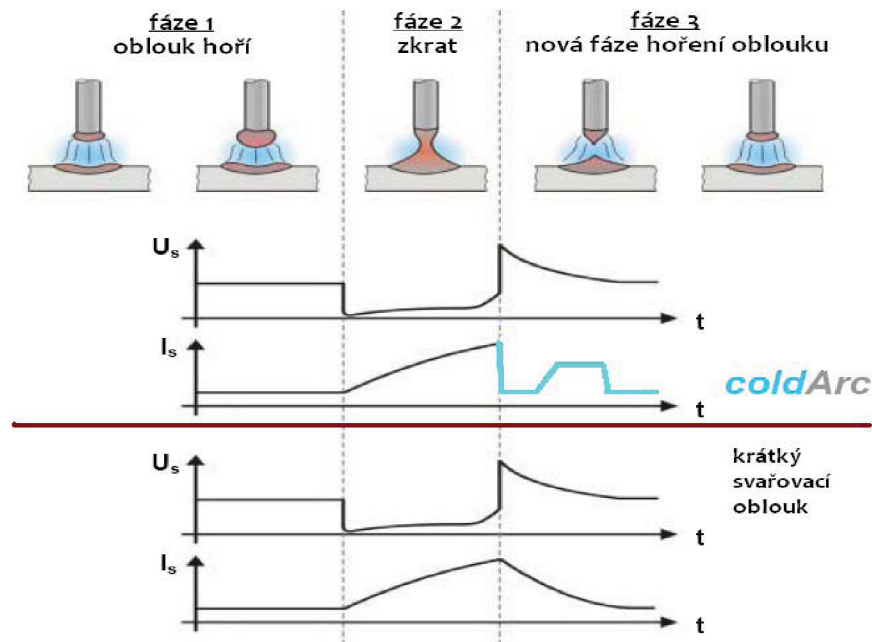
Svařovací cyklus probíhá střídáním tří fází, které jsou znázorněny na obr. 25. Výsledkem je malý rozsah tepelně ovlivněné oblasti spojených materiálů.

Fáze 1: Krátký oblouk hoří mezi základním a přídavným materiálem. Působením povrchového napětí svarové lázně se na konci přídavného materiálu začne tvořit kapka roztaveného kovu.

Fáze 2: V okamžiku kdy se kapka dostane do kontaktu se svarovou lázní dojde ke zkratu a uhasnutí oblouku. Vytvoří se most mezi základním materiálem a koncem přídavného

materiálu. Konečnému oddělení kapky pomáhají Lorentzovy síly a tepelný efekt způsobený strmým nárůstem proudové hustoty.

Fáze 3: Po oddělení kapky je opět zažehnut oblouk.



Obr. 25 Fáze procesu ColdArc [16]

Na obr. 25 je také graficky znázorněn průběh proudu a napětí ve všech popsaných fázích. V počáteční fázi zkratu se prudce sníží napětí působením nižšího elektrického odporu oproti první fázi. Ve stejném okamžiku se zvyšuje i proud. Po zániku vzniklého mostu a oddělení kapky od elektrody napětí prudce narůstá a proud naopak klesá. Nárůstem napětí se „nenásilně“ zažehne nový oblouk díky digitálnímu řízení. Po zažehnutí nového oblouku se napětí pozvolna snižuje, zatímco proud se na krátký okamžik zvýší, aby došlo k natavení základního materiálu. Po rychlém natavení se proud extrémně sníží, aby nedocházelo k dalšímu natavení. Díky tomu je velmi malá TOO, protože proud zůstane na extrémně nízké hodnotě až do okamžiku oddělení kapky roztaveného kovu.

Výhody metody ColdArc:

- svařování menších tloušťek plechů,
- **méně vneseného tepla,**
- nízkoenergetický přechod materiálu,
- minimální rozstřík,
- vynikající přemostění mezer,
- individuálně ovlivnitelná geometrie svaru,
- malá deformace materiálu.

Působením minimální vložené energie a digitální kontrole materiálového přenosu nedochází k propadávání taveniny, i když nejsou použity svařovací podložky. Výborné přemostění mezer a možnost použití vysokých svařovacích rychlostí. Mohou se svařovat i plechy s menší tloušťkou než je 0,3 mm, což přispívá k úspoře hmotnosti svařované konstrukce. Nejběžněji se používá jako přídavný materiál zinkový drát.

5.7 WISE

Softwarová řada Wise byla vyvinuta ve společnosti Kemppi ve spolupráci s významnými finskými průmyslovými partnery. Produkty tak byly ověřeny na mnoha skutečných součástech a v reálných podmínkách. Použití těchto metod je v automobilovém průmyslu, při stavbě lodí i v ostatních odvětví průmyslu.

Wise umožňuje komplexní řízení svařovacího oblouku i svařovacích parametrů dle konkrétních požadavků. Software lze nainstalovat jak k novému zařízení Kemppi, tak k již používanému DataGunu (tj. soubor softwarových programů). Wise je možné použít u automatizovaného i u manuálního svařování.

Procesy Wise se dají rozdělit do dvou skupin. Jedna skupina se zaměřuje na účinnost svařovacího výkonu a druhá na poskytování nových svařovacích technik při použití standardního MIG/MAG svařovacího procesu.

Pro dokonalejší svařování byly vyvinuty tyto čtyři Wise procesy:

- WiseRoot,
- WisePenetration,
- WiseFusion,
- WiseThin.

5.7.1 WiseRoot

WiseRoot byl přizpůsoben pro svařování kořenových vrstev pomocí studeného oblouku. Je navržen pro efektivní uzavření kořenového spoje a pro toleranci kořenové mezery.

Výsledkem je perfektní kořenový svar, který až 3 krát rychleji uzavře kořen nežli TIG svařování a o 15% rychleji než při běžném MIG/MAG svařování.

Proces WiseRoot nevyžaduje žádné keramické podložky, má snadné ovládání, které se lehce učí a používá.

Nejen u WiseRoot, ale i u ostatních procesů Wise se snižuje počet nutných oprav, čímž se šetří čas a snižují se i náklady na přídatný materiál.

5.7.2 WisePenetration

WisePenetration byl vyvinut pro potřeby svařování v případech, kdy je hořák v náročné poloze a přitom je požadována homogenní kvalita svařované struktury. Pomocí této funkce je dodáván konstantní svařovací výkon i v případě změny délky oblouku mezi tryskou hořáku a základním materiálem. Tím je sníženo riziko nedostatečného provaření.

Díky konstantní délce oblouku je možné tento proces použít nejen u automatizovaného, ale i u manuálního synergického MIG/MAG svařování.

U běžného MIG/MAG svařování musí svařeč měnit hodnoty napětí a proudu podle aktuální délky oblouku. Těmito odchylkami může docházet k nedostatečnému, proměnlivému průvaru, změně profilu svaru a k rozstříku kovu. WisePenetration je proto navržen tak, aby bylo dosaženo konzistentní kvality svaru s co nejmenší námahou.

5.7.3 WiseFusion

WiseFusion je modifikací procesu pro kontrolu nad svarovou lázní, u které dochází k hlubšímu průvaru, vyšší rychlosti svařování, menšímu množství vneseného tepla a menší deformaci.

Proces WiseFusion vytváří a udržuje správnou délku oblouku, současně řídí parametry při pulzním MIG/MAG svařování. Díky kontrole délky oblouku, po primárním nastavení parametrů, je možné svařovat ve všech polohách, bez nutnosti dalších zásahů.

Nejlépších výsledků je dosaženo u svařování hliníkových slitin a nerezí v MIG procesu.

5.7.4 WiseThin

WiseThin stejně jako WiseRoot je modifikací studeného oblouku pro manuální, automatizované svařování a pro pájení tenkých plechů. Použitím studeného oblouku je snížen tepelný příkon o 15 až 20 % oproti běžnému MIG/MAG svařování.

Díky kontrole nad svarovou lázní u tenkých plechů nedochází k rozstříku, snižuje se počet nutných dodatečných operací a oprav svaru. Tím se zkrátí výrobní časy a sníží se náklady na výrobu.

6 EXPERIMENT [6], [8]

Pro experimentální ověření regulace vneseného tepla, byl vybrán materiál X2CrTi12 tloušťky 2 mm. Jedná se o feritickou korozivzdornou ocel, u které je při svařování nutno použít co nejméně vneseného tepla, kvůli nežádoucímu růstu zrna (viz. kapitola 3.1 Feritické oceli).

Technologie svařování byly vybrány s ohledem na malé množství vneseného tepla do svaru a na zvolenou feritickou ocel. Jsou to technologie obloukového svařování TIG, plazma (o různých průměrech trysky) a vláknový laser.

Při svařování všech vzorků, nebyl použit žádný přídavný materiál ani předehřev základního materiálu.

Pro lepší posouzení počtu a velikosti zrn, je u nátavu metodou TIG a u plazmových svaru ve střední části vzorku vynesena čtvercová oblast o ploše vždy 1 mm². Pomocí které se snáze vyhodnotí, kolik zrn je v dané oblasti a tedy jak jemnozrná či hrubozrná je daná struktura.

U svaru laserem je svar příliš úzký a počet zrn na kontrolní ploše by zahrnoval i původní zrna. Ostatní metody do kontrolované oblasti zasahují pouze svarovým kovem nebo tepelně ovlivněnou oblastí. Výsledky by proto byly značně odlišné a neporovnatelné.

Všechny vzorky však lze porovnat z pohledu tvrdosti ve svaru a v základním tepelně neovlivněném. Tvrdost je měřena metodou Vickers (HV 5). Jedná se o metodu vhodnou pro měření tvrdých materiálu pomocí diamantového jehlanu.

6.1 Svařovaný materiál X2CrTi12

Zvolený materiál patří do skupiny feritických korozivzdorných oceli. Dle normy ČSN EN 10088 se označuje jako **X2CrTi12** a dle normy ČSN 10027-2 jako **1.4512**.

Zkoušený materiál v tomto experimentu byl vyroben norskou společností NB Norden Bandstahl GmbH. Níže uvedené hodnoty chemického složení (tab. 2) a mechanických vlastností jsou převzaty z dodacího protokolu materiálu.

Svařováním materiálu X2CrTi12 se vlivem ohřevu zvýší citlivost na hrubnutí zrna, které způsobí nežádoucí zkřehnutí. Při následném tváření se v křehkém svarovém spoji tvoří trhliny. Materiál má také nepříznivé vlastnosti pro svařování. Vyšší tepelná vodivost tohoto materiálu, nepříznivě zvětší objem taveniny ve svarové lázni, která následně rozšíří svarovou housenku. Materiál má v tekutém stavu velmi malé povrchové napětí, které způsobí vysoce tekutou svarovou lázeň.

Mechanické vlastnosti oceli X2CrTi12

Mez kluzu:	$R_{p\ 0,2}$	= 305 MPa.
Mez pevnosti:	R_m	= 456 MPa.
Tažnost:	A_5	= 34,4 %,
	A_{50}	= 34,4 %,
	A_{80}	= 30 %.

Chemické složení oceli X2CrTi12

Tab. 2 Chemické složení oceli X2CrTi12 (1.4512)

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti
Množství	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Max.	0,030	1,000	1,000	0,040	0,015	12,500	0,650
Min.	~	~	~	~	~	10,500	~
Skutečné	0,015	0,570	0,360	0,021	0,001	11,580	0,170

Uhlíkový ekvivalent pro vysokolegované oceli

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} \quad (6.1)$$

$$CET = 0,015 + \frac{0,36 + 0}{10} + \frac{11,58 + 0}{20} + \frac{0}{40}$$

$$CET = 0,63 \%$$

Teplota přehřevu u vysokolegovaných ocelí, mezi které se zvolený materiál řadí, nelze jednoznačně určit výpočtem. Přehřev je nutné určit experimentálně.

Při svařování zkušebních vzorků, se základní materiál nepřehřívá. Také kvůli lepšímu posouzení množství vneseného tepla různými technologiemi a jeho vlivu na materiál.

Struktura materiálu

Poměrně jemnozrnná mikrostruktura základního materiálu je zobrazena na obrázku 26.

Pro určení struktury materiálu je použit Schaeffler-Delongův diagram. Nejprve je nutné vypočítat chromový a niklový ekvivalent. Tyto dvě hodnoty se následně vnesou do diagramu. Struktura materiálu se odečte v místě jejich průsečíku.

Vypočtené hodnoty obou ekvivalentů se protínají v oblasti feriticko-martenzitické, viz. Schaeffler-Delongův diagram na obr. 12. Martenzit ve struktuře vzniká přetransformací při chladnutí z austenitu. Martenzit zvýší pevnost a tvrdost materiálu.

Chromový ekvivalent

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 Si + 0,5 Nb + 2 Ti \quad [8] \quad (6.2)$$

$$Cr_E = 11,58 + 0 + 1,5 \cdot 0,57 + 0,5 \cdot 0 + 2 \cdot 0,17$$

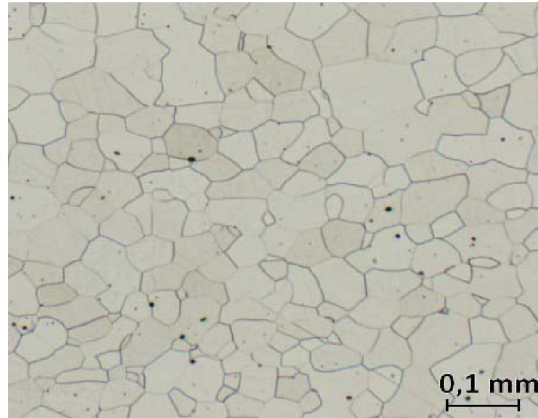
$$Cr_E = 12,775 \%$$

Niklový ekvivalent

$$Ni_E = Ni + 0,5 Mn + 30 C \quad [8] \quad (6.3)$$

$$Ni_E = 0,5 \cdot 0,36 + 0,5 \cdot 0 + 30 \cdot 0,015$$

$$Ni_E = 0,63 \%$$



Obr. 26 Mikrostruktura základního materiálu X2CrTi12

6.2 Svařování metodou TIG

Metodou TIG není zkušební vzorek svařen jako u ostatních vzorků, ale je zde proveden nátav. Materiál v tomto případě je pouze ohřátý.

Nátav je vytvořený pomocí zdroje Magic Wave 2600 Fuzzy vyrobený společností Fronius (obr. 27). Jako ochranný plyn byl použit čistý argon (čistota $\geq 99,996\%$).

Parametry svařování

Svařovací proud:	$I = 57 \text{ A.}$
Svařovací napětí:	$U = 9,7 \text{ V.}$
Rychlost svařování:	$v_s = 10 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1},$ $v_s = 1,66 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}.$
Průtok plynů:	$v_p = 15,5 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}.$
Tepelná účinnost přenosu tepla:	$\eta = 0,65.$



Obr. 27 Svařovací zdroj Magic Wave 2600 Fuzzy [20]

Výpočet vneseného tepla

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

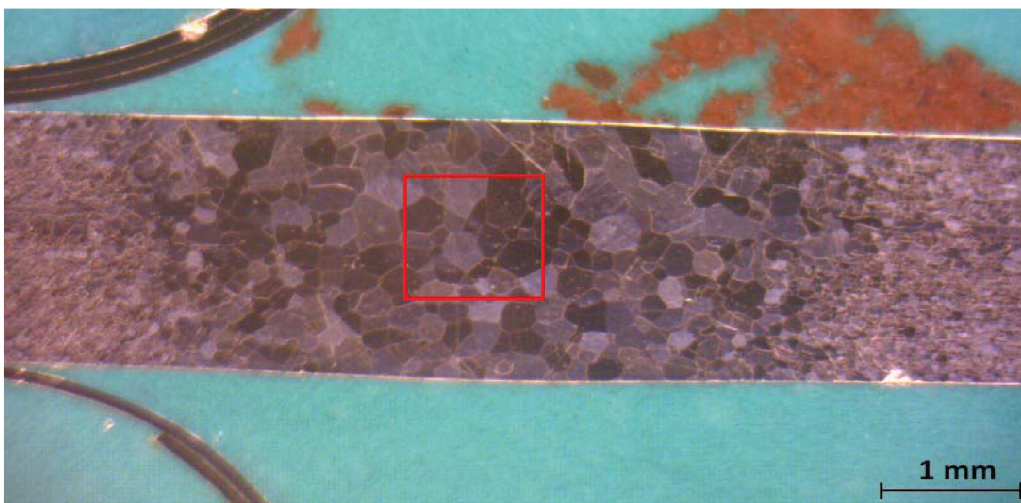
$$Q_{sTIG} = 0,65 \frac{9,7 \cdot 57}{10^3 \cdot 1,66}$$

$$\underline{Q_{sTIG} = 0,216 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

Vyhodnocení výsledné struktury nátavu

Na obrázku 28 je zobrazen nátav metodou TIG. Zrna jsou zde v celé tepelně ovlivněné oblasti rovnoměrná s délkou přibližně 0,4 mm a šířkou 0,3 mm. Nátav má jemnozrnnou strukturu.

U nátavu pomocí metody TIG do kontrolního rámečku zasahuje 34 zrn.



Obr. 28 Makrostruktura oceli X2CrTi12 nátavu TIG

Měření tvrdost

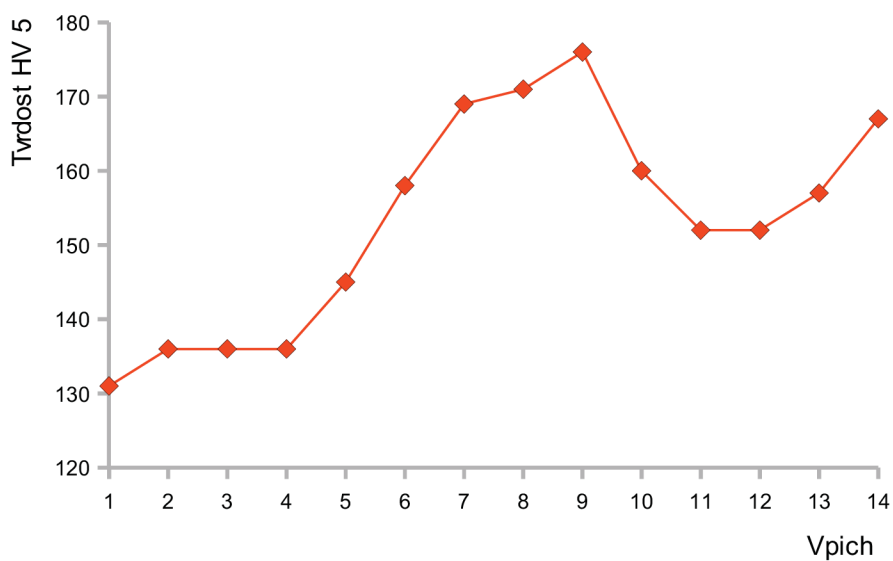
Tvrdost je měřena v kolmém řezu nátavem (obr. 28). Vpichy číslo 1 až 5 a 12 až 14 odpovídají tvrdosti v tepelně neovlivněném základním materiálu. Vpichy 6 až 11 udávají tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti.

V nátavu narůstá tvrdost o 29 % oproti materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 3 a následně vyneseny do grafu na obrázku 29.

Tab. 3 Tvrdost ve vzorku nátavu TIG

Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7
Tvrdost HV5	131	136	136	136	145	158	169

Vpich č.	8	9	10	11	12	13	14
Tvrdost HV5	171	176	160	152	152	157	167



Obr. 29 Průběh tvrdosti v nátavu TIG

6.3 Svařování plazmou

Plazmou byly svařeny tři vzorky hořákem PJB 150 o různých průměrech trysky. Použité průměry trysky $\varnothing = 2,4; 1,6$ a $1,2$ mm. Zdrojem tepelné energie je MIG-O-MAT plasma JET 150 (obr. 30).

Místo svaru bylo chráněno plynovou clonou z čistého argonu.

6.3.1 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 2,4$ mm

Jako největší průměr trysky byl zvolen rozměr 2,4 mm. U tohoto vzorku je proveden nejen rozbor makrostruktury, ale také rozbor mikrostruktury. Zejména pro zjištění, zda nevznikají nežádoucí struktury nebo nedochází k segregaci sloučenin na hranici zrn během svařování.

Parametry svařování

Svařovací proud:	$I = 100$ A.
Svařovací napětí:	$U = 25$ V.
Rychlost svařování:	$v_s = 25$ cm·min ⁻¹ , $v_s = 4,17$ mm·s ⁻¹ .
Průtoky plynu:	$v_p = 0,7$ l·min ⁻¹ .
Tepelná účinnost přenosu tepla:	$\eta = 0,7$.



Obr. 30 Plazmová jednotka MIG-O-MAT plasma JET 150 [21]

Výpočet vneseného tepla

$$Q_{s\varnothing 2,4} = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$
$$Q_{s\varnothing 2,4} = 0,7 \frac{25 \cdot 100}{10^3 \cdot 4,17}$$
$$Q_{s\varnothing 2,4} = 0,419 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

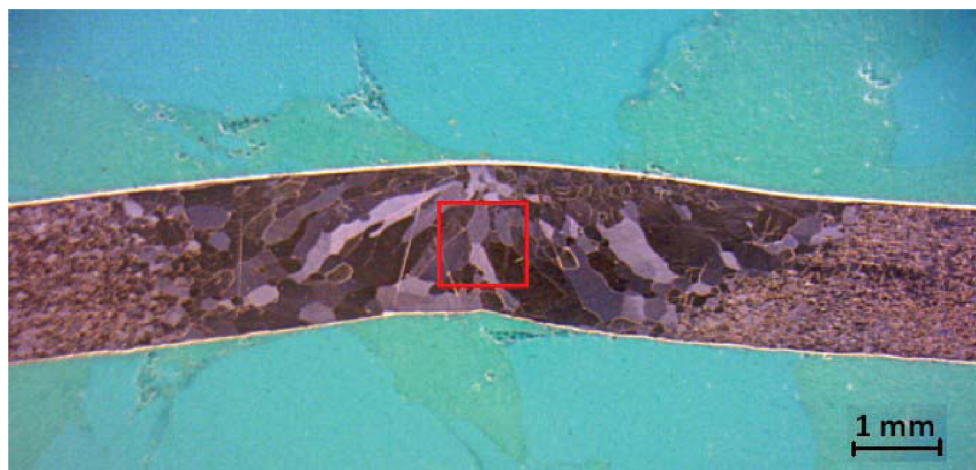
Vyhodnocení výsledné struktury ve svarovém spoji

Na snímku makrostruktury (obr. 31) jsou ve střední části výrazně středově orientovaná velká zrna.

Do kontrolního rámečku zasahuje 21 zrn.

Délka zrn je cca 1 mm a šířka až 0,5 mm.

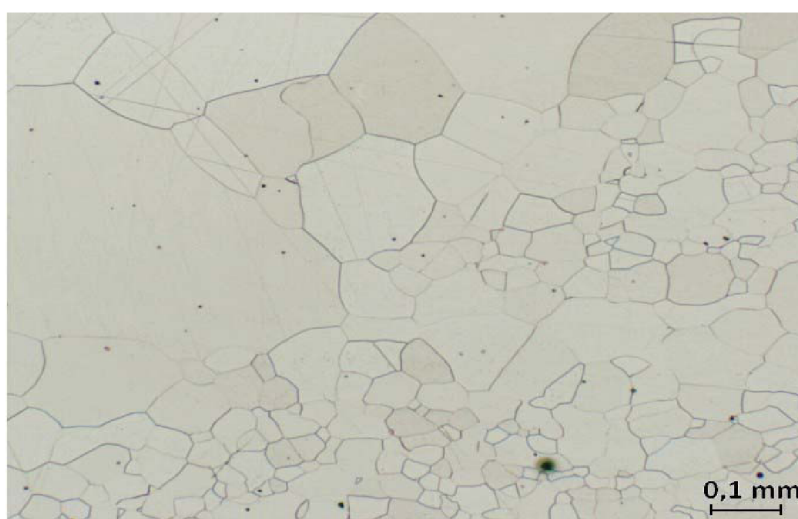
Na obrázku 32 je znázorněn přechod ze svarového kovu přes úzkou TOO do základního materiálu. Tepelně ovlivněná oblast měří přibližně 0,6 mm.



Obr. 31 Makrostruktura oceli X2CrTi12 svařované plazmou Ø 2,4 mm



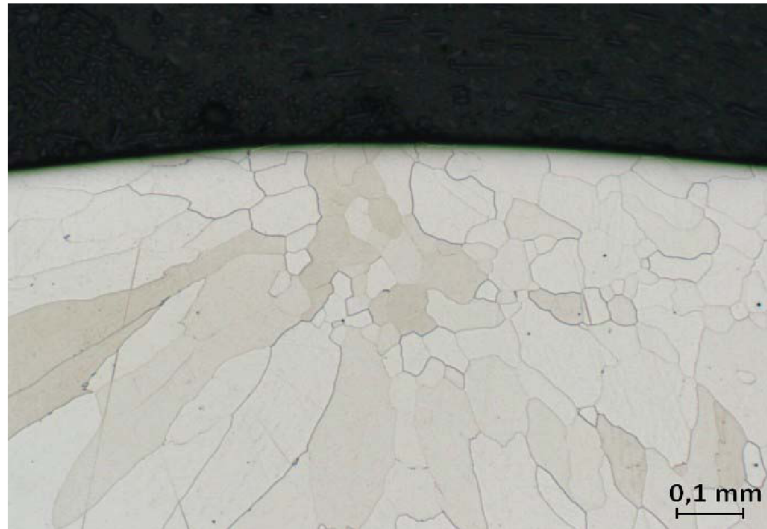
Obr. 32 Přechod svarového kovu přes TOO do základního materiálu



Obr. 33 Mikrostruktura přechodu mezi svarem, TOO a základním materiálem

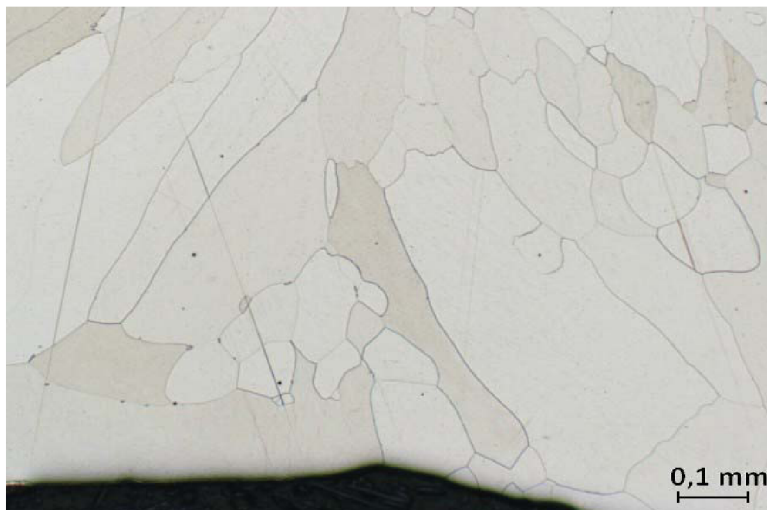
Mikrostruktura na obrázku 33 zobrazuje stejnou oblast jako obrázek 32 výše. Je zde vidět, že ve svaru ani v TOO nevznikají žádné nežádoucí struktury ani nedochází k segregaci sloučenin po hranicích zrn.

Na obrázku 34 je pohled na mikrostrukturu povrchové vrstvy svarového kovu. V této části se mezi rozměrnými zrny, vlivem rychlého ochlazení tavné lázně, vytvořili i jemnější zrna.



Obr. 34 Mikrostruktura povrchové vrstvy svarového kovu

Mikrostruktura kořenové části svaru je na obrázku 35 , kde jsou převážně velmi rozměrná zrna. Stejně jako ve střední části svarového kovu.



Obr. 35 Mikrostruktura kořenové části svarového kovu

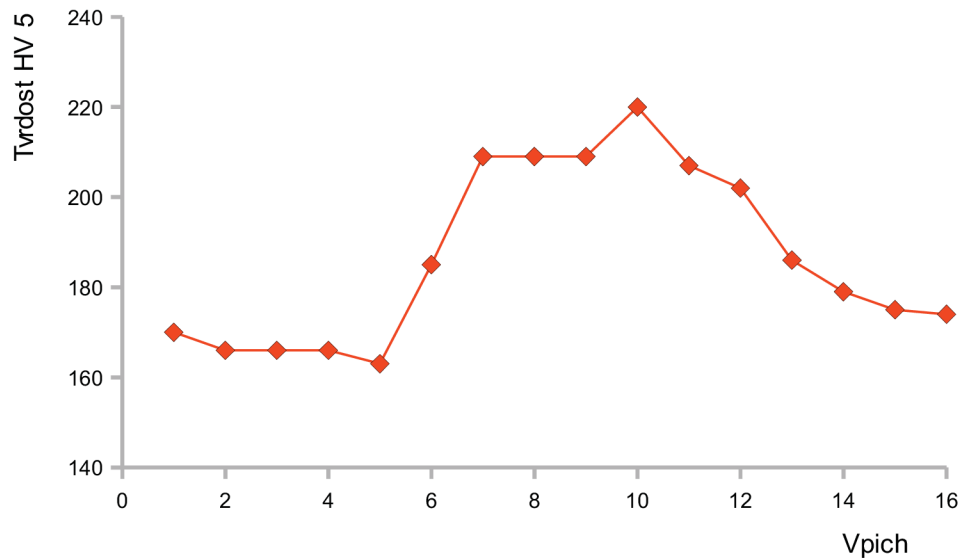
Měření tvrdosti

Tvrdost je měřena v kolmém řezu svarem (obr. 31). Vpichy číslo 1 až 5 a 14 až 16 odpovídají tvrdosti v tepelně neovlivněném základním materiálu. Vpichy 6 až 13 udávají tvrdost v oblasti svaru.

Ve svaru výrazně narůstá tvrdost a to až o 35 % oproti základnímu materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4 a následně vyneseny do grafu na obrázku 36.

Tab. 4 Tvrdost ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 2,4$ mm

Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7	8
Tvrdost HV5	170	166	166	166	163	185	209	209
Vpich č.	9	10	11	12	13	14	15	16
Tvrdost HV5	209	220	207	202	186	179	175	174



Obr. 36 Průběh tvrdosti ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 2,4$ mm

6.3.2 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 1,6$ mm

Průměr 1,6 mm je střední hodnota mezi zvolenými průměry trysek plazmového hořáku, použitých v tomto experimentu.

Parametry svařování

Svařovací proud:	$I = 55$ A.
Svařovací napětí:	$U = 16$ V.
Rychlost svařování:	$v_s = 38$ cm·min ⁻¹ , $v_s = 6,33$ mm·s ⁻¹ .
Průtok plynu:	$v_p = 0,5$ l·min ⁻¹ .
Tepelná účinnost přenosu tepla:	$\eta = 0,7$.

Výpočet vneseného tepla

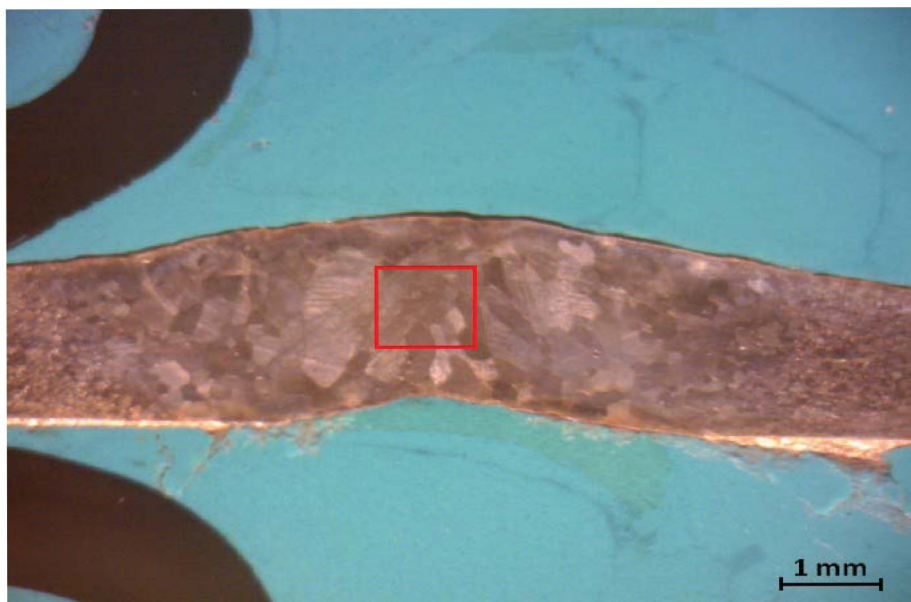
$$Q_{s\varnothing 1,6} = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$

$$Q_{s\varnothing 1,6} = 0,7 \frac{16 \cdot 55}{10^3 \cdot 6,33}$$

$$\underline{Q_{s\varnothing 1,6} = 0,097 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

Použitím menšího průměru trysky se výrazně snížilo vnesené teplo o 0,322 kJ·mm⁻¹ což je téměř 77 %.

Vyhodnocení výsledné struktury ve svarovém spoji



Obr. 37 Makrostruktura oceli X2CrTi12 svařované plazmou $\varnothing 1,6$ mm

Na snímku makrostruktury svařené plazmou o průměru trysky 1,6 mm (obr. 37) jsou vidět menší zrna a tedy jemnozrnější struktura. Oproti obrázku 31 u svaru svařného tryskou průměru 2,4 mm.

Je zde také výraznější TOO o velikosti přibližně 1 mm.

Do kontrolního rámečku v tomto případě zasahuje 29 zrn.

Zrna jsou přibližně délky 0,8 mm a šířky 0,3 mm.

Měření tvrdosti

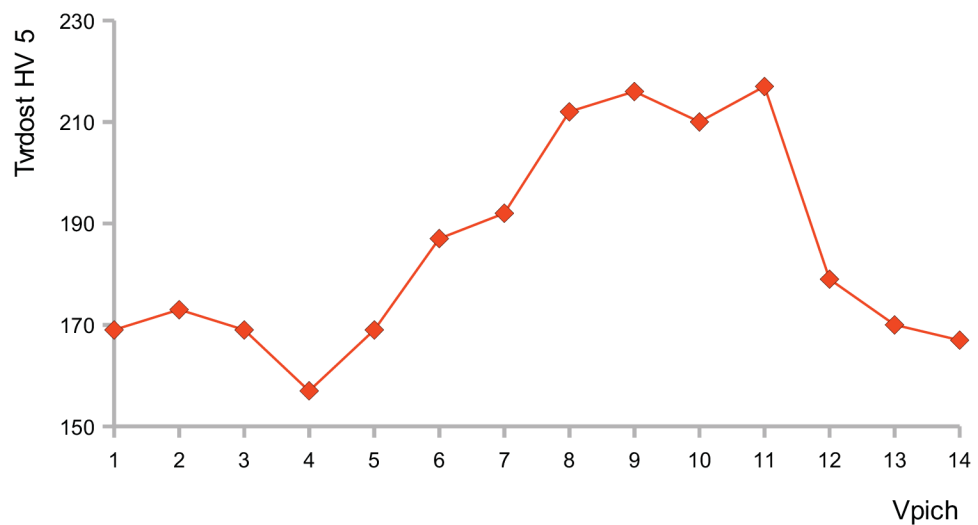
Tvrdot je měřena v kolmém řezu svarem na obrázku 37. Vpichy číslo 1 až 5 a 12 až 14 odpovídají tvrdosti v tepelně neovlivněném základním materiálu. Vpichy 6 až 11 udávají tvrdost ve svaru.

Ve svarovém kovu narůstá tvrdost o 28 % oproti materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5 a následně vyneseny do grafu na obrázku 38.

Tab. 5 Tvrdot ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 1,6$ mm

Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7
Tvrdot HV5	169	173	169	157	169	187	192

Vpich č.	8	9	10	11	12	13	14
Tvrdot HV5	212	216	210	217	179	170	167



Obr. 38 Průběh tvrdosti ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 1,6$ mm

6.3.3 Svařování plazmou, tryska $\varnothing = 1,2$ mm

Jako nejmenší rozměr trysky plazmového hořáku byl zvolen průměr 1,2 mm. Očekává se zde další snížení vneseného tepla i zjemnění struktury.

Parametry svařování

Svařovací proud:	$I = 37$ A.
Svařovací napětí:	$U = 12$ V.
Rychlost svařování:	$v_s = 14$ cm·min ⁻¹ , $v_s = 2,33$ mm·s ⁻¹ .
Průtok plynu:	$v_p = 0,3$ l·min ⁻¹ .
Tepelná účinnost přenosu tepla:	$\eta = 0,7$.

Výpočet vneseného tepla

$$Q_{s\varnothing 1,6} = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s}$$

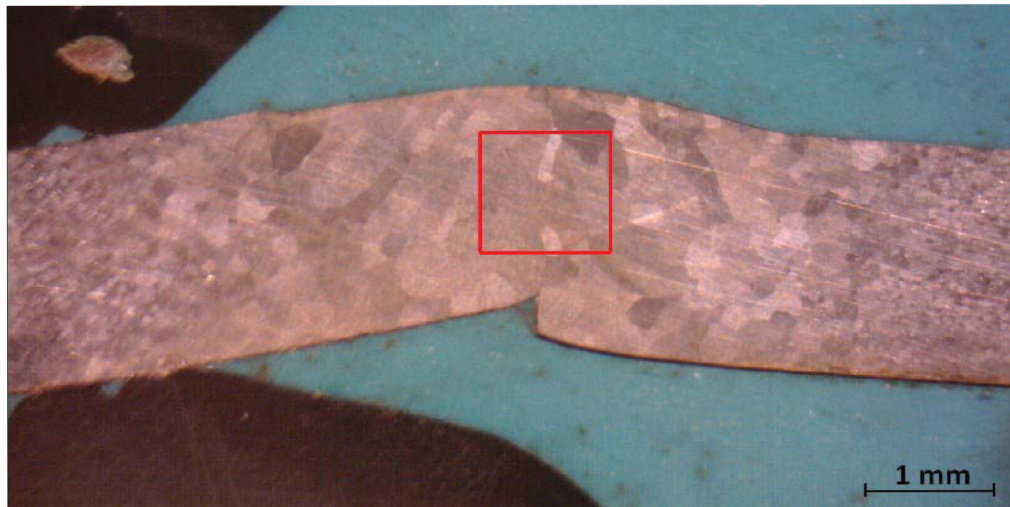
$$Q_{s\varnothing 1,6} = 0,7 \frac{12 \cdot 37}{10^3 \cdot 2,33}$$

$$\underline{Q_{s\varnothing 1,6} = 0,133 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

V tomto případě došlo k nárůstu vneseného tepla o 0,036 kJ·mm⁻¹ (37 %) oproti průměru trysky 1,6 mm a k poklesu o 0,286 kJ·mm⁻¹ (68 %) oproti průměru trysky 2,4 mm.

Množství vneseného tepla je zde výrazně ovlivněno nižší svařovací rychlostí.

Vyhodnocení výsledné struktury ve svarovém spoji



Obr. 39 Makrostruktura oceli X2CrTi12 svařované plazmou $\varnothing 1,2$ mm

Makrostruktura na obrázku 39 je poměrně jemnozrná. Tepelně ovlivněná oblast je zde přibližně 0,7 mm.

V tomto případě do kontrolního rámečku zasahuje 26 zrn.

Zrna jsou přibližně délky 0,5 mm a šířky 0,2 mm.

Měření tvrdosti

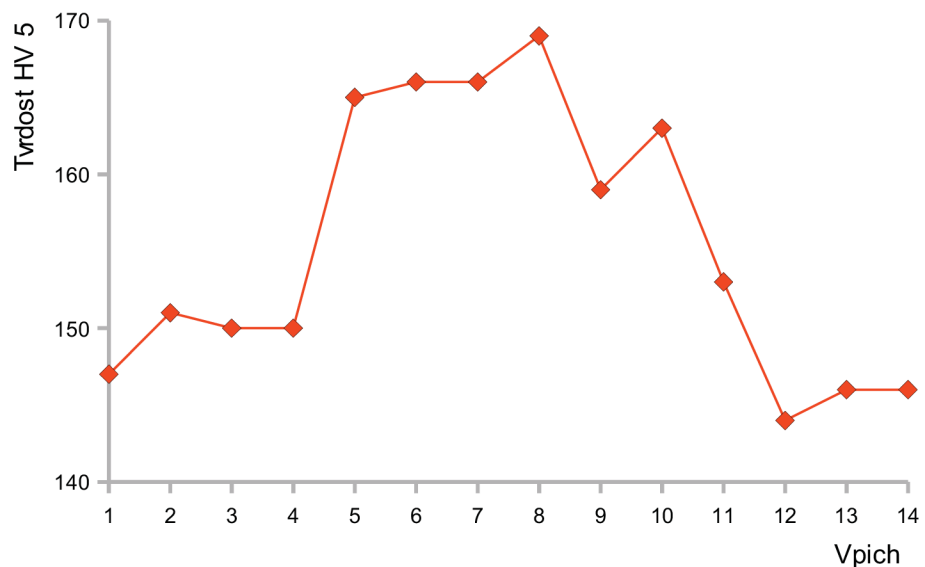
Tvrдость je měřena v kolmém řezu svarem na obrázku 39. Vpichy číslo 1 až 4 a 12 až 14 odpovídají tvrdosti v tepelně neovlivněném základním materiálu. Vpichy 5 až 11 udávají tvrdost v oblasti svaru.

Ve svarovém kovu narůstá tvrdost pouze o 15 % oproti základnímu materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 6 a následně vyneseny do grafu na obrázku 40.

Tab. 6 Tvrđost ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 1,2 \text{ mm}$

Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7
Tvrđost HV5	147	151	150	150	165	166	166

Vpich č.	8	9	10	11	12	13	14
Tvrđost HV5	169	159	163	153	144	146	146



Obr. 40 Průběh tvrdosti ve vzorku svařeném plazmou, tryska $\varnothing = 1,6 \text{ mm}$

6.4 Svařování laserem

Poslední zkoušenou metodou je svařování laserem. Vzorek je svařen pomocí vláknového laseru o výkonu 1 200 W. Zde se očekává nejméně vneseného tepla, nejmenší svarová housenka i minimální TOO. Protože laserový paprsek je soustředěn jen na úzkou oblast materiálu.

Parametry svařování

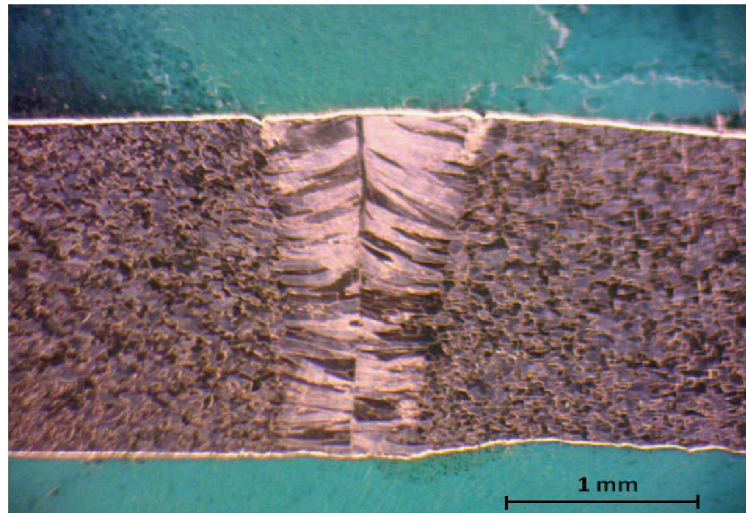
Výkon laseru:	$P = 1\,200\text{ W}$,
Rychlost svařování:	$v_s = 1\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,
	$v_s = 16,6\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,
Tepelná účinnost přenosu tepla:	$\eta = 0,65$.

Výpočet vneseného tepla

$$Q_{\text{laser}} = \eta \frac{P}{10^3 \cdot v_s}$$
$$Q_{\text{laser}} = 0,65 \frac{1200}{10^3 \cdot 16,6}$$
$$\underline{Q_{\text{laser}} = 0,047\text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}}$$

Výpočtem se potvrdilo, že do svaru je přivedeno nejméně vneseného tepla ze všech porovnávaných metod.

Vyhodnocení výsledné struktury ve svarovém spoji



Obr. 41 Makrostruktura oceli X2CrTi12 svařované laserem.

Na obrázku 41 je vidět velmi úzký svar. Ve střední části má svar šířku přibližně 0,8 mm. Na rozdíl od svaru svařeného plazmou s průměrem trysky 2,4 mm, kde ve střední části svar měří přibližně 6,9 mm.

Není zde patrná žádná tepelně ovlivněná oblast.

Zrna mají délku cca od 0,15 do 0,4 mm a šířku cca od 0,03 do 0,07 mm.

Na obrázcích 42 a 43 jsou znázorněny mikrostruktury laserového svaru. Na kterých je dobře vidět osové uložení zrn. Na obrázku 43 je také vidět mírné zúžení svaru.



Obr. 42 Mikrostruktura povrchové vrstvy svarového kovu svařené laserem



Obr. 43 Mikrostruktura kořenové vrstvy svarového kovu svařené laserem

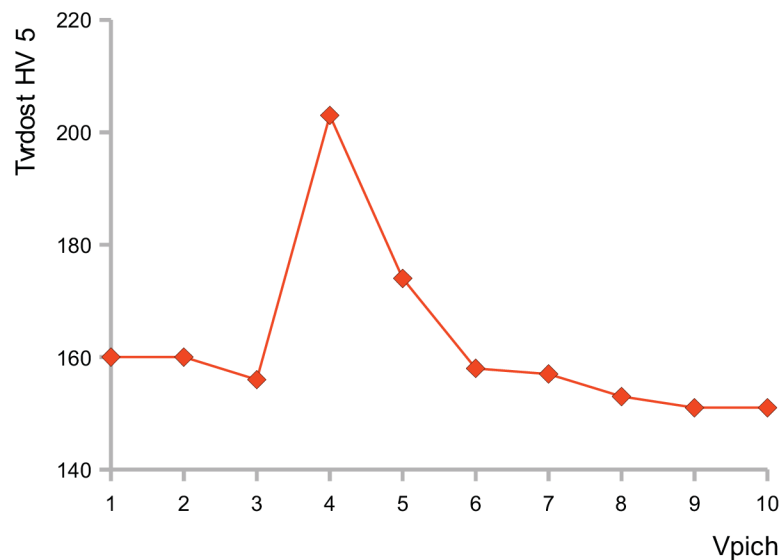
Měření tvrdosti

Tvrdost je měřena v kolmém řezu svarem na obrázku 41. Vpichy číslo 1 až 3 a 6 až 10 odpovídají tvrdosti v tepelně neovlivněném základním materiálu. Pouze vpichy 4 a 5 udávají tvrdost v oblasti svaru.

Ve svaru narůstá tvrdost o 31 % oproti základnímu materiálu, který nebyl tepelně ovlivněn. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7 a následně vyneseny do grafu na obrázku 44.

Tab. 7 Tvrdost ve vzorku svařeném laserem

Vpich č.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tvrdost HV5	160	160	156	203	174	158	157	153	151	151



Obr. 44 Průběh tvrdosti ve vzorku svařeném laserem

6.5 Vyhodnocení experimentu

Výsledky z experimentálního měření jsou pro lepší přehlednost seřazeny do tabulky 8.

Tab. 8 Srovnání výsledků dosažených experimentem

Použitá metoda svařování	Množství vneseného tepla Q_s [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$]	Počet zrn SK v měřené oblasti	Max. tvrdost HV5	Nárůst tvrdosti [%]
TIG	0,216	34	176	29
Plazma, tryska $\varnothing = 2,4$ mm	0,419	21	220	32
Plazma, tryska $\varnothing = 1,6$ mm	0,097	29	217	28
Plazma, tryska $\varnothing = 1,2$ mm	0,133	26	169	15
Laser	0,047	~	203	31

Nejméně vneseného tepla do svaru je i podle předpokladů přivedeno při svařování laserem. Na druhém místě je svařování plazmou s průměrem trysky 1,6 mm.

Svařováním pomocí laseru je vneseno do místa svaru až 11x méně tepla než při svařování plazmou s průměrem trysky 2,4 mm, kde bylo přivedeno nejvíce vneseného tepla ze všech zkoušených metod. Výsledná struktura má největší zrna i naměřená tvrdost je zde nejvyšší. Tvrdost se zvýšila až o 32 % oproti tepelně neovlivněné oblasti. Laser zaujímá druhou pozici s nejvyšším nárůstem tvrdosti s 31 %.

Nejmenší nárůst tvrdosti a to pouhých 15 % je zaznamenáno u svaru svařeného plazmou s průměrem trysky 1,2 mm.

Vyznačená čtvercová oblast na vzorcích je určena k posouzení jemnozrnnosti struktury.

U svaru laserem se nedá struktura jednoznačně porovnat s ostatními metodami kvůli velmi úzkému svaru. Počet zrn v měřené oblasti by byl zatížen velkou odchylkou oproti ostatním metodám. Značnou část měřené oblasti by totiž zaujímala původní zrna.

Podle počtu zrn zasahujících do vyznačené oblasti lze říct, že nejjemnozrnnější struktura je u nátavu metodou TIG. Zde však došlo pouze k ohřátí základního materiálu. Ze svařovaných vzorků má nejjemnozrnnější strukturu vzorek svařený plazmou s tryskou o průměru 1,6mm.

Nejmenší zrna jsou ve svarovém kovu vytvořeném pomocí laseru. Na druhém místě je plazma s průměrem trysky 1,2 mm a nátav metodou TIG. Největší zrna jsou u svaru plazmou s průměrem trysky 2,4 mm.

Porovnáním všech výše uvedených parametrů vychází, že celkově nejlepších hodnot se dosáhlo při svařování plazmou s průměrem trysky 1,2 mm. Z pohledu nejmenšího množství vneseného tepla je sice až na třetím místě a vytvořila se až druhá nejmenší zrna, ale nárůst tvrdosti je zde absolutně nejnižší. Také z ekonomického hlediska jsou pořizovací a provozní náklady pro svařování plazmou výhodnější než při svařování laserem, kterým je vneseno nejméně měrného tepla a vznikla nejmenší zrna.

Jednoznačně nejhorších výsledků se dosáhlo při svařování plazmou o průměru trysky 2,4 mm. Je zde nejvíce vneseného tepla, nejvyšší nárůst tvrdosti a i zrna jsou zde nejrozměrnější.

7 ZÁVĚRY

Úkolem této diplomové práce bylo zaměřit se na metody, kterými lze regulovat množství vneseného tepla do svaru. V současnosti se daleko lépe svařují materiály větších tloušťek. Svařování menších tloušťek je obtížnější především kvůli velkému množství vneseného tepla přivedeného do svaru. Proto jsou velmi žádané technologie, které dokáží efektivně a přesně regulovat měrné vnesené teplo.

Pro experimentální ověření je zvolen materiál náchylný na přehřátí. Jedná se o feritickou korozivzdornou ocel X2CrTi12 tloušťky 2 mm. Podle vybraného materiálu jsou odvozeny použité metody svařování a to metoda TIG, plazma s různými průměry trysek a svařování laserem.

Experiment je zaměřen na množství vneseného tepla, velikost zrna, jemnozrnnost struktury a tvrdost. Nejhorších výsledků se dosáhlo svařováním plazmou o průměru trysky 2,4 mm. Je zde vneseno nejvíce měrného tepla, tvrdost se nejvíce zvýšila a ve svarovém kovu se vytvořila největší zrna. Určení nejlepších výsledků již není tak jednoznačné. Porovnáním všech zkoumaných parametrů dopadl nejlépe svar pomocí plazmy o průměru trysky 1,2 mm. I přes poměrně větší množství vneseného tepla má malá zrna a tvoří jemnozrnnou strukturu. Velkou výhodou tohoto způsobu svařování je minimální nárůst tvrdosti ve svarovém kovu. Nejméně vneseného tepla a nejmenší zrna jsou však u svaru laserem, kde ale výrazně narostla tvrdost. Z ekonomického hlediska je také výhodnější svařování plazmou než laserem.

Výběr nejvhodnější technologie pro regulaci vneseného tepla je závislý na mnoha faktorech. Nejzásadnějším faktorem je ovšem druh svařovaného materiálu.

V práci je také uvedeno několik dalších metod pro regulaci množství vneseného tepla, které byly vyvinuty samotnými výrobci svařovacích zdrojů.

Seznam použitých zdrojů [22]

1. MÁŠOVÁ, Pavla. *Možnosti regulace tepla vneseného do svaru při MIG/MAG svařování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 36 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
2. ŽÁK, Jan. *Teorie svařování*. 1. vyd. Brno: VUT, 1988. 142 s.
3. KUNCIPÁL, J., et al. *Teorie svařování*. Redaktor Dr. Vladimír Pešl. 1. vyd. Praha: SNTL/ALFA, 1986. 272 s.
4. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnosti: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, leden 2001. 296 s. ISBN 80-85771-85-3.
5. LAUDIEN, U., et al. *Fachbuchreihe Schweisstechnik: DVS - Gefügerichtreihe Stahl*. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweisstechnik, 1979. 264 s. ISBN 3 87155 079 5.
6. PTÁČEK, Luděk; a kolektiv. *Nauka o materiálu II.* 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 398 s. ISBN 80-7204-248-3.
7. PODRABSKÝ, Tomáš. *Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli*. Brno: VUT, 2009. 42 s. - studijní podklady.
8. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: Učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. Ostrava: Zeross, 2001. 398 s. ISBN 80-85771-81-0.
9. HALA, Petr. *Svařitelnost kovů*. Brno: SIAD, 2005. 125 s.
10. Specialita určená pro vysoké nároky: Plazmové svařování v kompletní dodávce od firmy Fronius. *Weld+vision* [online]. 2004, 1, [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbc/SID-423545-806CE10A/fronius_mexico/4000062140_weld_vision_Nr12_cz.pdf>.
11. *Air-liquide* [online]. 2007 [cit. 2011-04-11]. Laserové svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.airliquide.cz/file/otherelement/pj/laserove-svarovani49120.pdf>>.
12. ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov: tavíci sa elektródou*. Bratislava: ETERNA PRESS s.r.o., 2003. 204 s. ISBN 80-968359-5-5.
13. DUCHÁŇ, Martin. *Trade Weld* [online]. 2008 [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.tradeweld.cz/files/1/FastROOT%20popis.pdf>>.
14. *CZ WELD* [online]. 2008 [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <http://www.czweld.cz/index_clanky.htm>.
15. *FRONIUS Česká republika s.r.o.* [online]. 2008-2009 [cit. 2011-04-11]. Dostupný z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/SID-B414131C-05F46BDD/fronius_ceska_republika/hs.xsl/29_3917.htm>.
16. GOECKE, Sven. *CZ_EWM_coldArc_welding.pdf. b. m.* 2005-10-12. 15 s.
17. *Processing talk* [online]. 15.12.2009 [cit. 2011-02-20]. Kemppi's Wise software aids productive welding. Dostupné z WWW: <<http://www.processingtalk.com/news/kep/kep127.html>>.

18. *Trade Weld* [online]. 2009 [cit. 2011-02-20]. Kemppi představuje produkty Wise pro dokonalejší svařování. Dostupné z WWW: <<http://www.tradeweld.cz/files/1/WISE%20software.pdf>>.
19. *Kemppi: The Joy of Welding* [online]. 2009 [cit. 2011-02-20]. Solutions > Wise welding processes and functions. Dostupné z WWW: <http://www.kemppi.com/inet/kemppi/en/akp.nsf/frameset/Frameset?OpenDocument&left=/inet/kemppi/en/akp.nsf/WEB_Nav?OpenView&navcat=Solutions&main=/inet/kemppi/kit.nsf/BrowseProducts?openview&restricttcategory=Solutions__Wise+welding+processes>.
20. *Fronius* [online]. 2004 [cit. 2011-04-15]. Dostupné z WWW: <http://www.fronius.com/cps/rde/xbcr/SID-B44179C2-EED4934A/fronius_istanbul/mw_tt2600_3000_fuzzy_cel_gb.pdf>.
21. *MIG-O-MAT* [online]. b. r. [cit. 2011-04-24]. Microplasma and plasma welding units / Technical Data. Dostupné z WWW: <<http://www.mig-o-mat.com/en/products/welding/plasmaJET250.html>>.
22. *Citace.com: verze 2.0* [online]. 2004-2011 [cit. 2011-05-09]. Dostupné z WWW: <citace.com>.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Označení	Legenda	Jednotky
A	Austenit	
APT	Svařování pod tavidlem	
A ₅	Tažnost ve vzdálenosti 5 mm	[%]
A ₅₀	Tažnost ve vzdálenosti 50 mm	[%]
A ₈₀	Tažnost ve vzdálenosti 80 mm	[%]
A _{c3}	Teplota začátku překrystalizace austenitu na ferit	[°C]
CET	Uhlíkový ekvivalent	[%]
CMT	Cold metal transfer	
Cr _E	Chromový ekvivalent	[%]
ESS	Elektrostruskové svařování	
F	Ferit	
H	Tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
GMAW	Gas metal arc welding – obloukové svařování v plynové atmosféře	
GTAW	Gas tungsten arc welding – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	
HRC	Tvrдость podle Rockwella (měřená pomocí diamantového jehlanu)	
HV5	Tvrđosti podle Vickerse, při zatížení silou 49,03 N	
HV10	Tvrđosti podle Vickerse, při zatížení silou 980,7 N	
I	Proud	[A]
I _b	Proud základu	[A]
I _k	Kritická hodnota proudu	[A]
I _p	Proud impulzu	[A]
I _z	Střední hodnota proudu	[A]
KCV	Vrubová houževnatost	[J·cm ⁻²]
M	Martenzit	
MAG	Metal aktiv gas – obloukové svařování v aktivní atmosféře	
MIG	Metal inert gas – obloukové svařování v inertní atmosféře	
MMAW	Manual metal arc welding - ruční svařování obalenou elektrodou	
Ni _E	Niklový ekvivalent	[%]
Obr.	Obrázek	
P	Výkon laseru	[W]
PG	Svařovací poloha – shora dolů	
ROE	Ruční svařování obalenou elektrodou	
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p 0,2}	Mez kluzu	[MPa]
Q _{cel}	Celková energie oblouku	[J]
Q _s	Specifické vnesené teplo	[kJ·mm ⁻¹]
Q _{s Ø 1,2}	Specifické vnesené teplo při svařování plazmou, průměr trysky 1,2mm	[kJ·mm ⁻¹]

$Q_{s \text{ } \varnothing 1,6}$	Specifické vnesené teplo při svařování plazmou, průměr trysky 1,6mm	[kJ·mm ⁻¹]
$Q_{s \text{ } \varnothing 2,4}$	Specifické vnesené teplo při svařování plazmou, průměr trysky 2,4 mm	[kJ·mm ⁻¹]
$Q_{s \text{ laser}}$	Specifické vnesené teplo při svařování laserem	[kJ·mm ⁻¹]
Q_{sv}	Energie vnesená do svarového spoje	[J]
$Q_{s \text{ TIG}}$	Specifické vnesené teplo při svařování TIG	[kJ·mm ⁻¹]
SAW	Submerget arc welding – svařování pod tavidlem	
S_n	Plocha příčného průřezu svarové housenky	[mm ²]
STT	Surface tension transfer	
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[s]
Tab.	Tabulka	
t_b	Čas trvání základu	[s]
TIG	Tungsten inert gas – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	
t_p	Čas trvání impulzu	[s]
T_t	Teplota transformace	[°C]
T_{trans}	Tranzitní teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
$v_{drát}$	Rychlost podávání drátu	[l·min ⁻¹]
v_p	Průtoky plynu	[mm·s ⁻¹]
v_r	Rychlost ochlazování	[°C·s ⁻¹]
v_s	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
WIG	Wolfram inert gas – svařování v plynové atmosféře wolframovou elektrodou	
x	Vzdálenost	[mm]
η	Teplená účinnost přenosu tepla	[-]
\varnothing	Průměr	[mm]
σ	Označení sigma fáze	