

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POROVNÁNÍ SVAŘOVÁNÍ MAG A PLAZMA

COMPARISON OF MAG AND PLASMA WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VERONIKA FŇUKALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROSLAV KUBÍČEK

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Veronika Fňukalová

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:

Porovnání svařování MAG a plazma

v anglickém jazyce:

Comparison of MAG and Plasma welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Vypracovat literární studii zaměřenou na problematiku svařování MAG, plazmou a vysokopevnostních ocelí.
2. Zpracovat návrh experimentu pro porovnání svařování MAG a plazmou vysokopevnostních ocelí.
3. Provést a vyhodnotit experimentální práci a zkoušky svažitelnosti vysokopevnostních ocelí.

Cíle diplomové práce:

Navrhnout a experimentem ověřit možnosti svařování vysokopevnostních ocelí metodou MAG - svařování tavící se elektrodou v aktivních plynech a plazmou. Provést měření tvrdosti ve svarových spojích a stanovit jejich pevnostní charakteristiky.

Seznam odborné literatury:

1. DVOŘÁK, M. a kol. Technologie II, 2vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7
2. BLAŠČÍK, F. a kol. Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvarovania, 1vyd. ALFA Bratislava 1988, 830s. ISBN 063-563-87
3. KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
4. KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
5. KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5
6. KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jaroslav Kubíček

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 12.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

FŇUKALOVÁ VERONIKA: Porovnání svařování MAG a plazma.

Diplomová práce se zabývá problematikou svařování vysokopevných a otěruvzdorných materiálů metodou MAG a plazma.

Na základě literární studie byla posouzena svařitelnost extrémně otěruvzdorné oceli CREUSABRO 8000. Byla navržena technologie svařování, parametry svařování a druh přídavného materiálu.

Experimentálně byly provedeny a vyhodnoceny zkoušky tvrdosti ve svarových spojích, tahové zkoušky, zkoušky lámavosti pro stanovení pevnostních charakteristik. Dále byla vyhodnocena makrostruktura a mikrostruktura.

V diplomové práci jsou dále uvedeny i další alternativy vysokopevných a otěruvzdorných ocelí.

ABSTRACT

FŇUKALOVÁ VERONIKA: Comparison of MAG and plasma welding.

My master's thesis describes questions of welding of high-firmed and high-abrasion resistant steels with welding processes MAG (Metal Active Gas) and plasma.

The weldability of CREUSABRO 8000 steel was passed judgement on, based on literary study of high-abrasion resistant steel question.

The technology, characteristics of welding, kind of additional material were proposed.

Tensile tests, brittleness tests for determination of strength characteristics and hardness tests of welding joints were implemented and analyzed experimentally.

Further were analyzed macrostructure and microstructure.

Other alternatives of high-firmed and abrasion resistant steels are part of my master's thesis.

Klíčová slova:

vysokopevná ocel

otěruvzdorná ocel

svařování

svařitelnost

MAG

plazma

Key words:

high-firmed steel

abrasion resistant steel

welding

weldability

MAG

plasma

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FŇUKALOVÁ, V. *Porovnání svařování MAG a plazma*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 93 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

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 27.5.2009

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavovi Kubíčkoví za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a také pracovníkům firmy Fronius.

OBSAH

Titulní list

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

1. ÚVOD	10
2. DEFINICE SVAŘOVÁNÍ	12
2.1 Vznik svarového spoje	12
3. ÚVOD DO SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM	14
4. OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU – MIG/MAG	16
4.1 Princip metody MIG/MAG	16
4.2 Použití a výsledky různých způsobů přenosu kovu	17
4.3 Výhody	19
4.4 Ochranné plyny	19
4.5 Přídavné materiály	22
4.6 Použití	23
5. PLAZMOVÉ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	24
5.1 Princip metody	24
5.2 Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním	27
5.3 Úprava svarových ploch	27
5.4 Výhody a použití	27
6. ÚVOD A VÝVOJOVÉ TRENDY VYSOKOVÝKONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ V OCHRANNÝCH ATMOSFÉRÁCH	28
7. LASERHYBRID	30
7.1 Přehled a vývoj	30
7.2 Oblasti použití	31
7.3 LaserHybrid – Tandem	31
8. TIMETWIN DIGITAL	33
8.1 Přehled a vývoj	33
8.2 Oblasti použití	34
9. PLOCHÝ DRÁT, DRÁTY VELKÝCH PRŮMĚRŮ	35
9.1 Přehled a vývoj	35
9.2 Oblasti použití	35

10. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST	36
10.1 Svařitelnost ocelí nelegovaných uhlíkových, uhlíkomanganových a mikrolegovaných	38
10.2 Svařitelnost nízkolegovaných a střednělegovaných ocelí	38
10.3 Nové typy vysokopevných a vysoce otěruvzdorných ocelí	39
10.3.1 Hlavní důvody aplikací vysokopevných konstrukčních ocelí HARDOX a WELDOX	39
10.3.2 Weldox	40
10.3.3 Hardox	41
10.3.4 Svařování materiálů HARDOX a WELDOX	41
10.3.4.1 Teplota výrobku během svařování	42
10.3.4.2 Dodatečné zpracování	44
10.3.4.3 Volba přídatného materiálu	45
11. EXPERIMENT	47
11.1 Základní materiál – porovnání materiálů	47
11.1.1 Volba základního materiálu – vysoce otěruvzdorná ocel CREUSABRO 8000	49
11.1.2 Svařování otěruvzdorné oceli – obecně	53
11.1.3 Svařování ocele Creusabro 8000	53
11.2 Návrh svařovacích zařízení, podmínek a parametrů svařování	55
11.2.1 Svařovací metoda MAG	55
11.2.2 Svařovací metoda plazma	61
11.3 Příprava vzorků na mechanické zkoušky – řezání vzduchovou plazmou	67
12. MECHANICKÉ ZKOUŠKY	69
12.1 Obecně – rozdělení	69
12.2 Zkouška tahem	69
12.3 Zkouška lámavosti	73
12.3.1 Zkouška lámavosti - obecně	73
12.3.2 Vlastní zkouška lámavosti	73
12.4 Zkoušky tvrdosti	77
12.4.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse – HV – obecně	77
12.4.2 Vlastní zkouška tvrdosti dle Vickerse – HV	77
13. SHRUTÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	85
14. ZÁVĚR	87

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

1. ÚVOD

Svařování patří do velké skupiny strojírenských technologií vedle obrábění, tváření, povrchových úprav a dalších významných technologií. Technologie svařování nezaujímá co do rozsahu největší objem mezi technologiemi, patří však mezi strojírenské technologie zpracovávající největší objem kovových materiálů a to jak materiálů tvářených, tak i materiálů litých.

V současné době nalézají v různých oborech jako jsou výroba ocelových konstrukcí, tlakových nádob a v automobilovém průmyslu kontinuální využití vysokopevné jemnozrnné oceli. Vývoj těchto ocelí s vysokou pevností podnítily požadavky konstruktérů na vysoké mechanické vlastnosti. Další významné oblasti pro využití vysokopevných a vysoce otěruvzdorných ocelí, kde se odolnost proti opotřebení očekává, jsou kamenolomy a lomy, hlubinné stavby (drtiče, mlýny, čelistové drtiče...), cementárny (pancéřování nádob, násypek atd.), metalurgie, zemědělské stroje, koksárny atd.

Odhadnout životnost ocelí v podmínkách abraze je velmi složité, nicméně opotřebení je způsobeno několika způsoby abraze, např. třecí, rázovou, abrazí ve štěrbině ... Typickým příkladem je korba nákladního automobilu (rázová abraze při nakládce, třecí při vykládce). Dalším nutným parametrem pro odhad životnosti je znalost vlastností otěruvzdorných materiálů a dále též musíme znát abrazivní médium.

Při použití vysokopevných konstrukčních ocelí místo klasické oceli si musíme uvědomit, že nelze počítat s úsporou nákladů na materiál, jelikož např. vysokopevná ocel o mezi kluzu 700 MPa je cca. 2x až 3x dražší než ocelový plech jakosti 11 523, který má poloviční mez kluzu (355 MPa). Např. při konstrukci jeřábu z vysokopevné oceli snížíme hmotnost zařízení, tím můžeme konstatovat úspory sekundárních nákladů, jako je třeba menší opotřebení komunikací, menší spotřeba pohonných hmot atd.

Převládajícím důvodem použití vysokopevných ocelí je potřeba snížit hmotnost z jiných důvodů než je úspora nákladů na materiál. Tyto důvody jsou dva. První je, že existuje omezení hmotnosti výrobku z hlediska manipulace, dopravy, legislativních předpisů..., přičemž jsou na tyto výrobky současně kladeny i značné nároky na nosnost, bezpečnost a odolnost proti zatížení.

Druhým důvodem je, že snížením hmotnosti dosáhneme zvýšení kapacity (nosnosti) zařízení.

I přesto, že bylo řečeno, že použití vysokopevných ocelí nedojde zas až tak k úsporám nákladů na materiál, může být ekonomické kritérium důvodem k použití těchto ocelí.

V případě, kdy zohledníme náklady na dělení, svařování, dopravu, nátěry, může být v některých případech použití těchto ocelí ekonomicky výhodné.

Zajímavým důvodem pro použití těchto ocelí je i jejich svařitelnost.

Vysokopevné oceli mají před sebou velkou perspektivu. Není však zřejmé, jak moc jsou schopny v budoucnu nahradit klasické oceli typu St37 a St52, avšak celosvětově roste jejich spotřeba rychleji než spotřeba klasických ocelí. Je také nutno si uvědomit, že spotřebované množství energie, množství vzniklého oxidu uhličitého a dalších nečistot jsou na výrobu 1 kg vysokopevné oceli v podstatě stejné jako na

výrobu 1 kg klasické oceli. Jeden kilogram klasické oceli může být přitom nahrazen např. půlkilogramem oceli vysokopevné.

Cílem diplomové práce je porovnání svařování MAG a plazma vysokopevných a otěruvzdorných ocelí, vyhodnocení experimentální práce a zkoušek svařitelnosti oceli CREUSABRO 8000 (ocel od firmy LEGA-INOX), tzn. měření tvrdosti ve svarových spojích a stanovení pevnostních charakteristik. Proč porovnání MAG a plazma? Jelikož při svařování plazmou se dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, dojde ke spolehlivému provaření kořene a lze svařovat střední tloušťky bez úkosu a to na jednu vrstvu, tzn. menší nebo žádné náklady na opracování hran pro úkosy.

2. DEFINICE SVAŘOVÁNÍ [2]

Svařování kovů a jejich slitin vznikají nerozebíratelná spojení pomocí soustředěného tepla, nebo tlaku, případně obojím a s použitím, nebo bez použití přídavného materiálu, stejného, či podobného chemického složení jako spojované materiály. Spojení nastane působením meziatomových sil, vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných plochách, které jsou v oblasti svařování v roztaveném nebo plastickém stavu.

Navarování kovů je obdoba svařování, kdy v omezeném prostoru dané součásti se nanáší přídavný materiál za účelem doplnění nebo zvětšení objemu součásti s cílem dosáhnout ochrany proti korozi, nebo zvýšení odolnosti proti opotřebení, případně z jiných důvodů.

Při tavném svařování může nebo nemusí být použitý přídavný materiál s tavicí teplotou stejnou nebo blízkou teplotě tavení základních materiálů.

Aby se kovy mohly spojit, vyžaduje většina svařovacích metod vytvoření vysoké lokální teploty. Typ zdroje ohřevu označuje často svařovací metodu, např. svařování plamenem, obloukové svařování. Jedním z hlavních problémů při svařování je, že kovy reagují s atmosférou rychleji, když stoupá jejich teplota. Metoda, jak chránit horký kov před atakem atmosféry, je druhým nejdůležitějším rozlišujícím znakem. Technika sahá od svařování pod tavidlem, které vytváří ochrannou strusku, až po svařování v ochranné atmosféře.

Některé metody byly vyvinuty pro velmi konkrétní aplikace, zatímco jiné jsou flexibilní a pokrývají široký sortiment svářečských prací. Ačkoliv se svařování užívá zásadně pro spojování stejných i nesejných kovových částí, užívá se stále více k opravám a renovacím opotřebovaných nebo poškozených součástek. Roste také počet aplikací pro "navarování" nových součástek, jejichž výsledkem je povrch odolný proti korozi, otěru, nárazu a opotřebení.

2.1 Vznik svarového spoje [2]

Svařování kovů a jejich slitin je definováno jako nerozebíratelná spojení s využitím tepelné, mechanické nebo radiční energie. Spojení nastane působením meziatomových sil a adhezních vazeb na aktivovaných kontaktních plochách způsobené teplem nebo tlakem. Pevné látky mohou mít různý typ vazby, která odpovídá různým typům rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány tak, aby potenciální energie krystalu byla co možná nejmenší. Základem vazby je mrak valenčních elektronů, které mohou volně přecházet od atomu k atomu. Ke kovové vazbě tedy dochází, pokud přitažlivé síly mezi kovovými ionty a elektronovým mrakem převyšují odpudivé síly elektronů v tomto mraku. Ionty jsou uspořádány podle přesně definovaného rozložení, podle něhož v pevných látkách existují mezi ionty síly přitažlivé a odpudivé.

Proces svařování vyžaduje aktivaci kontaktních ploch, tj. dodání energie aktivace pro překonání bariéry potenciální energie povrchových atomů.

Pro vznik svarového spoje je třeba dvoufázového procesu a to:

- I. fáze: rozvoj fyzikálního kontaktu (přiblížení svarových ploch na vzdálenost nutnou pro uplatnění interakcí)
- II. fáze: energetická interakce ukončující vznik spoje.

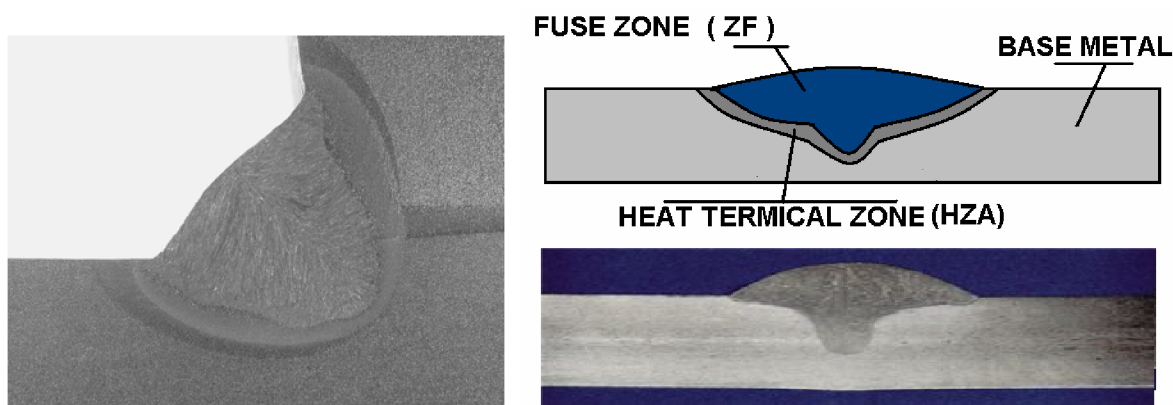
Pro svařování lze použít následující formy aktivační energie:

- a) termická aktivace
- b) pružné a plastické deformace – mechanická aktivace
- c) elektronové, fotonové nebo iontové ozáření – radiční aktivace

Všechny běžné metody svařování lze rozdělit na dvě velké skupiny: tavné svařování a tlakové svařování. U tavného svařování je vytvoření spoje dosaženo přívodem tepelné energie do oblasti svaru, kdy dochází k natavení základního, případně přídavného materiálu. Tekutá fáze je vázána na povrch tuhé fáze adhezními silami a při tuhnutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové mřížky. Rostou nová zrna a původní rozhraní zaniká.

Tlakové metody svařování jsou založeny na působení mechanické energie. Aktivaci povrchových atomů a makro nebo mikrodeformací se přiblíží spojované povrchy na vzdálenost působení meziatomových sil, přičemž vznikne vlastní spoj. U obou způsobů svařování je třeba překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch.

U tavných metod svařování je kolem roztavené části (svarový kov) pásmo, kde dosáhla teplota hodnoty překryštalizačních pochodů tzv. tepelně ovlivněná oblast (TOO).



Obr.: 1.1 Struktura svarového spoje [1]

ZF – svarový kov, BASE METAL – základní materiál, HZA – TOO (tepelně ovlivněná oblast)

3. ÚVOD DO SVAŘOVÁNÍ ELEKTRICKÝM OBLOUKEM [2], [4]

Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj, který hoří v prostředí ionizovaného plynu. Stabilně hoří za předpokladu napětí dostatečného pro ionizaci daného prostředí a proudu udržujícího plazma oblouku v ionizovaném stavu.

Charakteristické znaky oblouku jsou:

- 1) malý anodový úbytek napětí
- 2) malý potenciální rozdíl na elektrodách
- 3) proud řádově ampéry až tisíce ampér
- 4) velká proudová hustota katodové skvrny
- 5) intenzivní vyzařování světelného záření z elektrod i sloupce oblouku.
- 6) intenzivní vyzařování UV záření.

Fyzikální a metalurgické děje probíhají v oblouku velmi rychle, za vysokých teplot a jsou ovlivňovány:

- chemickým složením plazmatu, materiálem elektrod a částečně okolní atmosférou,
- geometrickým uspořádáním a tvarem elektrod,
- tepelnou vodivostí plazmatu, elektrody a základního materiálu.

Zapálení oblouku:

Zapálení oblouku probíhá při napětí naprázdno zdroje, které bývá obvykle vyšší než při ustáleném hoření oblouku. Velikost zápalného napětí ($U = 60 - 70 \text{ V}$) závisí na materiálu elektrod a ionizační schopnosti plynného prostředí.

Pro běžné metody svařování je charakteristický rozsah napětí na oblouku $U = 10 - 60 \text{ V}$ a svařovací proud v rozmezí $I = 10 - 2000 \text{ A}$.

Základní části elektrického oblouku

Sloupec elektrického oblouku:

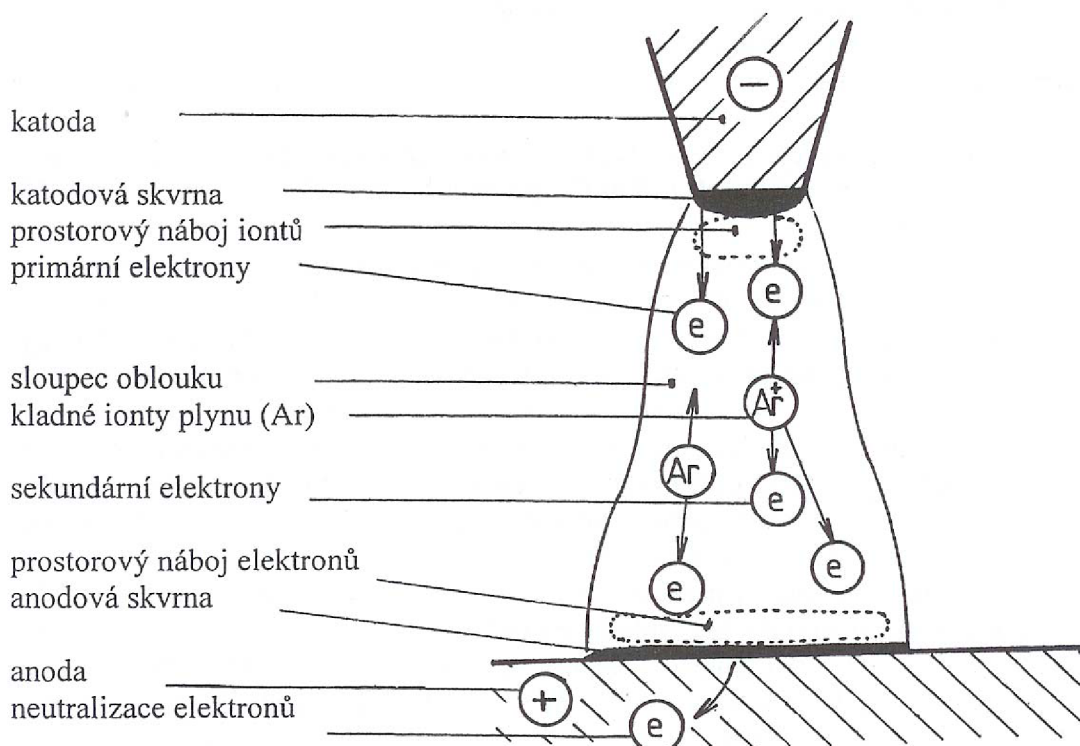
Má tvar mírně rozšiřujícího kužele směrem od katody k anodě. Elektrická vodivost sloupce je způsobena přítomností elektronů a anionů, které vznikají v důsledku termické ionizace. Plazma elektrických svařovacích oblouků je obvykle ve stavu „kvazineutrálním“, tj. v daném objemu a okamžiku předpokládáme stejný počet kladných a záporných částic. Disociační a ionizační energie složek plazmatu se v okrajových částech oblouku uvolňuje a technologicky využívá ke svařování. Maximální teploty jsou ve středu sloupce oblouku a odtud klesají k okraji. Při ručním svařování jsou teploty oblouku v rozmezí 4200°C až 5700°C , při svařování pod tavidlem 6200°C až 7600°C , v ochranných atmosférách při WIG 6200°C až 7800°C , u svařování MIG/MAG vysoká proudová hustota vytváří podmínky pro vznik slabě ionizovaného plazmatu. Teplota oblouku v oblasti plazmatu při svařování MIG dosahuje 12000°C až 15000°C , při MAG kolem 10000°C .

Katodová oblast:

V oblasti katody dochází k emisi elektronů, která se soustřeďuje do katodové skvrny. Elektrický oblouk se zužuje.

Anodová oblast:

Anodová oblast produkuje větší tepelný výkon než katodová oblast v důsledku neutralizace katodou emitovaných elektronů. Anodová skvrna má větší plochu.



Obr. 3.1 Části elektrického oblouku [2]

Přenos materiálu elektrickým obloukem:

Při přenosu nataveného materiálu elektrody do svarové lázně se uplatňuje složitý systém silového působení. Velikost, směr a výslednice sil jsou určovány svařovacími parametry – proudová hustota, průměr elektrody, polarita apod.

Gravitace působí podle polohy svařování, povrchové napětí udržuje kapku kovu na konci elektrody, jeho snížení zlepšuje přenos.

Druhy přenosu svarového kovu elektrickým obloukem:

Zkratový a kapkový přenos má střední délku oblouku a proudovou hustotu a používá se při svařování ve všech polohách, větších tluštěk v poloze vodorovné shora, při ručním svařování nízkolegovanými elektrodami.

Sprchový přenos má dlouhý oblouk a vysokou proudovou hustotu a používá se při svařování velkých tluštěk ve vodorovné poloze, vysokolegovaných ocelí, hliníku a mědi, v Ar.

Smáčivý proces ponořený oblouk má malou proudovou hustotu a krátký oblouk.

Používá se při svařování tenkých plechů v Ar, CO₂.

Impulsní proces má malou proudovou hustotu a je bez zkratů. Používá se při svařování tenkých plechů, vysokolegovaných ocelí, hliníku, v Ar. Vzniká dobrá kresba svaru při tomto procesu.

4. OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU V OCHRANNÉM PLYNU – MIG/MAG

Současný vývoj svařování v ochranných plynech je velmi důležitý. Metoda MIG (Metal Inert Gas) / MAG (Metal Activ Gas) nahrazuje ruční svařování obalenou elektrodou.

MIG/MAG metoda je nejpoužívanější technologie pro robotizované a mechanizované systémy.

Při obloukovém svařování v ochranných atmosférách hoří oblouk v atmosféře ochranného plynu, která chrání elektrodu, oblouk, odtavující se kapky přídavného materiálu a tavnou lázeň proti účinkům vzdušného kyslíku a dusíku. Jednotlivé technologie se rozlišují podle druhu elektrody a ochranného plynu.

4.1 Princip metody MIG/MAG [1], [2], [5]

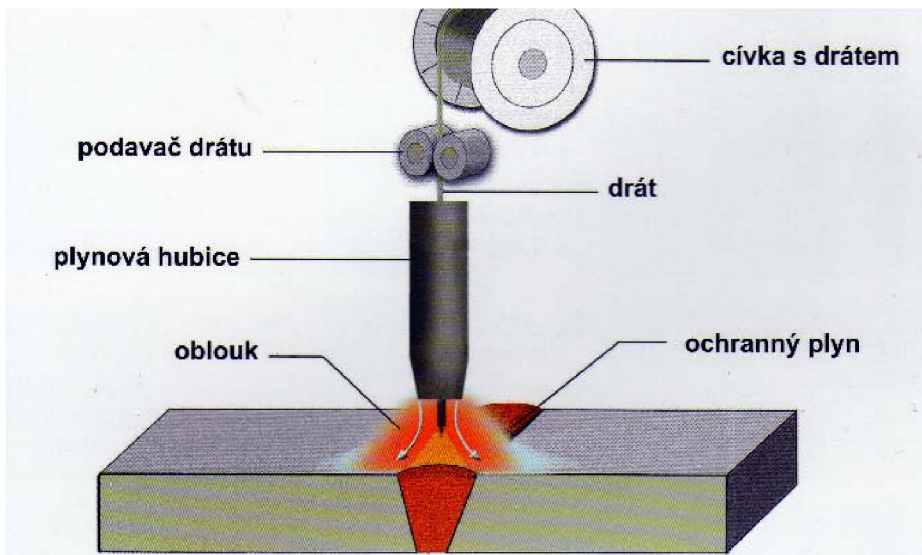
Svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu MAG patří vedle svařování obalenou elektrodou v celosvětovém měřítku k nejrozšířenějším metodám pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Svařování MIG v inertním plynu získává na důležitosti vlivem růstu objemu konstrukcí, staveb, lodí a dopravních prostředků vyráběných z hliníkových slitin. Hlavními důvody rozšíření metody MIG/MAG jsou: široký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace, velký sortiment vyráběných svařovacích zařízení a především významné výhody a charakteristiky uvedené metody svařování.

Svařování metodou MIG/MAG je založeno na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního nebo aktivního plynu. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená délka drátu byla co nejkratší. Drát je podáván podávacími kladkami umístěnými v podavači, vlastním hořáku, nebo kombinací obou systémů z cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Proudová hustota je u svařování MAG nejvyšší ze všech obloukových metod a dosahuje až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a svařovací proudy se pohybují od 30 A u svařování tenkých plechů drátem o průměru 0,6 – 0,8 mm, až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Charakter přenosu kovu obloukem závisí na parametrech svařování a ochranném plynu, přičemž běžný je zkratový pro tenké plechy a sprchový pro větší tloušťky plechů. U vysokých proudů se mění charakter přenosu kovu obloukem a vlivem elektromagnetických sil se dosahuje rotujícího oblouku. Teplota kapek se při MAG svařování pohybuje v rozmezí 1700 až 2500 °C a teplota tavné lázně se v závislosti na technologii, parametrech svařování, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C.

Ochrana oblouku a taveniny je zajištěna plynem nebo směsí plynů dodávaných speciální tryskou.

Díky vysokým proudům se svařovací rychlosti blíží hranici $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ochranná atmosféra se volí podle druhu svařovaného materiálu, ovlivňuje však také přenos kapek v oblouku, rozstřík, rozsah chemických reakcí a teplotní poměry v oblouku.



Obr. 4.1 Princip svařování tavící se elektrodou v inertním nebo aktivním plynu – MIG/MAG [5]

4.2 Použití a výsledky různých způsobů přenosu kovu [5]

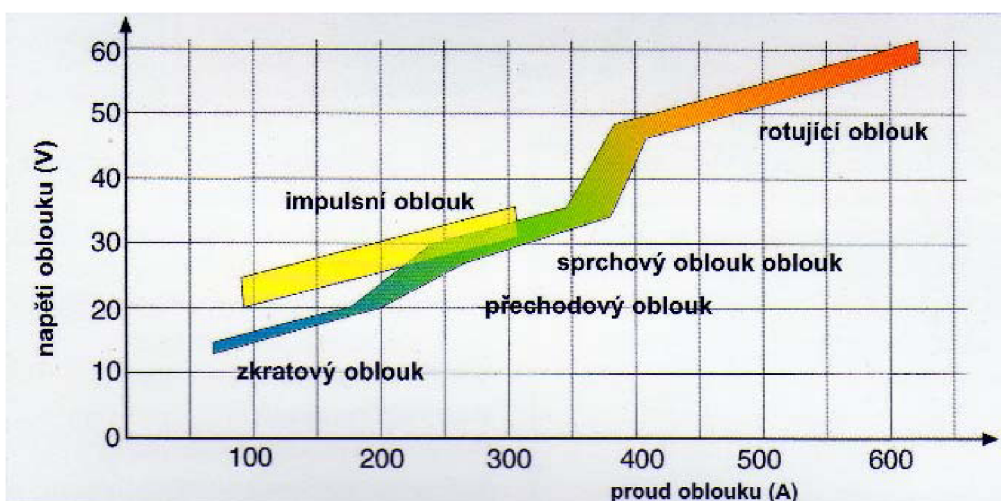
Přenos kapiček roztaveného kovu mezi přídavným materiálem a základním materiálem může probíhat různým způsobem, který podstatně závisí na plynu nebo ochranné směsi a elektrických parametrech oblouku.

Zkratový: používaný pro malé tloušťky, kořeny svarů a svařování v pozicích.

Přechodový oblouk: používaný pro střední tloušťky a hrubé svary, je charakteristický nestabilitou a velkým rozstříkem.

Sprchový oblouk: používá se pro velké tloušťky, vysoké výkony odtavení a vysokou rychlost svařování. Nadměrný přívod tepla může způsobit deformace a změnu mikrostruktury svarového spoje a tepelně ovlivněné oblasti.

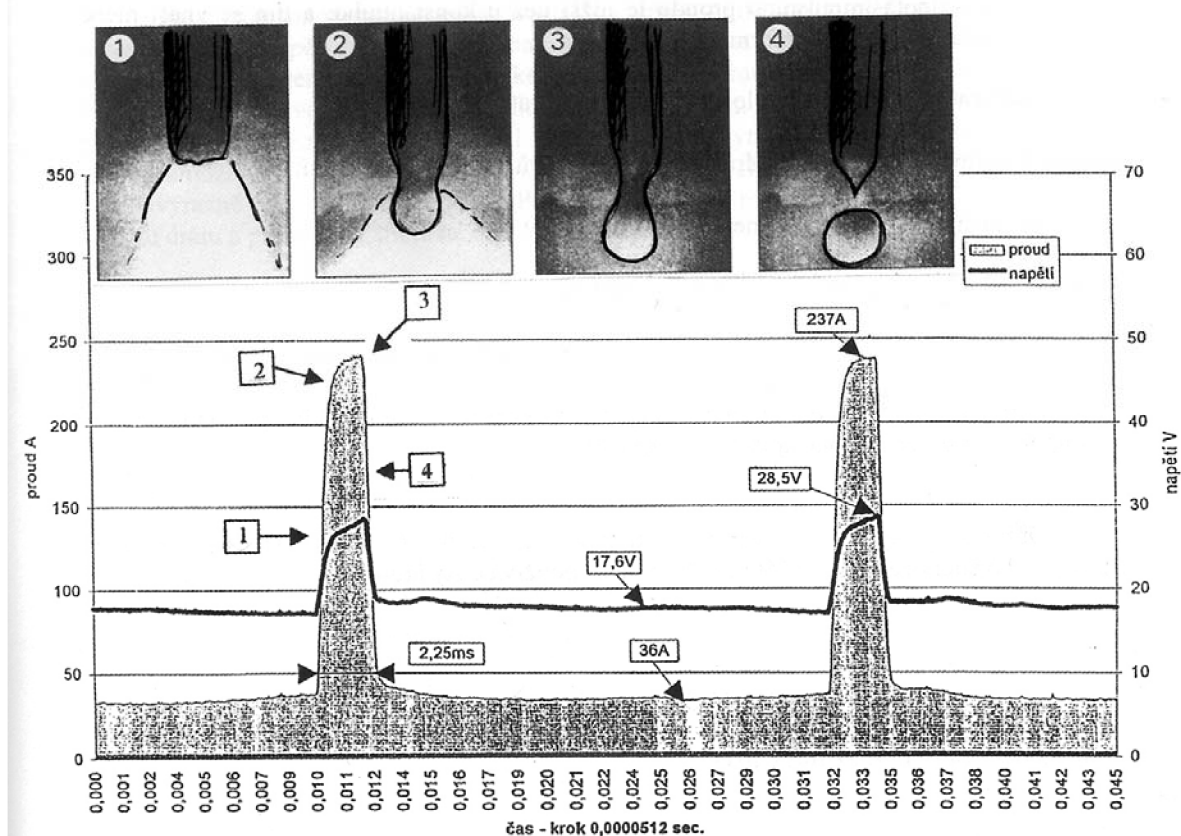
Impulsní oblouk: používá se pro střední výkony, doporučuje se pro svařování nerezavějících ocelí a lehkých slitin malé až střední tloušťky. U svařování oceli se dosahuje optimálních parametrů se směsí argon-kyslík-CO₂, zatímco při ochraně samotným CO₂ je nepoužitelný.



Obr. 4.2 Oblasti přenosu kovu v oblouku [5]

Impulzní bezkratový přenos:

Svařování impulzním proudem je forma bezkratového přenosu kovu. Parametry svařování impulzním proudem se dostávají nad oblast zkratového i sprchového přenosu. Impulzní forma přenosu kovu obloukem, jehož průběh je řízen elektronickou cestou, má pravidelný cyklus daný frekvencí amplitudy impulzního proudu. Základní proud je nízký, od 20 do 50 A, a jeho funkce je udržení ionizace sloupce oblouku, a tím i vedení proudu. Impulzní proud, který se nastavuje, je časově i tvarově řízený. V konečné fázi jeho amplitudy je zajištěno odtavování kapky přídavného materiálu. V celém průběhu amplitudy impulzního proudu intenzivně hoří oblouk, který ohřívá svarovou lázeň i samotný přídavný materiál.



Obr. 4.3 Impulzní forma přenosu kovu v oblouku

Průběh impulzní formy proudu obr. 4.3 může být pravoúhlý, oblý, nebo jsou u moderních digitálních zdrojů amplitudy proudu různě tvarovány v závislosti na druhu přídavného materiálu. Závislostí frekvence impulzů na proudu se udržuje velikost kapky na téměř konstantní úrovni. Pro nízký svařovací proud musí být i frekvence impulzů nízká, tak aby kapka kovu dosáhla optimální velikosti. Naopak vysoký svařovací proud nutně vyžaduje vysokou frekvenci impulzů. Nastavení šířky impulzu a frekvence není libovolné, ale je dáno vztahem $f = 1 / T_p$, kde T_p je doba trvání impulzu a f je frekvence. Tzn. Při frekvenci 500 Hz může být max. šířka impulzu 2 ms a pokud se zvětší šířka impulzu musí se snížit frekvence. Šířka impulzu má časový interval od 0,2 do 5 ms. Obecně se frekvence impulzů pohybuje mezi 25 až 500 Hz, výjimečně 1 kHz.

Současné nejmodernější digitální zdroje firmy Fronius pro svařování hliníku umožňují střídát klasickou impulzní frekvenci 25 až 500 Hz a dlouhé pulzy od 0,5 do 10 Hz při

současné pulzaci podávání drátové elektrody. Při svařování hliníku a jeho slitin se tímto spojením krátkých a dlouhých pulsů se dosáhne kresby svarové housenky podobné jako u svařování metodou WIG a snížení vneseného tepla se umožňuje svařovat i tenké hliníkové plechy od 0,8 mm.

Svařování impulzním proudem má řadu výhod:

- efektivní hodnota impulzního proudu je nižší než u konstantního, a tím se vnáší méně tepla do svaru s menším deformačním účinkem,
- lze svařovat tenké plechy i polohové svary bezzkratovým přenosem,
- vysoký impulzní proud taví i dráty větších průměrů, které jsou levnější,
- výkon navaření se pohybuje mezi 2 – 5 kg.hod⁻¹,
- pravidelná jemná kresba povrchu svaru i kořene,
- velmi vhodný přenos pro svařování hliníku a jeho slitin i vysokolegovaných ocelí,
- díky možnosti nastavení proudu, napětí, frekvence a amplitudy poskytuje zdroj impulzního proudu široké aplikační možnosti.

Optimální plyn pro svařování uhlíkových ocelí je směs Ar s 8% CO₂ a pro nerezavějící oceli Ar + 2% CO₂. U hliníku se používá čistý argon.

4.3 Výhody [1], [5]

Tato metoda svařování se vyznačuje těmito výhodami:

- svařování ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- minimální tvorba strusky,
- přímá vizuální kontrola oblouku a svarové lázně,
- vysoká efektivita, úspory nedopalků tzv. nekonečným drátem,
- snadný start oblouku bez nárazu svařovacího drátu do svařence,
- velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,
- malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování,
- vysoká proudová hustota,
- vysoký výkon odtavení,
- široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu,
- stabilní plynová ochrana v různých variantách umožňující diferencované typy přenosu kovu v oblouku a ovlivnění mechanických vlastností svarů,
- nízká pórovitost,
- malý nebo žádný rozstřík kovu elektrody,
- snadná aplikace metody u robotizovaných a mechanizovaných systémů svařování.

4.4 Ochranné plyny [1], [2]

Hlavní úlohou ochranných plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování tj. především chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku, který způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Směsi plynů mají zásadní důležitost, protože zaručují stabilitu a optimalizaci oblouku.

Ochranné plyny mají také významný vliv na: typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování.

Ochranný plyn svým složením a množstvím ovlivňuje tyto charakteristiky svařování:

- vytvoření ionizovaného prostředí pro dobrý start a hoření oblouku,
- metalurgické děje v době tvoření kapky, při přenosu kapky obloukem a ve svarové lázni,
- síly působící v oblouku,
- tvar a rozměry oblouku,
- charakter přenosu kovu v oblouku, tvar a rozměry kapek a rychlost jejich přenášení obloukem,
- tvar a rozměry průřezu svaru,
- hladkost povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál,
- kvalitu, celistvost a mechanické vlastnosti svarového spoje.

V současnosti se na ochranu oblouku používají jednosložkové nebo vícesložkové plyny. Podle charakteru se ochranné plyny projevují neutrálním, oxidačním nebo nauhličujícím vlivem na svarovou lázeň. Při volbě ochranného plynu spolurozhodují technické a ekonomické ukazatele. V minulosti se používaly jednosložkové plyny především ekonomicky výhodný CO_2 , ale v současnosti jsou velmi rozšířené směsi argonu s oxidem uhličitým nebo kyslíkem.

Jako ochranné plyny pro metodu MAG se používá čistý plyn oxid uhličitý CO_2 , nebo v současnosti častěji používané vícesložkové směsné plyny se základem argonu – $\text{Ar} + \text{CO}_2$, $\text{Ar} + \text{O}_2$, $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ a $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$.

Při svařování metodou MIG se používá většinou čistý plyn argon a helium nebo jejich dvousložková směs $\text{Ar} + \text{He}$. Čistota plynů a přesnost míchání směsí jsou stanovené normou ČSN EN 439.

Oxid uhličitý CO_2

Oxid uhličitý je nehořlavý, nejedovatý a bezbarvý plyn, jehož bod varu je $-78,45\text{ }^\circ\text{C}$. Jeho hustota je $1,976\text{ kg.m}^3$ a je tedy těžší než vzduch s relativní hustotou 1,53, přičemž hranice udušení pro člověka je cca 15% oxidu uhličitého ve vzduchu.

Vysoká hustota plynu příznivě ovlivňuje funkci plynové ochrany především v běžných polohách PA, PB a PC. Oxid uhličitý má vysokou tepelnou vodivost s vysokým přenosem tepla do svarové lázně. Tento přenos tepla spolu s teplem získaným exotermickými oxidačními reakcemi zajišťuje velmi dobré natavení svarových hran, hluboký průvar s oválným profilem svarové housenky a dobré odplynění svarové lázně.

Optimální pracovní oblast oxidu uhličitého je ve srovnání se směsným plynem podstatně užší a nastavení optimálních parametrů svařování vyžaduje určitou zkušenost a praxi. Oxid uhličitý způsobuje vysoké povrchové napětí na roztaveném konci elektrody, které se snaží udržet kapky na elektrodě. Kapky se oddělují s velkým objemem a zpravidla jejich poloměr v roztaveném stavu přesahuje 0,8 mm. Takové kapky se po dopadu na okolní materiál nataví a způsobují obtížně odstranitelný rozstřík, který zvyšuje pracnost výroby svařenců.

Obsah oxidů ve svaru je vysoký, stejně jako množství strusky na povrchu. Povrch svarové housenky je dosti nerovnoměrný s větším převýšením a přechod svarového kovu do okolního materiálu je ostrý, se značným vrubovým účinkem.

Pro svařování se používá CO₂ s čistotou min. 99,5%. Zbytek tvoří nečistoty a vlhkost, které nesmí být více jak 0,04 %. V lahvích o obsahu 20 a 40 l je plyn v kapalném stavu pod tlakem 5 MPa. Litř kapalného plynu, při 0 °C a tlaku 760 mm Hg dává 504,4 l plynu.

Při odpařování a expanzi plynu dochází k ochlazení, které vede k zamrznání ventilů. Proti zamrznání se používají elektrické ohřívače jako součást redukčního ventilu, které jsou připojené na zdroj proudu.

Tlak páry vody v CO₂ zcela závisí na tlaku plynu. Čím je menší tlak plynu, tím větší je koncentrace vody a zvláště intenzivní navlhčení plynu nastává pod 1 MPa, kdy roste nebezpečí pórovitosti svarů.

Kyslík O₂

Kyslík je nehořlavý plyn, ale oxidační hoření podporuje. Je těžší než vzduch s hustotou 1,429 kg.m³ a relativní hustotou 1,11. Při atmosférickém tlaku má teplotu varu – 183 °C. Vyrábí se destilací zkapalněného vzduchu stejně jako dusík a argon. Používá se ve směsích s argonem v rozpětí obsahu 0,03 – 3 %, a ve směsi s argonem a oxidem uhličitým, případně heliem v rozsahu 1 – 8 %. Kyslík výrazně zvyšuje tekutost svarové lázně a povrchové napětí roztaveného kovu, což je jeho hlavní důvod přidávání do ochranného směsného plynu. Tímto působením kyslíku se zlepšuje odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechod svarového kovu do základního materiálu.

Směsné plyny Ar + 15 až 25% CO₂

Univerzálním plynem pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí metodou MAG je z této skupiny směsný plyn Ar + 18% CO₂. Vyznačuje se velmi dobrými svařovacími vlastnostmi, stabilním elektrickým obloukem a hlubokým závarem. Umožňuje svařování se zkratovým i sprchovým přenosem kovu a malým rozstříkem, který neulpívá na povrchu. Poskytuje hladký povrch sváru s dobrým přechodem do základního materiálu a je použitelný pro všechny tloušťky plechů.

Směsný plyn Ar + 8% CO₂

Směsný plyn optimální pro impulsní a sprchový přenos kovu obloukem: Je doporučovaný také pro vysokovýkonné metody svařování při vysokých proudech. Vyznačuje se vysokou rychlostí svařování, plochým svarem, nízkým rozstříkem a minimální tvorbou strusky. Je vhodný pro ruční i mechanizované svařování všech tloušťek plechů.

Směsné plyny Ar + 5 až 13% CO₂ + 5% O₂

Tato směs poskytuje klidný svařovací proces s měkkým elektrickým obloukem, hladké a čisté svary. Vysoký obsah kyslíku zajišťuje velmi dobrou tekutost tavné lázně a výborné odplynění. Sprchový přenos kovu obloukem je možný i při nižší

intenzitě proudu. Přednostně se využívá při mechanizovaných a robotizovaných způsobech svařování malých a středních tloušťek.

Vliv plynů na stabilitu elektrického oblouku:

Při svařování tavící se elektrodou musí být zabezpečeno stabilní hoření oblouku při všech typech přenosů kovu. Čistý argon má dobrou ionizační schopnost, ale není vhodný pro svařování běžných konstrukčních ocelí, poněvadž oblouk hoří neklidně a kvalita svaru je nízká. Pro kvalitní svařování ocelí jsou nutné oxidační reakce, které zaručí čistý svarový kov s dobrými mechanickými vlastnostmi bez pórů, spolehlivý průvar a pravidelnou kresbou svarové housenky.

Z těchto důvodů je malá příměs oxidu uhličitého, nebo kyslíku nutná i při svařování korozivzdorných chromniklových ocelí.

Argon se používá pro svařování neželezných kovů kde i minimální oxidace není přípustná.

Oxid uhličitý má relativně obtížnou ionizační schopnost, horší zapalování oblouku a průběh hoření oblouku je charakteristický ostrým praskavým zvukem při oddělování kapek. Vyžaduje také vyšší ionizační napětí než argon. Výhody obou plynů se využívají ve směsích, kde oblouk hoří s vysokou stabilitou a pravidelností.

Vliv plynů na přenos tepla a profil svarové housenky:

Ochranné plyny mají různou tepelnou vodivost, která má výrazný vliv na přenos tepla do svaru a tím i na profil svarové housenky. Při svařování metodou MIG se nízká tepelná vodivost argonu dá zvýšit přidáním helia především pro svařování tlustostěnných plechů ze slitin hliníku a mědi. Heliem se zvyšuje také proudová hustota a tím i množství přenášeného tepla do svaru. Profil housenky je při použití helia hluboký i bez předehřevu svařence. Čistý argon se pro svařování vysokolegovaných ocelí již nedoporučuje, poněvadž v argonu se dosahuje pouze mělký závar s hlubokým závarem v ose oblouku. Rychlé tuhnutí taveniny ve spodní části bývá příčinou výskytu vměstků a neprůvarů.

Při svařování metodou MAG v čistém oxidu uhličitém je přenos tepla velmi dobrý a přispívá k dosažení hlubokého a širokého profilu oválné svarové housenky. Při vyšších svařovacích parametrech hrozí nebezpečí vzniku vrubů a při velkých ochlazovacích rychlostech mohou ve středu svaru vznikat trhliny.

4.5 Přídavné materiály [1], [2]

Metodou MIG/MAG lze svařovat různé kovy, jako oceli uhlíkové, střednělegované, vysokolegované, tak i slitiny hliníku, mědi, niklu. Všem těmto základním materiálům je nabízeno mnoho přídavných materiálů.

Pro metodu MIG/MAG se vyrábějí přídavné materiály ve formě plného drátu a plněného (trubičkového) drátu.

Plné dráty jsou vyráběny a dodávány v průměrech 0,6 0,8 1,0 1,2 1,6 2,0 a 2,4 mm. Dráty jsou navinuté na drátěných nebo plastových cívkách o běžné hmotnosti 15 kg. Pro robotizované pracoviště se vyrábějí svitky, které váží až 200 kg, což umožňuje práci na delší dobu bez přerušení.

4.6 Použití [5]

Nejširší uplatnění je v současnosti při ručním a mechanizovaném svařování nelegovaných, nízkouhlíkových a nízkolegovaných ocelí, při použití směsného plynu argonu s oxidem uhličitým.

Tato technologie se často používá v průmyslu pro svou vysokou flexibilitu a následující charakteristiky:

- snadná svařitelnost různých kovů a různých tloušťek,
- snadná svařitelnost ve všech polohách,
- použitelná v poloautomatických, automatických a robotizovaných zařízeních,
- vysoká produktivita díky svařovacímu drátu, který je pro proces klíčový.

5. PLAZMOVÉ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ

5.1 Princip metody [2], [5]

Ke vzniku plazmy je nutná ionizace plynu (mechanická nebo tepelná), při které dochází k vyražení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů atomů.

Uvolněné elektrony mají záporný náboj a vedou v plazmě elektrický proud.

Ionizované jádro atomu – iont se zbývajícími elektrony má kladný náboj. Navenek se však plazma chová jako elektricky neutrální.

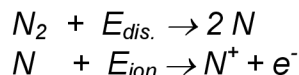
Na ionizaci plynů je potřeba značná energie. V technické praxi se často jako zdroj tepla používá elektrický oblouk, který je kontrahován a zvýšením teploty se dosáhne vyššího stupně ionizace.

Princip svařování plazmou je tedy založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem.

U dvouatomových plynů (dusík, vodík a kyslík) musí nejprve proběhnout disociace plynu, při které dochází k rozložení molekul plynu na atomy. Stupeň ionizace je závislý na teplotě a úplná ionizace se dosahuje při teplotách kolem 100 000 K.

V oblasti svařování jsou dosahovány teploty podstatně nižší, plazma je částečně ionizována a pro jednotlivé plyny jsou teploty disociace a ionizace v závislosti na entalpii znázorněné na obrázku, Část plynu, která není ionizována a je chladnější stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku tak, aby se plazma nedotýkala stěn trysky.

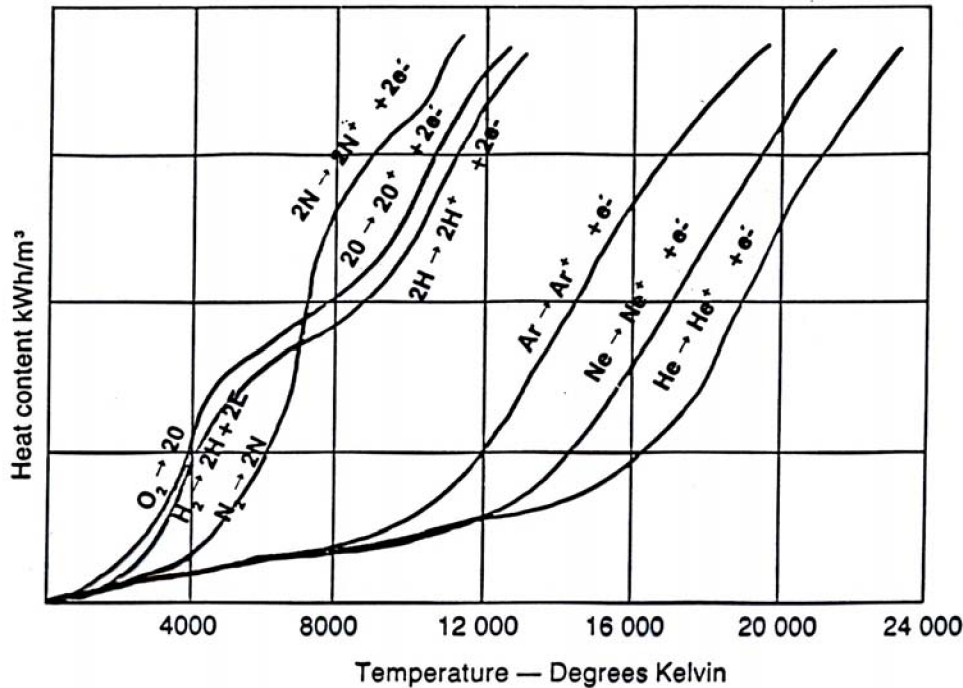
Disociace a ionizace dusíku:



kde E_{dis} je potřebná energie na disociaci a E_{ion} je ionizační energie.

Pro používaná prostředí platí tyto přibližné průměrné teploty plazmy:

dusíková plazma do	9 000 K
vodíková plazma	10 000 K
argonová plazma	16 000 K
heliová plazma	20 000 K
plazma stabilizovaná vodou až	35 000 K



Obr. 5.1 Závislost entalpie plazmy na teplotě [2]

Vlastní princip je odvozený od svařování metodou WIG, kde keramická hubice je nahrazena kovovou tryskou chlazenou vodou nebo plynem. V principu existuje dvojitá elektrická zapojení hořáku. Zapojení závislé (přenesený oblouk) u kterého je záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na materiálu. Pro nastartování a zapálení pomocného oblouku se používá VF ionizátor připojený ke kovové trysce. Pomocný (pilotní) oblouk vytvoří dostatečně vodivé prostředí pro zapálení hlavního oblouku i na relativně dlouhou vzdálenost. Závislé zapojení se používá především u svařování, navařování a řezání.

Připojení pólů zdroje pouze na elektrodu a kovovou trysku se nazývá nezávislé zapojení

(nepřenesený oblouk) a používá se především u žárových nástřiků nebo povrchového kalení.

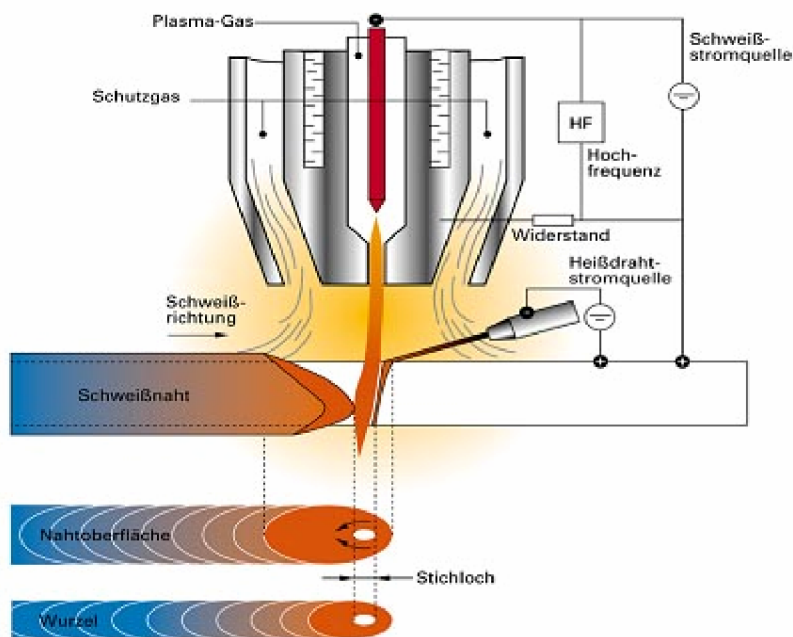
Plazmový hořák má zúženou výstupní trysku, která přispívá ke kontrakci plazmového paprsku.

Kontrakce je podporována také fokusačním plynem přiváděným k plazmovému paprsku. Jako fokusační plyny se používají směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Dvouatomové plyny s vysokou spotřebou energie na disociaci a velkou tepelnou kapacitou odebírají teplo z vnějších vrstev plazmatu a vysokou tepelnou vodivostí vodíku je tento efekt ještě zesílen. Plazma se tím zužuje, a protože musí přenést výkon odpovídající nastaveným hodnotám, zvýší se její teplota a tím i stupeň ionizace a následně elektrická vodivost.

Ochlazení plazmy při kontaktu se svařovaným materiálem vede k opačnému pochodu tzv. rekombinaci, kdy dochází ke slučování elektronů s ionty na atomy. Při rekombinaci se disociací a ionizací akumulované teplo uvolňuje a přenáší do materiálu.

Účinnost přenosu tepla se pohybuje kolem 70 – 80 %.

Při ohřevu plynu obloukem se mnohonásobně zvyšuje jeho objem a tím výstupní rychlost plazmy dosahuje vysokých hodnot. Dynamická účinnost dopadající plazmy spolu s vysokou teplotou umožňuje proniknutí paprsku v celém průřezu materiálu. Při svařování musí být dosažena rovnováha mezi tímto dynamickým účinkem a povrchovým napětím taveniny tak, aby nedošlo k vyfouknutí taveniny ze spáry. Výstupní rychlost plazmy při svařování a navařování se pohybuje mezi 200 až 500 m.s⁻¹.



Obr. 5.2 Řez plazmovým hořákem [5]

Obecně se pro plazmové svařování používají tři druhy plynů:

- plazmový: Ar, Ar + H₂, Ar + He, s průtokem 0,5 až 9 l.min⁻¹, vysoce ionizovaný, schopný vytvářet plazmový paprsek s vysokou energií.
- fokusační pro zúžení plazmového paprsku a průtokem 3 až 18 l.min⁻¹
- ochranný pro ochranu svarové lázně proti oxidaci s průtokem 2 až 20 l.min⁻¹, u aktivních materiálů Ti, Zr, Ta se průtok zvyšuje na 20 až 30 l. min⁻¹.

Volba plynu má zásadní význam, protože určuje tvarování, rozměr plazmového paprsku a úspěšné provedení svaru bez defektů a s optimální mechanickou odolností.

Běžná technická plazma se vyznačuje těmito vlastnostmi:

- Současně s pružnými srážkami molekul (atomů) se v podstatné míře vyskytují i nepružné, které vedou k disociaci a ionizaci plynu.
- Chemicky stejnorodý plyn se mění na směs atomů, iontů, elektronů, fotonů atd.
- Směs částic v plazmě je kvazineutrální, tzn. počet kladných a záporných částic je přibližně stejný.
- Elektrická vodivost plazmy je závislá na pohyblivosti elektronů (100x vyšší než iontů).
- Na plazmu silně působí elektrické a magnetické pole.

5.2 Svařitelnost materiálů plazmovým svařováním [2]

Svařitelnost materiálů i parametry svařování jsou u plazmového svařování podobná jako u metody WIG. Plazmové svařování však dosahuje vysokých svařovacích rychlostí, výhodnější poměr šířky k hloubce (1:1,5 až 1 : 2,5) a spolehlivé provaření kořene. Svařují se všechny druhy ocelí, měď, hliník, titan, nikl, molybden a jejich slitiny. Parametry svařování vysokolegovaných ocelí se pro tloušťky 2 až 10 mm pohybují v těchto rozmezích: napětí mezi 28 až 40 V a svařovací proud mezi 110 až 300 A. Podobné parametry se používají i pro svařování niklu a jeho slitin a pro svařování titanu jsou přibližně o 15 až 20 % nižší. Svařovací rychlosti jsou ve srovnání s metodou WIG podstatně vyšší a pro uvedené parametry se pohybují mezi 85 až 20 cm.min⁻¹.

Materiály náchylné na přehřátí se svařují impulsním proudem.

5.3 Úprava svarových ploch [2]

Vzhledem k vysokému dynamickému účinku plazmového paprsku je možné svařovat tupé svary typu I se spolehlivým provařením kořene do větších tlouštěk bez úpravy svarového úkosu.

Nerezavějící austenitická ocel se svařuje bez úpravy úkosu do tloušťky 10 až 12 mm s mezerou 0,5 – 1 mm a s plynovou ochranou kořene formovacím plynem. Pro nelegované a středně legované oceli se neupravují hrany do tloušťky cca 6 mm.

5.4 Výhody a použití [2], [5]

- jednoduchá úprava svarových ploch středních tlouštěk
- svařitelnost středních tlouštěk bez úkosu a na jednu vrstvu
- svařitelnost všech kovů s přídavným materiálem i bez něj
- svařování bez podložení kořene
- velmi dobrý průvar i tvar svaru
- možnost mechanizace, snadná automatizovatelnost
- vysoká čistota svaru bez pórů a bublin
- dobré mechanické vlastnosti svarového spoje
- ve srovnání s WIG metodou menší tepelně ovlivněná oblast
- nízké vnesené teplo a malá deformace výrobku
- možnost svařování střídavým i impulsním proudem.

Rozměry hořáku a obtížnost ručního použití znamenají, že tato technologie by měla být preferována pro mechanizované způsoby svařování.

6. ÚVOD A VÝVOJOVÉ TRENDY VYSOKOVÝKONOVÉHO SVAŘOVÁNÍ V OCHRANNÝCH ATMOSFÉRÁCH [6]

Trend směřující ke zvýšení produktivity při svařování se vyznačuje třemi požadavky: vysoký výkon svařovacího zdroje, vysoká míra použitelnosti a jednoduché intuitivní vedení uživatele.

U vysokovýkonového svařování se problematika točí kolem svařovací rychlosti a kolem zvýšení odtavného výkonu. V důsledku jde vždy o vyšší pracovní produktivitu. Ta je ovšem podmíněna všestranně perfektním a přesně probíhajícím pracovním procesem.

Vysokovýkonové metody svařování můžeme u různých firem nalézt pod různými názvy. Při těchto procesech se svařuje s vysokým proudem od 450 do 800 A a vysokým napětím 45 až 60 V. Posuv drátu při těchto metodách se pohybuje mezi 20 až 50 m.min⁻¹ a výkony navaření 10 až 25 kg.hod⁻¹.

U vysokovýkonových svařovacích procesů se na svařovací systémy kladou mimořádně vysoké nároky:

- Maximální míra pracovní flexibility celého zařízení
- Stabilní a precizně vedený pracovní proces
- Spolehlivost
- Robustní konstrukce
- Dlouhá životnost

To jsou rámcové podmínky, které musí být splněny na 100%. To platí i např. pro firmu Fronius. Jinak by nebylo vysokovýkonové svařování životaschopné, neboť cíl je takový: vyšší produktivita. Jen v tom případě platí: „rychleji znamená lépe“.

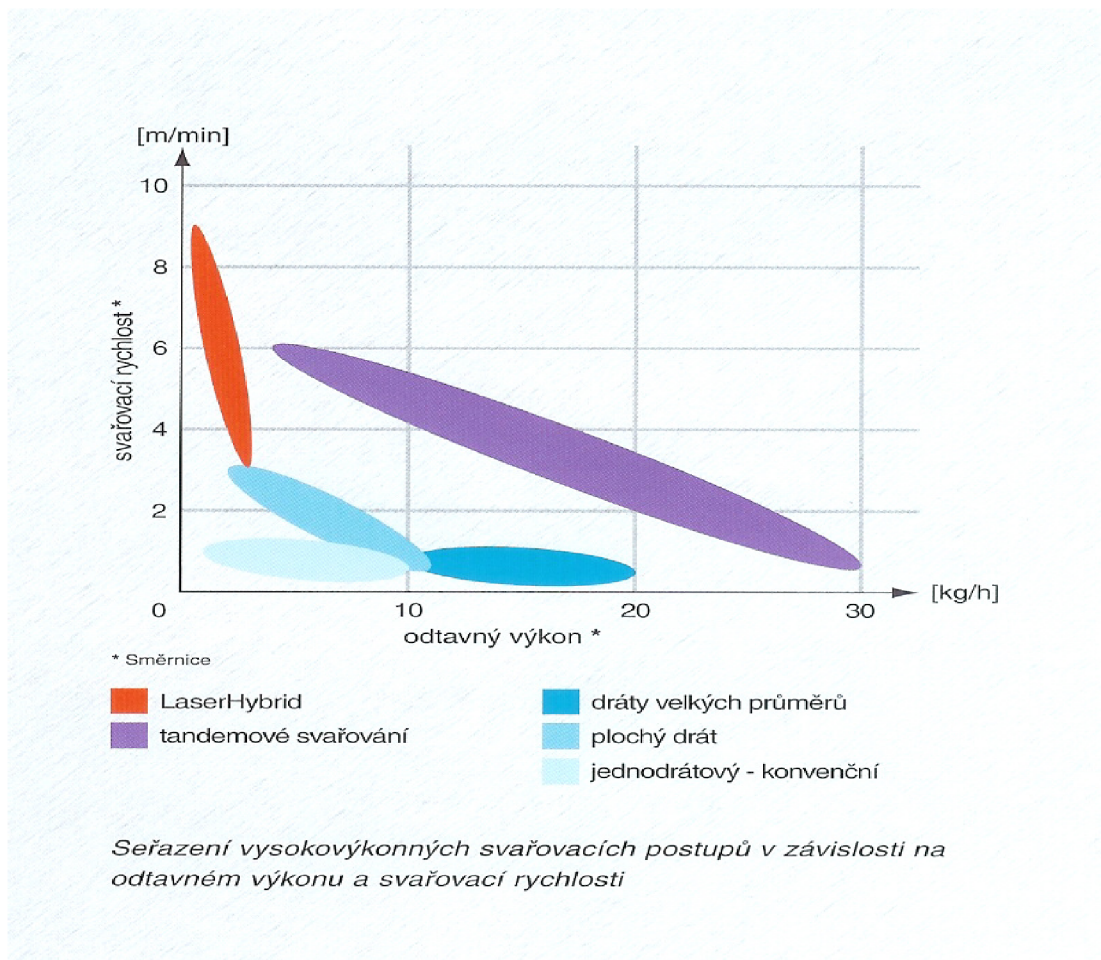
Nabídka systémů pro automatizované svařování:

Různé pracovní postupy mohou být určeny pro robotizované a automatizované svařování. Jsou použitelné pro všechny běžně nabízené typy robotů, nezávisle na tom, zda mají řízení digitální nebo analogové.

Vysokovýkonové svařování je použitelné pro nejrůznější aplikace. Jednotlivé procesy lze využít stejně dobře pro tenké i silné plechy, ocel, chromnikl, nebo hliník. Při konstrukčním návrhu jednotlivých dílů určitého výrobku lze již od začátku brát v úvahu vysokovýkonové svařovací postupy.

Firma Fronius nabízí v současné době 4 různé vysokovýkonové svařovací procesy v ochranné atmosféře:

- LaserHybrid
- TimeTwin Digital
- Plochý drát
- Dráty velkých průměrů
- + další metody jiných firem



Obr. 6.1 Seřazení vysokovýkonových svařovacích postupů v závislosti na odtavném výkonu a svařovací rychlosti [6]

7. LASERHYBRID

7.1 Přehled a vývoj [7]

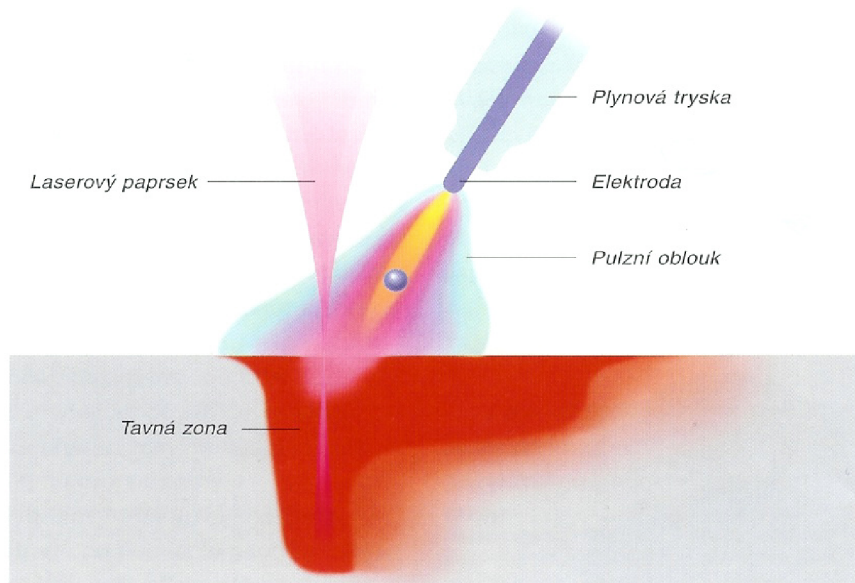
Od roku 1978 byl LaserHybrid zkoumán na Fraunhofer-insitutu pro laserovou technologii v Německu. V roce 2000 byl uveden Laser-MIGHybrid uveden do provozu právě institutem Fraunhofer (ILT), a rozmach hybridního systému svařování mohl být dále sledován, aby mohly následovat další montáže.

Pracovní postup LaserHybrid je nejehospodárnější vysokovýkonná varianta při současně dosahované nejvyšší kvalitě. To je měřeno s přihlédnutím k dalším kritériím, jako jsou kvalita svaru, potřeba dodatečného opracování a mechanicko-technologické vlastnosti.

LaserHybrid je výjimečná spojovací technologie. Při ní se slučují dva svařovací postupy, konvenční svařovací postup laserovým paprskem a klasický postup MIG, aby se využily výhody obou postupů. Výsledkem jsou synergické účinky, jako zmenšená velikost tavné lázně, snižující se tepelné zatížení, vyšší flexibilita procesu, nejnižší náklady na metr svaru a nekratší výrobní časy.

Pracovní postup LaserHybridu „říká“: rychlý jako laser a stejně dobrý jako MIG. Tyto dvě metody jsou si dosti protikladné. To právě motivovalo vývojové pracovníky k docílení vysoké svařovací rychlosti, jakou umožňuje klasický laserový postup spolu s dobrou přemostitelností mezer, což je předností MIG-postupu.

Spojením obou procesů dojde k stabilizaci pracovního procesu, která umožňuje téměř bezroztříkové svařování. Nízké tepelné zatížení a zmenšení tepelně ovlivněné oblasti a v důsledku pak velmi úzký svar, což se obojí dohromady projeví snížením tepelné deformace a nižší spotřebou přídavného materiálu. Další můžeme jmenovat dokonale homogenní svar na hliníku, v celé délce od začátku až do konce, protože LaserHybrid na 100% eliminuje neprovařená místa na začátku svaru.



Obr. 7.1 Schematické znázornění svařovacího postupu LaserHybrid [7]

7.2 Oblasti použití [7]

Podnět k vývoji postupu LaserHybrid dal výrobce automobilů, a sice Audi Neckarsulm v roce 1998. Audi již mělo mnoho zkušeností s laserem a společně s experty z firmy Fronius pracovalo na novém svařovacím postupu. Pokusy splnily beze zbytku všechna očekávání a tak dospěl postup LaserHybrid do stadia praktického využití a nejen v automobilovém průmyslu.

Další odvětví použití postupu LaserHybrid:

- Stavba zásobníků, ocelových konstrukcí a strojírenská výroba
- Letecký průmysl a kosmonautika
- Stavba kolejových vozidel
- Stavba lodí

7.3 LaserHybrid – Tandem [6]

U svařování LaserHybrid – Tandem se jedná o automatizovaný vysokovýkonný proces svařování, kdy proces LaserHybrid je kombinován s tandemovým svařovacím postupem. Interakce laserového paprsku se třemi oblouky zahajuje plně novou dimenzi ve spojování kovových materiálů v oblasti tlustostěnných plechů.

Tandemové svařování vykazuje podstatně nízkou hustotu energie a je charakterizováno velmi vysokým odtavným výkonem.



Obr. 7.2 LaserHybrid – Tandem [6]

8. TIMETWIN DIGITAL

8.1 Přehled a vývoj [8], [9], [10]

Při běžných postupech pracujících s jedním drátem se dosahuje odtavných výkonů do 6-ti kg/hod. Pak je logické, že se dvěma dráty lze dosáhnout dvojnásobku. I u tandemového procesu jsou výsledky ještě mnohem lepší – zde jsou možné odtavné výkony až 30 kg/hod. Pokud jsou příslušné svařovací zdroje kompletně digitalizované, pak je výsledkem nejenom zdvojnásobení rychlosti, ale také perfektnost v nejvyšší míře. Tak jak to dokáže TimeTwin Digital. Systém, který využívá všechny možnosti vysokovýkonového svařování, neboť zde nejde pouze o to, svařovat rychle, ale rychle a perfektně.

V případě systému TimeTwin Digital se jedná o dříve vyzkoušený a zcela osvědčený svařovací postup v ochranné atmosféře na tandemovém principu. Dva samostatně řízené svařovací zdroje TPS 4000 nebo 5000 (Trans Puls Synergic) se dvěma vzájemně izolovanými drátovými elektrodami pracující společně v jedné plynové hubici a ve společné tavné lázni. Novinkou je kompletní digitalizace tohoto pracovního procesu a v jejím důsledku dosud nedosažitelná preciznost a perfektnost pracovního procesu spolu s maximálním zjednodušením obsluhy.

V automatizovaných aplikacích, kde se počítá s každou vteřinou, se požaduje flexibilita. Systém TimeTwin Digital tomuto požadavku vychází ve více směrech vstříc.



Obr. 8.1 Dvě vzájemně izolované drátové elektrody pracující v jedné plynové hubici a jedné společné tavné lázni [8]

8.2 Oblasti použití [8], [9], [10]

Pro automatizování aplikace v oborech:

- Stavba technologických zařízení, zásobníků, ocelových konstrukcí a strojírenská výroba
- Automobilový a dodavatelský průmysl
- Stavba speciálních vozidel / stavební stroje
- Údržba / opravy
- Stavba průmyslových zařízení a potrubních vedení
- Stavba kolejových vozidel
- Stavba lodí

9. PLOCHÝ DRÁT, DRÁTY VELKÝCH PRŮMĚRŮ

9.1 Přehled a vývoj [6], [8]

Speciální případy jako jsou např. velké tloušťky plechů používaných v konstrukci zemních strojů, vyžadují nekonvenční řešení.

Při svařování v ochranné atmosféře plochým drátem má páskový přídavný materiál (který je také současně elektrodou) pravouhlý průřez cca 4,5 x 0,5 mm. Důsledkem velkého průřezu je mělký závar, zlepšená přemostitelnost a odtavné výkony u ocele až do hodnoty 11 kg/hod a u hliníku až 4 kg/hod. Svařovací rychlosti mohou dosahovat u ocele až 165 cm/min a v případě hliníku i více. Pro dosažení požadované vysoké hodnoty svařovacího proudu, až např. 900 A, pracují dva svařovací zdroje paralelně a vytvářejí jeden společný oblouk.

Druhý způsob je předešlému v principu velmi podobný, jen s tím hlavním rozdílem, že „svařovací dráty“ jsou kruhové a mají průměr až 3,2 mm. S využitím bazického trubičkového drátu o průměru 2,4 mm lze docílit odtavné výkony až 25,5 kg/hod u oceli a u hliníku až 5 kg/hod.

Metody jsou určeny pro automatizované pracovní postupy.



Obr. 9.1 Svařovací metoda plochým drátem [6]

9.2 Oblasti použití [6], [8]

- Stavba technologických zařízení, zásobníků, ocelových konstrukcí a strojírenská výroba
- Automobilový a dodavatelský průmysl
- Stavba speciálních vozidel / stavební stroje
- Stavba průmyslových zařízení a potrubních vedení
- Stavba kolejových vozidel
- Stavba lodí

10. MATERIÁLY A JEJICH SVAŘITELNOST [3], [11]

Svařitelnost je vlastnost materiálu jako každá jiná technologická materiálová vlastnost. Svařitelnost kovů je komplexní charakteristika vyjadřující vhodnost kovu na zhotovení svarků s požadovaným účelem, při určitých technologických možnostech svařování a konstrukční spolehlivosti svarového spoje.

Vhodnost na svařování je pojem, který zavedla ČSN 05 1309-90 namísto dosud používaných stupňů svařitelnosti „zaručená“ (1a), „zaručená podmíněčně“ (1b), „dobrá“ (2), „obtížná“ (3).

Vhodnost kovu na svařování je charakteristika, která vyjadřuje změnu jeho vlastností v důsledku svařování. Obecně lze svařitelnost také interpretovat jako reakci materiálu na tepelně deformační cyklus svařování, jejímž výsledkem jsou strukturní změny, deformace a zbytková pnutí.

Vhodnost kovu na svařování je dána:

- chemickým složením,
- metalurgickým způsobem výroby,
- způsobem lití a tváření,
- tepelným zpracováním.

Kritéria svařitelnosti:

Vhodnost materiálu na svařování je vyjadřována tedy pojmem svařitelnost. Pro hodnocení svařitelnosti kovů se podle ČSN 05 1309 používají:

- a) ukazatel celistvosti svarových spojů, charakterizující odolnost svarových spojů ke vzniku trhlin a jejich nepřípustných vad,
- b) ukazatel vlastností svarových spojů, charakterizující změny jednotlivých vlastností kovů v oblasti svarového spoje v důsledku svařování.

Uhlíkový ekvivalent:

Při výběru oceli, kterou budeme svařovat, musíme dávat pozor na možnou degradaci jejich vlastností v místě svarového spoje v průběhu výroby a provozu svařovaných konstrukcí. Pro posouzení svařitelnosti používáme výpočet uhlíkového ekvivalentu C_e . Bez zvláštních opatření lze svařovat oceli s obsahem uhlíku $\leq 0,22$ hm. %, přičemž ekvivalentní obsah uhlíku $C_e \leq 0,50$ se počítá:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024 \cdot s \quad [\%] \quad (10.1)$$

kde s je tloušťka plechu [mm].

Se zvyšující se hodnotou C_e se svařitelnost oceli zhoršuje. Vhodnost oceli ke svařování se hodnotí také dle tloušťky materiálu, je spjata i s tepelným příkonem při svařování a příp. s předehřevem.

Mezinárodní svářečský institut (IIW) navrhl vzorec, který platí pro oceli s obsahem uhlíku $> 0,18$ hm. %:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad [\%] \quad (10.2)$$

Pro oceli do pevnosti 700 MPa nejsou nutné zvláštní opatření, jsou-li splněny požadavky uvedené v tabulce 10.1.

Tab.10.1 Mezní hodnoty C, $C_{e(IIW)}$, tloušťky, u kterých nejsou nutné zvláštní opatření (předehřev, dohřev) [3]

Nízkouhlíkové, nizkolegované C-Mn oceli R_m [MPa]	C [hm. %]	$C_{e(IIW)}$ [hm. %]	Tloušťka [mm]	Pozn.
370-520	$\leq 0,22$	$\leq 0,41$	≤ 25	
500-700	$\leq 0,20$ $\leq 0,20$	$\leq 0,45$ $\leq 0,41$	≤ 25 25-37	Nízkovodíkové technologie

Další vzorec japonských autorů Ito-Bessyo pro výpočet uhlíkového ekvivalentu je pro obsah uhlíku $< 0,16$ hm. %:

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad [\%] \quad (10.3)$$

Podmínky svařitelnosti:

Vhodnost ocelí nelegovaných, nizkolegovaných a střednělegovaných na svařování je vázána na měrný tepelný příkon svařování Q_p a popř. předehřev. Většinou je potřebné na zabezpečení svařitelnosti použít předehřev, pokud je současně obsah C $> 0,18\%$, ekvivalentní obsah $C_e > 0,42$ při tloušťce svařovaného materiálu nad 25 mm. Teplota předehřevu, popř. doporučený příkon pro svařování, by měl být uveden v materiálových normách.

Hodnocení svařitelnosti:

Na zkoušení a hodnocení vlastností ocelí na svařování se používá soubor ukazatelů celistvosti a mechanických vlastností svarových spojů.

Ukazatele celistvosti hodnotí oceli z hlediska odolnosti proti vzniku různých typů praskavosti účinkem svařovacího procesu na základní materiál a jeho degradačním vlivem, který se projeví v praskavosti svarových spojů za studena, za horka, žíhací praskavostí a lamelární praskavostí.

Odolnost svarových spojů proti jednotlivým typům praskavosti se zkouší různými laboratorními a technologickými zkouškami.

Ukazatele mechanických vlastností svarových spojů vyjadřují degradační vlivy tepelně deformačního cyklu svařování na materiál a kritériem jsou hodnoty mechanických vlastností v oblasti svarového spoje v porovnání s odpovídajícími hodnotami základního materiálu.

Pevnost v tahu svarového spoje je mírou jeho únosnosti. Při aplikaci vhodného přídatného materiálu a odpovídajícího měrného tepelného příkonu Q_p nebývá pevnost svarových spojů problematická.

Vrubová houževnatost (nárazová práce) velmi citlivě reaguje na proces svařování a změny jím v materiálu vyvolané, a to jak v oblasti ohřáté těsně pod A_1 , tak i v oblastech ohřátých na teploty vyšší, až po hranici natavení.

10.1 Svařitelnost ocelí nelegovaných uhlíkových, uhlíkomanganových a mikrolegovaných [11]

Svařitelnost se řeší dle normy ČSN EN 1011-2. Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů. Část 2 zahrnuje obloukové svařování uhlíkových jemnozrnných ocelí, část 3 obloukové svařování korozivzdorných ocelí.

UHLÍKOVÉ A UHLÍKOMANGANOVÉ OCELI

Tento typ ocelí patří k nejběžněji používaným. Jejich svařitelnost je ovlivňována především obsahem uhlíku, způsobem výroby, zejména z hlediska naplynění a jeho vlivu na deformační stárnutí a křehké porušení při nízkých teplotách, obsahem nečistot a technologií svařování. Svařitelnost oceli se zhoršuje se zvyšujícím se hodnotou C_e a svařovanou tloušťkou. Také vysoký příkon Q_p může vést ke zhoršení vlastností svarového spoje v důsledku zhrubnutí zrn nebo v důsledku nepříznivé mikrostruktury, např. Widmannstaettenické. Svařování materiálů větších tloušťek však vždy vyžaduje určitý teplotní režim spočívající v predehřevu, jisté úrovni mezivrstevové (mezihousenkové) teploty a dohřevu. Nutný predehřev je většinou 100 až 250°C. Vliv zbytkových pnutí lze v případě potřeby eliminovat žíháním ke snížení pnutí při teplotách 600 až 650°C nebo mechanickým vibrováním. Při nutnosti zjemnění zrna a dosažení požadovaných vlastností u některých ocelí se doporučuje normalizační žíhání při teplotách 900 až 950°C.

MIKROLEGOVANÉ OCELI

Jako mikrolegované oceli jsou označovány uhlíkomanganové oceli se sníženým obsahem uhlíku C a s přísadou mikrolegujících prvků Nb, Ti, V, Zr uklidněné hliníkem Al. Jejich svařitelnost není obtížná, pokud je dodržena optimální technologie z hlediska tepelného příkonu s ohledem na menší strukturní stabilitu. Volba přídatných materiálů se řídí požadavkem na mechanické vlastnosti svarového spoje. Vlastnosti svarového kovu jsou do jisté míry ovlivněny promícháním s nataveným základním materiálem. Při volbě přídatného materiálu je třeba brát v úvahu i následné tepelné zpracování svarového spoje.

10.2 Svařitelnost nízkolegovaných a střednělegovaných ocelí [11]

Vzhledem k vlivu legovacích prvků na kalitelnost je svařitelnost těchto ocelí limitována vhodným teplotním režimem svařování, popř. i tepelného zpracování po svaření.

Nejzávažnějším problémem svařitelnosti nízkolegovaných a střednělegovaných ocelí je vznik trhlin za studena, ale můžeme se setkat i s trhlínami za horka a žíhacími trhlínami, na které jsou náchylné oceli legované CrMo a CrMoV. Celistvost svarových spojů lze též řešit výpočtovými metodami nebo experimentálně různými technologickými a laboratorními zkouškami.

U většiny svarových spojů nízkolegovaných a střednělegovaných ocelí je po svaření nutné tepelné zpracování, které má za cíl změnu struktury tepelně ovlivněné oblasti, popř. i svarového kovu, snížení vnitřních napětí, zabezpečení dobrých creepových vlastností, stabilitu rozměrů a další. Teploty žíhání jsou závislé na předpisech pro daný výrobek, např. pro energetiku ČSN 42 0285.

VYSOKOPEVNOSTNÍ OCELI

Problematika svařování vysokopevnostních ocelí je dána celistvostí svarových spojů, zejména vznikem trhlin za studena, popř. zbrzděných lomů v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Dále je to otázka vlastností svarového spoje, a to nejen mechanických. Každá vysokopevnostní ocel vyžaduje při svařování jiný přístup, dokonce je u ocelí s mezí kluzu nad 800 MPa, popř. pevnosti do 2000 MPa, propracováno svařování bez předehřevu a následného tepelného zpracování. Při volbě přídatného materiálu je nutno brát v úvahu chemické složení oceli a provozní podmínky svarových spojů, požadavky na pevnost svarového spoje. Dominantní je opět celistvost svarového spoje. Zatímco při svařování vysokopevnostních ocelí s mezí kluzu do 700 MPa jsou k dispozici přídatné materiály odpovídající pevnostní třídy, je nutno i z hlediska celistvosti volit pro oceli pevnosti do 2000 MPa přídatné materiály austenitické nebo austeniticko-martenzitické.

10.3 Nové typy vysokopevných a vysoce otěruvzdorných ocelí

10.3.1 Hlavní důvody aplikací vysokopevných konstrukčních ocelí HARDOX a WELDOX [14], [15], [16]

Podobné chemické složení a podobný způsob tepelného zpracování dělají z vysokopevných ocelí sourozence ocelí otěruvzdorných.

V obou případech se většinou jedná o kalené ocelové plechy s nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků, tak aby při vysokých hodnotách pevnosti (respektive tvrdosti) byla zajištěna jejich technologičnost zejména svařitelnost. Hlavní rozdíl při výrobě těchto dvou skupin ocelí je v závěrečné fázi tepelného zpracování – popouštění. Zatímco se otěruvzdorné oceli po kalení nepopouštějí, nebo se popouštějí jen na nízké teploty (cca. 200°C), vysokopevné konstrukční oceli se popouštějí na vysoké teploty (cca. 600°C). Vyšší popouštěcí teplotou vznikne ve vysokopevných konstrukčních ocelích jiná rovnováha mezi pevností a houževnatostí – úroveň houževnatosti je povýšena na úkor pevnosti (tvrdosti).

V současné době můžeme rozdělit vysokopevné konstrukční oceli do dvou hlavních skupin. Do úrovně meze kluzu 500 MPa včetně jsou většinou tyto oceli nekalené a jsou zahrnuty v EN 10 113. V označení SSAB Oxelösund jde pak o ocelové plechy WELDOX 420, WELDOX 460, WELDOX 500 (uvedené číslo znamená zaručovanou hodnotu meze kluzu).

Kalené „pravé“ vysokopevné oceli mají pak mez pevnosti od 690 MPa jsou zahrnuty v EN 10 137. V označení WELDOX jsou to pak stupně 700, 900 a 960. Nejpevnější konstrukční ocelí je v současné době ocel WELDOX 1100 s mezí kluzu 1100 MPa, která není ještě zahrnuta v evropských normách. Zásadní rozdíl v mechanických vlastnostech mezi „klasickou“ konstrukční ocelí (11 523) a vysokopevnými oceli je zejména v mezi kluzu a mezi pevnosti. Ostatní zaručované mechanické vlastnosti (tažnost a vrubová houževnatost) zůstávají přibližně na stejné úrovni.

Při diskuzích o aplikacích vysokopevných konstrukčních ocelí je nutno si uvědomit, že nelze počítat s úsporou nákladů, pokud v konstrukci použijeme vysokopevný plech (menší tloušťky) místo klasické oceli. Vysokopevná ocel o mezi kluzu 700 MPa je cca. 2x až 3x dražší než ocelový plech jakosti 11 523, který má poloviční mez kluzu (355 MPa). V reálných konstrukcích pak úspora tloušťky plechu při použití oceli s dvojnásobnou hodnotou meze kluzu není 50%, ale většinou je to méně než 30%. Úspora nákladů za materiál není tedy apriori důvodem k aplikaci vysokopevné oceli.

V současné době je převládajícím důvodem použití vysokopevných ocelí potřeba snížit hmotnost z jiných důvodů než je úspora nákladů na materiál. Tyto důvody jsou v zásadě dva.

První je, že existuje omezení hmotnosti výrobku z hlediska manipulace, dopravy, legislativních předpisů, těžiště ..., přičemž jsou na tyto výrobky současně kladeny i značné nároky na nosnost, bezpečnost, odolnost proti zatížení...

Druhým důvodem je, že snížením hmotnosti dosáhneme zvýšení kapacity (nosnosti) zařízení.

I přesto, že jsme konstatovali, že aplikací vysokopevných ocelí nedojde k úsporám nákladů na materiál, může být ekonomické kritérium důvodem k použití těchto ocelí. V případě, kdy zohledníme náklady na dělení, svařování, dopravu, nátěry, ... může být v některých případech použití těchto ocelí ekonomicky výhodné.

Zajímavým důvodem pro použití vysokopevných ocelí je svařitelnost. Vysokopevné oceli WELDOX s mezí kluzu 420 až 500 MPa a menší tloušťky ocelí WELDOX 700 (do 20 mm) mají nižší hodnotu uhlíkového ekvivalentu než ocel 11 523. V některých případech, kdy je z důvodu tloušťky plechu již nutné ocel 11 523 předeřhřívát, můžou být ekvivalentní tloušťky ocelí WELDOX 420 až WELDOX 700 svařovány bez předeřhřevu. To může mít značný význam, pokud svařování probíhá v terénu a předeřhřev může být technicky obtížný. Z těchto důvodů byla ocel WELDOX použita několikrát ve Skandinávii pro stavby mostů.

10.3.2 Weldox [14], [15], [16]

WELDOX jsou konstrukční vysokopevné otěruvzdorné plechy s mezemi kluzu od 420 do 1111 MPa. Jejich podstata je v dosažení daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti. Výsledkem je např. ocel WELDOX 700, s mezí kluzu 700 MPa, která v tloušťce 20 mm má stejnou svařitelnost jako ocel 11523.

LEGUJEME "VODOU" - snažíme se nahradit část legujících prvků potřebných k dosažení daného pevnostního stupně intenzitou kalčího procesu. Takto dostáváme nízké hodnoty uhlíkového ekvivalentu C_e , což má příznivý vliv na svařitelnost.

Tab.10.2 Vlastnosti ocelí WELDOX [16]

Jakost	$R_{p0,2}/\text{Mpa}$	R_m/MPa	KV/J (-40°C)	C_e	EN 10137
WELDOX 420 E	420	500 – 660	40	0,39	
WELDOX 500 E	500	570 – 720	40	0,39	
WELDOX 70 E	700	780 – 930	27	0,41	S 690 QL
WELDOX 90 E	900	940 – 1100	27	0,56	S 890 QL
WELDOX 96E	960	980 – 1150	27	0,56	S 960 QL
WELDOX 1100 E	1100	1200 - 1500	27	0,70	

Hodnoty uhlíkového ekvivalentu C_e uvedené v tabulce jsou typickými hodnotami pro tloušťku plechu 20 mm. U ocelových plechů WELDOX jsou zaručovány a hutním atestem doloženy hodnoty $R_{p0,2}$, R_m , A_5 , KV a chemické složení.

Oceli WELDOX se dále vyrábějí s označením D, F (např. WELDOX 700 D), kde označení D znamená zaručovanou hodnotu vrubové houževnatosti KV při -20°C, označení F pak při -60°C. V kódování podle EN 10137 je to pak Q, resp. QL1 (např. S 690 Q).

10.3.3 Hardox [14], [15], [16]

HARDOX 400 je nejrozšířenější v řadě otěruvzdorných plechů HARDOX. Vzhledem k vysoké úrovni houževnatosti a bezproblémové svařitelnosti se často používá jako otěruvzdorný a konstrukční plech současně.

Tab.10.3 Vlastnosti ocelí HARDOX [16]

Jakost	Tvrдость Brinell HB	KV/J (-401C)	Rozmezí tloušťek/mm	C _e
HARDOX 400	370 - 430	45	3 - 130	0,37
HARDOX 450	425 – 475	35	4 – 80	0,47
HARDOX 500	470 - 530	30	5 - 80	0,58
HARDOX 600	560 - 640	20	5 - 50	Cca 0,82

U ocelových plechů HARDOX je hutním atestem zaručováno rozmezí hodnot tvrdosti a chemické složení oceli. Výše uvedené hodnoty vrubové houževnatosti KV a uhlíkového ekvivalentu C_e jsou uvedeny jako typické hodnoty pro tloušťku plechu 20 mm.

Uhlíkový ekvivalent:

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad (10.4)$$

Nová otěruvzdorná ocel HARDOX 600 vyráběná švédskou firmou SSAB Oxelösund AB je první komerčně vyráběná ocel ve tvaru tlustých plechů zaručující tvrdost 100% HB (560 – 640). Tato ocel je zdánlivým pokračováním řady stávajících ocelí HARDOX 400 a HARDOX 500 (majících 400 HB respektive 500 HB tvrdosti). Ve skutečnosti ale, nárůst tvrdosti o 100 HB oproti oceli HARDOX 500 znamená v této pevnostní úrovni, nový koncept její výroby a zpracování. Výroba tlustých plechů z oceli HARDOX 600 znamená zejména velmi vysoké nároky na čistotu oceli, to znamená unikátní rafinační proces během její výroby. Kvalita oceli spolu s precizním tepelným zpracováním musí zaručovat nejenom 100% HB výsledné tvrdosti ale i příslušnou úroveň houževnatosti.

10.3.4 Svařování materiálů HARDOX a WELDOX [14], [15], [16]

Otěruvzdorné plechy HARDOX a vysokopevné konstrukční plechy WELDOX firmy SSAB Oxelösund obsahují málo legujících prvků. Takže i jejich uhlíkový ekvivalent je malý. Proto lze tyto plechy pomocí standardního obloukového svařování snadno svařovat ke všem obvyklým konstrukčním plechům.

Při svařování plechů HARDOX je cílem:

- udržet tvrdost tepelně ovlivněné zóny (TOZ)
- dosáhnout vyhovující houževnatosti této oblasti

Při svařování plechů WELDOX je cílem:

- zajistit odpovídající pevnost svaru
- dosáhnout vyhovující houževnatost svaru

Pro danou třídu pevnosti mají plechy HARDOX a WELDOX nízké uhlíkové ekvivalenty:

Ocel s nízkým uhlíkovým ekvivalentem (C_e) lze lépe svařovat než ocel s vysokou hodnotou C_e . Obvyklé hodnoty C_e pro konkrétní tloušťku plechu jsou uvedeny v tabulkách uvedených již výše.

Uhlíkový ekvivalent lze vypočítat z této rovnice:

$$C_e = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad (10.5)$$

10.3.4.1 Teplota výrobku během svařování

Vždy při svařování konstrukčních ocelových plechů, odolných vůči opotřebení, je důležité minimalizovat riziko vzniku trhlin ve studeném stavu (používají se termíny vodíkové trhliny). Hlavní příčinou vzniku těchto trhlin je výskyt vodíku a zároveň výskyt pnutí ve svaru. Nebezpečí vzniku trhlin lze minimalizovat následovně:

- předehřátím výchozího materiálu před svařováním
- dokonalým vyčištěním a vysušením styčných spár
- minimalizací pnutí ze smrštění. Toto lze docílit přesným umístěním výrobků a vhodně naplánovaným postupem svařování.
- volbou přídatného materiálu s nízkým obsahem vodíku

Předehřev:

Předehřev je mimořádně důležitý při stehování a při svařování kořenových svarů. Čím je teplota během svařování a po svařování vyšší, tím snáz unikne vodík z oceli. Nutnost provést předehřev se zvyšuje s tloušťkou materiálu (viz. následující tabulka) tak, aby se kompenzovalo rychlejší ochlazování tlustšího plechu, a také proto, že tlustší plech má vyšší hodnotu C_e než tenký plech.

Pokud je okolní vlhkost vysoká nebo pokud je teplota nižší než $+5^\circ\text{C}$, měla by se hodnota dle tabulky zvýšit o 25°C . Obdobně by se měla zvýšit teplota, pokud svařovaný výrobek je pevně vetknutý.

Pokud se svařují různé typy oceli nebo pokud se ke svařování používají elektrody s vyšším uhlíkovým ekvivalentem C_e než je ekvivalent základního materiálu, potřebný předehřev se stanoví podle oceli (nebo elektrody) s vyšším uhlíkovým ekvivalentem.

Tab.10.4 Doporučené teploty [16]

Doporučené teploty pro předehřev pro různě kombinované (sumární) tloušťky plechu (mm)												Doporučené interpass teploty
$t_1+t_2+t_3=$	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	[°C]
S355								75°C				225 – 250
WELDOX 355												225 – 250
WELDOX 420/460								75°C				225 – 250
WELDOX 500								75°C				200 – 225
WELDOX 700			75°C				100°C		150°C			200 – 225
WELDOX 900*	75°C	100°C						150°C				150 - 175
WELDOX 960*	75°C	100°C						150°C				150 - 175
WELDOX 1100*	100°C	125°C			150°C			175°C				150 - 175
HARDOX 400			75°C			100°C		175°C				150 - 175
HARDOX 500	100°C	125°C	150°C		175°C						150 - 175	

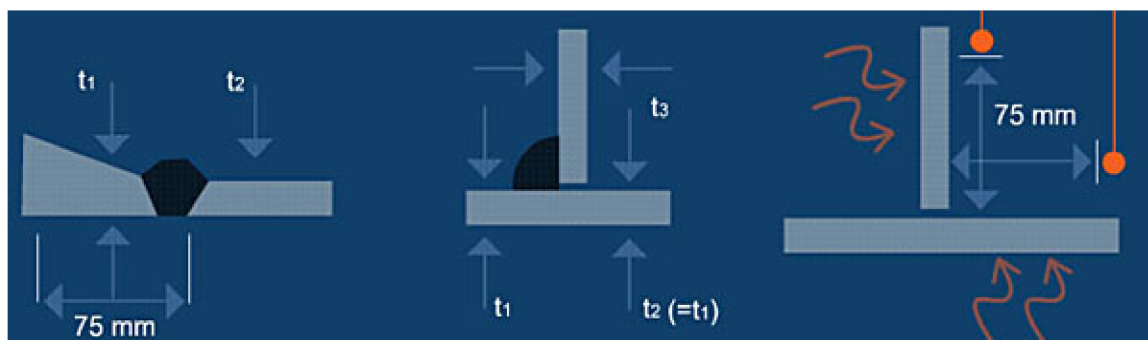
*) Teplota předehřevu je dána přídavným materiálem, pokud uhlíkový ekvivalent tohoto materiálu je vyšší než uhlíkový ekvivalent plechu.

Doporučené teploty výrobku vycházejí z předpokladu, že:

- obsah vodíku je menší než 5 ml/100 g svařovaného kovu
- tepelný příkon je zhruba 1,7 kJ/mm

t_1 = střední tloušťka ve vzdálenosti 75 mm od svařovaného spoje

Teploty měřené v tomto místě



Obr.10.1 Kombinovaná (sumární) tloušťka plechu [mm] [14], [15], [16]

Dodatečný ohřev:

Pokud se okamžitě po svařování provede ohřev svaru, také to usnadní únik vodíku z oceli. Teplota ohřevu po svařování by měla být stejná jako teplota předehřevu. Doba ohřevu by měla být minimálně 5 minut na milimetr tloušťky plechu, avšak celkem nejméně jedna hodina.

10.3.4.2 Dodatečné zpracování

Žihání ke snížení pnutí:

Žihání ke snížení pnutí se provádí za účelem snížení zbytkového pnutí po ukončení svařování. WELDOX lze za účelem snížení pnutí žíhat pouze v případě, že tento postup vyžadují konstrukční předpisy. HARDOX a WELDOX 1100 se za účelem snížení pnutí nesmí žíhat.

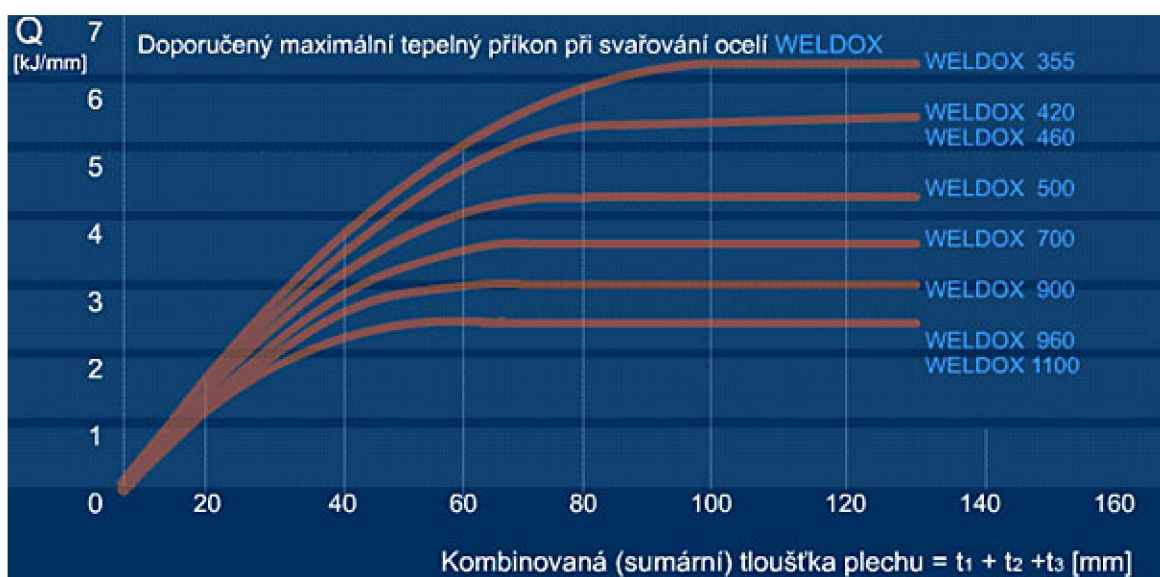
Opatření pro zvýšení meze únavy:

Mez únavy svaru lze zvýšit různým dodatečným zpracováním. Tímto se docílí plynulejší přechod mezi svarem a plechem a sníží se koncentrace pnutí.

Pro svařování materiálu HARDOX a WELDOX doporučujeme dodržovat níže uvedená omezení tepelného příkonu. Hodnoty tepelného příkonu pod níže uvedenými hodnotami zajišťují uspokojivou kombinaci houževnatosti, pevnosti a tvrdosti tepelně ovlivněné zóny (TOZ).



Obr.10.2 Doporučený maximální tepelný příkon při svařování ocelí HARDOX 400 a HARDOX 500 [14], [15], [16]



Obr.10.3 Doporučený maximální tepelný příkon při svařování ocelí WELDOX [14], [15], [16]

10.3.4.3 Volba přídatného materiálu

Při svařování materiálu HARDOX a WELDOX lze použít veškeré obvyklé metody obloukového svařování, které jsou určeny pro svařování běžných plechů a plechů s vysokou pevností. Volba přídatného materiálu vychází z požadavků, které jsou pro jednotlivé případy kladeny na mechanické vlastnosti svaru. Pro svařování materiálu HARDOX a WELDOX by se měly používat bazické elektrody. Zvolte přídatný materiál s obsahem vodíku $\leq 5\text{ml}/100\text{g}$ svarového kovu. Při volbě meze kluzu přídatného materiálu jsou k dispozici tyto možnosti:

1. svarový kov s nižší mezí kluzu*, než je mez kluzu základního materiálu
2. svarový kov se stejnou mezí kluzu*
3. svarový kov s vyšší mezí kluzu*, než je mez kluzu základního materiálu

*) Vztahuje se ke jmenovité minimální hodnotě meze kluzu v tahu.

Při svařování ocelí v rozsahu WELDOX 700 až WELDOX 1100 doporučujeme kombinovat elektrody s odlišnou pevností, například měkké elektrody pro kořenový svar a elektrody s vyšší pevností pro zbývající část svaru. Hlavní výhody v případě, že zvolíme přídatný materiál s nízkou pevností (mez kluzu pod 500MPa) oproti přídatnému materiálu s vysokou pevností, jsou:

- vyšší houževnatost svarového kovu
- lepší tažnost svaru
- snížená náchylnost na vznik trhlin

U koutových svarů doporučujeme vždy použít přídatný materiál s nižší mezí kluzu.

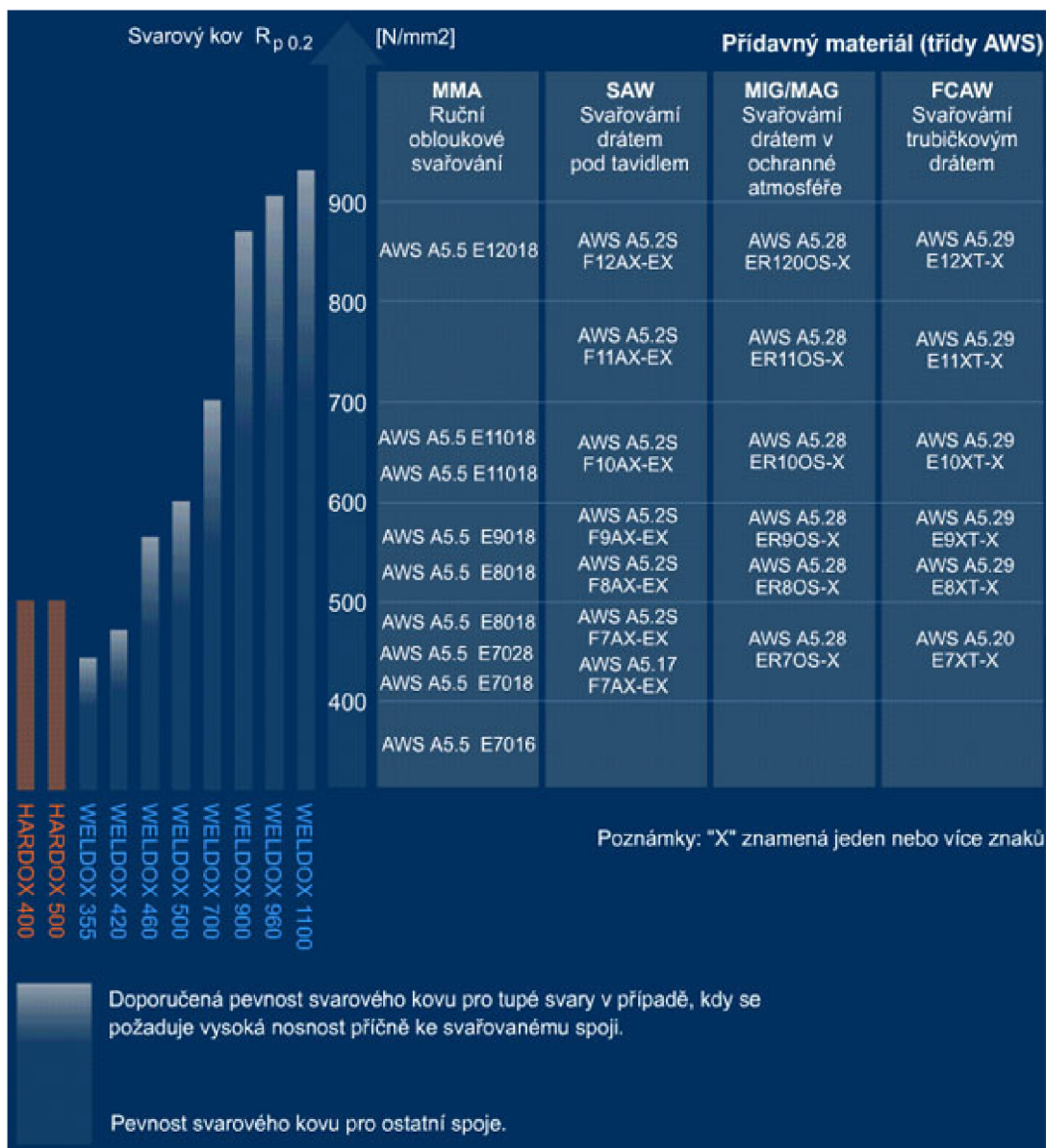
Tab.10.5 Doporučená pevnost při svařování [16]

Doporučená pevnost při svařování ocelí HARDOX a WELDOX	
WELDOX 355/420	Vyšší pevnost než základní materiál
WELDOX 460/500	Vyšší nebo stejná pevnost než základní materiál
WELDOX 700	Stejná nebo nižší pevnost než základní materiál
WELDOX 900/960	Nižší pevnost než základní materiál
WELDOX 1100	Nižší pevnost než základní materiál
HARDOX 400/500	Nižší pevnost než základní materiál

Použití měkkých elektrod při svařování materiálu HARDOX:

HARDOX by se měl svařovat měkkými bazickými elektrodami. Měkká elektroda je přídatný materiál s mezí kluzu v tahu menší než 500 MPa. Tyto elektrody snižují úroveň zbytkového pnutí ve svaru a tím náchylnost materiálu na vznik trhlin ve studeném stavu. Pokud je svar umístěn tak, že je vystaven značnému opotřebení, lze pro krycí housenky použít tvrdé elektrody. V následujících případech lze HARDOX úspěšně svařovat pomocí austenitických nerezavějících přídatných materiálů:

- pokud je svařenec pevně upnutý
- pokud nelze výrobek předeřít
- pokud je plech silnější než 60 mm.



Obr.10.4 Pevnost svarového kovu a přídavné materiály [14], [15], [16]

Obecná doporučení pro volbu přídavného materiálu při svařování oceli HARDOX a WELDOX:

- při svařování FCAW, SAW a MMA by se vždy mělo použít bazické tavidlo
- vrubová houževnatost svarového kovu by měla být přinejmenším stejná jako vrubová houževnatost plechu
- vždy používat přídavný materiál s nízkým obsahem vodíku (HD 5 ml/100g).

11. EXPERIMENT

Hlavním cílem diplomové práce je navrhnout a experimentem ověřit možnosti svařování vysokopevných ocelí metodou MAG a plazmou, provést měření tvrdosti ve svarových spojích a stanovit jejich pevnostní charakteristiky.

11.1 Základní materiál – porovnání materiálů [12]

Základní materiál byl zvolen od firmy LEGA-INOX ABRAServis. LEGA-INOX ABRAServis se specializuje na dodávku a zpracování materiálů vysoce odolných proti opotřebení a vysoce pevnostních materiálů – celkem asi 1230 artiklů v oblastech:

- vysoce pevnostní jemnozrné oceli
- plechy vysoce odolné proti opotřebení
- děrované plechy vysoce odolné proti opotřebení, průmyslová síta
- trubky vysoce odolné proti opotřebení
- otěruvzdorná tyčová ocel

Vzhledem k poměru cena – životnost a využití možností představují materiály a produkty z otěruvzdorných ocelí velmi dobrou alternativu k různým běžným ocelím. Dle vstupních podmínek vykazují otěruvzdorné plechy 3 – 10 násobnou životnost oproti oceli St 52-3 – 11 523.1.

Plechy a tyčová ocel vysoce odolné proti opotřebení nalézají své uplatnění ve všech oborech, kde se tato odolnost a otěruvzdornost očekává např.:

- kamenolomy a lomy, hlubinné stavby (drtiče, mlýny, čelist'ové drtiče, řetězové dopravníky...)
- cementárny (pancéřování nádob, násypek atd.)
- metalurgie, zpracování šrotu, zemědělské stroje, koksárny.

Vysoce pevnostní jemnozrné oceli nalézají kontinuální využití pro:

- ocelové konstrukce, výroba nádob a automobilů.

Tab.11.1 Plechy vysoce odolné proti opotřebení – Série 1000, termomechanicky válcované, popřípadě olejem zušlechtěné: [12]

CREUSABRO 8000	
dodací tvrdost	430 – 500 HB
tloušťka plechu	4 – 60 mm
rozměry	do 2 500 x 8 000 mm
rozsah použití	do cca 500°C bez větší ztráty tvrdosti
specifikace	Extrémně otěruvzdorný plech, výborná opracovatelnost, svařitelnost.

CREUSABRO 4800	
dodací tvrdost	340 - 400 HB
tloušťka plechu	3 – 150 mm
rozměry	do 2 500 x 8 000 mm
rozsah použití	do cca 500°C bez větší ztráty tvrdosti
specifikace	Vysoký nárok proti opotřebení, dobrá opracovatelnost, svařitelnost.
ABRAMAX	
dodací tvrdost	270 - 340 HB
tloušťka plechu	6 – 20 mm
rozměry	do 2 000 x 6 000 mm
rozsah použití	
specifikace	Stavební ocel pod otěruvzdorné plechy s vysokými garantovanými mechanickými vlastnostmi.

Tab.11.2 Materiály odolné proti opotřebení s uplatněním při úderech a odrazech [12]

CREUSABRO M	
dodací tvrdost	Ca. 220 HB, pod údery zvýšení tvrdosti na cca 500 HB
tloušťka plechu	1,5 – 20 mm
rozměry	do 2 500 x 8 000 mm
specifikace	Austenitická manganová ocel (12-14 % Mn).

Tab.11.3 Vysoce pevné jemnozrnné stavební oceli [12]

IMEX 700 (S 690 QL odpovídající EN 10137-2)	
hranice tažnosti	garantovaná od 690 N/mm ²
údaje o vrubové houževnatosti	při -40°C
tloušťka plechu	4 – 200 mm
rozměry	do 3 000 x 12 000 mm
specifikace	Vysoce pevná, vodou zušlechtěná jemnozrnná ocel.
IMEX 960 (S 960 QL odpovídající EN 10137-2)	
hranice tažnosti	garantovaná od 960 N/mm ²
údaje o vrubové houževnatosti	při -40°C
tloušťka plechu	5 – 50 mm
rozměry	do 3 000 x 12 000 mm
specifikace	Vysoce pevná, vodou zušlechtěná jemnozrnná ocel.
IMEX 701 (S 700 MC odpovídající EN 10049-2)	
hranice tažnosti	garantovaná od 690 N/mm ²
údaje o vrubové houževnatosti	specifické od případu
tloušťka plechu	3 – 10 mm
rozměry	od 1 500 mm šířky
specifikace	Vysoce pevná, termomechanicky válcovaná jemnozrnná ocel. Tváření za studena.

Správné vnímání a pochopení oceli. Profesionální zpracování.

Zpracování otěruvzdorných ocelí vyžaduje především odborně – specifické know-how. Moderní otěruvzdorné oceli se dnes velmi snadno zpracovávají a přitom vykazují vyšší mechanické vlastnosti než běžný konstrukční materiál.

Otěruvzdorné oceli vyžadují nejen robustní stroje, ale také mnoho zkušeností při opracování, neboť zpracování otěruvzdorných materiálů a produktů je velmi odlišné od zpracování běžných ocelí. V centru LEGA-INOX ABRAServis se nabízejí početné zpracovatelské možnosti, které přinesou možnost předat zákazníkovi materiál a produkty ve správné a požadované kvalitě.

11.1.1 Volba základního materiálu - vysoce otěruvzdorná ocel CREUSABRO 8000 [13]

Ocel CREUSABRO 8000 je otěruvzdorná ocel nabízející až o 50% vyšší odolnost proti opotřebení v porovnání s vodou kalenou ocelí tvrdosti 500 HB. V oceli CREUSABRO 8000 je využita inovační koncepce, založená na kombinaci chemického složení a tepelného zpracování (kalení v oleji). Tato kombinace zlepšuje otěruvzdornost oceli přispěním:

- velmi jemných karbidů chrómu a molybdenu zpevňujících mikrostrukturu
- velmi účinné schopnosti vytvrzení při zařazení do provozu, nástupem efektu zvaném TRIP efekt (Transformation Induced by Plasticity)

Kromě vysoké otěruvzdornosti si Creusabro 8000 ještě udržuje velmi dobrou schopnost zpracování, značně lepší než ve vodě kalené oceli tvrdosti 500 HB. Ocel Creusabro 8000 v důsledku toho nabízí optimální kombinaci mimořádné otěruvzdornosti a běžné přijatelné zpracovatelnosti.

Tab.11.4 Chemické složení [13]

C	Mn	Ni	Cr	Mo	S
≤ 0,28	≤ 1,60	≈ 0,40	≤ 1,60	≥ 0,20	≤ 0,002

(garantované hodnoty v hm.%)

Tab.11.5 Mechanické vlastnosti (typické hodnoty) [13]

Tvrdost [HB]	R_{p0,2} [MPa]	R_m [MPa]	EI [%]	KCV -20°C [J.cm⁻²]	E [GPa]
400	1250	1630	12	55	205

Tab.11.6 Mechanické vlastnosti při vysokých teplotách (typické hodnoty) [13]

R_e [MPa]			R_m [MPa]		
200°C	400°C	500°C	200°C	400°C	500°C
1080	880	520	1650	1250	900

Tab.11.7 Fyzikální vlastnosti [13]

20/100°C	20/100°C	20/100°C	20/100°C	20/100°C
11,2	12,0	12,5	13,2	13,8

Hustota při +20°C: 7,85 kg.dm⁻³

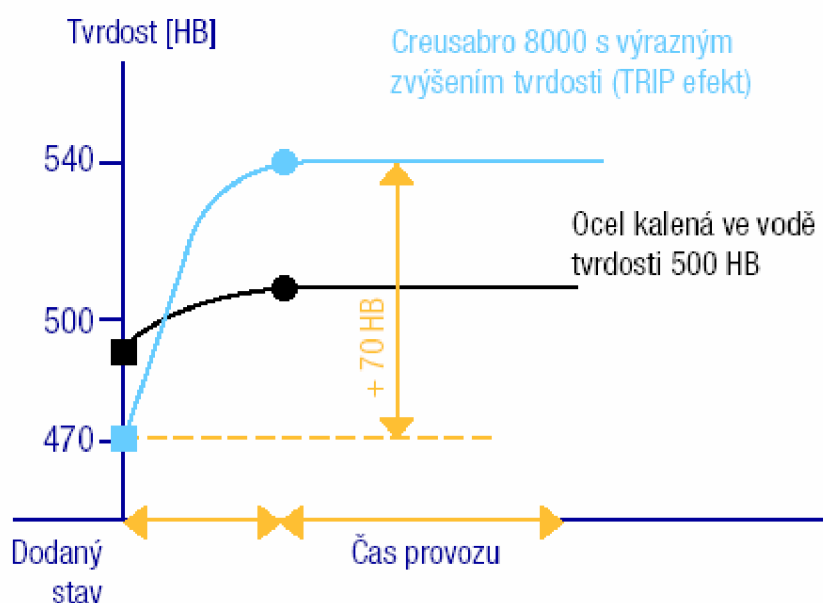
Koeficient roztažnosti – průměr (x 10⁻⁶ °C⁻¹)

Metalurgický koncept

Otěruvzdornost oceli není výlučně spojená s tvrdostí oceli v dodaném stavu. Její mikrostruktura výrazně ovlivňuje její otěruvzdornost. Chemické složení a výrobní postupy aplikované na Creusabro 8000 zdokonalují mikrostrukturu, která se velmi podílí na zlepšení odolnosti proti opotřebení prostřednictvím následných efektů.

- Deformační zpevnění v provozu prostřednictvím TRIP efektu

Při zatížení v provozu Creusabro 8000 profituje z povrchového vytvrzení přibližně 70 HB při jakémkoliv druhu opotřebení (náraz, otěr ...).



Obr.11.1 Deformační zpevnění oceli CREUSABRO 8000 [13]

- Opoždění od odstranění úlomku

Ocel Creusabro 4800 má výhodu vyšší schopnosti plastické deformace způsobené nárazem částic abraziva. Tato „zásoba plasticity“ způsobuje opoždění odstranění abrazí vytvořeného mikroobjemu (úločku), čímž zabezpečuje menší rychlost opotřebení, jako by to bylo ve vodě kalené oceli tvrdosti 400HB.

TRIP efekt (transformací indukovaná plasticita)

Ocel Creusabro 8000 má v důsledku přítomnosti zbytkového austenitu v mikrostruktúře schopnost deformačního zpevnění v provozu vlivem lokální plastické deformace. Tato plastická deformace způsobí vytvrzení transformací zbytkového austenitu na tvrdý martenzit. TRIP efekt se též podílí na zpoždění odstranění částic materiálu z povrchu ocele pod vlivem abrazivně působících částic.

Jemná disperze mikrokarbidů

V mikrostruktúře oceli Creusabro 8000 jsou rozloženy jemné mikrokarbidy, které svou přítomností zvyšují odolnost oceli proti opotřebení.

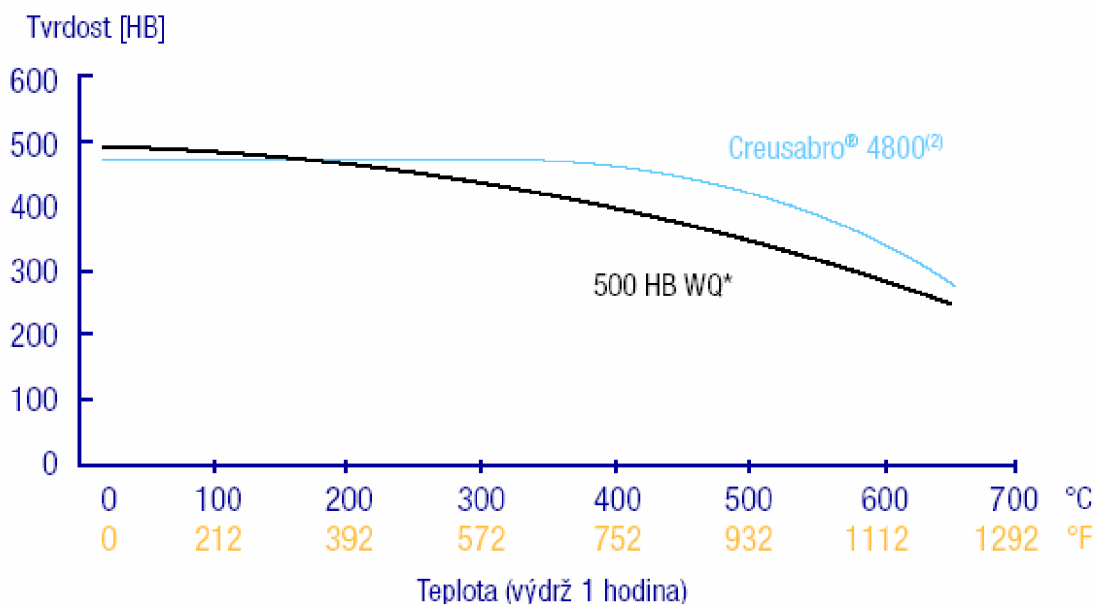
- Souhrn

Tab.11.8 Souhrn [13]

Odolnost proti opotřebení	Ve vodě kalená ocel tvrdosti 500 HB Běžná (konvenční) cesta Pasivní materiál	CREUSABRO 4800 Inovační cesta Aktivní materiál
	Je dána tvrdostí v dodaném stavu.	Kombinace tvrdosti, mikrokarbidů, TRIP efektu
Proces	<ul style="list-style-type: none"> • Nízko legovaná ocel • Kalení do vody 	<ul style="list-style-type: none"> • Specifické přísady legujících prvků • řízená rychlost ochlazování (tepelné zpracování)
Struktura	100% martenzitická lamelární struktura	<ul style="list-style-type: none"> • Struktura: martenzit + zbytkový austenit + mikro-karbidy • Transformace zbytkového austenitu na martenzit pod abrazivním působením • Jemné mikrokarbidy homogenně rozložené

Vlastnosti při vysoké teplotě:

Chemické složení oceli Creusabro 8000 hlavně chrom a molybden zvyšují odolnost proti poklesu tvrdosti oceli při zvýšených teplotách (podstatně lépe než u konvenčních, ve vodě kalených ocelí tvrdosti 500HB).



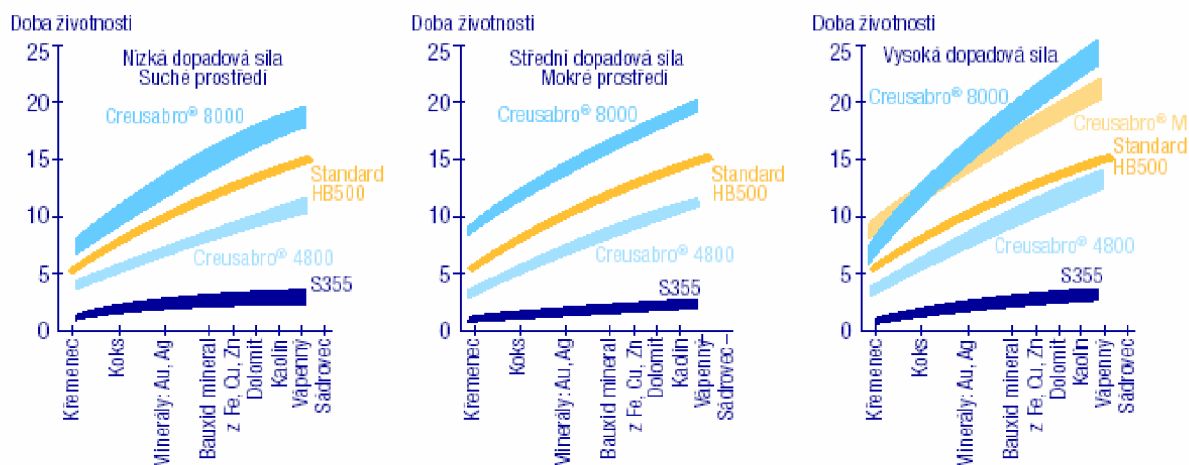
Obr.11.2 Vlastnosti při vysoké teplotě [13]

Tyto vlastnosti dovolují zpracování oceli Creusabro 8000 při vysokých teplotách (450/500°C), tváření za tepla například s ochlazováním na vzduchu bez uvedení výrazného snížení tvrdosti (okolo 30 HB).

Tepelná odolnost oceli Creusabro 8000 dovoluje její využití v prostředí, kde teplota dosahuje maximálně 300°C.

Životnost:

Ať jsou provozní podmínky jakékoliv, specifická inovační koncepce Creusabra 8000 vede ke zlepšení odolnosti proti opotřebení v porovnání s jinými otěruvzdornými ocelmi, dostupnými na trhu.



Obr.11.3 Porovnání životnosti, např. porovnání s životností oceli S355 v prostředí křemene (hodnota 1). [13]

- Zkušební test

Provedlo se hodně testů, které potvrdily vysokou otěruvzdornost a tím i vyšší životnost Creusabra 8000 v porovnání s ve vodě kalenou ocelí tvrdosti 500 HB.

Tab.11.9 Porovnání [13]

Podmínky abrazivního působení	Aplikace	Tloušťka kusu	Životnost (porovnání s ve vodě kalenou ocelí tvrdosti 500 HB)
Doly	obložení z plechů na nakládacích lopatách	30 mm	+ 100%
Ocelárny	vertikální obložení velmi namáhaných skluzů a výklopných lžic jeřábů	15 mm	+ 35%
Výroba umělých hnojiv	drticí kladiva	15 mm	+ 58%
Sklářský průmysl	odchylující desky na pásových dopravnících	15 mm	+ 65%
Lomy (žula)	vyložení z plechů na čelistech drtičů	40 mm	+ 50%

11.1.2 Svařování otěruvzdorné oceli – obecně [14]

Hlavní zásady:

Přídavné materiály musí mít nízký obsah vodíku (do 5 ml/ 100 g), je třeba je vysušit, odstranit mastnotu, zbytky barev a další nečistoty.

Postup svařování se musí naplánovat tak, aby se svařovalo k volným koncům, což umožňuje, aby uniklo vznikající pnutí ve svařovém spoji.

Nepoužívat žíhání na odstranění pnutí po svařování. Oceli při žíhání nad 300°C začínají ztrácet svou tvrdost.

Pokud je doporučen předehřev je nutno jej aplikovat i při stehování. Dále je doporučeno používat minimální délku stehu 50 mm. Při stehování je náchylnost oceli na vznik trhliny vyšší než při samotném svařování. U stehování je rychlost ochlazování vyšší oproti masivnímu svaru.

Doporučený maximální tepelný příkon je v rozmezí 0,5 – 2,5 kJ.mm⁻¹ a je závislý na tloušťce svařovaného materiálu.

11.1.3 Svařování oceli Creusabro 8000 [13]

Ocel Creusabro 8000 může být svařována všemi tradičními metodami sváření: ruční obloukové sváření, sváření v ochranné atmosféře, sváření pod tavidlem. Pro sváření míst nevystavených opotřebení se používají následné přídavné materiály.

Tab.11.10 Přídavné materiály [13]

Použitá metoda sváření	AFNOR	DIN	AWS
Ruční obalenou elektrodou	A81309 E514/3B	DIN 1913 Třída E5143/B10	AWS 5-1 Třída E 7016 nebo 7018
Polo – automatické v ochranném plynu	A81311 GS2	DIN 8559 SG2	AWS A5-18 Třída ER70S4 nebo ER70S6
	A81350 TGS 51BH TGS 47BH	DIN 8559 SGB1 CY 4255	AWS-5-20 Třída ER 71T5

Svařovaná plocha nesmí být mastná, mokrá, okysličená ...

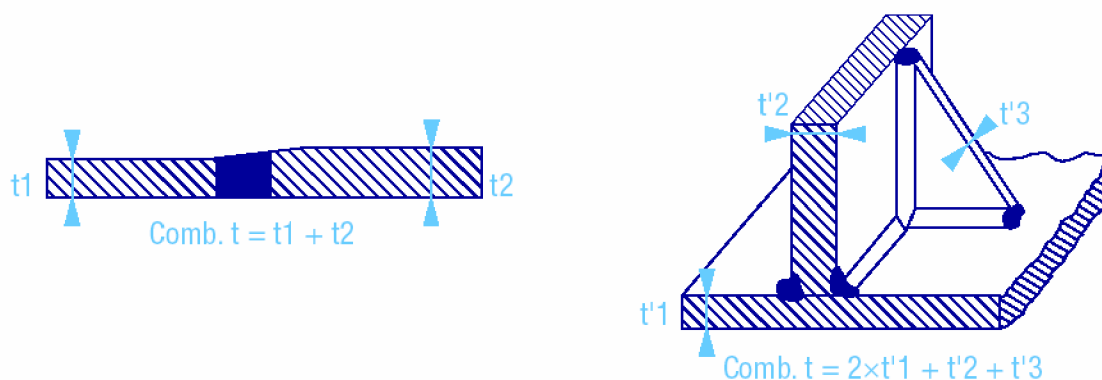
Následující teploty předehřevu by měly být dodrženy (svařovat bez nadměrného namáhání).

Tab.11.11 Předehřev [13]

Metoda sváření	Tepelný příkon [kJ/cm]	Předehřev pro různé kombinované tloušťky plechu [mm]								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
Obloukové sváření obalovanou elektrodou	10									
	20									
Poloautomatické v ochranném plynu	15									
	30									
Obloukové sváření pod tavidlem	20									
	30									

Bez předehřevu
 Předehřev na 100°C
 Předehřev na 150°C

Výpočet kombinované tloušťky:



Obr.11.4 Kombinovaná tloušťka [13]

Tloušťka navrženého svařovaného extrémně ořezuvzdorného plechu je **t = 4 mm**.

11.2 Návrh svařovacích zařízení, podmínek a parametrů svařování

11.2.1 Svařovací metoda MAG

První svařování bylo provedeno metodou MAG – svařování tavící se elektrodou v ochranných aktivních plynech (135).

Bylo využito zařízení TransPulsSynergic 4000 od firmy FRONIUS s pojezdovou jednotkou Fronius Automation – FTV 20.

Ovládací skříňka: FRC 4

Podavač drátu: VR 4000



Obr.11.5 Uspořádání komponentů při svařování metodou MAG



Obr.11.6 TransPulsSynergic 4000 [17]

Metody svařování:
 Svařování MIG/MAG
 Svařování MIG/MAG pulzním obloukem
 Pájení MIG
 WIG – DC
 Svařování obalenou elektrodou

Sériové vybavení:
 2-/4-kladkový posuv
 Automatické odpojení chlazení
 Zavedení drátu bez proudu a plynu
 Monitorování zemního zkratu
 Odhořovací automatika
 Funkce zkouška plynu
 Práce s programovými bloky (JOBS)
 Manuální provoz
 Synergický provoz
 Certifikace S, CE
 Teplotně řízený hořák
 Ovládání Up/Down na hořáku
 Ochrana proti přehřátí
 2-taktní režim, 4-taktní režim
 Bodování
 Start pro hliník
 Digitální displej
 Adaptér pro košovou cívku

Tab.11.12 Technické údaje - svařovací zdroj TPS 4000 [17]

Svařovací zdroj		TPS 4000	
Síťové napětí	+/-10%	50/60Hz	+/-15% 3 x 400 V
Účinnost	0,99 (400 A)		
Rozsah svařovacího proudu		3 – 400 A	
Svařovací proud při zatížení	10 min/40°C	40%	-
	10 min/40°C	50%	400 A
	10 min/40°C	60%	365 A
	10 min/40°C (25°C)	100%	320 A (365 A)
Napětí na prázdko		68 – 78 V	
Pracovní napětí		14,2 – 34,0 V	
Krytí		IP 32	
Hmotnost		77,61 lbs. / 35,2 kg	
Rozměry d x š x v	inch	24,61 x 11,42 x 18,70	
	mm	625 x 290 x 475	

Ochranný plyn: [5]

Dle EN 439 byl zvolen plyn s označením M21 – od firmy LINDE Gas – CORGON 18, což je směs: 82% Ar + 18% CO₂.

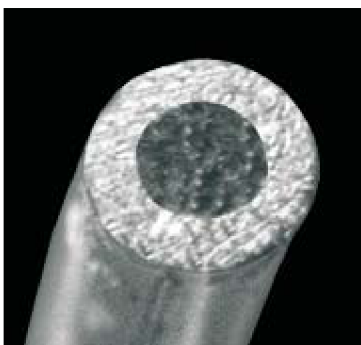
Použitím směsi těchto plynů dojde k podstatnému zvýšení produktivity u ručního nebo mechanizovaného svařování ocelí. Výše uvedená směs plynů umožní snížení rozstříku a tvorby zplodin a tím zlepšení životního prostředí pracujících.

Je vhodný pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, konstrukčních ocelí, žáruvzdorných a žárovevných ocelí, termomechanicky zpracovaných ocelí, vysokopevných ocelí a ocelí pro použití za nízkých teplot.

Volba přídavného materiálu:

Přídavný materiál se volí s ohledem na požadavek hodnot svarového kovu. Tyto materiály musí zajistit, aby se při daných podmínkách svařování zamezilo vzniku vad.

Svařování trubičkovými dráty: [18]



Obr. 11.7 Ukázka průřezu trubičkového drátu [18]

Svařování metodou MAG s použitím trubičkového drátu patří k nejproduktivnějším postupům svařování.

Díky vysoké proudové hustotě, která je dána tím, že proud prochází pouze tenkým trubičkovým pláštěm drátu, dochází k rychlému odtavování (volného konce) drátu a tím i k vysokému odtavnému výkonu.

Trubičkové dráty s kovovým práškem tak nabízí značně vyšší výtěžnosti ve srovnání s plným drátem a časová úspora, která vzniká v procesu svařování, pak příznivě ovlivňuje celkovou kalkulaci nákladů.

Vedle samotného procesu svařování použití trubičkového drátu příznivě ovlivňuje kalkulaci hotového svarového spoje z hlediska následného opracování. Ekonomika celého procesu pak vychází příznivěji, přestože plné dráty jsou levnější než trubičkový drát.

Úspory nákladů spojených s následným opracováním jsou dosahovány:

- snížením deformací v důsledku velkých svařovacích rychlostí
- průběhem svařovacího procesu bez rozstříku svarového kovu
- bezvrubý svar s jemnou kresbou
- snížená potřeba dodatečných úprav okolí sváru
- výrazné eliminace oprav svarů

Charakteristika:

- vyšší odtavovací výkony při menším vneseném teple
- vyšší rychlosti svařování a tím i větší efektivita procesu
- zlepšený přenos kovu do svařovací lázně ve všech polohách svařování
- výrazné úspory a zlepšení ekonomiky celého procesu svařování a zároveň zlepšení kvality provedeného spoje
- dobrá smáčivost boků svarové drážky – lze zmenšit úhel otevření drážky
- úplně uzavřený bezešvý drát – není nutné přerušovat i po delší době jeho skladování

- stejnoměrný tvar, žádné problémy při podávání drátu (vede i dvouklapková mechanika)
- větší tuhost trubičky: nedochází ke kroucení, napínání, zaplétání v kladkách

Aplikace:

- mostní konstrukce
- tlakové nádoby a komponenty
- konstrukce hal
- strojírenství všeobecně – ocelové konstrukce

Návrh přídatného materiálu pro MAG svařování: [18]

Přídavný materiál MEGAFIL®1100 M byl zvolen od firmy WIRPO. Je to trubička s kovovým práškem netvořící strusku.

Je to špičkový přídavný materiál s extra vysokou pevností svarového kovu.

Umožňuje dobré zapalování oblouku i při studeném drátu. Výhodný pro aplikace se svařovacími roboty, svařování na více vrstev bez nutnosti čištění sváru od nečistot. Ideální jak pro krátký oblouk, tak i pro sprchový proces, vynikající přemostění vůlí v kořenových vrstvách, vysoká efektivita svařováním pro ekonomickou výrobu svarků.

Od doby co bežešvé trubičkové dráty jsou odolné proti absorpci vlhkosti, je zaručena koncentrace difuzního vodíku < 5 ml/100g.

Normy:	EN ISO 16 834:	T 89 4 Z M M 1 H5
	AWS / ASME – SFA 5.29:	E 120 T1 - G
	AWS / ASME – SFA 5.28:	E 110 C – G

Tab.11.13 Materiály [18]

Materiály	DIN	EN	ASTM
TM – ocel na potrubí	až StE 890	S890QL1	až A 714 / A 709 / A 515 / A 517
Vysokopevnostní jemnozrnná ocel (popuštěná)	až StE 960 (1100)	až S960QL1 (1100)	až A 714 / A 709 / A 515 / A 517

Certifikace: TÜV, DB

Tab.11.14 Chemické složení svarového kovu % (pro směsný plyn typu M21) [18]

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
0,07	1,5	0,63	< 0,015	< 0,015	0,8	2,7	0,8

Tab.11.15 Mechanické vlastnosti svarového kovu (typické hodnoty pro plyn M21) [18]

Tepelné zpracování	Rp0,2 [N.mm ⁻²]	Rm [N.mm ⁻²]	A ₅ [%]	Nárazová energie [J]	
				±0°C	-20°C
u	> 960	980 - 1180	> 8	> 55	> 47

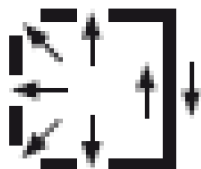
u: po svaření

Trubičkové dráty se dodávají v průměrech Φ 1,0 – 2,4 mm.

Druh proudu = stejnosměrný, (elektroda + pól)



Obr.11.8 Polarita [18]



Obr.11.9 Polohy svařování [18]

Nastavení parametrů pro svařování metodou MAG:

Nejdříve jsme si ozkoušeli na zkušební plechu, s jakými parametry tento plech svařovat. Tento zkušební plech byl tloušťky 3 mm. Konce a střed plechu byly nastehovány bazickou elektrodou OK 48.00 od firmy ESAB tak, aby mezi nimi zůstala mezera 1 mm.

Parametry byly nastaveny takto:

$I = 150 \text{ A}$

$U = 21,8 \text{ V}$

$v = 35 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

plyn: CORGON 18

impulzní svařování

Přídavný materiál MEGAFIL®1100 M - Φ 1,2 mm

Výpočet vneseného tepla:

$$Q = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_{sv} \cdot 1000}$$

$$Q = \frac{0,85 \cdot 21,8 \cdot 150}{5,83 \cdot 1000} \quad (11.1)$$

$$Q = 0,477 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

U – napětí oblouku [V]

I – svařovací proud [A]

v_{sv} – svařovací rychlost [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]

η – účinnost svařování

Na plechu nebyl proveden žádný úkos, svařování bylo provedeno natupo. Po svaření impulzním proudem byl plech kartáčem očištěn a prohlédnut. Při svařování nedocházelo k nějakému výraznému rozstříku. Došlo k dobrému protavení kořene.

Dále jsme svařovali stejný plech, vzorek o tloušťce 4 mm a délka svaru dosahovala 190 mm. Dva plechy byly opět nejdříve nastehovány na koncích elektrodou, mezera mezi plechy 1 mm.

Byly nastaveny tyto parametry:

$$I = 180 \text{ A}$$

$$U = 23,4 \text{ V}$$

$$v_{sv} = 35 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$$

plyn: CORGON 18

impulzní svařování

Přídavný materiál MEGAFIL®1100 M - Φ 1,2 mm

Skutečné hodnoty však jsou:

$$I = 172 \text{ A}$$

$$U = 25,3 \text{ V}$$

$$v_{sv} = 35 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$$

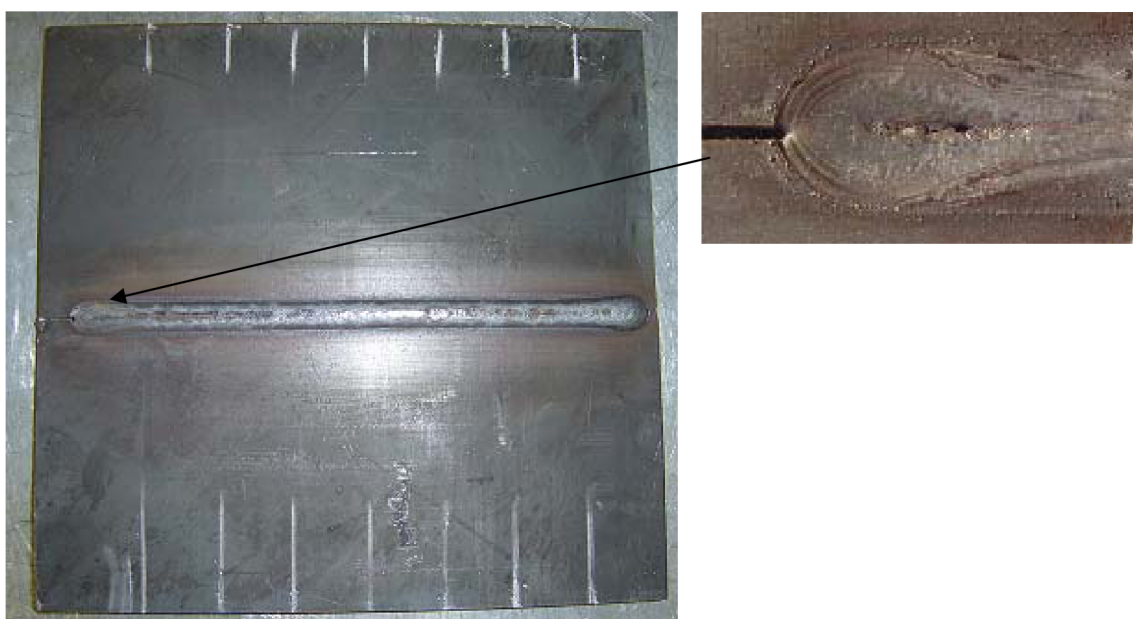
Výpočet vneseného tepla Q pro skutečné hodnoty:

$$Q = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_{sv} \cdot 1000}$$

$$Q = \frac{0,85 \cdot 25,3 \cdot 172}{5,83 \cdot 1000} \quad (11.2)$$

$$Q = 0,634 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Na plechu nebyl opět proveden žádný úkos, svařování bylo provedeno natupo. Po svaření impulzním proudem byl plech kartáčem očištěn a prohlédnut. Při svařování nedocházelo k nějakému výraznému rozstříku. Došlo k dobrému protavení kořene, a svařený vzorek nevykazoval úhlové deformace. Na konci svarové lázně zůstala výrazná kráterová trhlina nedosažením přídavného materiálu před ukončením krystalizace.



Obr.11.10 Vzorek svařený metodou MAG, kráterová trhlina

11.2.2 Svařovací metoda plazma

Druhé svařování bylo provedeno metodou PLAZMA (15).

Bylo využito svařovacího zdroje MagicWave 4000 (Job), plazmového modulu PlasmaModule 10 a podavače drátu s označením KD 7000 D - 11. Všechny zařízení jsou od firmy FRONIUS.

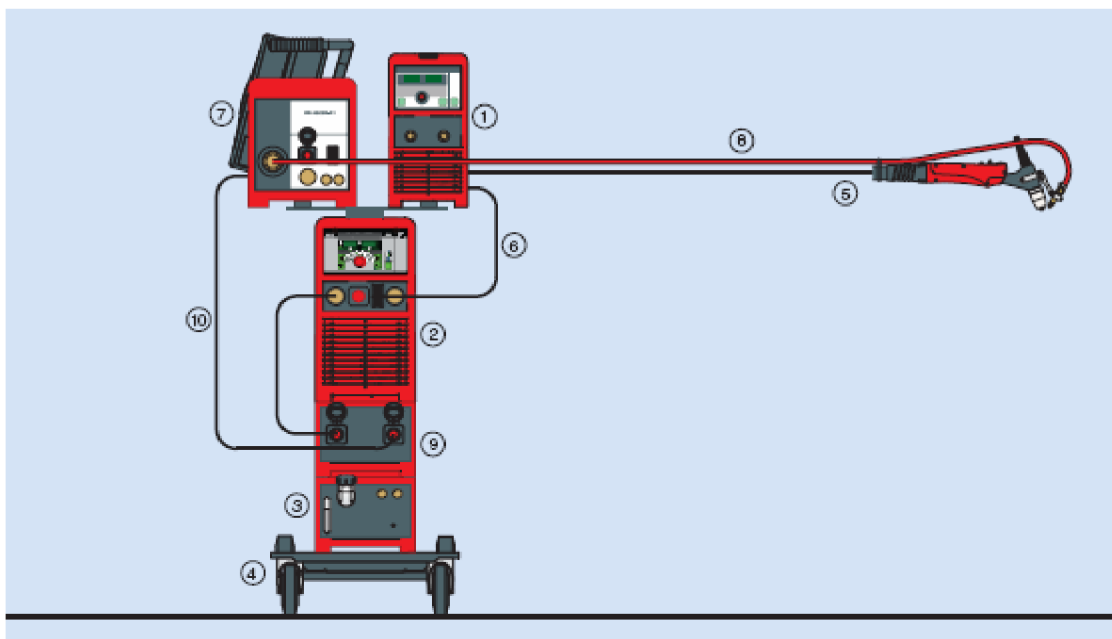
Podavač drátu: KD 7000D -11

Ovládací skříňka (dálkové ovládání): FRC – 40

Pojzdová jednotka - FTV 20

Plazmový hořák: PTW 3500

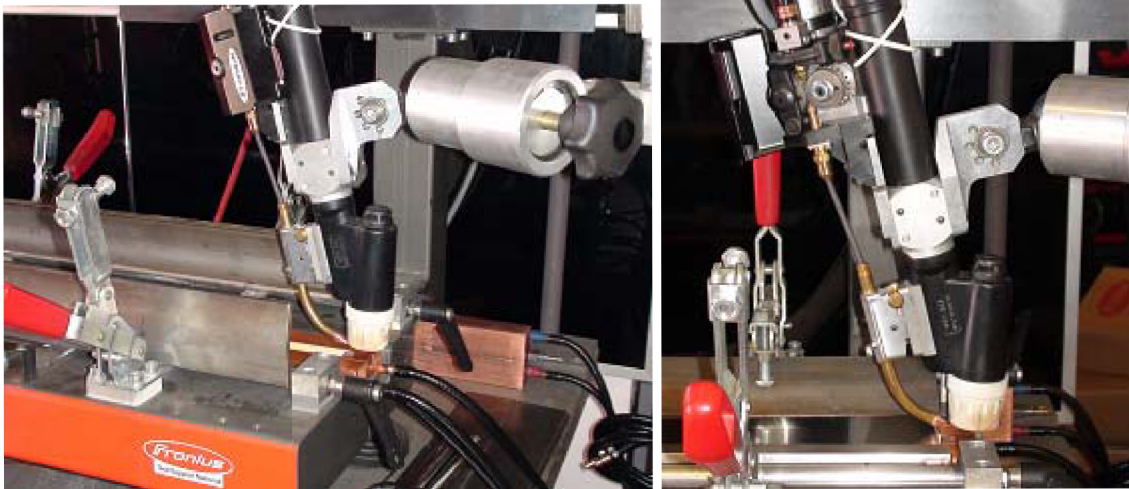
Cu – podložka s drážkou je nutná pro odvod plynů, je chlazená vodou – zařízení pro chlazení „Kühlkreis“ FK 57 50 Hz.



Obr.11.11 Uspořádání komponentů při robotickém průvarovém svařování plazmou [17]



Obr.11.12 Podavač KD 7000D-11, PlazmaModule 10, zdroj MagicWave 4000 (Job)



Obr.11.13 Plazmový hořák PTW 3500, podávání drátu



Obr.11.14 MagicWave 4000 (Job) [17]

Metody svařování:

WIG-DC

WIG-AC/DC

Obalená elektroda

Sériové vybavení:

Automatická tvorba kaloty

Automatické odpojení chladicího modulu

Přepínatelné zapalování dotyk / VF

Zkouška plynu

Možnost připojení na elektrocentrálu

Programový provoz (JOB – pouze u MW 4000 / 5000 Job)

Přepínání polarity

Certifikace S, CE

Teplotně řízený větrák

Regulace UpDown na hořáku

Ochrana proti přehřátí
 2-taktní a 4-taktní režim
 Bodovací / Pulzní režim
 Digitální displej
 Stehovací program TAC
 Monitorování zemního zkratu
 Možnost přepojení na sběrnici

Tab.11.16 Technické údaje – svařovací zdroj MW 4000 (Job) [17]

Svařovací zdroj		MW 4000 (Job)	
Síťové napětí	+/-10%	50/60Hz	+/-15% 3 x 400 V
Účinit		0,99 (400 A)	
Rozsah svařovacího proudu		WIG	3 – 400 A
		EL	10 – 400 A
Svařovací proud při zatížení	10 min/40°C	40%	-
	10 min/40°C	45%	400 A
	10 min/40°C	60%	365 A
	10 min/40°C (25°C)	100%	310 A
Napětí na prázdkno		86 V	
Pracovní napětí		WIG	10,1 – 26,0 V
		EL	20,4 – 36,0 V
Krytí		IP 32	
Hmotnost		128,31 lbs. / 58,2 kg	
Rozměry d x š x v		inch	24,61 x 11,42 x 27,76
		mm	625 x 290 x 705

PlasmaModule 10 [17]

Plazmový modul si řídí průtok plazmového plynu, řídí pilotní oblouk – start/stop, obsahuje i řídicí obvody pro vlastní plazmové svařování.

Sériové vybavení:

Funkce zkouška plynu
 Teplotně řízený větrák
 Plynulé nastavení pilotního proudu (podle typu hořáku)
 Digitální ampérmetr pro údaj pilotního proudu
 Digitální údaj průtoku plazmového plynu
 Bezdotykové zapálení pilotního oblouku
 Startovací tlačítko pro pilotní proud
 Předvolba nastavení (interně / externě)
 Možnost montáže na podvozek

Tab.11.17 PlasmaModule 10 [17]

Technické údaje		PlasmaModule 10
Síťové napětí	+ 15% 50/60Hz	230 V
Síťové jištění – zpožděný typ		16 A
Napětí na prázdko		88 V
Pracovní napětí		10 – 16 V
Krytí		IP 32
Pilotní rozsah proudu (přednastavený)		3 – 30 A
Množství plazmového plynu (regulovatelné)		0,078 - 2,64 gal/min / 0,3 – 10,0 l/min
Hmotnost		31,2 lbs. / 14,2 kg
Rozměry d x š x v	inch	19,9 x 7,1 x 13,6
	mm	505 x 180 x 344

Plazmový plyn, ochranný plyn a ochranný plyn pro kořen (formovací plyn): [5]
Dle EN 439 byl zvolen plyn s označením I1 – od firmy SIAD – Argon Ar Technický 4.6, tj. je čistý argon (100 %).

Volba přídavného materiálu:

Pro svařování plazmou byl zvolen ten stejný přídavný materiál jako u svařování MAG, tzn. trubičkový drát MEGAFIL®1100 M od firmy WIRPO. Podrobnější popis viz. výše u metody MAG.

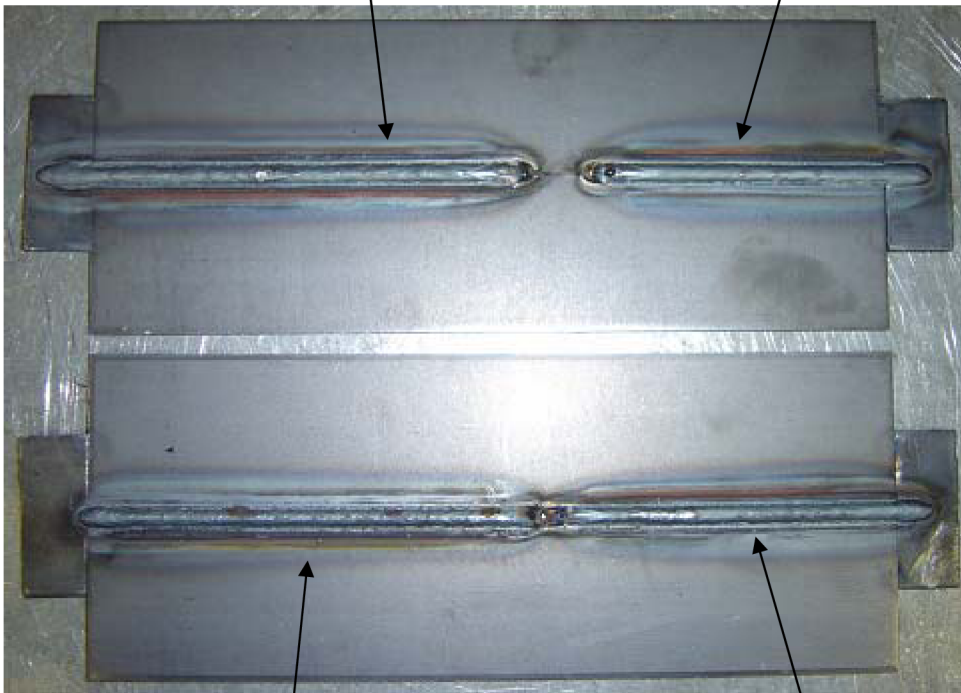
Nastavení parametrů pro svařování metodou PLAZMA:

Připravené plechy o tloušťce 4 mm byly nejdříve nastehovány ručně bez přídavného materiálu svařovací metodou TIG s ochranným plynem Ar tak, aby mezi plechy nebyla žádná mezera. Pak byl plech ustaven a upevněn na stole pomocí upínek a svařen plazmou způsobem „key hole“. Plechy svařovány bez úkosů.

Zkušební plechy:

$I = 210 \text{ A}$
 $U = 23,4 \text{ V}$
 $v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok plazmového plynu = $1,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok formovacího plynu = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 $Q = 0,51 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- zápal na jedné straně
- pěkná klíčová dírka
- kořen provařen

$I = 220 \text{ A}$
 $U = 24,1 \text{ V}$
 $v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok plazmového plynu = $1,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok formovacího plynu = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 $Q = 0,55 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- zápal na obou stranách
- kořen provařen
- pěkná klíčová dírka



Obr.11.15 Zkušební plechy

$I = 200 \text{ A}$
 $U = 25,0 \text{ V}$
 $v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok plazmového plynu = $2,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok formovacího plynu = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 $Q = 0,51 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- zápal na jedné straně
- širší průvar
- pěkná klíčová dírka

$I = 200 \text{ A}$
 $U = 23,4 \text{ V}$
 $v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
 $v_d = 2,2 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok plazmového plynu = $1,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
Průtok formovacího plynu = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$
 $Q = 0,48 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$
- zápal na obou stranách
- na konci svaru není provařen kořen
- pěkná klíčová dírka

Zkušební plech:

Délka svaru = 190 mm

$I = 220 \text{ A}$

$U = 25,3 \text{ V}$

$v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

$v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok plazmového plynu = $2,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok ochranného plynu pro kořen (formovací plyn) = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Vzorek:

$I = 220 \text{ A}$

$U = 25,3 \text{ V}$

$v_{sv} = 350 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

$v_d = 2,0 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok plazmového plynu = $2,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok ochranného plynu = $5,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Průtok ochranného plynu pro kořen (formovací plyn) = $4,0 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$

Výpočet vneseného tepla Q :

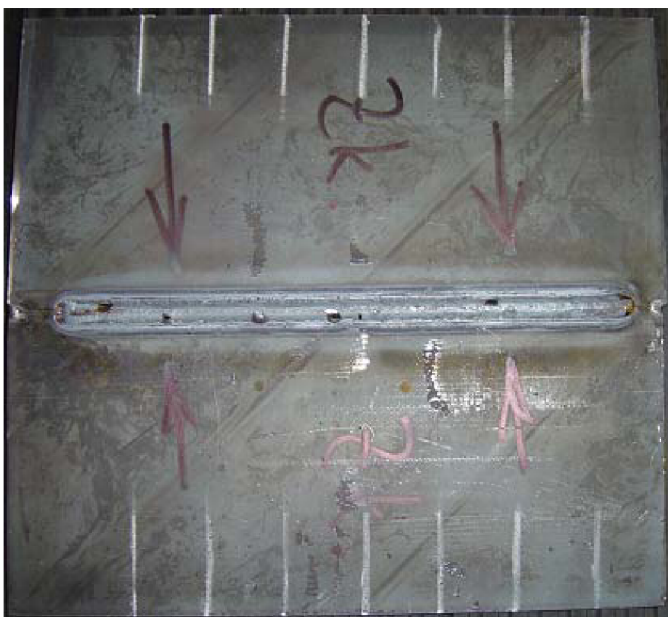
$$Q = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{v_{sv} \cdot 1000}$$

$$Q = \frac{0,6 \cdot 25,3 \cdot 220}{5,83 \cdot 1000} \quad (11.3)$$

$$Q = 0,573 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Na plechu nebyl proveden žádný úkos, svařování bylo provedeno natupo.

Při svařování nedocházelo k rozstříku. Došlo k dobrému protavení kořene, a svařený vzorek nevykazoval žádné deformace. Po obou stranách svaru se tvořily mírné zápaly, které nebylo možné odstranit i po několika nastavení různých parametrů.



Obr.11.16 Vzorek svařený metodou plazma

11.3 Příprava vzorků na mechanické zkoušky – řezání vzduchovou plazmou

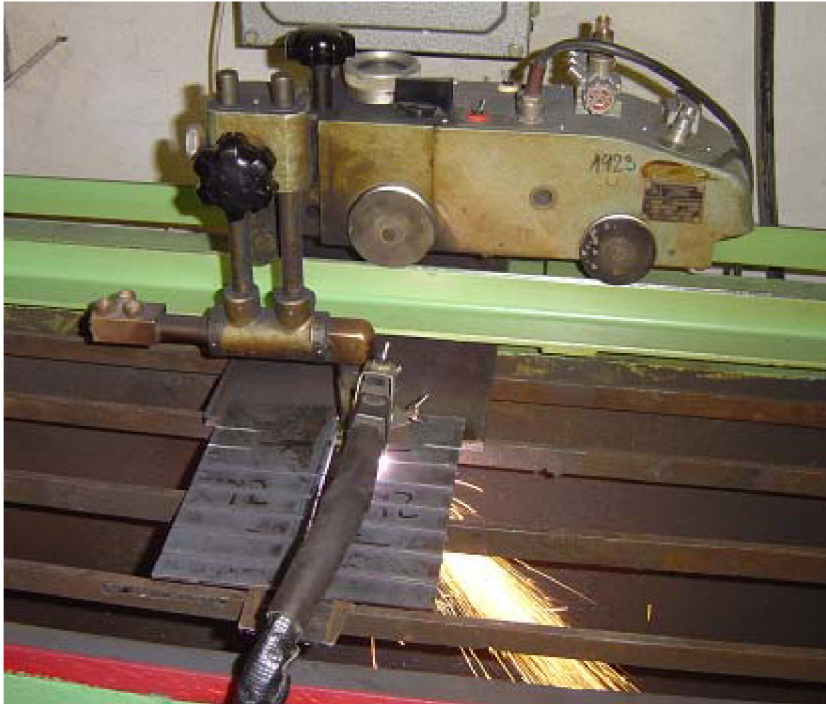
Vzduchová plazma je v současné době velmi rozšířená a její provoz je ekonomicky výhodný do tloušťky plechu cca 40 mm. Ke stabilizaci se používá stlačený vzduch (0,4 až 0,8 MPa). Vysokým průtokem vzduchu se ochlazují vnější vrstvy plazmy, tak se kontrahuje plazmový paprsek a získá se úzká rovnoběžná řezná spára. Současně s vysokým průtokem se zlepšuje chlazení hořáku. Vzduchová plazma má ve srovnání s plynovou výrazně větší tepelnou kapacitu a tím i vysokou rychlost řezání. Pro řezání vzduchovou plazmou se použila hafniová elektroda, která je uložena v niklovém pouzdře měděného nosiče.

Svařené plechy byly rozřezány vzduchovou plazmou, každý na 8 dílů. 2 díly vždy pro tahovou zkoušku a 4 díly vždy pro zkoušky lámavosti – 2 přes svar, 2 přes kořen.

Zařízení pro řezání plazmou:



Obr.11.17 Uspořádání při řezání vzduchovou plazmou



Obr. 11.18 Příklad řezání vzorku

Zdroj: ESAB LPH 50 POWER CUT

Parametry při řezání plazmou:

$p_{\text{vzduch}} = 4,5 \text{ bar}$

$I = 30 \text{ A}$

$v_{\text{řezání}} = 250 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$

12. MECHANICKÉ ZKOUŠKY

12.1 Obecně – rozdělení

Mechanické vlastnosti materiálů jsou určovány experimentálně. Důležité faktory, které přímo ovlivňují zjištěnou hodnotu dané vlastnosti, jsou:

- typ působícího zatížení – tahové, tlakové, krutové, ohybové, stříhové
- časový průběh zatížení
- doba zatížení
- teplota

Destruktivní zkoušky:

- zkouška tahem
- zkouška rázem v ohybu
- zkouška lámavosti
- zkouška tvrdosti
- makroskopická a mikroskopická kontrola
- zkouška únavové pevnosti
- speciální zkoušky

Nedestruktivní zkoušky:

- zjišťování struktury materiálů
- defektoskopie

12.2 Zkouška tahem

Zkušební tyč je při zkoušce tahem namáhána jednoosým tahem a tato zkouška končí destrukcí zkušební tyče.

Zkouška tedy spočívá v deformaci zkušební tyče a vyhodnocení pevnostních charakteristik. Zkušební tyč je upnuta do čelistí stroje a zatěžována silou do porušení.

Stroj, na kterém se zkouška prováděla, se nazývá hydraulický zkušební stroj ZD 40 (400 kN)

Na tomto stroji můžeme provádět tahové, ohybové a tlakové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování. Je zde umožněno programové zpracování a vyhodnocení zkoušek. Součástí je i řídicí jednotka EDC 60 se snímačem síly.

Technické parametry:

Výrobce: HBM (SRN)

Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN

Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. ± 1%

Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm

Chyba měření dráhy: ± 0,01 mm

Počítač je vybaven programem M – TEST v.1.7 pro zkoušení kovových materiálů dle EN 10001 – 2 s vyhodnocením výsledků i grafických zpracování.



Obr.12.1 Hydraulický zkušební stroj ZD 40



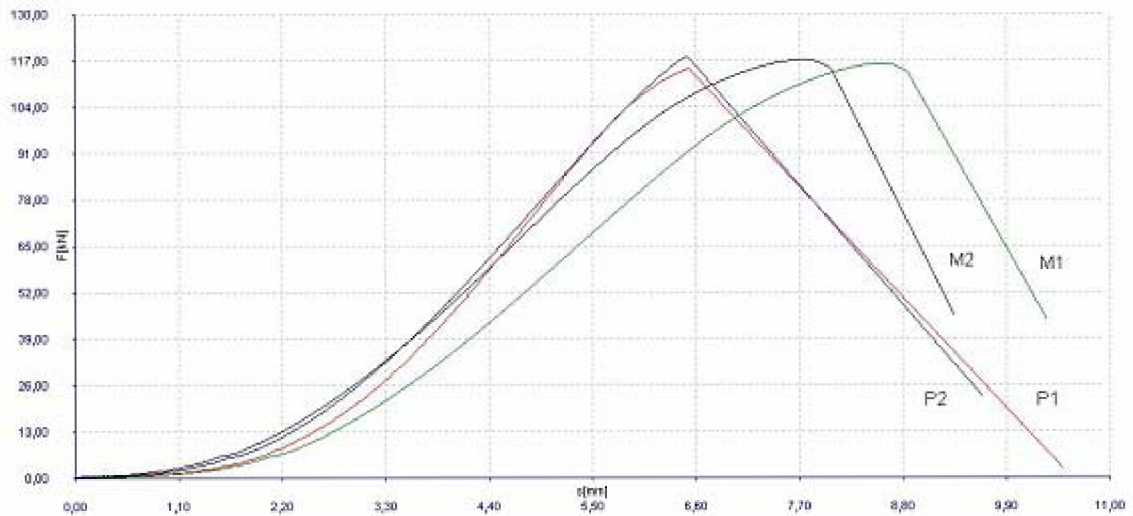
Obr.12.2 Nařezané vzorky pro tahovou zkoušku svařované metodou plazma



Obr.12.3 Nařezané vzorky pro tahovou zkoušku svařované metodou MAG

Tab.12.1 Naměřené hodnoty při tahové zkoušce

číslo zk.	a[mm]	b[mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Vzorek
1	4,1	23,1	94,48	114724,8	1201,25	1214,29	4	P1
2	4,1	25,2	103,11	117988,0	1110,25	1144,30	3	P2
3	4,1	23,2	94,85	116088,4	1123,22	1223,95	4	M1
4	4,1	23,6	96,44	117188,4	1117,81	1215,12	4	M2



Obr.12.4 Graf tahové zkoušky pro vzorky P1, P2, M1, M2

Vzorky svařované metodou plazma:

P1

U tohoto vzorku byla nastavena vysoká rychlost zatěžování.



Obr.12.5 Vzorek P1 - plazma

P2

U vzorku P2 došlo k utržení ještě dříve než u vzorku P1, tento vzorek nejdříve praskl na začátku zápalu a dále pokračovalo prasknutí napříč přes svar.



Obr.12.6 Vzorek P2 - plazma

Přesto že byl u obou vzorků kolem svaru zápal o malé hloubce, byla dosažena vysoká mez kluzu.

Vzorky svařované metodou MAG:

M1



Obr.12.7 Vzorek M1 – MAG

M2



Obr.12.8 Vzorek M2 – MAG

U těchto vzorků je nevýrazná mez kluzu, můžeme zhodnotit zkoušku jako prokazatelnou, naměřené hodnoty meze kluzu odpovídají. Vzorky praskly v tepelně ovlivněné oblasti.

12.3 Zkouška lámavosti

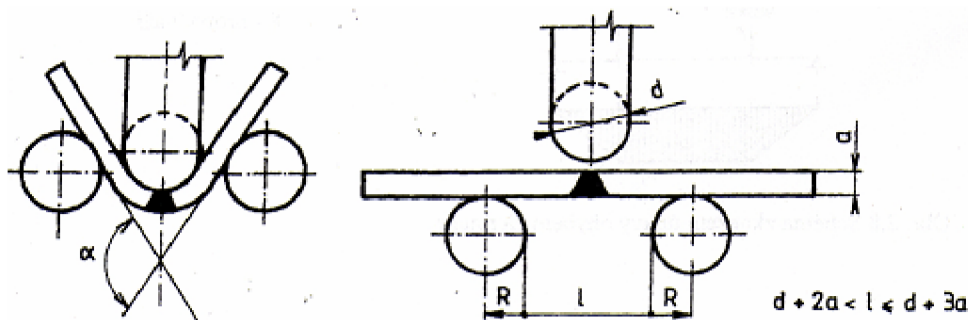
12.3.1 Zkouška lámavosti obecně [3]

Zkouška lámavosti podle ČSN EN 910 se používá zejména pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů za studena. Pro tloušťky materiálu < 12 mm musí být zkoušeny dvě zkušební tyče ze strany svaru a dvě ze strany kořene.

Destruktivní zkouška svarů kovových materiálů – Zkouška lámavosti a u základních materiálů podle ČSN ISO 7438 Kovové materiály – Zkouška lámavosti (obr. 12.9).

Průměr ohýbacího trnu d musí splňovat požadavky odpovídající normy výrobku bez vzniku trhlin.

Princip spočívá v ohnutí ploché tyče o tloušťce zkoušeného svaru t maximálně do 30 mm okolo trnu do předepsaného úhlu ohybu. Kritériem odolnosti při zkoušce lámavosti je dosažení předepsaného úhlu ohybu bez vzniku trhlin, nebo vznik první trhliny na tažené straně tyče s registrací dosaženého úhlu. Dosažení úhlu ramen 180° , tj. jejich rovnoběžnost při neporušení celistvosti materiálu nebo vzniku trhlin, je považováno za plně vyhovující kritérium. Nejméně příznivá je orientace tzv. „otvírání svaru“ podél kořenové vrstvy.



Obr.12.9 Schéma zkoušky lámavosti [3]

Přísnost zkoušky se zvýší s umístěním kořene svaru na tažené straně zkušebního tělesa. (ČSN 910 Destruktivní zkoušky svarových spojů kovových materiálů – Zkoušky lámavosti. Nahrazuje norma ČSN 05 1124.)

12.3.2 Vlastní zkouška lámavosti

Zkoušky lámavosti byla provedena na hydraulickém univerzálním stroji ZD 20 (200 kN).

Parametry:

Průměr trnu: $d = 25$ mm

Průměr podpor: $D = 50$ mm

Vzdálenost středů podpor: $l = 100$ mm



Obr.12.10 Hydraulický univerzální stroj ZD 20

Tab.12.2 Naměřené hodnoty při zkoušce lámavosti

Vzorek	F_{max} [kN]	Úhel ohybu α [°]	Výsledek, trhlina
M1L sv	7,6	60	vznik trhliny do 5 mm od svaru
M2L sv	7,8	57	vznik trhliny do 5 mm od svaru
M3L k	7,15	53	vznik trhliny podél kořene
M4L k	7,0	49	vznik trhliny podél kořene
P1L sv	1,4	29	vznik trhliny podél zápalu
P2L sv	5,3	28	vznik trhliny podél zápalu
P3L k	8,05	66	vznik trhliny do 5 mm od kořene
P4L k	7,5	57	vznik trhliny podél kořene

Vzorky MAG – svar:



Obr.12.11 M1 svar



Obr.12.12 M2 svar

Vzorky MAG – kořen:



Obr.12.13 M3 kořen



Obr.12.14 M4 kořen

Vzorky plazma – svar:



Obr.12.15 P1 svar



Obr.12.16 P2 svar

Vzorky plazma – kořen:



Obr.12.17 P3 kořen



Obr.12.18 P4 kořen

Výsledky zkoušky lámavosti jsou uvedeny v tab.12.2.

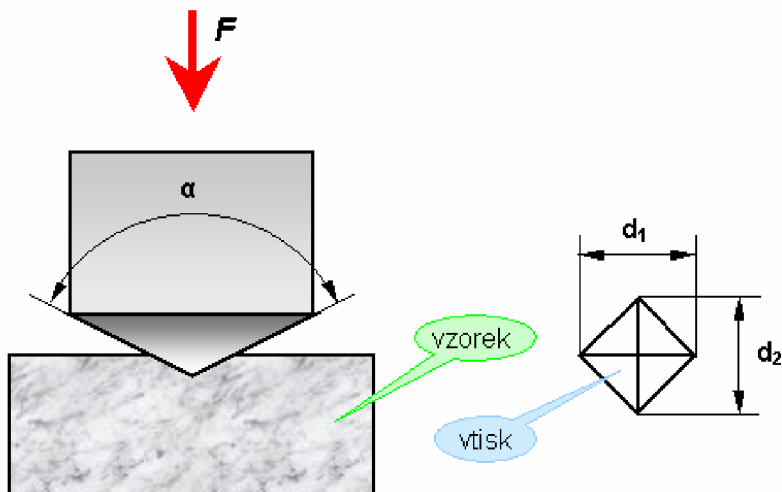
U vzorků svařených metodou plazma je vidět na obr.12.15 a obr.12.16, že při této zkoušce praskly vzorky při malém ohybovém úhlu (cca 30°) přímo podél zápalu ze strany svaru.

Ostatní úhly odpovídají specifikacím přídatného materiálu, které jsou pro materiály těchto typů a tvrdostí dosažitelné.

12.4 Zkoušky tvrdosti

12.4.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse – HV – obecně [5]

Vnikajícím tělískem je čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°, tvrdost je hodnocena dle střední úhlopříčky vtisku.



Obr.12.19 Zkouška tvrdosti dle Vickerse ČSN EN ISO 6507-1

Výpočet Vickersovi tvrdosti je dán vzorcem:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d_s^2} \quad (12.1)$$

F – zatěžující síla [N]

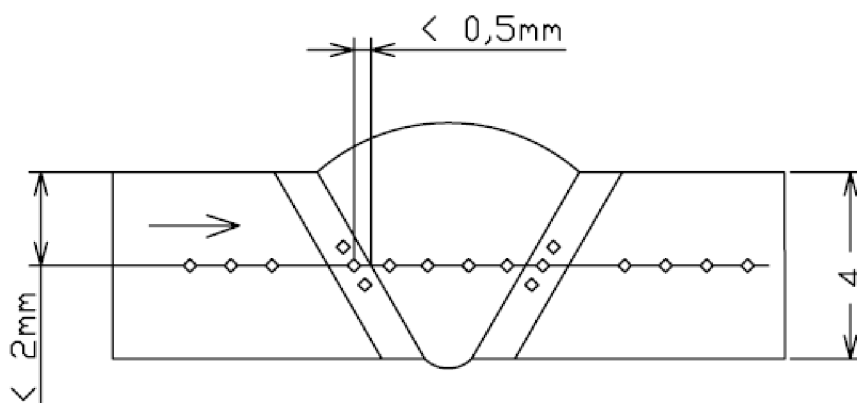
d_s – střední úhlopříčka vtisku [mm]

Vickersova zkouška se používá pro hodnocení materiálů o vyšších pevnostech. Podle ČSN EN 1043-1 je pro měření tvrdosti ve svarových spojích předepsána zkouška HV 10 s předepsaným zkušebním zatížením 98 N nebo HV 5 se zkušebním zatížením 49 N.

12.4.2 Vlastní zkouška tvrdosti dle Vickerse - HV

Měření tvrdosti se provedlo v základním materiálu, v tepelně ovlivněných oblastech a ve svarovém kovu. Každá řada vtisků musí mít minimálně 3 jednotlivé vtisky v každé výše uvedené oblasti.

Počet a rozmístění vtisků musí být uvážen tak, aby to postačilo k určení oblasti se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí v důsledku svařování.

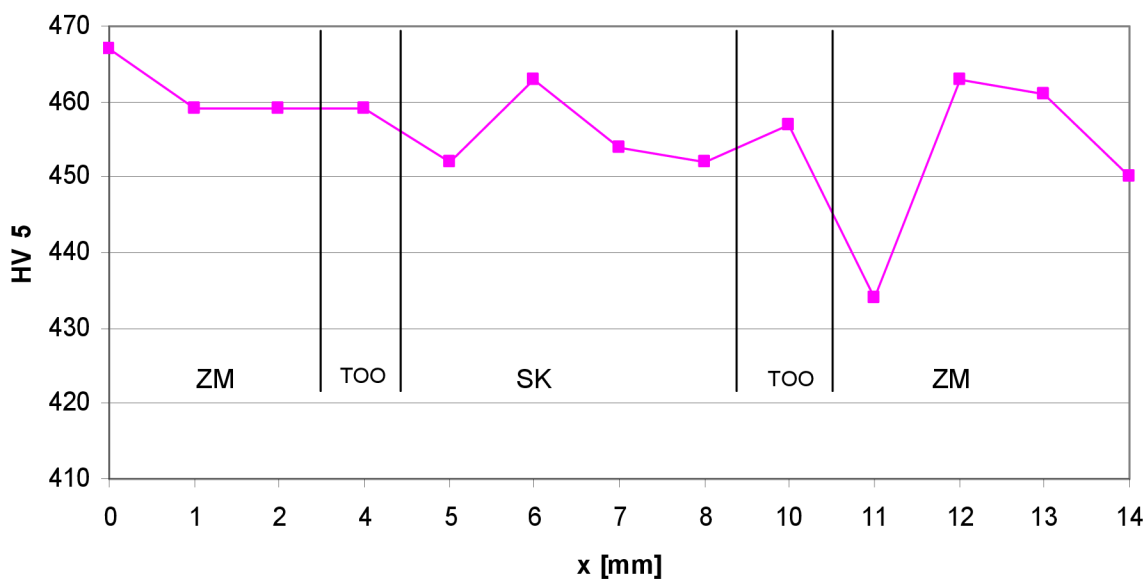


Obr.12.20 Přibližné rozmístění vtisků [hodnoty v mm]

Tab.12.3 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku MAG

VZOREK MAG TVRDOST HV 5												
Základní materiál	TOO	Svarový kov						TOO	Základní materiál			
→												
		437						467				
467	459	459	472	452	463	454	452	473	434	463	461	450
		467						432				

HV 5, CREUSABRO 8000, t = 4mm, MAG

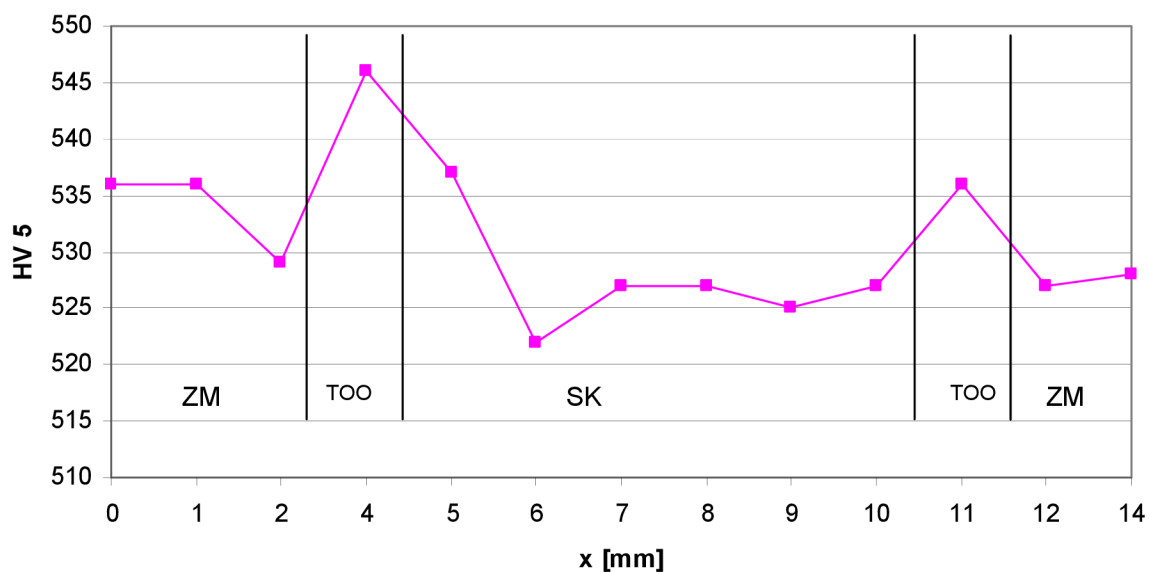


Obr.12.21 Charakteristický průběh tvrdostí v základním materiálu a svarovém spojem

Tab.12.4 Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku PLAZMA

VZOREK PLAZMA TVRDOST HV 5															
Základní materiál	TOO	Svarový kov										TOO	ZM		
→															
		549											539		
536	536	529	543	537	522	527	527	525	527	527	527	527	528		
		546											541		

HV 5, CREUSABRO 8000, t = 4 mm, PLAZMA



Obr.12.22 Charakteristický průběh tvrdostí v základním materiálu a svarovém spojem

Zhodnocení tvrdosti:

Pro měření tvrdosti byla zvolena metoda podle Vickerse HV 5 se zkušebním zatížením 49 N. Měření bylo provedeno na tvrdoměru Zwick 3212 (obr.12.23). Pro snímání a vyhodnocení vtisků je standardní stroj vybaven souřadnicovým stolem a připojením na PC. Vybavení včetně software je od firmy Zwick.

V tepelně ovlivněné oblasti nepozorujeme u vzorku při svařování MAG nárůst tvrdosti. U plazmového svařování můžeme vidět malý nárůst tvrdosti v TOO, ale není výrazný. U obou technologií jsou v základním materiálu a svarovém spojem téměř rovnoměrné hodnoty.

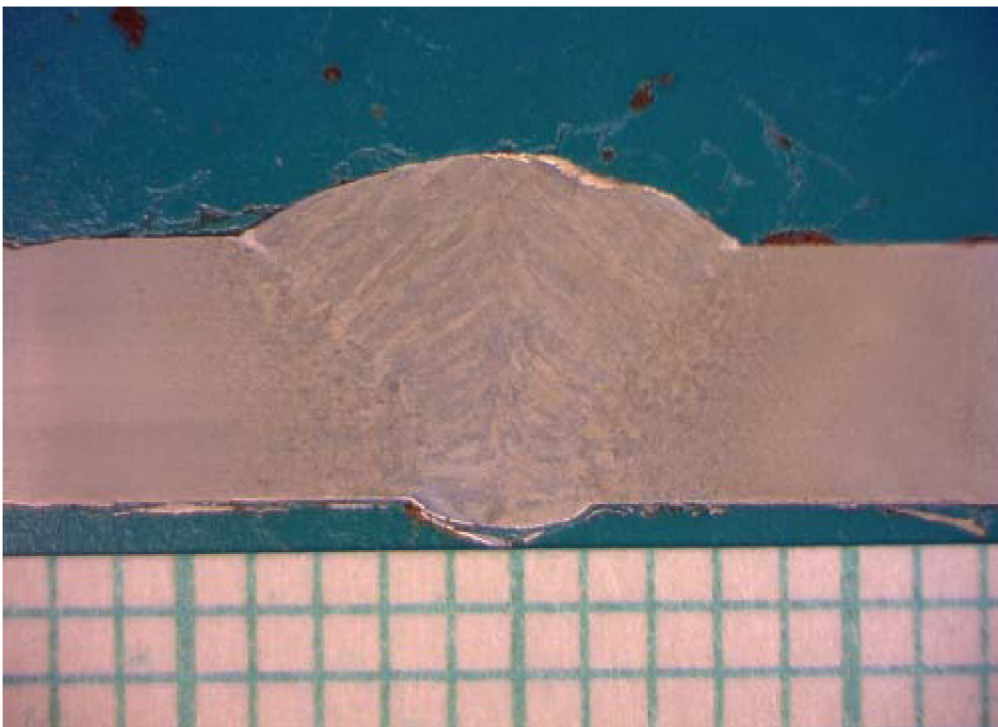


Obr.12.23 Tvrdoměr Zwick 3212

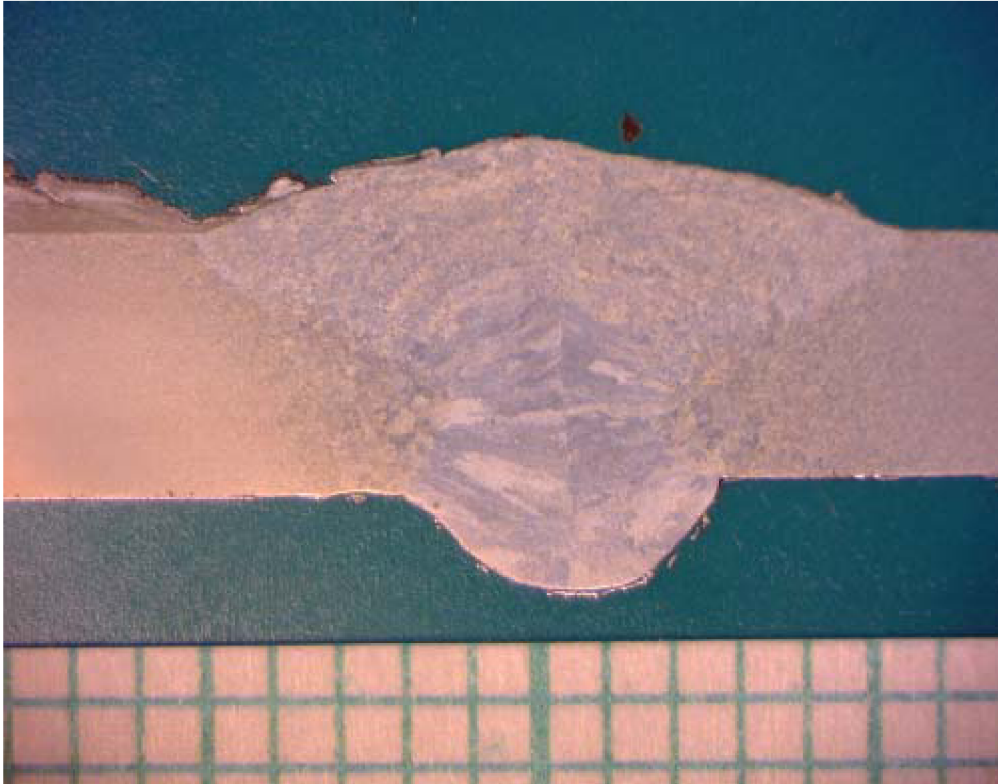
Metalografická kontrola:

Běžně se používá jako doplněk testů mechanických vlastností při ověřování zejména stavu struktury materiálu, resp. svarových spojů. Musí se připravit zkušební vzorky, provede se vhodný odběr, dále broušení na metalografických papírech, leštění a leptání. Vzorky byly leptány 2%ním nitemem.

Makrostruktura svarového spoje:



Obr.12.24 Makrovýbrus svarového spoje provedeného způsobem svařování MAG v porovnání s milimetrovým papírem



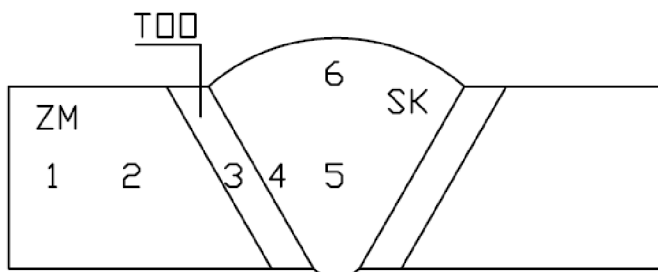
Obr.12.25 Makrovýbrus svarového spoje provedeného způsobem svařování plazma v porovnání s milimetrovým papírem

Na výše uvedené makrostruktuře (obr.12.25) lze pozorovat v oblasti kořene větší dendrity oproti obr.12.24, dále je vidět i rozdílná krystalizace u obou vzorků. Vzorek svařovaný plazmou vykazuje větší šířku svaru a větší průvar kořene.

Mikrostruktury kovů svarů:

Mikrostruktura byla vyhodnocena u vzorku svařeného plazmou a byla pozorována na optickém mikroskopu se zvětšením 200x.

Dle čísel na obr.12.26 byly udělány snímky mikrostruktur různých oblastí.



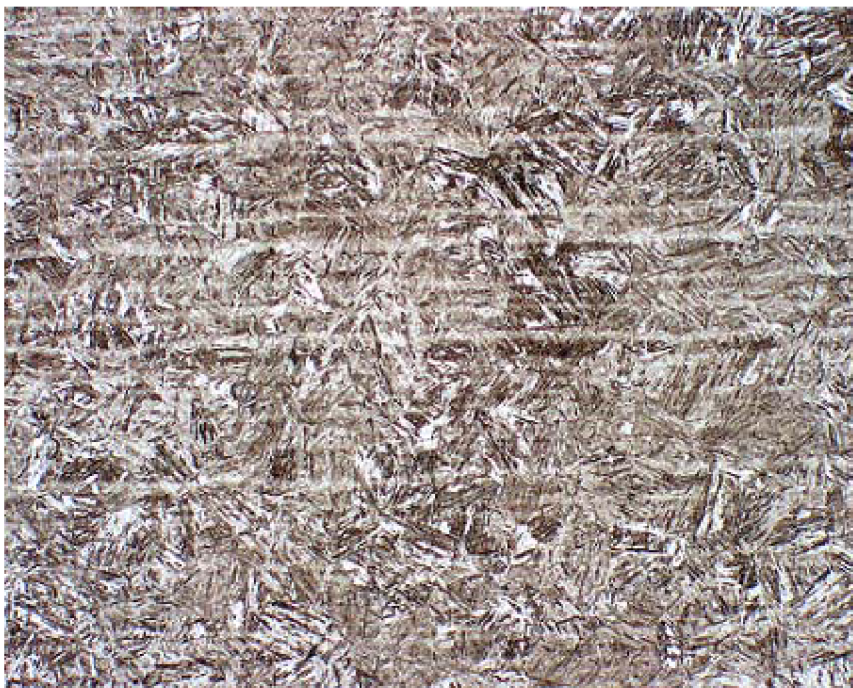
Obr.12.26 Rozmístění odebrání snímků mikrostruktur

Uvedené fotografie mají zvětšení 200x.



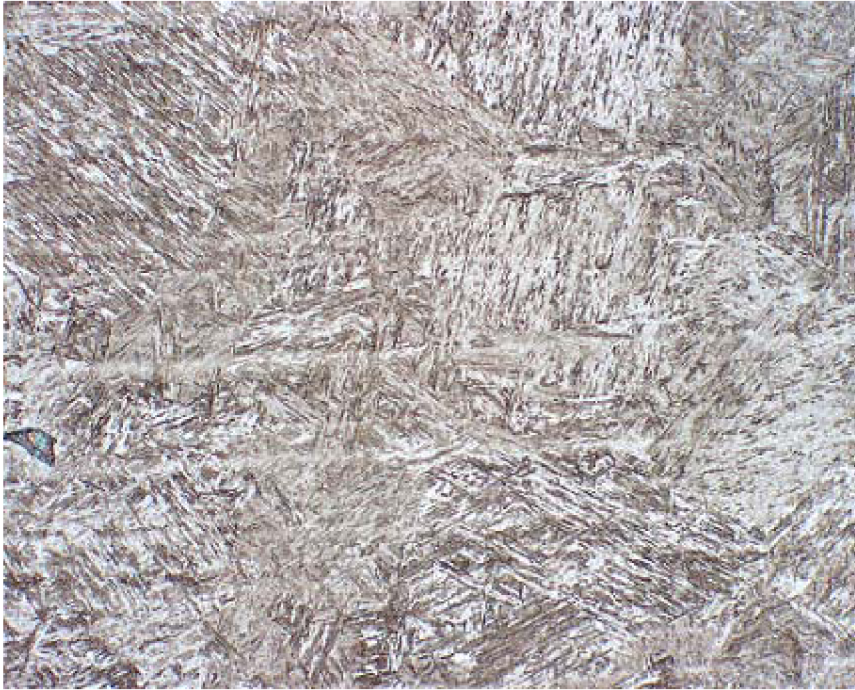
Obr.12.27 Mikrostruktura základního materiálu (1)

Na obr.12.27 je vidět jemnozrnný martenzit a také vlákna materiálu ve směru válcování.

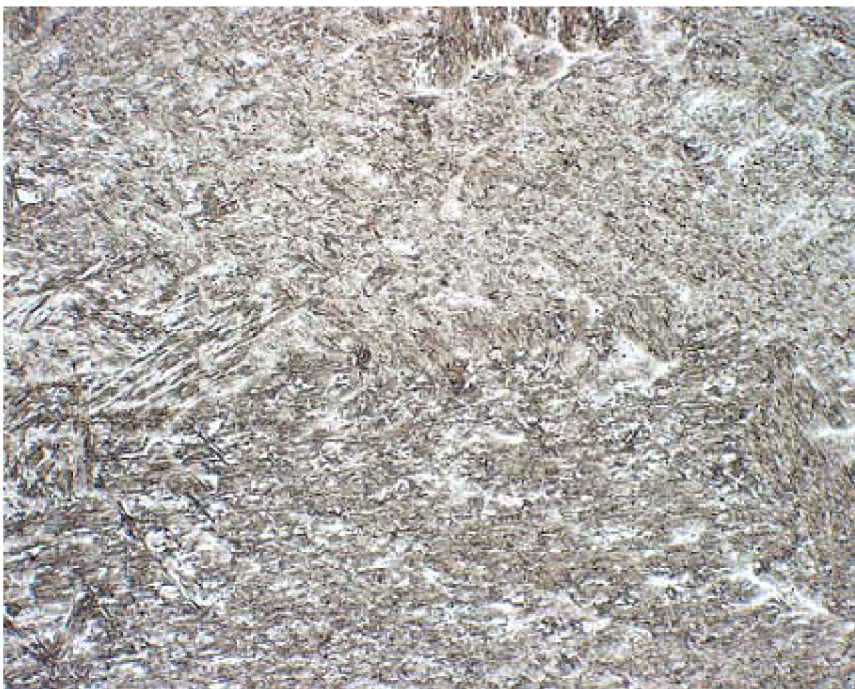


Obr.12.28 Mikrostruktura v tepelně ovlivněné oblasti (2)

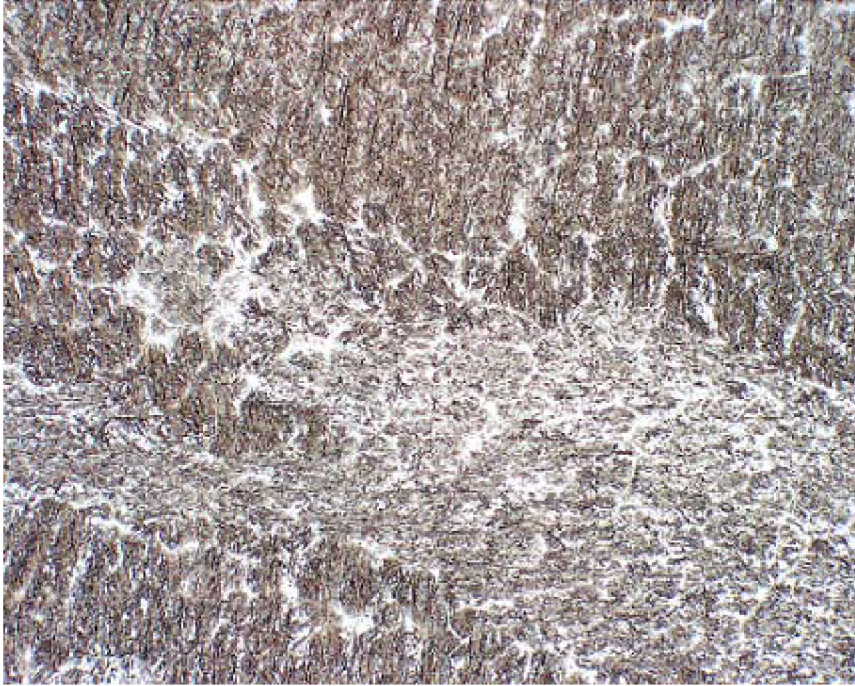
Na obr.12.28 mikrostruktura v TOO má hrubší jehlicovitý martenzit.



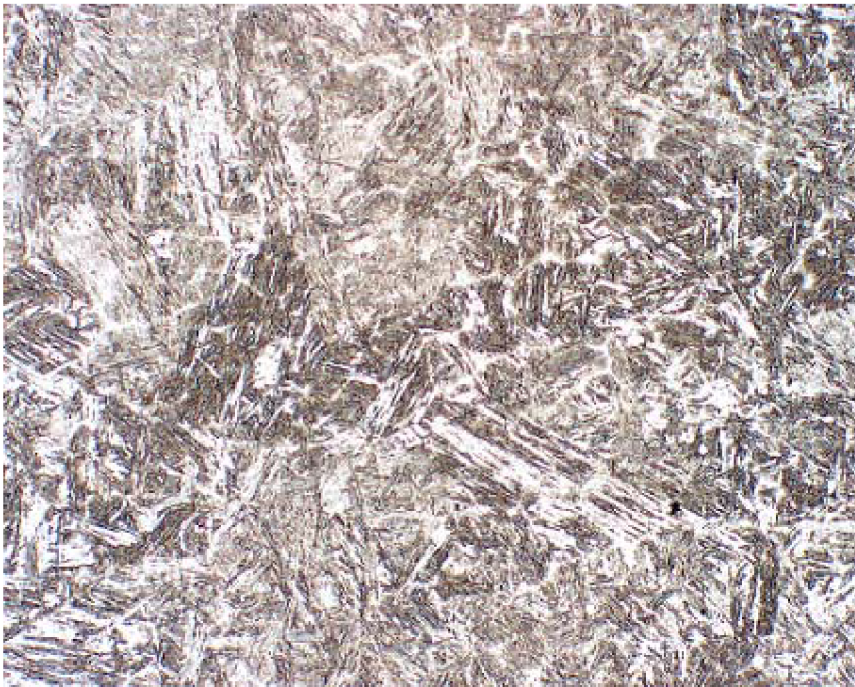
Obr. 12.29 Mikrostruktura v oblasti maximálního zhrubnutí (3)



Obr. 12.30 Mikrostruktura v oblasti svarového kovu (okraj – 4)



Obr.12.31 Mikrostruktura v oblasti svarového kovu (střed – 5)



Obr.12.32 Mikrostruktura v oblasti svarového kovu (horní část – 6)

V TOO a svarovém kovu se vyskytuje nízkouhlíkový dislokační martenzit.

13. SHRNUÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Hlavní částí diplomové práce byl experiment svařování vysoce ořeruvzdorné oceli CREUSABRO 8000 s vysokou mezí kluzu ($R_e = 1250 \text{ MPa}$) a vysokou pevností ($R_m = 1630 \text{ MPa}$) metodami MAG a plazma. Jako přídavný materiál byl použit trubičkový drát MEGAFIL®1100 M. Špičkový přídavný materiál s extra vysokou pevností svarového kovu. Mechanické vlastnosti svarového kovu by se měli pohybovat: $R_e = 980 - 1180 \text{ MPa}$ a $R_m > 960 \text{ MPa}$.

Při tahové zkoušce jsem došla k závěru, byly zkoušeny dvě zkušební tyče svařované metodou MAG a dvě metodou plazma, že u těchto vzorků je nevýrazná mez kluzu, ale hodnoty odpovídají mezi kluzu svarového kovu, tedy zkoušku můžeme hodnotit jako prokazatelnou.

U vzorků provedených plazmovým svařováním docházelo k praskání podél mírného zápalu kolem svarového kovu, který nebylo možné i po několika nastavení parametrů svařování odstranit. U druhého vzorku, svařovaného plazmou (P2), došlo k utržení ještě dříve než u vzorku prvního (P1). Vzorek P2 praskl nejdříve podél zápalu a dále pokračovalo prasknutí napříč přes svar.

Přesto že byl u obou vzorků (P1 a P2) kolem svaru zápal o malé hloubce, byla dosažena vysoká mez kluzu.

U vzorků svařovaných metodou MAG docházelo k praskání v tepelně ovlivněné oblasti, svar vydržel.

Hodnoty meze kluzu R_e se pohybují kolem cca 1100 MPa a meze pevnosti R_m cca 1200 MPa.

Dále byla provedena zkouška lámavosti. Při této zkoušce byly vždy zkoušeny dva vzorky ze strany svaru a dva ze strany kořene.

U vzorků svařených metodou plazma je vidět na obr.12.15 a obr.12.16, že při této zkoušce praskly vzorky při malém ohybovém úhlu (cca 30°) přímo podél zápalu ze strany svaru.

Ostatní úhly odpovídají předpokladům, které jsou pro materiály těchto typů a tvrdostí dosažitelné. Úhly ohybu se tedy u dalších vzorků jak svařovaných plazmou tak i metodou MAG pohybují v rozmezí 49° až 66°.

Další destruktivní zkouškou bylo měření tvrdosti podle Vickerse HV 5 se zkušebním zatížením 49 N.

U vzorku svařovaného metodou MAG se tvrdosti pohybují kolem 456 HV a průběh tvrdostí v základním materiálu a svarovým spojem je téměř lineární.

U vzorku svařovaného plazmou jsou hodnoty tvrdostí průměrně kolem 533 HV.

V TOO lze vidět mírný nárůst tvrdosti, ale nijak výrazný. Hodnoty tvrdostí byly u obou technologií velmi rovnoměrné.

Dále byla vyhodnocena makrostruktura vzorků, jak svařovaného plazmou tak i metodou MAG. Na obr.12.25 je vidět makrovýbrus svarového spoje provedeného způsobem svařování plazma v porovnání s milimetrovým papírem a oproti makrovýbrusu svarového spoje provedeného způsobem svařování MAG (obr.12.24) je vidět větší šířka svaru, větší průvar kořene, což způsobilo svařování způsobem „klíčová dírka“. U obou makrovýbrusů lze pozorovat i rozdílnou krystalizaci svarového kovu, kde u plazmového makrovýbrusu jsou zřetelně vidět větší dendrity v oblasti kořene.

V mikrostruktuře základního materiálu je vidět jemnozrný martenzit. Při svařování dojde v tepelně ovlivněné oblasti a ve svarovém kovu ke zhrubnutí martenzitu, jedná se o tzv. nízkouhlíkový dislokační martenzit. Obsah uhlíku C ve svarovém kovu je 0,07 hm.% a prokázání karbidů nebylo ověřeno. Svarový kov bude díky vyššímu obsahu niklu (2,7 hm.%) i houževnatý.

14. ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá problematikou svařování vysokopevných a vysoce otěruvzdorných materiálů při použití metod MAG a plazma. Základní materiál byl zvolen ocel CREUSABRO 8000 od firmy LEGA – INOX a přídatný materiál MEGAFIL®1100 M byl od firmy WIRPO. Při práci s těmito materiály jsem došla k závěru, že základní a přídatný materiál jsou vhodné pro svařování oběma metodami.

U plazmového svařování bylo provedeno několik svarů pro optimalizaci parametrů (viz. kap.11.2.2). I přesto se nepodařilo odstranit mírný zápal na okrajích svarového kovu. To se projevilo jak u tahové zkoušky, tak i u zkoušky lámavosti, kdy materiál většinou u těchto vzorků praskal právě v zápalech, který se považuje za vrub.

U svařování MAG praskal materiál v tepelně ovlivněné oblasti.

Výsledky tahové zkoušky dokladují odpovídající mez kluzu a mez pevnosti přídatného materiálu.

Jako velmi příznivý výsledek se ukázala zkouška tvrdosti dle Vicekrse, kde u obou technologií bylo dosaženo velmi rovnoměrných hodnot v celém průřezu svarového spoje. V žádném případě neklesá tvrdost významně pod tvrdost základního materiálu v oblasti blízkosti tavných linií svarového materiálu a tepelně ovlivněné oblasti.

Ze všech zkoušek, které byly na vzorcích provedeny, lze stanovit závěr, že tyto materiály jsou vhodné i do exponovaných svařovaných konstrukcí, svar bude mít téměř stejnou odolnost proti opotřebení jako základní materiál. Ve svarovém kovu nejsou karbidy Cr a Mo, které jsou obsaženy v základním materiálu, proto odolnost proti opotřebení ve svarovém kovu je tedy nižší.

Závěrem experimentu byly provedeny ještě metalografické kontroly jak makro- tak i mikrostrukturní rozborů. U makrovýbrusu svarového spoje provedeného způsobem svařování plazma je vidět rozdílná krystalizace svarového kovu oproti makrovýbrusu svarového spoje provedeného způsobem svařování MAG.

Pro obě dvě metody svařování byly vypracovány postupy svařování „WPS“(Welding Procedure Specification).

Diplomová práce uvádí i další alternativy vysokopevných a otěruvzdorných materiálů, zabývá se i krátkým přehledem vývojových trendů vysokovýkonového svařování v ochranných atmosférách, jako je Laserhybrid, TimeTwin Digital a další.

Seznam použitých zdrojů

- [1] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie 2 : Část svařování*. Brno, 2006. 187 s. VUTBR FSI Odbor svařování a povrchových úprav. Syllabus přednášek.
- [2] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : Zeross, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.
- [3] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vyd. Ostrava : Zeross, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [4] KUNCIPÁL, Josef, et al. *Teorie svařování*. Dr. Vladimír Pešl. 1. vyd. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986. 272 s. ISBN 04-211-86.
- [5] SIAD. *Katalog SIAD : zpracování kovů*. 1. vyd., 2006. 30 s. ISBN MKT PLZ 016.
- [6] Fronius. *Vysokovýkonné svařování*. 1. vyd., 2001. 38 s.
- [7] *Fronius magazín : Weld + vision*. Fronius. 2001, č. 1.01.
- [8] *Fronius magazín : Weld + vision*. Fronius. 2003, č. 1.03.
- [9] *Fronius magazín : Weld + vision*. Fronius. 2004, č. 2.04.
- [10] *Časopis pro svařovací techniku*. Fronius. 2007, č. 19.
- [11] KRÍŽ, Rudolf, et al. *Strojírenská příručka 8*. 1. vyd. Praha : Scientia, 1998. 255 s. ISBN 80-7183-054-2.
- [12] *Katalog LEGA-INOX ... the nature of steel : Energie - Vysoce otěruvzdorné a vysokopevnostní materiály a produkty*. IMS Group LEGA-INOX ABRAServis.
- [13] *LEGA-INOX ... the nature of steel : CREUSABRO 8000 vysoce otěruvzdorná ocel*. IMS Group LEGA-INOX ABRAServis.
- [14] *Hardox* [online]. [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <www.hardox.cz>.
- [15] *Gamaocel* [online]. 2000 [cit. 2009-02-20]. Dostupný z WWW: <www.gamaocel.cz>.
- [16] FŇUKALOVÁ, Veronika. *Svařování silnostěnných svařenců vysokovýkonnými metodami.*, 2007. 39 s. Vedoucí bakalářské práce Kubíček Jaroslav Ing.
- [17] Fronius. *Výrobní katalog 2006/2007 : Divize svařovací techniky.*, 2006. 74 s. Dostupný z WWW: <fronius.com>. ISBN 40,0006,2656.
- [18] *Wirpo* [online]. 2005 [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.wirpo.cz/cs/c/tabulky/3-trubickove-draty-pro-svarovani-a-navarovani.htm#sekce1>>.

Seznam použitých symbolů a zkratk

a	tloušťka vzorku	[mm]
A ₅	tažnost	[%]
b	šířka vzorku	[mm]
C _e	uhlíkový ekvivalent	[%]
D	průměr podpory	[mm]
d	průměr trnu	[mm]
d _s	střední úhlopříčka vtisku	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F _m	zatěžující síla při tahové zkoušce	[N]
F _{max}	zatěžující síla při zkoušce lámavosti	[N]
I	svařovací proud	[A]
KCV	vrubová houževnatost	[J.cm ⁻²]
KV	nárazová práce	[J]
l	rozteč podpor	[mm]
M	označení vzorku svařeného metodou MAG	
P	označení vzorku svařeného metodou plazma	
P _{CM}	uhlíkový ekvivalent	[%]
p _{vzduch}	tlak vzduchu	[bar]
Q	tepelný příkon	[kJ.mm ⁻¹]
Re	mez kluzu	[MPa]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
s	dráha zatěžování	[mm]
S ₀	průřez vzorku	[mm ²]
SK	svarový kov	
t	tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
U	napětí oblouku	[V]
v _d	rychlost podávání drátu	[m.min ⁻¹]
V _{řezání}	rychlost řezání	[mm.min ⁻¹]
v _{sv}	svařovací rychlost	[mm.s ⁻¹]
x	poloha vtisku	[mm]
ZM	základní materiál	
α	úhel ohybu	[°]
η	účinnost svařování	[%]

Seznam příloh

- Příloha 1 Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10204 – přídatný materiál
- Příloha 2 WPS pro MAG svařování
- Příloha 3 WPS pro plazmové svařování

Drahtzug Stein, wire & welding GmbH & Co KG

Abnahmeprüfzeugnis 3.1 nach EN 10204

Talstraße 2, D-67317 Drahtzug - Altleiningen

LS - Nr.: Order No.: Commande No.:	Kunde: Customer: Client:	Wirpo s.r.o Hajecka 12 CZ 61800 Brno	 DRAHTZUG STEIN wire & welding
Auftragsnr.: Commission No.: Référéncé:			

Zusatzwerkstofftyp/Consumable: Sorte/type: Abmessung / Diameters Ø:	Fülldrahtelektrode / Flux cored wire STEIN-MEGAFIL® 1100 M 1,2 mm	Stromstärke/Current: 240 A Spannung/Voltage: 27 V Schweißgeschw./Welding speed: 35 cm/min Schutzgas/Shielding gas: M21 Schutzgasmenge: 15 l/min Stick out: 15 mm Position: PA / 1G Zwischenlagentemp.: 150 °C
Normbezeichnung/Specification EN 12535: AWS/ASME Sec. II/CSFA 5.28: DB-Kennblattnummer:	T 89 4 Z M M 1 H5 E 110 C-G (~AWS/ASME Sec. II/CSFA 5.29: E 120 T1-G)	

Position	Bemerkung Remark	Charge Lot-Nr. Batch	Analyse - Analysis																
			C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	N ₂	Ti	B				
1		058528	0,070	0,63	1,70	0,018	0,015		2,70										

Position	Wärmebeh. Heat-treatment	Charge Lot-Nr. Batch	Zugversuch - Tensile Test - Traction						Kerbschlagbiegeversuch - Impact Test										
			Rm (N/mm ²)	Rp0,2 (N/mm ²)	A (%)				J RT	J 0°C	J -20°C	J -40°C	J -60°C						
2	unbehandelt as welded	058528	980	907	21						69	70							
											72	68							
											75	67							
											72	68							


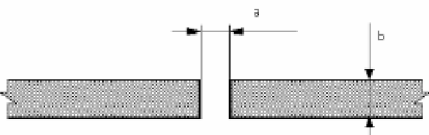
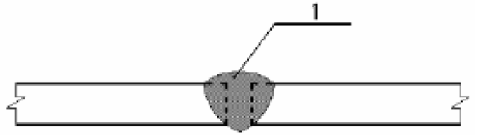
Position	Wärmebeh. Heat-treatment	Charge Lot-Nr. Batch	Zugversuch - Tensile Test - Traction						Kerbschlagbiegeversuch - Impact Test										
			Rm (N/mm ²)	Rp0,2 (N/mm ²)	A (%)				J RT	J 0°C	J -20°C	J -40°C	J -60°C						


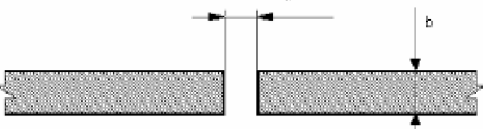
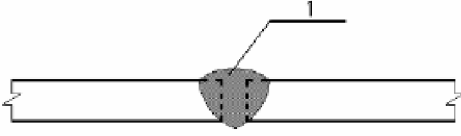
Bemerkungen:
Remark: Dieses Zeugnis wurde auf EDV erstellt und daher nicht unterschrieben.
This report has been carried by our EDV -system and will there fore not be signed.

Drahtzug, Stein GmbH & Co KG
Datum: 29.05.2008

Qualitätswesen
Jutzi G.

Priložba 1

Specifikace postupu svařování „WPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)		Strana: 1 Celkem: 1 Revize č.:				
1. Výrobce : VUT FSI v Brně Technická 2896/2 616 69 Brno		10. Zkušební organizace : TDS Brno – SMS, s.r.o. Mariánské nám. 1 617 00 Brno 				
2. Místo : Brno	11. Způsob přípravy úkosu : obrábění, broušení					
3. Číslo dokladu (WPS) : 01/2009	12. Způsob čištění : kartáčování, odmaštění					
4. Číslo WPQR : —	13. Specifikace základních materiálů					
5. Číslo zkušební kusu : —	- materiál 1: CREUSABRO 8000					
6. Kvalifikace svařeče : —	- materiál 2: CREUSABRO 8000					
7. Metoda svařování : 135	14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 4 mm					
8. Druh svaru : Jednostranný tupý (BW)	15. Vnější průměr [mm] : -					
9. Údaje o přípravě svarových ploch : —	16. Poloha svařování : PA					
17. Tvar spoje	18. Rozměry	19. Postup svařování				
	a [mm] 1					
	b [mm] 4					
	c [mm] —					
	α [°] —					
20. Parametry pro svařování						
21. Svarová housenka	1	2	3	4	5	6
22. Metoda svařování	135					
23. Průměr přídav. mater. [mm] - \varnothing	1,2					
24. Svařovací proud [A]	172					
25. Svařovací napětí [V]	25,3					
26. Druh proudu a polarita	DC (+)					
27. Přenos kovu přídavného materiálu	impulzní					
28. Rychlost podáv. drátu [m.min ⁻¹]	-					
29. Rychl. posuvu pojezdu [m.min ⁻¹]	0,35					
30. Tepelný příkon [kJ.cm ⁻¹]	6,34					
31. Přídavný materiál - zařazení a značka: EN ISO 16 834: T 89 4 Z M M 1 H5, MEGAFIL[®] 1100 M						
32. Předpis pro sušení :	—	42. Údaje o podložním kroužku :	—			
33. Ochranný plyn / tavidlo : CORGON 18 (82%Ar+18%CO₂)		43. Další informace : Rozkvy - amplituda :	—			
- ochranný plyn [l.min. ⁻¹]:	15	- frekvence a doba prodlevy :	—			
- ochrana kořene [l.min. ⁻¹]:	—	Rozkvy (max. šířka housenky) :	—			
34. Wolfram. elektroda, druh/průměr :	—	44. Údaje pro pulzní svařování :	—			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene:	—	45. Údaje pro plazmové svařování :	—			
36. Teplota předehřevu [°C] :	—	46. Úhel nastavení hořáku :	+ 10°			
37. Interpass teplota [°C] :	—	47. Druh automatu a svař. hlavy :	Fronius			
38. Tepelné zpracování / stárnutí :	—	48. Prokování svaru :	—			
39. Doba, teplota, postup :	—	49. Poznámky :	—			
40. Rychlost ohřevu a chlazení :	—	<i>Terminologie v Angličtině a Němčině viz druhá strana</i>	—			
41. Vzdálenost elektrody (kontaktní špičky) od základního materiálu [mm] :	—	<i>„English“ on second side, „Deutsch“ siehe Rückseite</i>	—			
50. Výrobce VUT FSI v Brně Ústav strojírenské technologie Odbor technologie svařování a povrchových úprav	52. Zkušební orgán nebo technická dozorčí (inspekční) organizace					
51. datum, jméno, podpis a razítko svařečského dozoru	53. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu					

Specifikace postupu svařování „WPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)		Strana: 1				
		Celkem: 1				
		Revize č.:				
1. Výrobce : VUT FSI v Brně Technická 2896/2 616 69 Brno	10. Zkušební organizace : TDS Brno – SMS, s.r.o. Mariánské nám. 1 617 00 Brno					
2. Místo : Jihlava	11. Způsob přípravy úkosu : obrábění, broušení					
3. Číslo dokladu (WPS) : 02/2009	12. Způsob čištění : kartáčování, odmaštění					
4. Číslo WPQR : —	13. Specifikace základních materiálů					
5. Číslo zkušebního kusu : —	- materiál 1: CREUSABRO 8000					
6. Kvalifikace svářeče : —	- materiál 2: CREUSABRO 8000					
7. Metoda svařování : 15	14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 4 mm					
8. Druh svaru : Jednostranný tupý (BW)	15. Vnější průměr [mm] : -					
9. Údaje o přípravě svarových ploch : —	16. Poloha svařování : PA					
17. Tvar spoje	18. Rozměry	19. Postup svařování				
	a [mm] 0,5					
	b [mm] 4					
	c [mm] —					
	α [°] —					
20. Parametry pro svařování						
21. Svarová housenka	1	2	3	4	5	6
22. Metoda svařování	15					
23. Průměr přídav. mater. [mm] - \varnothing	1,2					
24. Svařovací proud [A]	220					
25. Svařovací napětí [V]	25,3					
26. Druh proudu a polarita	DC (+)					
27. Přenos kovu přídavného materiálu	-					
28. Rychlost podáv. drátu [m.min ⁻¹]	2,0					
29. Rychl. posuvu pojezdu [m.min ⁻¹]	0,35					
30. Tepelný příkon [J.cm ⁻¹]	5,73					
31. Přídavný materiál - zařízení a značka: EN ISO 16 834: T 89 4 Z M M 1 H5, MEGAFIL[®] 1100 M						
32. Předpis pro sušení :	—	42. Údaje o podložném kroužku :	—			
33. Ochranný plyn / tavidlo : Argon Ar Technický 4.6		43. Další informace : Rozkvy - amplituda :	—			
- ochranný plyn [l.min. ⁻¹]:	5,0	- frekvence a doba prodlevy :	—			
- ochrana kořene [l.min. ⁻¹]:	4,0	Rozkvy (max. šířka housenky) :	—			
34. Wolfram. elektroda, druh/průměr :	—	44. Údaje pro pulzní svařování :	—			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene:	—	45. Údaje pro plazmové svařování :	Plazmový plyn: Argon Ar Technický 4.6: 2,0 l.min⁻¹			
36. Teplota předehřevu [°C] :	—	46. Úhel nastavení hořáku :	0°			
37. Interpass teplota [°C] :	—	47. Druh automatu a svař. hlavy :	Fronius			
38. Tepelné zpracování / stárnutí :	—	48. Prokování svaru :	—			
39. Doba, teplota, postup :	—	49. Poznámky :	—			
40. Rychlost ohřevu a chladnutí :	—	<i>Terminologie v Angličtině a Němčině viz druhá strana</i>				
41. Vzdálenost elektrody (kontaktní špičky) od základního materiálu [mm] :	4	<i>„English“ on second side, „Deutsch“ siehe Rückseite</i>				
50. Výrobce VUT FSI v Brně Ústav strojírenské technologie Odbor technologie svařování a povrchových úprav		52. Zkušební orgán nebo technická dozorce (inspekční) organizace				
51. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru		53. datum, jméno, podpis a razítko zkušebnímu orgánu				