



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 SVAŘOVÁNÍ PLAZMOU

COMPARISON OF GMAW AND PLASMA WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. TOMÁŠ NEJEDLÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. LADISLAV DANĚK, CSC.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Nejedlý

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 svařování plazmou

v anglickém jazyce:

Comparison of GMAW and Plasma Welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Porovnání dvou srovnatelných svařovacích technologií. Hodnocení tvaru závaru a specifického vneseného tepla.

Cíle diplomové práce:

U obou technologií stanovit specifické vnesené teplo, makrostruktury svarů (tvar a plochy návaru a závaru, rozměry TOO), průběh tvrdosti v příčném řezu. Závěry a vyhodnocení.

Seznam odborné literatury:

AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

KŘÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojírenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-7183-054-2

MESSLER, Robert. Principles of welding. USA 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

MINAŘÍK Václav. Obloukové svařování. Praha: SCIENTIA. 1998, 229 s. ISBN 80-7183-119-0.

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 21.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

TOMÁŠ NEJEDLÝ: Porovnání svařování MAG a svařování plazmou

Vypracovaná diplomová práce porovnává svařování MAG a svařování plazmou, se stejnými vstupními parametry. Na základě literatury byla posouzena svařitelnost a popsány obě metody svařování. Experimentálně bylo pro obě technologie určeno specifické vnesené teplo, vyhodnocena makrostruktura svaru a zředění, rozměry tepelně ovlivněné oblasti a na závěr zkouška tvrdosti v příčném směru podle Vickerse.

Klíčová slova

MAG, plazma, tepelně ovlivněná oblast, makrostruktura

ABSTRACT

TOMÁŠ NEJEDLÝ: Comparison of GMAW and Plasma welding

Developed thesis compares MAG welding and plasma welding, with the same input parameters. Based on the literature was reviewed weldability and welding of both methods. It was experimentally for both technologies specifically designed heat input, evaluation and macrostructure of the weld dilution, the dimensions of the heat affected zone and finally test the hardness in the transverse direction Vickers.

Key words

MAG, Plasma, heat - affected zone, macrostructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NEJEDLÝ, Tomáš. *Porovnání svařování MAG a svařování plazmou*. Brno, 2014. 55s, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Porovnání svařování MAG a svařování plazmou vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 23. května 2014

.....

Poděkování

Děkuji tímto panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné rady a připomínky, za odborné vedení mé práce a vstřícný přístup.

Obsah

Titulní list	
Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1 Úvod	10
2 Definice svařování	11
2.1 Vznik svarového spoje kovových materiálů	11
2.1.1 Svarový kov	12
2.1.2 Specifické vnesené teplo	13
2.2 Makrostruktury svarů	13
2.2.1 Rozměry TOO	14
2.2.2 Průběh tvrdostí v příčném řezu a růst zrn	15
2.3 Svařitelnost	17
2.3.1 Kritéria svařitelnosti	17
2.3.2 Svařitelnost uhlíkových ocelí	18
2.4 Vady ve svarech	20
2.4.1 Trhliny za horka	20
2.4.2 Trhliny za studena	21
2.4.3 Lamelární trhliny	22
2.4.4 Žíhací trhliny	23
3 Obloukové svařování tavící se elektrodou – MAG	25
3.1 Princip a parametry technologie MAG	25
3.1.1 Zdroje pro svařování metodou	26
3.1.2 Podavače drátu	27
3.1.2 Přenos kovu v oblouku	27
3.2 Metalurgické reakce při svařování MAG	29
3.3 Ochranné plyny	30
3.4 Přídavný materiál	31
4 Plazmové obloukové svařování	33
4.1 Princip metody	33
4.2 Plyny použité při plazmovém svařování	35
4.3 Úprava svarových ploch a svařitelnost	35
4.4 Výhody a použití	36
4.4 Mikroplazmové svařování	36
4.5 Systém Plazma – MIG (GMPA – Gas Metal Plasma Arc)	37

5 Porovnání technologií	38
5.1 Základní materiál	38
5.2 Svařování technologií MAG	38
5.3 Svařovací metoda plazma	42
5.4 Specifické vnesené teplo	45
5.4.1 Svařování MAG	45
5.4.2 Svařování plazmou	45
5.5 Makrostruktura svaru a zředění u metody MAG	46
5.6 Makrostruktura a zředění u svařování plazmou	48
5.7 Zkoušky tvrdosti	50
5.7.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse – HV – obecně	50
5.6.2 Vlastní zkouška tvrdosti v příčném řezu	51
6 Závěr	55
Seznam použitých zdrojů	56
Seznam použitých zkratk a symbolů	58
Seznam příloh	60

1 ÚVOD [1][2][16]

Procesy svařování v současné době můžeme vnímat jako značně rozšířenou a stěžejní technologii zpracování materiálu. Svařování patří mezi velké skupiny strojírenských technologií, které zpracovávají největší objem kovových materiálů a to jak materiálů tvářených, tak i litých. Zvládnutí technologie svařování závisí na znalostech vědních oborů, jako jsou například matematika, fyzika, chemie, fyzikální chemie, fyzikální metalurgie, nauka o materiálech, fyzika kovů a další obory.

Neustálou snahou na poli inovací svářečských technologií je zajistit optimální výkony těchto procesů, které vedou ke zvýšení konkurenceschopnosti.

Svařování se hojně uplatňuje ve strojírenské výrobě, v automobilovém a lodním průmyslu (obr. 1), při výrobě všech možných typů ocelových konstrukcí a různých součástech které by se jinak musely vyrobít složitější a nákladnější technologií, jako je například lití, složité obrábění, atd.

Metody svařování kovových materiálů odtavující se elektrodou v ochranné atmosféře jsou v současné době velmi používané z důvodu své vysoké efektivity. Ale i svařování plazmou přináší nové možnosti ve svařování materiálů. Svařované výrobky často nahrazují např. odlitky, které jsou pracnější na přípravu výroby a to obzvláště u tvarově komplikovaných dílců. Technologie svařování sebou ovšem přináší určité komplikace, které při nesprávné použité technice svařování celý proces časově prodlužují a také prodražují. Největší problém při svařování je teplotní ovlivnění svařovaného materiálu, které způsobuje zbytková napětí a s tím spojenou nežádoucí deformaci. Proto se dnešní vývoj svařování zaobírá směrem minimalizovat negativní ovlivnění svařence.



Obr. 1.1 Svařování v lodním průmyslu pod vodou [16]



Obr. 1.2 Příklad svařence [1]

2 DEFINICE SVAŘOVÁNÍ [2][29]

V praxi se používají dvě různá spojení strojních součástí, rozebíratelná a nerozebíratelná spojení. Nerozebíratelná spojení jsou realizována pomocí svařování, pájení, nýtování a lepení. Cílem svařování je vyrobit nerozebíratelné spojení dvou a více určitých povrchů dílů za určitých vlastností svaru, které jsou požadovány.

Nerozebíratelné spojení pomocí svařování vzniká pomocí soustředěného tepla, tlaku, případně kombinací s použitím, nebo bez použití přídavného materiálu. Působením meziatomových sil, vazeb na teplem nebo tlakem aktivovaných plochách, vznikne spojení.

Protože současnými metodami obrábění je prakticky nemožné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb (meziatomová vzdálenost $5 \cdot 10^{-8}$ cm), kdy je termodynamický stav materiálu stabilní, resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto je pro spojení dvou a více určitých povrchů nutné působit tlakem, teplem, nebo oběma faktory najednou. Obecně platí závislost \rightarrow čím vyšší působí tlak, tím méně je potřeba vnést teplo a opačně. Tlakové svařování je označením svařování za působení převážně tlaku a tavné svařování při působení tepla.

2.1 Vznik svarového spoje kovových materiálů [2][14]

Svařování kovů a jejich slitin je definováno jako nerozebíratelná spojení s využitím tepelné, mechanické nebo radiační energie. Spojení vznikne působením meziatomových sil, vazeb na teplem, nebo tlakem aktivovaných plochách. Pevné látky mohou mít různý typ vazby, která odpovídá různým typům rozložení elektronů a iontů. Ionty jsou v atomu uspořádány přesně podle definovaného rozložení, podle něhož v pevných látkách existují mezi ionty síly přitažlivé a odpudivé, 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.

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

Formy aktivační energie:

- Termická aktivace,
- mechanická aktivace - pružné a plastické deformace,
- radiační aktivace - elektronové, fotonové nebo iontové ozáření.

Běžné metody svařování lze rozdělit na dvě skupiny:

- Tavné svařování,
- tlakové svařování.

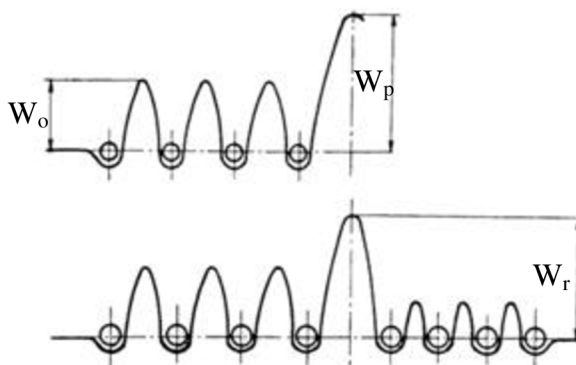
K vytvoření spoje u tavného svařování je potřeba přivodit tepelnou energii do oblasti svaru, kde dochází k natavení základního a případně přídavného materiálu. Tekutá fáze je vázána na povrch tuhé fáze adhezními silami a při tunutí taveniny se slabé adhezní síly mění na chemickou vazbu ve formě krystalové 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 potřeba překonat energetickou hladinu potenciální energie na rozhraní spojovaných ploch obr. 2.1.

Na obrázku 2.1 jsou znázorněny:

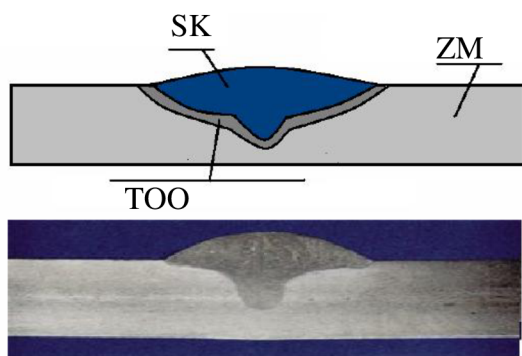
- W_o – potenciální energie nutná pro změnu polohy iontu uvnitř krystalu,
- W_p – vliv povrchu krystalu na velikost potenciální energie (energie nutná pro změnu polohy iontu),
- W_r – potenciální energie na rozhraní fází.



Obr. 2.1 Energetické bariéry potenciální energie[14]

2.1.1 Svarový kov [4][8]

Svarový kov vzniká tavením základního a přídavného materiálu (obr. 2.2). Tento proces vzniku je turbulentní. Část nataveného základního materiálu ve svarovém kovu nazýváme promísení, které je při svařování kořene svaru vyšší než svařování výplňové části. Přehled promísení podle technologií svaření je zobrazen v tab. 1.



Obr. 2.3 Struktura svaru [4]

ZM – základní materiál

SK – svarový kov

TOO – teplem ovlivněná oblast

Obr. 2.2 Struktura svarového kovu [4]

Tab. 1 Promísení svarového kovu [4]

Technologie svařování	Stupeň promísení [%]
ROA	10 – 40
SAW	až 85
Elektrostruskové svařování	až 90

Svařovací proud a svařovací napětí nejvýrazněji ovlivňují geometrii svarové lázně. Svařovací napětí ovlivňuje šířku svaru a svařovací proud hloubku. Poměr šířky k hloubce svarového kovu označujeme jako koeficient tvaru svaru Ψ . Tvar svarové lázně je ale ovlivněn i rychlostí svařování.

Krystalizace svaru začíná při poklesu teploty svarového kovu pod teplotu likvidu. V průběhu tuhnutí probíhají likvační a segregační procesy. Na svarových plochách v důsledku heterogenní nukleace krystalizuje svarový kov, který dědí orientaci zrn (i velikost) přechodového pásma. Pevné fáze rostou kolmo na izotermu, tj. ve směru gradientu teploty. Svarový kov krystalizuje buď celulárně nebo dendriticky, záleží na chemickém složení

svarového kovu a rychlosti svařování. Při menším podchlazení nastává celulární krystalizace, která nemá krystalografickou orientaci. Dendritická krystalizace vzniká při větším podchlazení a dendrity rostou přednostně v krystalografickém směru. Mikrostruktura závisí na jeho chemickém složení a parametrech svaření. Houževnatosti materiálů svarové kovy většinou nedosahují. Vlastnosti svarových kovů závisí na typu mikrostruktury, velikosti zrn, precipitačních procesech, stárnutí, atd.

2.1.2 Specifické vnesené teplo [4][8][14]

V důsledku rychlosti změny teplot při svařování dochází v okolí svaru ke složitým metalurgickým procesům a to jak ve svarovém kovu, tak i v základním materiálu. Z transformačních diagramů je možno určit výslednou strukturu kovu. Transformační diagramy však neexistují pro všechny materiály, proto se pro některé materiály určuje přípustné množství přípustné energie při zachování svařovací rychlosti, tím docílíme požadované struktury.

Specifické vnesené teplo Q_s :

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.1)$$

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

Celková tepelná účinnost η :

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

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

Tab. 2 Hodnoty koeficientu účinnosti η [zeoss]

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

Při klasickém způsobu svařování je svar zatížen po celou dobu svařování proudem a vnesené teplo je vypočítané pomocí rovnice 2.1. U pulzního svaru, se střídáním pulzu impulzu I_p a proudu základu I_b v poměru 50:50 doby svařovacího cyklu, se do místa svaru vnáší střídavě teplo. Výsledné teplo je díky střídání velikosti proudu menší než klasickou metodou.

2.2 Makrostruktury svarů [4][17][23]

Strukturou materiálu rozumíme množinu vztahů mezi různě složitými a různě velkými částmi hmoty (elementárními částicemi, atomy, molekulami, krystaly), které vytvářejí určitou formu její existence (stav). Strukturou krystalů nebo amorfních oblastí odpovídajícího objemu nazýváme makrostrukturou nebo mikrostrukturou. Makrostrukturou pozorujeme pouhým okem nebo lupou, mikrostrukturou pozorujeme některou mikroskopickou metodou.

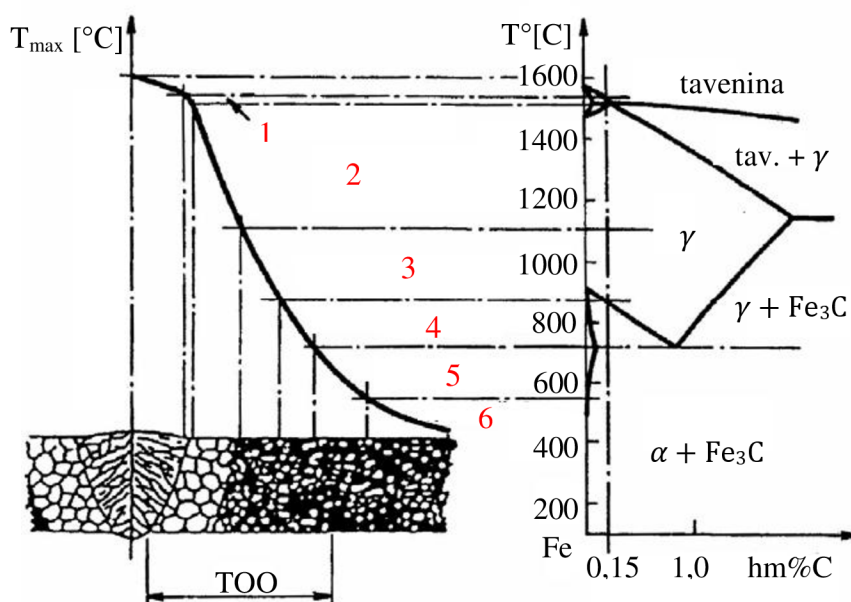
Vlastnosti materiálu jsou významným vnějším projevem jeho struktury a mohou být na základě znalostí struktury v různé míře předvídaný. Vlastnosti materiálu dělíme na mechanické, fyzikální, chemické a technologické. Zkoušení těchto vlastností má pro technickou praxi mimořádnou důležitost.

Charakteristika makrostruktury hutního materiálu:

1. Heterogenita chemického složení slitin a směsí v různých místech průřezu,
2. makroskopické strukturní útvary vzniklé při krystalizaci nebo tuhnutí,
3. makroskopické strukturní útvary vzniklé při tváření kovů, tvarování nekovů a při spojování materiálu svařováním, pájením či lepením nebo při jiných zpracovatelských technologiích,
4. hloubka tepelného ovlivnění při přenosu tepla nebo o povrchových vrstvách při přenosu hmoty,
5. hloubka poškození povrchu při korozi nebo opotřebení,
6. lomy vzniklé v provozu působením vnějších sil nebo prostředí.

2.2.1 Rozměry TOO [4][8][11][15]

Oblast svarového spoje, ve které dojde ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla od sváření, nazýváme tepelně ovlivněnou oblastí (TOO). V kovech a slitinách s polymorfní přeměnou dochází v TOO k výrazným strukturním změnám, které ovlivňují vlastnosti svarových spojů. Svařování nelegovaných i legovaných ocelí s polymorfní přeměnou $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ můžeme TOO rozdělit na charakteristická pásma (obr. 2.4)



Obr. 2.4 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje mater [4]

1. Oblast částečného natavení tvořící přechod z TOO do svarového kovu. Protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální, tak u většiny ocelí se tato hranice redukuje na linii.
2. Oblast přehřátí, oblast s teplotami nad A_3 , překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn. Teplota pro nelegované oceli je kolem 1050°C , pro mikrolegované je asi 1250 až 1300°C .

3. Oblast s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, teplota nad A_3 .
4. Oblast nad teplotou A_1 s neúplnou polymorfní přeměnou, mezi teplotami A_1 až A_3 .
5. Oblast pod teplotu A_1 , zde probíhají změny v rámci tuhého roztoku αFe nebo substrukturní.
6. Neovlivněný základní materiál.

Různé technologie svařování mají rozdílná pásma jednotlivých oblastí TOO, ty nejvíce ovlivňují svařovací parametry. Šířku pásem lze pro jednotlivé technologie charakterizovat podle [Hřivňák] tab. 3.

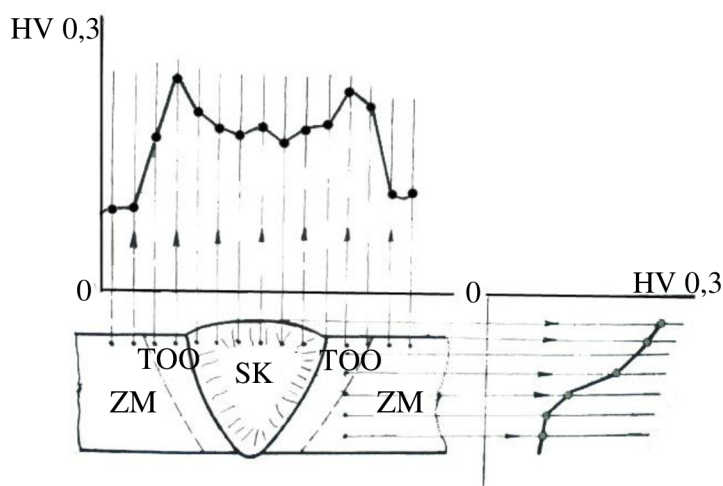
Tab. 3 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO [8]

Technologie svařování	Šířka TOO [mm]		
	nad A_1	nad A_3	přehřátá oblast
ROS	3 až 8	0.3 až 1	0.1 až 0.3
MAG	3 až 8	0.3 až 1	0.1 až 0.3
APT	3 až 15	0.3 až 2	0.1 až 0.5
Elektrostruskové svařování	5 až 50	1 až 10	0.5 až 5
Svařování elektronovým paprskem	0.3 až 1	0.1 až 0.3	0 až 0.1
Svařování plazmou	0.3 až 1	0.1 až 0.3	0 až 0.1

Při svařování legovaných, zušlechťených a termomechanicky zpracovaných ocelí lze pozorovat pokles pevnosti v místě teplem ovlivněné oblasti, vlivem tepelně deformačního cyklu. Proto je doporučeno limitovat použitý výkon svařování, aby byla šířka TOO minimální. Pevnost pásem TOO se zkouší na vzorcích se simulovaným svářecím cyklem nebo nepřímo měřením tvrdosti.

2.2.2 Průběh tvrdostí v příčném řezu a růst zrn [4][8][11]

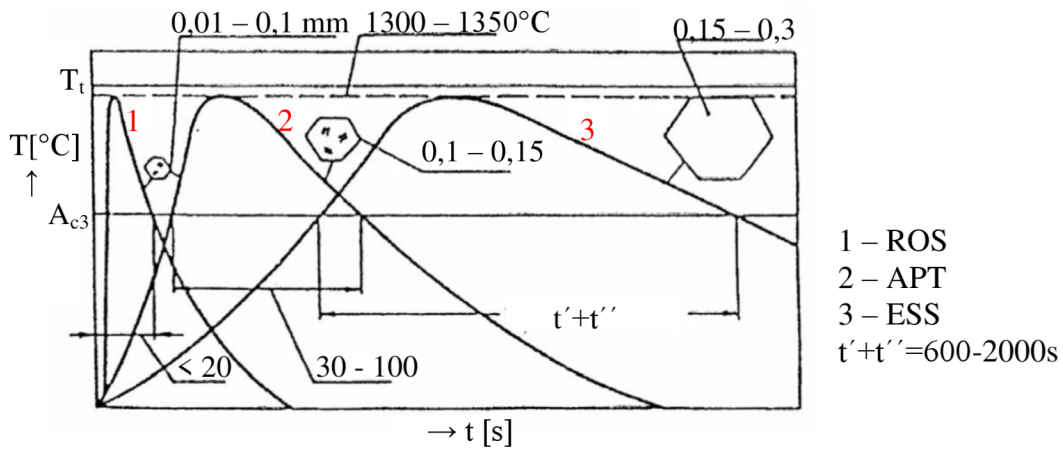
Měřením tvrdostí v příčném řezu se zkouší pevnost jednotlivých pásem TOO. Charakteristický průběh tvrdostí je znázorněn na obr. 2.5, kde je vidět výrazné zvýšení tvrdosti v oblasti nad teplotu přehřátí a pokles tvrdosti v okolí teploty A_1 . Velikosti tvrdosti závisí na chemickém složení oceli a příkonu svařování, který ovlivňuje čas chladnutí. Obvykle požadované hodnoty tvrdosti se pohybují v rozmezí HV=340 až 450.



ZM – základní materiál
 TOO – tepelně ovlivněná oblast
 SK – svarový kov

Obr. 2.5 Průběh tvrdosti svarovým kovem [11]

Při svařování dochází k růstu zrn v pásmu přehřátí. Růst zrn závisí na chemickém složení oceli a na teplotním ovlivnění. Svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou má za následek relativně malý růst zrn, větší je pak při svařování pod tavidlem a největší u elektrostruskového sváření, viz obr. 2.6.

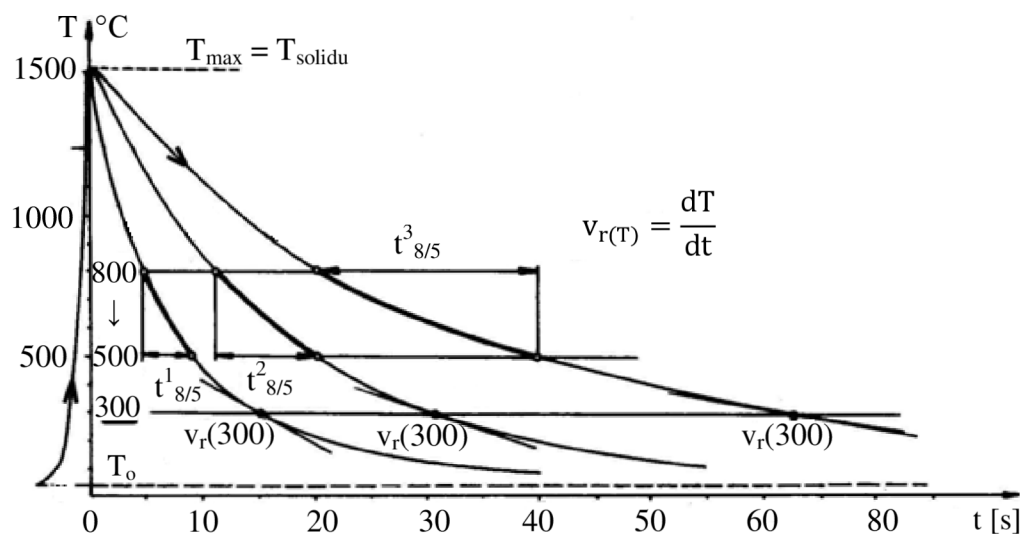


Obr. 2.6 Růst zrna při svařování [4]

Nevýhody růstu zrn:

- Zhoršuje plasticitu (vrubovou a lomovou houževnatost),
- zvyšuje náchylnost k praskání,
- hrubé zrna brzdí kinetiku rozpadu austenitu,
- v kovech bez polymorfni přeměny snižuje pevnost.

Cyklus svařování, charakterizovaný rychlostí ohřevu na svařovací teplotu, max. teplotu prodlevy A_{c3} , dobou setrvání na maximální teplotě a zejména dobou ochlazování svaru mezi teplotou 800 až 500 °C, ovlivňuje strukturu TOO. Tato doba se označuje $\Delta t_{8/5}$ a má rozhodující vliv na mechanické vlastnosti TOO. Růst původního austenitického zrna TOO je jedním z rozhodujících degradačních mechanismů plasticity svarových spojů. Nejhorší mechanické vlastnosti jsou v místech svarového spoje, kde byla při svařování dosažena v TOO nejvyšší teplota. Zde je prokazována nejvyšší tvrdost (viz obr. 2.7) a nejnížší vrubová houževnatost.



Obr. 2.7 Teplotní cykly [4]

2.3 Svařitelnost [4][8][15]

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

Vlastnosti ovlivňující svařitelnost:

- Chemické složení,
- metalurgický způsob výroby,
- tepelné zpracování,
- způsob lití a tváření.

Technologická možnost svařování kovu vyjadřuje vliv použitého druhu svařování na vlastnosti svarového spoje určité konstrukční spolehlivosti. Vliv jednotlivých technologických podmínek na možnost svařování je jedním z nejdůležitějších činitelů, neboť technologie výroby podstatně ovlivňuje možnost svařování uvažovaného materiálu a ovlivňuje mechanické a fyzikální vlastnosti svarového spoje, ale i úroveň pnutí, deformací a náchylnost ke vzniku defektů.

Konstrukční spolehlivost svarového spoje je zabezpečena především tloušťkou materiálu, tuhostí spoje ve svaru, tvarem svarových ploch a rozložením svarových spojů v závislosti na namáhání.

2.3.1 Kritéria svařitelnosti [4][8][13][15]

Hodnocení svařitelnosti kovů podle ČSN 05 1309:

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

Hodnocení svařitelnosti je určeno jednak jako vhodnost materiálu na svařování za určitých technologických podmínek a jednak jako technologické podmínky svařování určitého materiálu pro dosažení funkčně vyhovujícího spoje.

Zkoušení a hodnocení svařitelnosti ocelí pro obloukové svařování, které je nejrozšířenější ze svařovacích metod, se provádí podle normy ČSN 05 1311. Tato norma hodnotí vhodnost ocelí ke svařování pro tloušťky materiálů do 25 mm, v rozmezí 25 až 60 mm a nad 60 mm.

Uhlíkový ekvivalent

Jeden z aspektů posouzení komplexní charakteristiky ocelí pro danou součást je určení tzv. ekvivalentního obsahu uhlíku C_e . Oceli s obsahem uhlíku $\leq 0,22$ hm. % lze provádět svařování bez zvláštních opatření, přičemž ekvivalentní obsah uhlíku $C_e \leq 0,50$ je počítán dle rovnice:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024s \quad [\%] \quad (2.3)$$

kde: s – tloušťka plechu.

Rovnice platí pro materiály do obsahu prvků:

$C = 0,22$ hm. %, $Mn = 1,6$ hm. %, $Cr = 1$ hm. %, $Ni = 3,0$ hm. %, $V = 0,14$ hm. %, $Cu = 0,30$ hm. %.

Pro $C > 0,18$ hm. % navrhl mezinárodní svářečský institut vzorec:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad [\%] \quad (2.4)$$

Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu lze najít mnoho dalších vztahů, které jsou podle jednotlivých autorů určeny pro specifickou skupinu ocelí, resp. její chemické složení.

2.3.2 Svařitelnost uhlíkových ocelí [2][4][13][15]

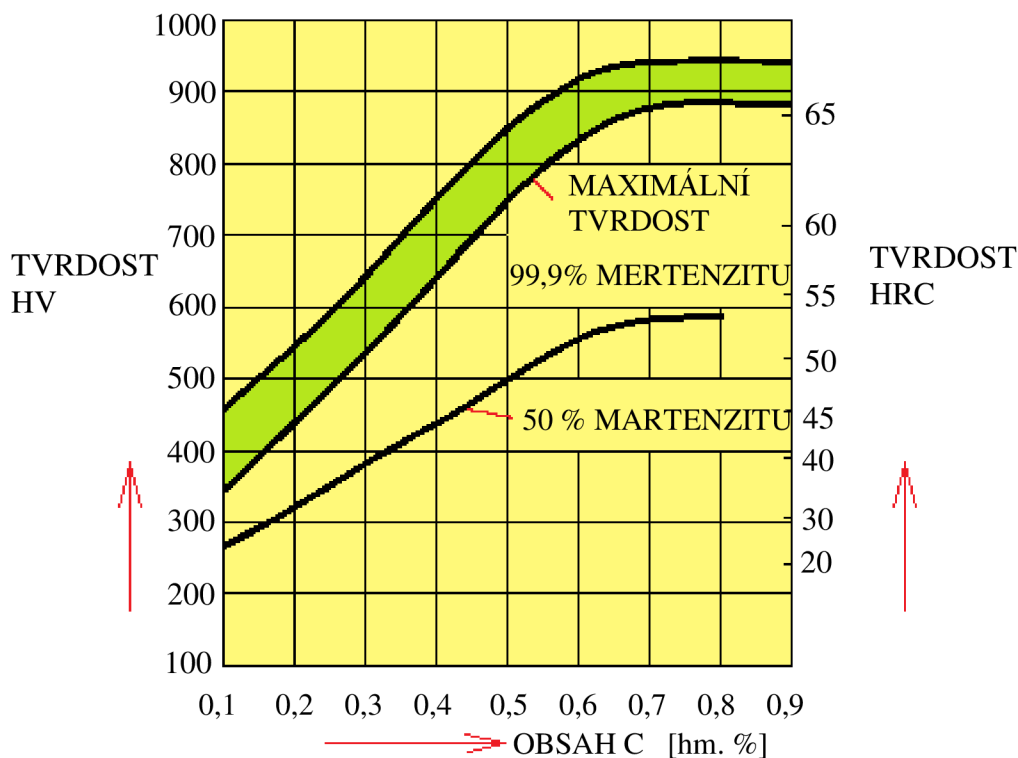
V experimentu bude použita uhlíková ocel 1.0036 (ČSN 11 373), tato ocel je zařazena mezi uhlíkové oceli, snadno svařitelné. Uhlíkové oceli podle ČSN třídy 10, 11, 12 a oceli na odlitky řady 42 26., jsou definovány obsahem uhlíku. Obsah uhlíku u těchto ocelí bývá v rozmezí od velmi nízkého obsahu až do obsahu 1,7 hm. %, i když obsah uhlíku u technických ocelí nad 1,3 hm. % bývá poměrně vzácný.

Uhlíkové oceli mají nízkou odolnost v korozním a oxidačním prostředí a rovněž výrazné snížení pevnosti při vyšších teplotách. Z technického hlediska využití je nutno respektovat omezení při jejich volbě:

1. Nízkou prokalitelnost.
2. Malou korozní odolnost a malou odolnost proti oxidaci.
3. Malou pevnost při vysoké teplotě.
4. Výrazný pokles tvrdosti při žíhání.

Tyto problémy lze vyřešit použitím legovaných ocelí, protože legující prvky upravují mechanické a metalurgické vlastnosti těchto ocelí.

Uhlík v TOO při svařování nelegovaných ocelí způsobuje zvýšení tvrdosti, snížení plasticity a vzniká vnitřní pnutí, které může vést ke vzniku trhlin. Maximální tvrdost v TOO se připouští 350 HV, které se dosáhne při 50 hm. % obsahu martenzitu ve struktuře a při obsahu uhlíku 0,25 hm. % (obr. 2.8).



Obr. 2.8 Závislost tvrdosti oceli na obsahu uhlíku způsobená přítomností martenzitu

Oceli s obsahem uhlíku $C < 0,25$ hm. % jsou svařitelné bez zvláštních podmínek všemi známými technologiemi svařování. U neuklidněných ocelí se při svařování mohou ale vyskytnout problémy, protože při natavování segregovaných oblastí mohou vzniknout póry, trhliny a může dojít i ke zkřehnutí svarového spoje. Volba přídatných materiálů pro uhlíkové oceli se volí především podle požadovaných mechanických vlastností.

Svarové spoje uhlíkových ocelí se obvykle tepelně nezpracovávají, jen při svařování velkých tloušťek materiálů a tuhých svařenců se žihají na snížení vnitřních napětí při teplotách nižších než je teplota A_{c1} . Pouze výjimečně se svarové kovy normalizačně žihají za účelem zvýšení meze únavy.

Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost uhlíkových ocelí [2][4]

- **Křemík** – Působí značně deoxidačně, v nelegovaných uhlíkových ocelí zvyšuje pevnost feritu. Nedostatek křemíku → ocel neuklidněná (pod 0,1 hm. %), horní hranice omezena na 0,45 hm. % Si.
- **Fosfor** - Zvyšuje mez kluzu i mez pevnosti a zvyšuje odolnost proti atmosférické korozi, snižuje plasticitu ocelí, způsobuje křehnutí za studena – jeho obsah omezen na max. 0,03 hm. %.
Škodlivé působení fosforu:
 - a) Prodlužuje dvoufázovou oblast v rozmezí teplot 1534 až 1050 °C a tím zvyšuje sklon k segregaci.
 - b) Způsobuje zkřehnutí tuhého roztoku α .
 - c) Malá difuzní rychlost v α a γ tuhém roztoku (ferit, austenit) nedovoluje vyrovnání koncentrace fosforu.
- **Síra** – Zvyšuje náchylnost na vznik teplých trhlín (viz. kap. 2.4.1). Přidává se úmyslně do nelegovaných konstrukčních ocelí za účelem zlepšení obrobiteľnosti. Při vysokém obsahu síry pomáhá mangan, protože síra má vyšší afinitu k manganu. Maximální obsah síry má být max. 0,03 hm. %.
- **Dusík** – Austenitotvorný prvek, jeho přítomnost v uhlíkové oceli způsobuje rozšíření pole γ . Vznikem nitridů se zvyšuje mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost. Snižují se ale plastické vlastnosti materiálu, zejména tažnost, vrubová houževnatost a mez únavy. Nebezpečné je vylučování nitridů v úzkém pásmu okolo svaru, které může vést k úplnému rozrušení konstrukce.
- **Vodík** – Nežádoucí příměs vzniklá rozkladem vzdušné vlhkosti při tavení a to jak při výrobě, tak i při sváření. Způsobuje vliv na vznik pórů ve svarovém kovu, oduhličení svarového kovu, vznik trhlín ve svarovém kovu a TOO.
Zdroje vodíku při svařování:
 - a) Vlhkost obalu elektrod a tavidel,
 - b) vlhkost na povrchu základního materiálu a přídatného materiálu,
 - c) zbytky maziva po tažení ulpělé na povrchu přídatného materiálu,
 - d) vlhkost v ochranných plynech,
 - e) obsah vodíku v základním materiálu,
 - f) korozní produkty,
 - g) barvy a mazadla na svarových plochách.
- **Hliník** – Působí silně deoxidačně a nenitridačně. Silně uklidněné oceli mají min. 0,02 hm. % hliníku.
- **Měď** - Do obsahu 0,26 hm. % se předpokládá za neškodný. Způsobuje stárnutí svarových spojů, hrubnutí zrna.

2.4 Vady ve svarech [11]

Svarový kov musí být celistvý, tj. bez vad, z toho se vychází už při hodnocení svařitelnosti. Ve svarovém spoji nelze ponechat vady, které jsou svým charakterem nepřijatelné vzhledem k požadované bezpečnosti provozu a životnosti svařené konstrukce. Proto je důležitá kontrola svarových spojů, zejména pomocí nedestruktivních zkoušek. Stále více se používá koncepce „vhodnosti pro daný účel“, která za jistých okolností připouští existenci vad určitého druhu, velikosti a množství.

2.4.1 Trhliny za horka [4][8][15]

V teplem ovlivněné oblasti, i ve svarovém kovu, se při ochlazování svarových spojů za vysokých teplot, vznikají trhliny za horka. U ocelí se tato teplota pohybuje nad 850 °C. Tyto trhliny se dělí:

1. Krystalizační – vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí (krystalizace). Krystalizační trhliny mají za následek snížení tažnosti kolem teploty solidu.
2. Likvační – vznikají ve vysokohřátém podhousenkovém pásmu teplem ovlivněné oblasti základního materiálu, nebo ve svarovém kovu,
3. Polygonizační – mohou vznikat jako likvační v TOO základního materiálu, nebo ve svarovém kovu při nižší teplotě (~ 850 °C). Charakteristické jsou pro vysokolegované austenitické oceli a slitiny niklu. Polygonizační trhliny jsou též označovány jako trhliny poklesu tažnosti. Souvisejí s poruchami na hranicích migrujících zrn při ochlazování v oblasti teploty rekrystalizace.

Za hlavní metalurgické příčiny krystalizačních a likvačních trhlin v ocelích jsou považovány prvky S, P, B, Nb, Ti a Si, které tvoří s železem a s niklem nízkotavitelná eutektika (například Fe – FeS, $T_s = 988$ °C, nebo Fe₃P, $T_s = 1048$ °C). Proto se s ohledem na zvýšení odolnosti proti trhlínám se obsah S + P doporučuje menší než 0,02 hm. %. K zabezpečení přípustného obsahu síry se používá Mn, který vytváří sulfidy α -MnS s vyšší teplotou tavení ($T_s = 1610$ °C). Příklady svarových spojů náchylných k tvorbě trhlin za horka jsou na obr. 2.10.

Hodnocení náchylnosti ocelí k horkým trhlínám

Hodnocení náchylnosti svarového kovu v TOO k trhlínám za horka lze informativně určit parametrickými rovnicemi → například rovnice H. C. S:

$$H. C. S = \frac{C(S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) \cdot 10^3}{3Mn + Cr + Mo + V} [\%] \quad (2.5)$$

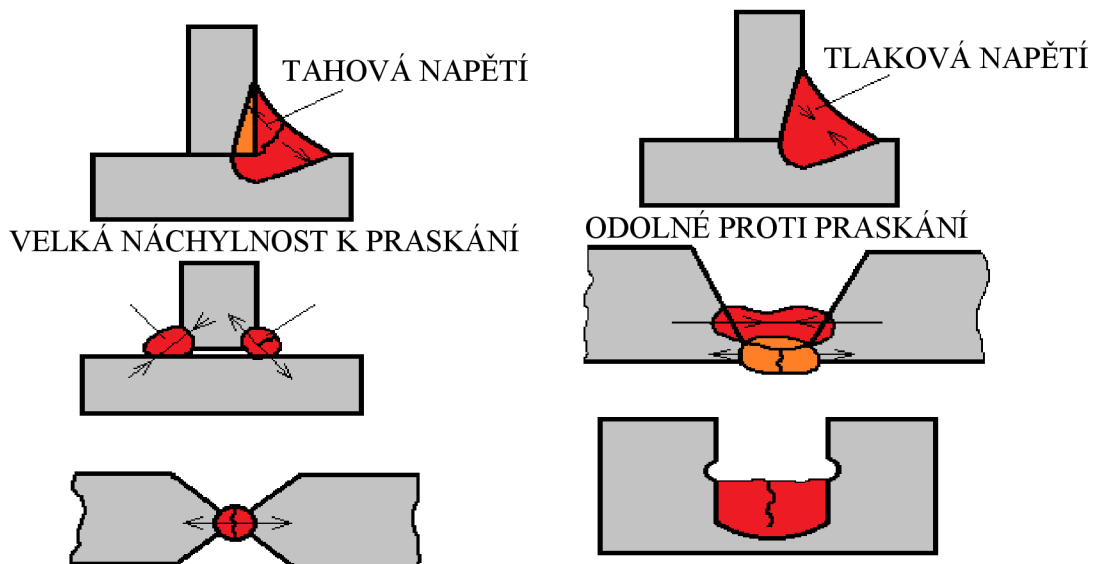
Ocel náchylná k trhlínám za horka:

pro nelegované oceli - H.C.S. > 4

pro nízkolegované oceli - H.C.S. > 1,6.

Opatření k zamezení vzniku horkých trhlin:

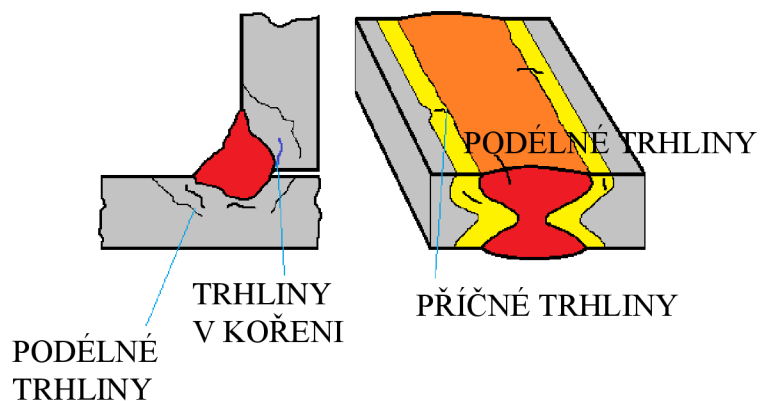
1. Snížit měrný příkon svařování,
2. omezit deformace a napětí použitím vhodných technik svařování, tvaru svarového spoje, předehřev,
3. nepoužívat housenky s malým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem, zejména v kořenové oblasti,
4. používat přídavné materiály vysoké čistoty.



Obr. 2.9 Svarové spoje náchylné k tvorbě trhlin za horka

2.4.2 Trhliny za studena [4][8][14][15]

Trhliny indukované vodíkem a zbrzděné lomy, trhliny za studena jsou defekty, které vznikají při nízkých teplotách (pod 200 °C). Na obrázku 2.10 jsou zobrazeny typy studených trhlin. Mohou se vyskytovat v kořenové oblasti, v koncových oblastech spojů, ve svarovém kovu, ale nejčastěji se vyskytují v podhousenkové oblasti spojů ocelí. Povrch trhlin transkrystalického charakteru je, na rozdíl od trhlin vzniklých za horka, lesklý.



Obr. 2.10 Typy studených trhlin

Tři faktory ovlivňující vznik studených trhlin:

1. Přítomnost tahových zbytkových napětí,
2. přítomnost vodíku ve svarovém spoji,
3. přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku.

Nejčastějším zdrojem vodíku ve svaru bývá atmosférická vlhkost, vlhkost z tavidel nebo z obalu elektrod. Obsah vodíku ve svarovém kovu měříme nejčastěji rtuťovou a glycerinovou zkouškou. Rozpustnost a rozložení vodíku ve svarovém kovu závisí na teplotě, koncentraci a typu vměstků, mikropórů a dislokací.

Náchylnost ocelí na vznik studených trhlin souvisí s prokalitelností, resp. transformačním zkřehnutím. Na náchylnost ocelí na zakalení v TOO má vliv chemické složení, lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem, např. dle IIW/IIS:

$$C_{e(IIW)} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad hm. [\%] \quad (2.6)$$

Průběh svařovacího cyklu lze ovlivnit změnou technologie svařování, změnou svařovacích parametrů, použitím předehřevu a dohřevu. Transformační zkřehnutí TOO je dané chemickým složením, které je vyjádřeno např. časem ochlazování Δt (800 – 500 °C).

Hodnocení náchylnosti ocelí ke studeným trhlinám

Nejjednodušším způsobem, jak zhodnotit náchylnost na vznik studených trhlin, které je spojeno se zahrnutím jednotlivých vlivů, je kritériální hodnocení dle množství C, tloušťky, hodnoty uhlíkového ekvivalentu $C_{e(IIW)}$ dle tabulky 4.

Tab. 4 Mezní hodnoty C, $C_{e(IIW)}$, tloušťky, u kterých jsou nutné zvláštní opatření [4]

Nízkouhlíkové, nízkolegované C – Mn oceli R_m [MPa]	C [hm. %]	$C_{e(IIW)}$ [hm. %]	Tloušťka [mm]	Poznámka
370 – 520	$\leq 0,22$	$\leq 0,41$	≤ 25	
500 - 700	$\leq 0,20$	$\leq 0,45$	≤ 25	nízkouhlíkové technologie
	$\leq 0,20$	$\leq 0,51$	25 - 37	

Parametrická rovnice parametru praskavosti P_w , zahrnuje vliv chemického složení oceli, vliv difúzního vodíku a vliv tuhosti svařovaného spoje je vyjádřena vztahy:

$$P_w = P_{CM} + \frac{H_{D(GI)}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} \quad [\%] \quad (2.7)$$

$$K = K_0 \cdot h \quad \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (2.8)$$

Kde:

P_{CM} - uhlíkový ekvivalent,

K_0 - měrná tuhost (pro tupý spoj = 69),

K - intenzita tuhosti spoje,

$H_{D(GI)}$ – obsah difundovaného vodíku stanoveného glycerinovou zkouškou,

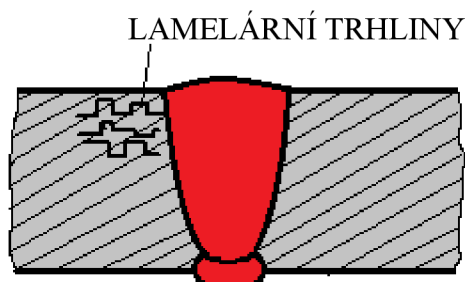
h – tloušťka materiálu v mm.

V případě, že $P_w > 0$, je ocel náchylná na vznik trhlin. Jiné možnosti stanovení náchylnosti na vznik studených trhlin je definování maximální tvrdosti v TOO a její početní predikci nebo výpočtem doporučené teploty předehřevu, při které trhliny nevznikají. Rozhodující vliv faktorů má zejména chemické složení materiálu, rychlost ochlazování v TOO, vliv tloušťky materiálu a obsah difúzního vodíku.

Náchylnost ocelí ke vzniku studených trhlin lze stanovit experimentálně a to na zkoušky s využitím reálného svařování, zkoušky se simulovaným svařovacím cyklem, zkoušky s vlastní tuhostí a zkoušky s vynucenou tuhostí. Mezi zkoušky s vlastní tuhostí patří: zkoušky Tekken, Lehigh, CTS, křížová, RD a další.

2.4.3 Lamelární trhliny

V základním materiálu nebo v TOO, v důsledku namáhání ve směru tloušťky plechu (obr. 2.11), vznikají lamelární trhliny, které mají kaskádovitý, stupňovitý tvar, zpravidla rovnoběžný s povrchem plechu. Lamelární trhliny se řadí mezi defekty typu studených trhlin, přestože jejich vznik může souviset s ději v přehřáté oblasti TOO.



Obr. 2.11 Příklad lamelární trhliny svarových spojů

Objevují se v oblastech řádkových shluků nekovových vměstků.

Činitelé ovlivňující vznik lamelárních trhlin:

1. Plastické vlastnosti oceli ve směru tloušťky,
2. konstrukce svařovaného uzlu,
3. přítomnost velkého počtu plochých rozválcovaných vměstků, nejčastěji sírníku,
4. způsob svařování a svařovací parametry,
5. obsah difúzního vodíku.

Hodnocení náchylnosti ocelí k lamelárnímu praskání

Pro hodnocení se používají parametrické rovnice zahrnující vliv chemického složení materiálu, obsahu nečistot, obsahu difúzního vodíku, příp. množství a tvar plošných nečistot, ale rovnice neberou v úvahu vznik vad, hádkovitost struktury, tloušťky materiálu a velikost napětí ve směru tloušťky.

Parametr lamelární praskavosti dle obsahu síry:

$$P_L = P_{CM} + \frac{H_{GI}}{60} + 6s \quad (2.9)$$

Parametr lamelární praskavosti dle množství vměstků:

$$P_l = P_{CM} + \frac{H_{GI}}{60} + \frac{l}{1000} \quad (2.10)$$

kde:

P_{CM} – uhlíkový ekvivalent,

H_{GI} – obsah difúzního vodíku stanovený glycerinovou metodou v [mlH/100g],

s – obsah síry v [%],

l – součet délek plošných vměstků v [μm].

Kriteriální hodnoty parametrů P_L a P_l pro odolnost proti lamelárnímu praskání konstrukční a nízkolegované oceli:

$$P_L \leq 0,35; \quad P_l \leq 0,4.$$

Na hodnocení náchylnosti k lamelárním trhlinám se používá řada experimentálních zkoušek a to Cranfieldova zkouška praskavosti, oknová zkouška a zkouška tahem ve směru tloušťky plechu.

Opatření k zamezení vzniku lamelárních trhlin

Aby byl omezen vznik lamelárních trhlin, je nutné:

1. Používat základní materiály se zaručenou kontrakcí ve směru osy z - $Z_z \geq 15\%$,
2. použít techniky svařování, které minimalizují napětí od svařování,
3. přesměrovat působení tahových napětí změnou tvaru spoje,
4. zlepšení čistoty oceli, snížení obsahu difúzního vodíku,
5. použít polštářování na ploše, kde působí kolmá tahová napětí.

2.4.4 Žíhací trhliny [4][8]

Žíhací trhliny vznikají při tepelném zpracování svarových spojů nebo mnohavrstevném svařování. Za nízkých teplot vznikají žíhací trhliny v důsledku vysoké rychlosti ohřevu na žíhací teploty, při kterém je vysoký rozdíl teplot mezi povrchem a jádrem svaru. Vysokoteplotní typ žíhacích trhlin vzniká v podhousenkové oblasti charakterizované zhrubnutím zrn. Tento typ trhlin se vyskytuje především u tepelného zpracování svarových

spojů nízkolegovaných CrMo, CrMoV a mikrolegovaných ocelí. Náchylnost ke vzniku žíhacích trhlin zvyšují povrchově aktivní prvky, jako je Cu, Sn, Sb, As.

Žíhací trhliny mohou vznikat:

1. Za nízkých teplot, tj. v průběhu ohřevu na teploty žíhání (200 – 300 °C),
2. pod návary nízkolegovaných ocelí při plátování austenitickou navařovací páskou,
3. v oblasti žíhacích teplot (600 – 650 °C).

Hodnocení náchylnosti ocelí k žíhacím trhlinám

Statistickým zpracováním experimentálních zkoušek, pro hodnocení náchylnosti na vznik žíhacích trhlin, byla odvozena řada parametrických rovnic, které se vztahují na nízkolegované oceli na bázi CrMo nebo CrMoV.

Zkušební metody pro stanovení oceli na vznik žíhacích trhlin:

- Tahové zkoušky na svařovaných, případně simulovaných vzorcích při žíhacích teplotách,
- simulace žíhacího cyklu na simulovaných tělesech,
- zkoušky vlivů žíhání na vlastních svařených tělesech.

Opatření k zamezení vzniku žíhacích trhlin

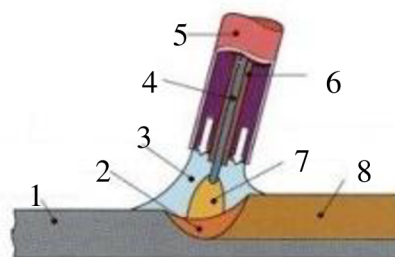
Snížení náchylnosti na vznik žíhacích trhlin za nízkých teplot se provádí snížením rychlosti ohřevu v teplotní oblasti do ~ 400 °C, zvláště v prvních stádiích do 250 °C. Rychlost ohřevu u materiálu náchylných na vznik žíhacích trhlin a u velkých tloušťek svarek se má pohybovat v rozsahu 15 až 30 °C / h.

3 OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ TAVÍCÍ SE ELEKTRODOU – MAG [2][13]

Metoda MAG (Metal Active GAS) patří s technologií MIG (Metal Inert GAS) v současné době mezi nejpoužívanější technologie, použité na robotizovaném a mechanizovaném pracovišti. Metoda MAG nahrazuje svařování obalenou elektrodou díky své ceně a jednoduchosti robotizace. Při svařování hoří oblouk v atmosféře aktivního ochranného plynu, který chrání elektrodu, stabilizuje oblouk, chrání odtavující se kapky přídavného materiálu a tavnou lázeň proti účinkům kyslíku a dusíku ze vzduchu.

3.1 Princip a parametry technologie MAG [2][14][18][28]

Základem technologie je svařování tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře aktivního plynu viz. obr 3.1. Aby elektricky zatížena délka drátu byla co nejkratší, je napájení drátu elektrickým proudem až v hořáku pomocí třetího kontaktu. Proudová hustota u technologie MAG je u svařování elektrickým obloukem nejvyšší, dosahuje hodnot až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ a svařovací proudy se pohybují od 30 až do 800 A u vysokovýkonných mechanizovaných metod. Teplota kapek se při svařování MAG pohybuje mezi 1700 až 2500 °C, teplota tavné lázně, v závislosti na parametrech svařování, technologii, chemickém složení a vlastnostech materiálu pohybuje mezi 1600 až 2100 °C. Použitím vysokých proudů u této technologie je zajištěna vysoká rychlost svařování, která se blíží hranici $150 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ a rychlost kapek přenášených obloukem přesahuje $130 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

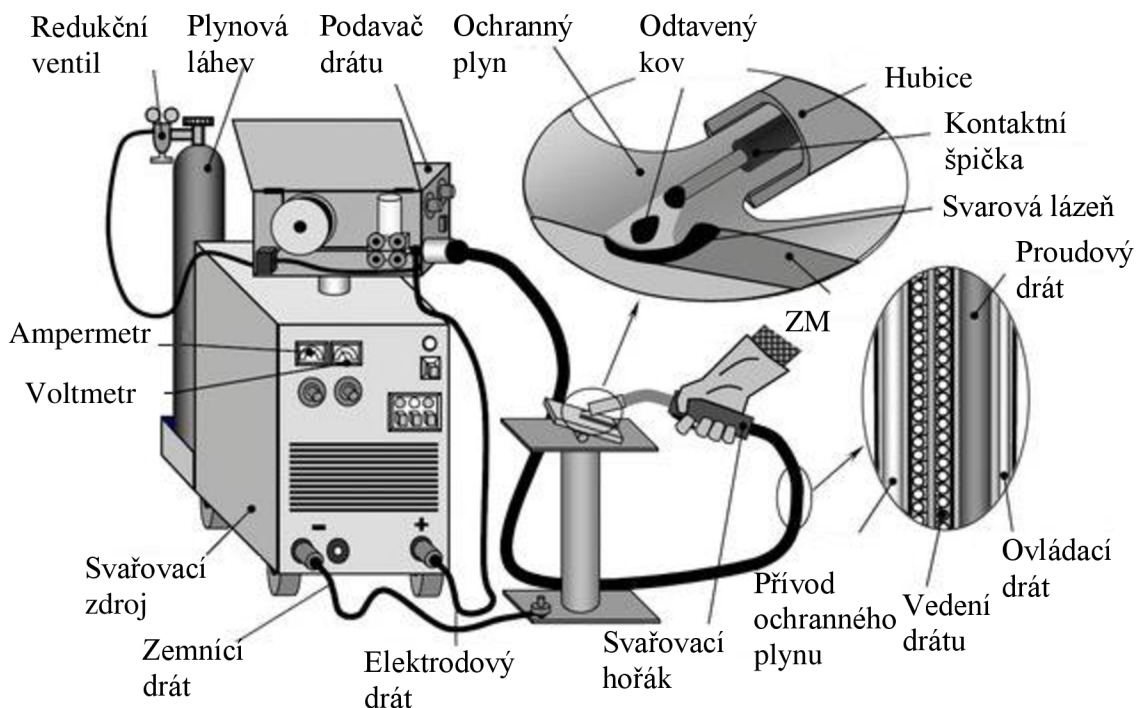


- | | |
|-------------------|-----------------------|
| 1 – ZM | 5 – Plynová hubice |
| 2 – Svarová lázeň | 6 – Kontaktní špička |
| 3 – Ochranný plyn | 7 – Elektrický oblouk |
| 4 – PM | 8 – Svarový kov |

Obr. 3.1 Princip svařování metodou MAG [28]

Základní vybavení pro svařování metodou MAG (obr. 3.2):

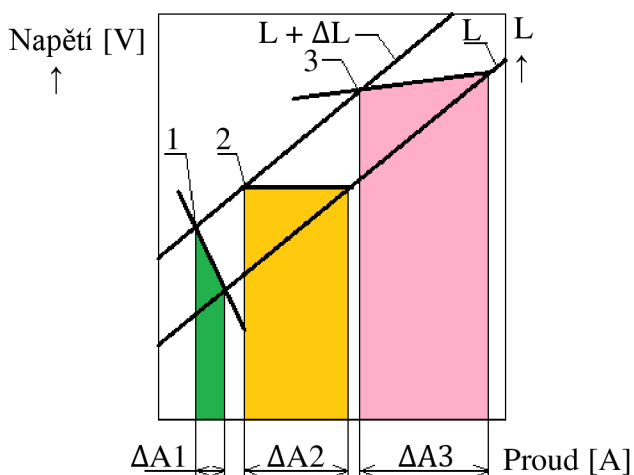
- zdroj svařovacího proudu s řídicí jednotkou,
- podavač drátové elektrody,
- svařovací hořák,
- multifunkční kabel hořáku s rychlospojkou,
- uzemňovací kabel se svorkou,
- zásobník ochranného plynu s redukčním ventilem.



Obr. 3.2 Vybavení pro svařování metodou MAG [18]

3.1.1 Zdroje pro svařování metodou MAG [2][21]

Jako zdroje pro svařování technologií MAG se používají zdroje se stejnosměrným výstupem, usměrněné pomocí usměrňovačů. V dnešní době se ale převážně používají invertory různých výkonových vlastností. Zdroje mají plochou statickou charakteristiku obr. 3.3 s tzv. konstantním napětím se samoregulační schopností udržování konstantní délky oblouku při svařování. Regulace délky oblouku je ale možná pouze při konstantní rychlosti podávání drátu a je založena na výrazné změně proudu a napětí na oblouku při malé změně délky oblouku. Například při krátkém oblouku a poklesu napětí se zvyšuje intenzita proudu a odtavování drátu je rychlejší.



1 – strmá charakteristika	2 – plochá mírně klesající charakteristika
3 – strmá mírně rostoucí charakteristika, L a L + ΔL charakteristiky oblouku	

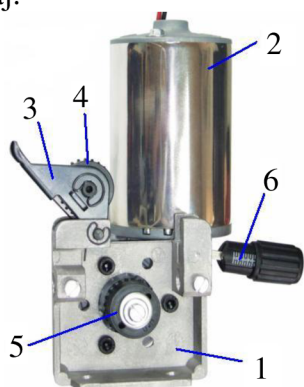
Obr. 3.3 Srovnání různých $V - A$ charakteristika – vliv strmosti na změnu proudu [2]

Typy zdrojů:

- Kompaktní zdroje s integrovaným podavačem drátu, chlazení hořáku proudem plynů, výkon zdroje bývá do 300 A.
- Výkonné zdroje s chladicí jednotkou, oddělený podavač drátu, výkon kolem 500 A.
- Stavebnicové uspořádání, oddělený podavač drátu, zdroj většinou invertorový, oddělený řídicí systém, výkonné chlazení.
- Zdroje s podavačem přímo v hořáku, použití u svařování tenkým hliníkovým drátem.

3.1.2 Podavače drátu [2][25]

Při svařování metodou MAG s přídavným drátem, je zapotřebí nepřetržitě dodávat drát do hořáku. Dodáván je pomocí podavače, který musí zaručit rovnoměrné podávání drátu. Drát nesmí být zdeformován ani nesmí být poškozen povrch drátu. Pohon drátu je zajištěn pomocí jednokladkového, dvoukladkového (obr. 3.4), čtyřkladkového podavače nebo podavače s mimoběžnými osami. Kladky mohou mít různé typy drážek dle podávaného drátu, např. lichoběžníková drážka, hladká polokulatá drážka, V drážka, vroubkovaná polokulatá drážka, aj.



- 1 – těleso podavače,
- 2 – elektromotor se šnekovou převodovkou,
- 3 – raménko přitlaku,
- 4 – hladká přitlačná kladka,
- 5 – motorem poháněná kladka s drážkou,
- 6 - regulační šroub s pružinou uvnitř pro nastavení přitlačné síly

Obr. 3.4 Dvoukladkový podavač drátu [25]

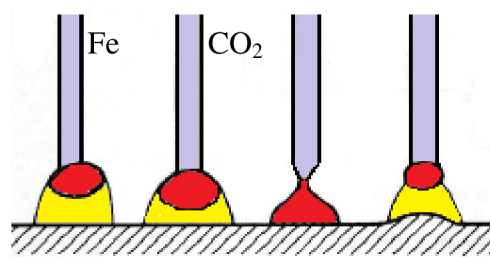
3.1.2 Přenos kovu v oblouku

Přenos kovu v oblouku je jednou ze základních charakteristik metod svařování elektrickým obloukem tavící se elektrodou, která závisí na svařovacích parametrech, jako je elektrický proud a napětí. Technika svařování, druh přídavného materiálu a složení ochranného plynu jsou však výrazně ovlivňující činitelé. Jednotlivé typy přenosu kovu v oblouku v závislosti na oblasti jsou znázorněny na obr. 3.7.

Typy přenosu kovu v oblouku:

a) Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu

Tento druh přenosu kovu se uplatňuje při nižších hodnotách napětí a podkritických hodnotách proudu od 60 do 170 A. Krátký oblouk se zkratovým přenosem kovu pracuje na principu, kdy se oblouk přerušuje zkratem, díky kterému dochází k přerušování oblouku a oddělení části elektrody. Drát je přiblížen do zkratu dříve, než vznikne kapka kovu (viz. obr. 3.5).



Obr. 3.5 Průběh zkratového přenosu kovu v oblouku [19]

Při vysokém napětí a nízkém proudu je frekvence kapek malá a rozstřík velký. Nepravidelné praskání je známkou příliš vysokého proudu. Zkratový proud může být použit ve všech ochranných plynech. Jen při použití různým plynů musí být upraveno svařovací proud a napětí. Přehled proudového zatížení pro jednotlivé průměry drátu jsou uvedeny v tabulce 5.

Zkratový přenos kovu je užit především v oblasti svařování tenkých plechů, překlenutí širších mezer, kořenových vrstev tupých svarů a pro svařování vysocelegovaných ocelí.

Tab. 5 Proudové rozsahy pro svařování zkratovým procesem [2]

Proudové rozsahy			
Průměr drátu [mm]	Nízký proud [A]	Vysoký proud [A]	Průměrný proud [A]
0,8	50	130	90
1,0	70	160	120
1,2	90	200	150

b) Krátký oblouk se zrychleným zkratovým přenosem

Drát je tlačěn pod velkým úhlem při vysoké podávací rychlosti, tím je čas na tvorbu kapky ještě menší než u přenosu kovu krátkým obloukem se zkratovým přenosem. V podstatě jde o zrychlení zkratového přenosu kovu. Technologie svařování umožňuje svařování tenkých plechů od 1 mm s vysokým výkonem a vysokou rychlostí. U této technologie je doporučeno zvýšení průtoku ochranného plynu, kvůli vzdálenosti plynové trysky od materiálu. Jako ochranný plyn je použit Ar + 8% CO₂.

c) Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem

Pro sprchový přenos jsou použity hodnoty svařovacího proudu od 200 do 500 A a napětí 28 až 40 V. Účinkem magnetického pole jsou tvořící se drobné kapky ustříženy a jsou osově urychleny ve vysoké frekvenci 150 – 350 Hz směrem do tavné lázně.

Dlouhý oblouk se sprchovým bezzkratovým přenosem umožňuje svařování ve více polohách. Je použit pro výplňové housenky svarů středních a velkých tloušťek. Tuto technologii lze rozeznat podle velké hloubky závaru z důvodu vysokého přenosu tepla, který je ovlivněn obloukem jenž nezhasíná. Jako ochranný plyn je použit směs plynů s Ar + CO₂, Ar, nedoporučuje se však použití čistého CO₂. V tab. 6 jsou uvedeny parametry nastavení pro sprchový proces.

Tab. 6 Nastavení parametrů pro sprchový proces v závislosti na průměr drátu [2]

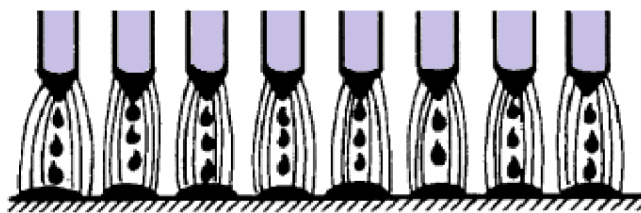
Průměr drátu [mm]	Rychlost posuvu drátu [m.min ⁻¹]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [A]
0,8	11	180	26
1,0	10	220	28
1,2	8	280	30

d) Impulsní bezzkratový přenos

Parametry svařování impulsním proudem spadají do oblasti jak zkratového, tak i sprchového přenosu. V celém průběhu amplitudy impulsního proudu intenzivně hoří oblouk, který ohřívá svarovou lázeň i samotný přídavný materiál a vždy v konečné fázi amplitudy je odtavena kapka přídavného materiálu (obr. 3.6). Jeho průběh je řízen elektronicky. Základní proud je nízký kolem 30A a udržuje ionizaci sloupce oblouku. Průběh se tvaruje v závislosti na druhu materiálu. Obsahuje nízkou frekvenci impulzů pro dosažení optimální velikosti kapky kovu. Při svařování hliníku a jeho slitin je možné svařovat plechy až 0,8 mm.

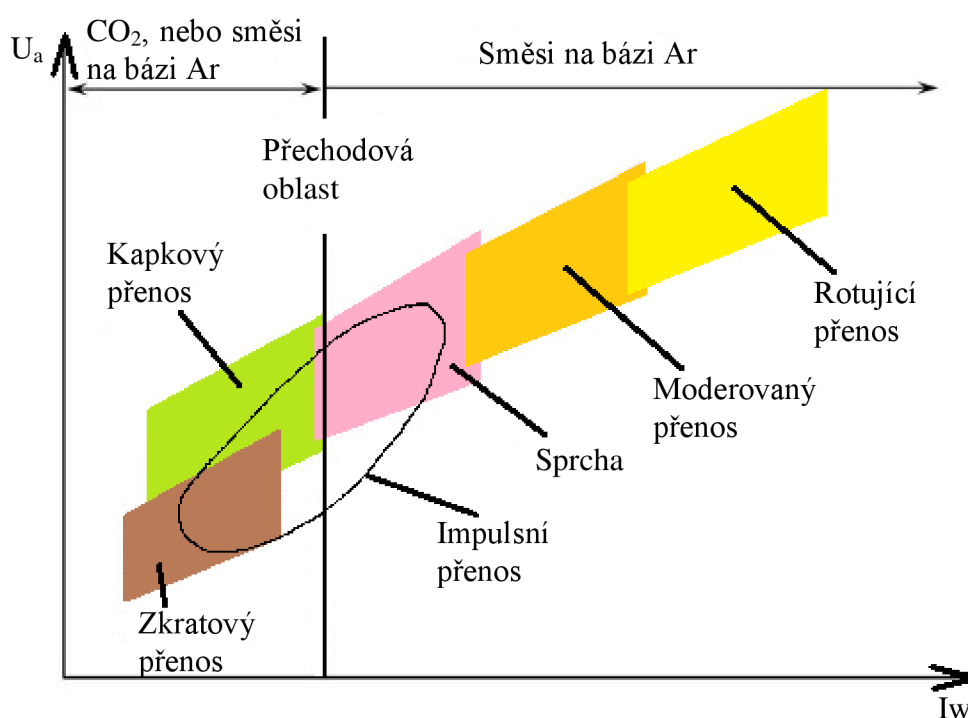
Svařování impulsním proudem má řadu výhod. Například svařování tenkých plechů i polohové svary bezzkratovým přenosem, vnášení menšího tepla do svaru z důvodu menší efektivní hodnoty impulsního proudu, vysoký výkon navařování, velmi vhodný přenos pro svařování hliníku a jeho slitin i vysokolegovaných ocelí, pravidelná kresba povrchu svaru i kořene.

Jako optimální plyn pro svařování uhlíkových ocelí je směs s 8 % CO_2 a pro nerezavějící oceli $\text{Ar} + 2\% \text{O}_2$. U hliníku se používá čistý argon.



Obr. 3.6 Sprchový přenos kovu [3]

- e) Přečtový dlouhý oblouk s nepravidelnými zkraty.
- f) Moderovaný bezzkratový přenos.
- g) Dlouhý oblouk s rotujícím přenosem kovu.



Obr. 3.7 Oblasti přenosu kovu v oblouku

3.2 Metalurgické reakce při svařování MAG [2][15][21]

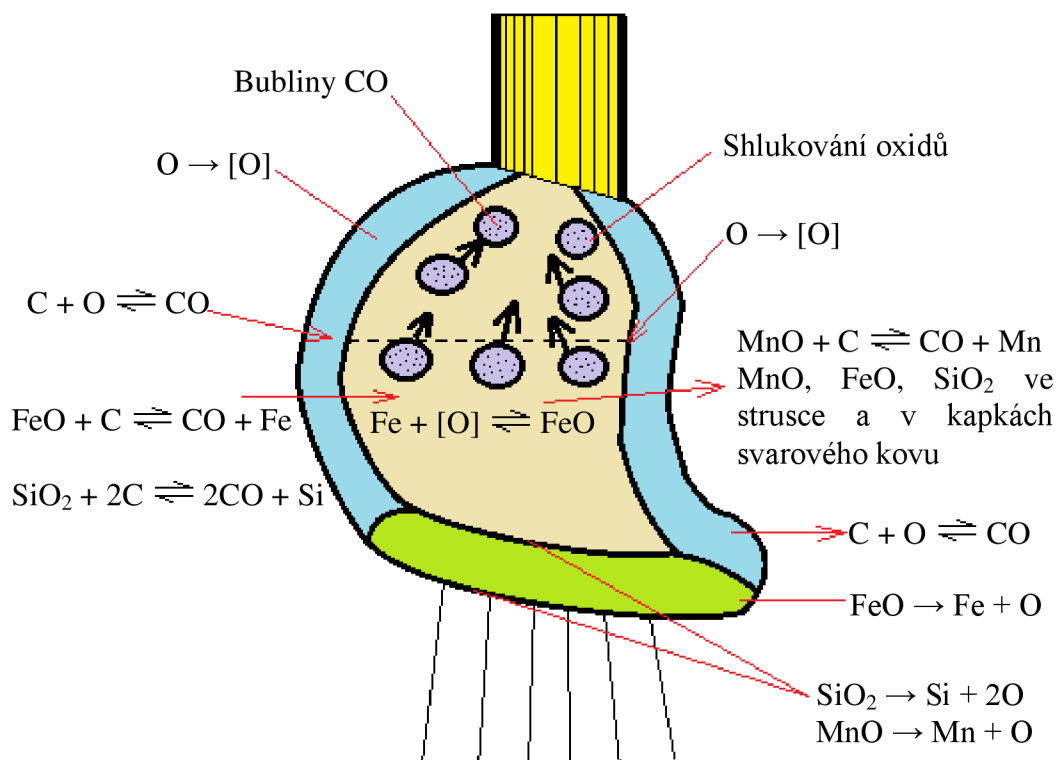
Při svařování metodou MAG v ochranné atmosféře aktivního plynu CO_2 můžeme rozdělit na 3 druhy podle působení na svarový kov a to na redukční, oxidační a nauhličující. Oxidačním účinkem na tavnou lázeň se vyznačují plyny s určitým podílem kyslíku, redukčním účinkem vodíku a směsi s vodíkem a nauhličující efekt má plyn obsahující uhlík.

Mezi nejdůležitější metalurgické reakce patří oxidační a desoxidační pochody probíhající v kapkách tavní elektrody (obr. 3.8) a v roztaveném svarovém kovu. Rozsah reakcí, ovlivňující tvar oblouků, povrch svařované housenky a vnitřní čistotu svaru, má především vliv množství disociovaného kyslíku schopného slučování s prvky v tavenině.

Zdrojem atomárního kyslíku v oblouku je jeho podíl v ochranném plynu, nebo disociace molekul CO_2 , které se rozpadají na CO a O . Disociace oxidu uhličitého je závislá na teplotě.

Vznikající kapky svarového kovu jsou obohacovány kyslíkem při přechodu do tavné lázně, dosahují vysokých teplot, protože oxidační reakce jsou exotermické. Uvolněné teplo vzniklé exotermickými reakcemi je difúzí vedeno do okolního materiálu, tím je hlubší a oválnější

svarová lázeň. Slučování oxidů FeO s C se ale tvoří bubliny CO, které mohou být za určitých podmínek příčinou pórovitosti, bublinatosti svarového kovu. Proto musí být provedena dokonalá dezoxidace svarového kovu, která je provedena přidáním deoxidačních prvků do přídavného materiálu. Deoxidačními prvky jsou Mn a Si, které vytvoří s kyslíkem oxidy a ve formě strusky vyplavou na povrch lázně. Množství strusky je závislé na množství kyslíku a oxidu uhličitého ve směsi ochranného plynu. Na dezoxidaci svarové lázně se nejvíce podílí Si, pak V, Cr, Mn. Vzniklou strusku na povrchu svaru je nutno odstranit.



Obr. 3.8 Reakce ochranného plynu s natavenou kapkou elektrody [15]

3.3 Ochranné plyny [2][13]

Velmi důležitá a nepostradatelná součást při svařování metodou tavící se elektrodou jsou ochranné plyny, které chrání tavnou lázeň před vlivy okolní atmosféry. Svou ionizační schopností, ochranné plyny, umožňují stabilní hoření elektrického oblouku a přispívají k přenosu tepelné energie do svaru. Svým složením a množstvím ovlivňují řadu svařovacích charakteristik, mezi které patří například:

- Způsob přenosu svarového kovu obloukem,
- množství rozstříku,
- stabilitu elektrického oblouku,
- rychlost svařování,
- hloubka závaru a profil svaru.

Oxid uhličitý

Vysoká hustota plynu příznivě ovlivňuje funkci plynové ochrany především v běžných polohách PA, PB a PC. Vysoký přenos tepla do svarové lázně ovlivňuje oxid uhličitý svojí vysokou tepelnou vodivostí a spolu s teplem získaným exotermickými reakcemi zajišťuje

velmi dobré nastavení svarových hran, hluboký průvar s oválným profilem svarové housenky a dobré odplynění svarové lázně.

Svar obsahuje velké množství oxidů, stejně jako množství strusky na povrchu. Přejod svarové kovu do okolního materiálu je ostrý, se značným vrubovým účinkem a povrch svarové housenky je velmi nerovnoměrný s velkým převýšením.

Při svařování technologií MAG je použito plyn CO_2 s čistotou minimálně 99,5%, zbytek tvoří nečistoty a vlhkost. V láhvích je plyn v kapalném stavu pod tlakem 5MPa. Jeden litr kapalného plynu, při 0 °C a tlaku 760 mm Hg dává 504,4 l plynu.

Kyslík

Kyslík je sice nehořlavý plyn, ale oxidační hoření podporuje. Používá se především ve směsích s argonem v rozpětí obsahu 0,03 – 3 %, a ve směsi s argonem a oxidem uhličitým. Hlavní důvod přidávání kyslíku do ochranného směsného plynu je výrazné zvýšení tekutosti svarové lázně a povrchového napětí roztaveného kovu. Kyslík tímto způsobem zlepšuje odplynění svarové lázně, profil svarové housenky a přechod svarového kovu do základního materiálu.

Směsné plyny Ar + 15 až 25 % CO_2

Směsný plyn Ar + 18 % CO_2 patří mezi nejpoužívanější univerzální ochranný plyn pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí metodou MAG. Hlavní výhody toho plynu jsou například dobré svařovací schopnosti, stabilní elektrický oblouk a hluboký závar. Ale také umožňuje svařování zkratovým i sprchovým přenosem kovu a malým rozstříkem. Používá se pro všechny tloušťky plechů.

Směsný plyn Ar + 8 % CO_2

Tento směsný plyn se používá hlavně pro impulsní a sprchový přenos kovu obloukem. Dovoluje vysokou rychlost svařování s nízkým rozstříkem a minimální tvorbou strusky. Používá se také u vysokovýkonné metody svařování při vysokých proudech, proto se používají na ručních i mechanizovaných pracovištích při svařování všech tloušťek plechu.

Směsné plyny Ar + 5 až 13 % CO_2 + 5 % O_2

Vysoký obsah kyslíku zaručuje velmi dobrou tekutost tavné lázně a výborné odplynění. Sprchový přenos kovu obloukem je možný i při nižší intenzitě proudu. Plyn je především použit na mechanizovaných a robotizovaných způsobech svařování malých a středních tloušťek.

3.4 Přídavný materiál [2][9][22]

Použití přídavných materiálů závisí na vlastnostech svařovaného materiálu a na technologii sváření. Technologie MIG/MAG se používá pro svařování ocelí uhlíkových, středně legovaných a vysokolegovaných, slitin hliníku, mědi, niklu i pro navařování v oblasti renovací a tvrdonávarů.

Přídavné materiály jsou použity ve formě plného drátu obr. 3.9, nebo plněného drátu (trubičkové dráty). Dráty jsou navinuté na cívky o běžné hmotnosti 15 kg. Ale jsou však vyrobeny v širokém sortimentu rozměrů a hmotností drátů.

Označení cívky štítkem:

- Označení výrobce,
- označení drátu dle výrobce i příslušné normy,
- průměr drátu,
- hmotnost,



Obr. 3.9 Přídavný drát [22]

- číslo tavby,
- klasifikace a certifikace jiných orgánů.

Plněné dráty [2][16][28]

Svařováním metodou MAG s použitím trubičkového drátu patří k nejproduktivnějším metodám svařování.

Procházející proud tenkým trubičkovým drátem zajišťuje vysokou proudovou hustotu, díky které dochází k rychlému odtavování drátu a tím i vysokému odtavnému výkonu.

Plněné dráty (obr. 3.10) obsahují například bazické, kyselé, rutilové, případně fluoridové struskotvorné přísady, které při odtavování vytvářejí na povrchu svaru tenkou vrstvu strusky, ovlivňující formování svaru a kvalitu povrchu.

Podobně jako u svařování MIG/MAG závisí i tato metoda na ochranném plynu, který chrání svarovou oblast roztaveného kovu. Plyn se dodává buď samostatně (trubičkový drát je určen pro svařování v ochranné atmosféře) nebo vzniká rozkladem přísad z náplně (trubičkový drát s vlastní atmosférou - MOG). Kromě ochranného plynu produkuje trubičkový drát i strusku, která slouží jako další ochrana při chladnutí svarového kovu. Po svařování se z povrchu svaru odstraní.

Ekonomika celého procesu vychází příznivěji při použití trubičkového drátu, než plně dráty, i přes vyšší cenu těchto trubičkových drátů.

Úspory nákladů spojených s následkem opracování jsou dosahovány:

- Výrazné eliminace oprav svarů,
- bezzubý svar s jemnou kresbou,
- snížením deformací v důsledku velkých svařovacích rychlostí,
- průběhem svařovacího procesu bez rozstříku svarového kovu.

Charakteristika:

- Vyšší rychlosti svařování a tím i větší efektivita procesu,
- zlepšený přenos kovu do svařovací lázně ve všech polohách svařování,
- dobrá sočivost boků svarové drážky,
- vyšší odtavovací výkony při menším vneseném teple,
- výrazné úspory a zlepšení ekonomiky,
- stejnoměrný tvar trubičky – žádné problémy při podávání drátu.



Obr. 3.10 Plněný trubičkový drát [16]

4 PLAZMOVÉ OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ [2][26]

Používání nových materiálů a typů slitin vede k rozvoji a vývoji nových aplikací netradičním způsobem svařování. Plazmové svařování je rozvíjeno nejen kvůli některým průmyslovým odvětvím, jako je jaderná technika, dopravní technika, elektronika, letecký a kosmický průmysl.

V oblasti tavného svařování jsou použity metody s vysokou koncentrací tepelné energie na jednotku plochy. Znakem těchto metod je podstatné snížení spotřeby tepelné energie na jednotkovou délku svaru.

Speciální technologie, mezi které jsou zařazeny technologie svařování plazmou, svařování svazkem elektronů a svařování laserem, mají nesporné výhody:

1. Vysoká rychlost ohřevu i vysoká rychlost svařování omezuje difúzi tepla do okolí svaru, a tím i omezuje rozsah transformačních změn v materiálu,
2. minimální deformace,
3. malá tepelně ovlivněná oblast, snížení zbytkových napětí a deformací,
4. umožnění navrhování nových konstrukčních řešení svarků.

4.1 Princip metody [2][14][15][27]

Pojem plazma byl zaveden pro speciální stav plynů v roce 1923, označovaný jako čtvrtý stav hmoty. Vznik plazmy je podmíněn ionizací plynu, při které dochází k vyrazení nebo uvolnění elektronů z vnějších valenčních orbitů elektronu. V plazmě vedou elektrický proud uvolněné elektrony, které mají záporný náboj. Kladný náboj má ionizované jádro atomu zabývajícími se elektrony. Navenek se plazma chová jako elektricky neutrální.

Na ionizaci plynů je nutná značná energie, buď mechanická nebo tepelná. V technické praxi je používán jako zdroj tepla elektrický oblouk. Princip je teda založen na ionizaci plynu při průchodu elektrickým obloukem (4.2).

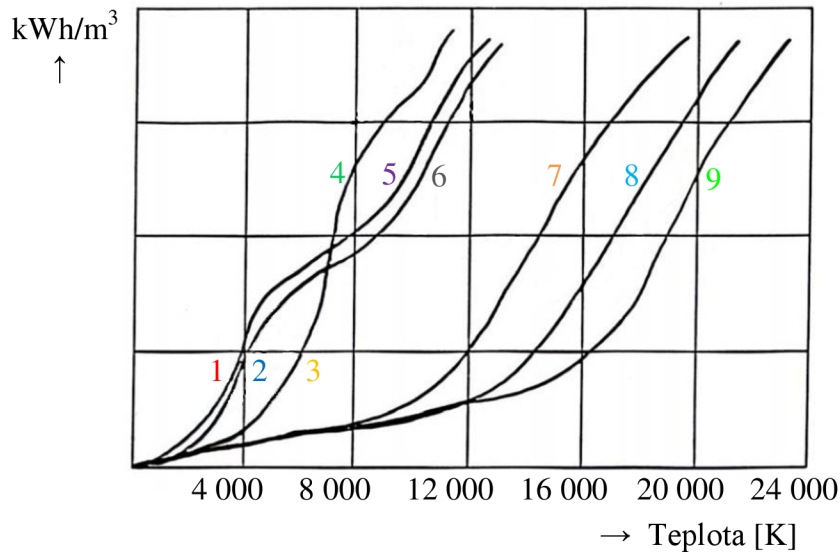
Na rozložení molekul na atomy u dvouatomových plynů, musím nejdříve proběhnout disociace plynu (4.1). Úplná ionizace proběhne za teplot kolem 100 000 K, ale u technologie svařování jsou dosahovány nižší teploty, v závislosti na entalpii jednotlivých plynů (obr. 4.1). Aby se plazmový paprsek nedotýkal stěn paprsku, je ionizována jen část plynu a neionizována chladnější část stabilizuje plazmový paprsek v ose hořáku.

Disociace a ionizace dusíku:



Průměrné teploty plazmy pro jednotlivá prostředí:

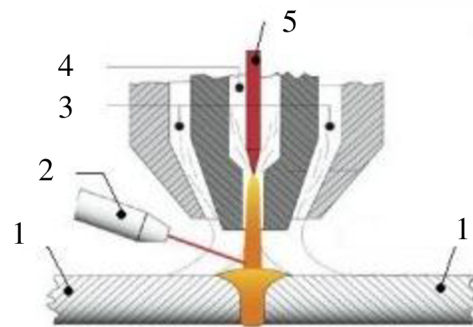
- Dusíková plazma do 9000 K,
- vodíková plazma 10 000 K,
- argonová plazma 16 000 K,
- héliová plazma 20 000 K,
- plazma stabilizována vodou až 35 000 K.



1. $O_2 \rightarrow 2O$	2. $H_2 \rightarrow 2H + 2E$	3. $N_2 \rightarrow 2N$	4. $2N \rightarrow 2N^+ + 2e^-$
5. $2O \rightarrow 2O^+ + 2e^-$	6. $2H \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	7. $Ar \rightarrow Ar^+ + e^-$	8. $Ne \rightarrow Ne^+ + e^-$
9. $He \rightarrow He^+ + e^-$			

Obr. 4.1 Závislost entalpie plynů na teplotě [2]

Vlastní princip plazmového svařování je odvozen od technologie svařování WIG. Při svařování paprskem plazmatu, nepřeneseným obloukem, hoří oblouk mezi wolframovou elektrodou a vnitřní stěnou plazmové trysky, nebo při přeneseném zapojení mezi wolframovou elektrodou a materiálem. Na obr. 4.2 je zobrazeno zapojení hořáku závislé (přenesené), u kterého je na záporný pól připojen na wolframovou elektrodu a kladný pól na materiál. K zapálení oblouku je použit VF ionizátor, ten vytvoří pomocný oblouk dostatečný k zapálení hlavního oblouku i na dostatečně velké vzdálenosti.



- 1 – Základní materiál
- 2 – Podavač přídavného materiálu
- 3 – Ochranný plyn
- 4 – Plazmový plyn
- 5 – Netavící elektroda

Obr. 4.2 Řez plazmovým hořákem [27]

Plazmový hořák se zúženou tryskou i fokusační plyn, přiváděný k plazmovému paprsku, zužují (kontrakce) plazmový paprsek. Jako fokusační plyny jsou použity směsi argonu s vodíkem nebo dusíkem. Dvouatomové plyny spotřebovávají velkou energii na disociaci a velkou tepelnou kapacitu, odebírají tak teplo z vnějších vrstev. Plazma je zužována, a aby byl přenesen požadovaný výkon, je zvýšena teplota, a tím i stupeň ionizace a následně elektrická vodivost.

Ohřevem plynu obloukem je mnohonásobně zvýšen jeho objem a tím i výstupní rychlost plazmy. Vysoká teplota spolu s dynamickým účinkem dopadající plazmy umožňuje proniknutí plazmy v celém průřezu materiálu. Výsledná rychlost plazmy při svařování se pohybuje mezi 200 až 500 $m \cdot s^{-1}$.

Vlastnosti technické plazmy:

- Současně s pružnými srážkami molekul se vyskytují i nepružné srážky, vedoucí k disociaci a ionizaci plynu,
- na pohyblivosti elektronů závisí elektrická vodivost plazmy,
- chemicky stejnorodý plyn je měněn na směs atomů, iontů, elektronů, fotonů,
- počet kladných a záporných částic je přibližně stejný,
- na plazmu působí silné elektrické a magnetické pole.

4.2 Plyny použité při plazmovém svařování [1][2]

Při plazmovém svařování jsou použity 3 druhy plynů. Plazmový ke vzniku plazmatu, fokusační, který slouží k zúžení plazmového paprsku a ochranný plyn pro ochranu svarové lázně proti oxidaci.

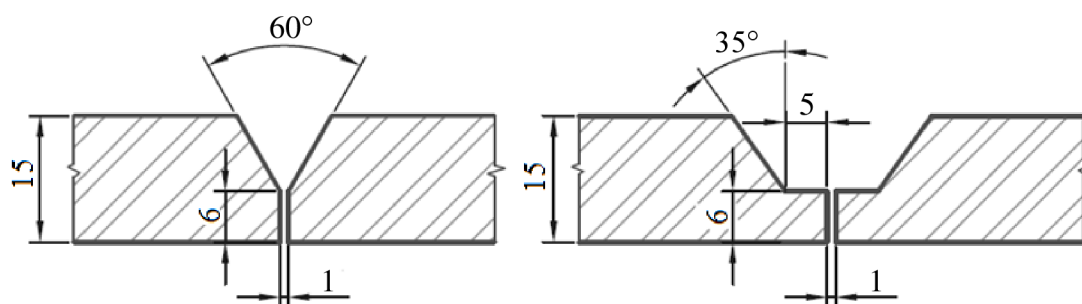
1. plazmový plyn: Ar (obr. 4.3), Ar + H₂, Ar + He, průtok 0,5 až 0,9 l.min⁻¹,
2. fokusační plyn, průtok 3 až 18 l.min⁻¹,
3. ochranný plyn, průtok 2 až 20 l.min⁻¹,
u aktivních materiálů Ti, Zr, Ta zvýšení průtoku na 20 až 30 l.min⁻¹.



Obr. 4.3 Tlakové láhve argonu [1]

4.3 Úprava svarových ploch a svařitelnost [2][13]

Vysokým dynamickým účinkem plazmového paprsku je zaručeno spolehlivé provaření kořene do větších tloušťek bez úpravy svarového úkosu. Bez úpravy úkosu mohou být svařeny bez úpravy úkosu nerezavějící austenitické oceli do tloušťek 10 až 12 mm s mezerou 0,5 – 1 mm a s plynovou ochranou kořene formovacím plynem. Nelegované a středně legované oceli nemusí být upraveny do tloušťky asi 6 mm. Příklad úpravy vysokolegované oceli Cr – Ni oceli svařovací plochy je zobrazen na obr. 4.4.



Obr. 4.4 Úprava svarových ploch vysokolegované Cr – Ni oceli [2]

4.4 Výhody a použití [2][27]

Výhody:

- Minimální deformace,
- malá tepelně ovlivněná oblast, snížení zbytkových napětí a deformací,
- umožnění navrhování nových konstrukčních řešení svarků,
- omezení rozsahu transformačních změn v materiálu
- dobrý vzhled svarů,
- svařování těžko tavitelných kovů a možnost svařovat velmi tenké materiály
- svařování slitin se speciálními vlastnostmi,
- možnost svařování součástí velmi malých rozměrů (teplotní čidla),
- svařitelnost materiálů s přídavným materiálem i bez něj,
- velmi dobrý průvar i tvar svaru,
- vysoká čistota svaru bez pórů,
- možnost mechanizace, možnost automatizace,
- jednoduchá úprava svarových ploch.

Použití:

S ohledem na vysoké pořizovací a provozní náklady se materiály, svařitelné jinou technologií, plazmou běžně nesvařují. Ale vysoká energie plazmy umožňuje svařovat materiály s vysokou teplotou tavení, jako je např. wolfram, molybden, hliník a měď. Svařování plazmou se používá hlavně při svařování ušlechtilých materiálů a to zejména v oblasti jaderného průmyslu, chemického průmyslu, elektroniky, stavby lodí či leteckého a automobilového průmyslu.

Zvláštní postavení má plazmové svařování v rámci svařování plazmových nádob a potrubních systémů v chemickém a potravinářském průmyslu. V případě že je nakombinován svařovací proces s vhodným zařízením, je možné docílit optimálních kvalitativních i ekonomických ukazatelů.

4.4 Mikroplazmové svařování [2]

Hoření plazmového oblouku je stabilní i při nízkých proudech, to je využito při mikroplazmovém svařování. Intenzita proudu se pohybuje v rozsahu 0,05 až 20 A, lze jím svařovat i kovové fólie tl. 0,01 i plech 2 mm.

Při spojování fólií je značným problémem příprava svarové mezery, která se musí pohybovat mezi 10 – 20 % tloušťky fólie. Toto svařování je využito v leteckém a kosmickém průmyslu, mikroelektronice, chemickém a potravinářském průmyslu.

Příklady parametrů mikroplazmového svařování:

- Slitina niklu Inconel, tl. 0,3 mm, proud 6A, rychlost svařování 40 cm. min⁻¹,
- měď, tloušťka 0,075 mm, proud 10 A, rychlost svařování 15 cm. min⁻¹,
- titan, tloušťka 0,2 mm, proud 5 A, rychlost svařování 12,5 cm. min⁻¹.

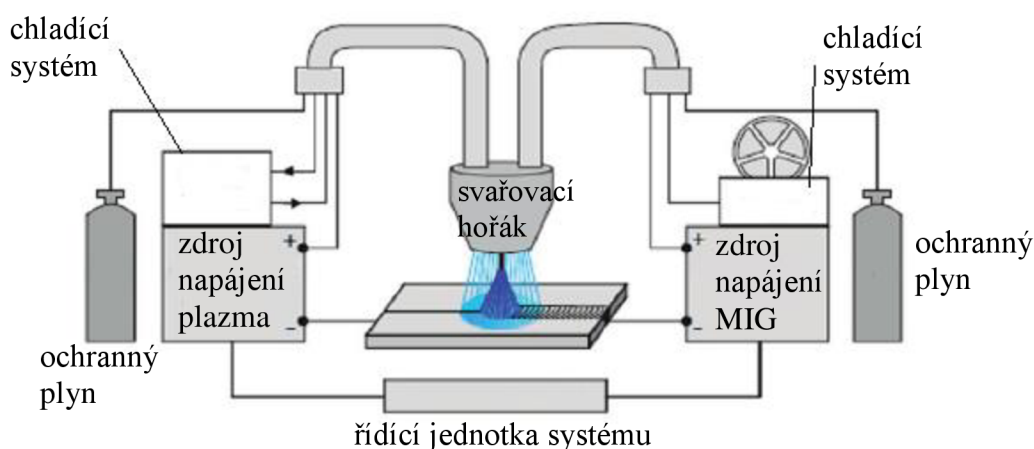
4.5 Systém Plazma – MIG (GMPA – Gas Metal Plasma Arc) [2][30]

Kombinací svařováním plazmou a svařování metodou MIG spojuje výhody plazmového oblouku, jako jsou vysoká stabilita hoření i při vysoké délce oblouku, s výhodami MIG svařování – automatické podávání tavicí se drátové elektrody (obr. 4.5. a 4.6).

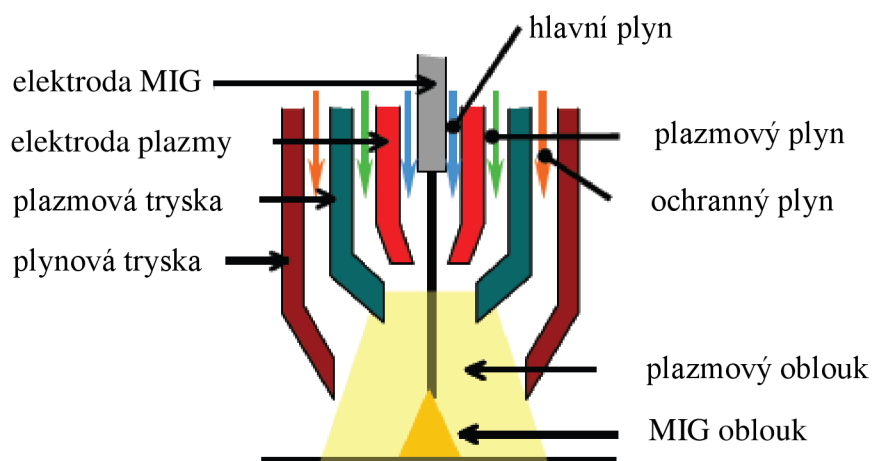
Dvě základní alternativy:

- Plazmový oblouk hoří mezi hubicí a základním materiálem,
- plazmový oblouk hoří mezi pomocnou wolframovou elektrodou a proud plazmatu je usměřován hubicí.

U systému plazma – MIG je přenos kovu klidný, bez rozstříku a je usměřován proudícím plazmatem. Vysoký svařovací proud se vlivem šikmé polohy pomocné elektrody a neaxiální složky magnetické síly v oblouku vychýlí ohřátý konec drátu a začne rotovat kolem osy hořáku. Při nízkém svařovacím proudu je hlavní oblouk úzký a průvar hluboký.



Obr. 4.5 Systém Plazma – MIG hybridní svařování [30]



Obr. 4.6 Hořák systému Plazma – MIG [30]

5 POROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ

Aby bylo možné technologii svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře (MAG) a technologii svařování plazmou, musí být použit stejný základní materiál, který musí být dobře svařitelný pro obě technologie, stejný přídatný materiál, stejné podmínky a v neposlední řadě stejné parametry svařování.

5.1 Základní materiál [6][10]

Jako základní materiál byl vybrán materiál 1.0036, který zaručuje dobrou svařitelnost. Jedná se o ocel neušlechtilou, neuklidněnou nebo polouklidněnou ocel vhodnou na součásti (menších tloušťek) konstrukcí a strojů (i tavně svařovaných), namáhaných staticky a dynamicky, u tvarových tyčí a nesvařovaných dílců do tl. 16 mm (podle ČSN 73 1401), dále na různé výrobky běžného použití.

Tloušťka plechu byla 12 mm. Na plechu nebyla provedena žádná úprava, bude proveden návar. Ocel 1.0036 odpovídá oceli Fe 360 B podle ISO 630:1980, Fe 360 BFN podle EN 10025:1990 a oceli St3kp a St3ps podle GOST 380-88, S235J0 podle EN 10025 – 94.

Tab. 7 Parametry oceli 1.0036 [5]

	Min.	Max.	Jednotky
Hustota	7850	7850	kg / m ³
Pevnost v tahu	360	370	MPa
Mez kluzu	240	240	MPa
Yangův modul	210 000	210 000	MPa
Mez únavy	200	200	MPa

5.2 Svařování technologií MAG [6]

Pro svařování technologií MAG byl použit svářecí zdroj od firmy Fronius TransPlusSynergic 4000 s pojezdovou jednotkou Fronius Automation – FTV 20. (Obr. 5.1). Technické údaje jsou v tab. 8.

Ovládací skříňka: FRC 4

Podavač drátu: VR 4000



Obr. 5.1 Svářecí zdroj Fronius TransPlusSynergic 4000 [6]

Sériové vybavení:

Automatické odpojení chlazení, 2-/4 kladkový posuv, zavedení drátu bez proudu a plynu, monitorování zemního zkratu, odhořovací automatika, manuální provoz, digitální displej, synergický provoz, teplotně řízený hořák, ovládání Up/Down na hořáku, ochrana proti přehřátí, 2 – taktní režim, 4 – taktní režim, bodování, start pro hliník, adaptér pro košovou cívku, certifikace S a CE.

Tab. 8 Technické údaje – svařovací zdroj TPS 4000 [6]

Svařovací zdroj		TPS 4000	
Síťové napětí		+/- 10 %	50/60Hz
Účíník		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
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:

Jako ochranný plyn byl zvolen směsný plyn Ar + 18 % CO₂. Hlavní výhody této směsi jsou dobré svařovací schopnosti, hluboký závar a stabilní elektrický oblouk. CO₂ v této směsi zvyšuje tepelnou vodivost, odplynění svarové lázně a zajišťuje hluboký průvar.

Přídavný materiál [9][20]

Jako přídavný materiál byl zvolen plný drát od firmy ESAB pro nízkolegované oceli s označením materiálu OK AR 13.31, EN (DIN) G Mn4Ni2CrMo. Jedná se o nepoměděný nízkolegovaný drát pro svařování vysokopevných ocelí s požadavkem na vysokou houževnatost svarového kovu. Tento drát vyniká snadností zapalování a stabilitou oblouku s nízkým rozstříkem, bezporuchovým podáváním i za vysokých rychlostí. Drát je odolný proti korozi a je vhodný především pro mechanizované pracoviště.

Min. pevnost kluzu 610 MPa, pevnost v tahu 710 Mpa. Interpass teplota 150 °C, předehřev 150 °C.

Klasifikace svarového kovu – EN 12534: G 55 3 M Mn3NiCrMo

Svařovací proud - + =

Tab. 9 Typické chemické složení drátu v % [20]

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo
0,10	0,70	1,40	0,60	0,60	0,20

Tab. 10 Typické hodnoty čistého svarového kovu [20]

Podmínky	Stav	Plyn	R _m MPa	R _{p0,2} MPa	A ₅ %
EN	TZ 0	M 21	770	690	20
EN	TZ 1	M 21	750	660	24
EN	TZ 2	M 21	750	660	24

TZ 0 – stav po svařování,

TZ 1 – stav po žihání 570 °C / 1h,

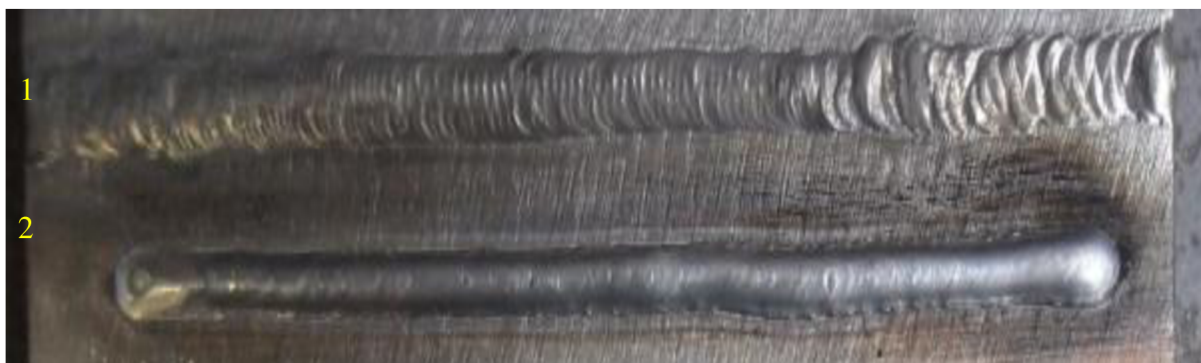
TZ 2 – stav po žihání 620 °C / 1h.



Obr. 5.2 Přídavný materiál [9]

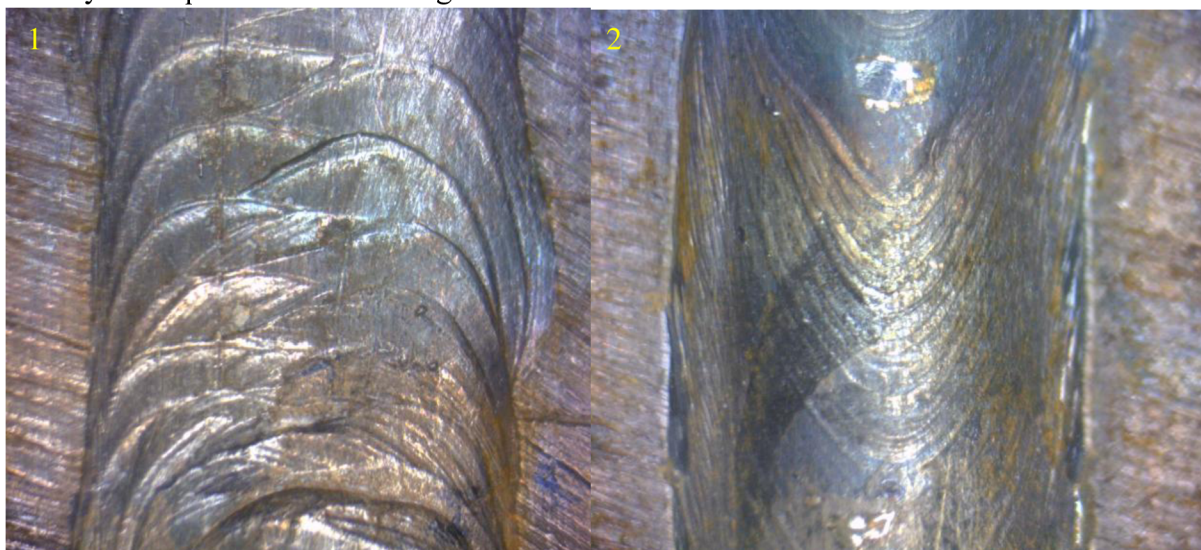
Provedení svaru

Nejdříve byla odzkoušena technologie svařování MAG ručním posunem, tento svar není tak vzhledově dobrý jako druhý svar, který byl proveden s automatickou pojezdovou jednotkou Fronius Automation – FTV 20.



Obr. 5.3 Svary technologií MAG

Detaily svaru provedené technologií MAG



Obr. 5.4 Detail svaru č. 1 a 2

Svary na obr. 5.3, 5.4:

1 – Ruční svařování technologií MAG – hodnoty v tab. 11.

Tab. 11 Parametry svařování pro 1. svar

	Parametry	Jednotky
Svařovací proud	110	A
Svařovací napětí	15,8	V
Rychlost posuvu drátu	1,5	mm/s ⁻¹
Průměr přídatného drátu	1,2	mm
Svařovací rychlost	nekonstantní	mm/s ⁻¹

Svar 1. provedený ručním svařování technologií MAG není pro porovnání vhodný, protože není konstantní rychlost posouvání a svar není ani vzhledově dobrý.

2 – Strojové svařování technologií MAG – hodnoty tab. 12.

Tab. 12 Parametry svařování pro 2. svar

	Parametry	Jednotky
Svařovací proud	130	A
Svařovací napětí	15,8	V
Rychlost posuvu drátu	1,5	mm/s ⁻¹
Průměr přídatného drátu	1,2	mm
Svařovací rychlost	6,667	mm/s ⁻¹

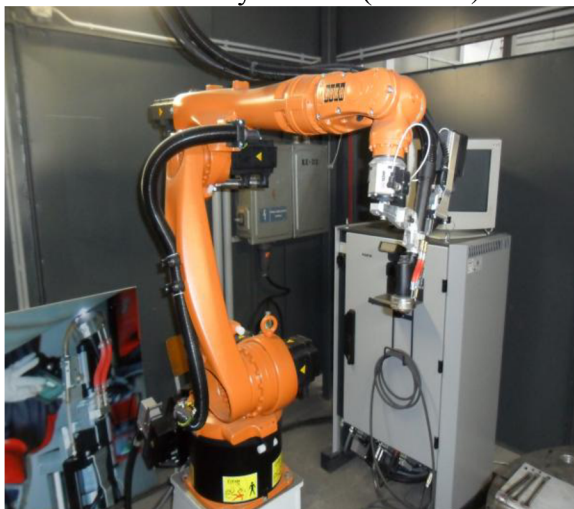
Svar č. 2. byl proveden strojovým posunem technologií MAG. Tento svar byl porovnáván se svařováním technologií plazma. Nadále bylo počítáno pouze s touto technologií svařování a ruční svařování nebylo bráno k porovnávání technologií svařování.

5.3 Svařovací metoda plazma

Svařování metodou plazma bylo provedeno pomocí svařovacího zdroje MagicWave 4000 (Job) (technické parametry v tab. 13), plazmového modulu PlasmaModule 10 a podavače drátu s označením KD 7000 D – 11, vše od firmy Fronius na obr. 5.6. Posun zajišťoval robot od firmy KUKA.

Podavač drátu: KD 7000 D – 11

Posun – pojezd: robotizovaná ruka od firmy KUKA (obr. 5.5)



Obr. 5.5 Robotizovaná ruka KUKA



Obr. 5.6 Svařovací zdroj MagicWave 4000, podavač KD 7000 D – 11, PlazmaModule 10

Metody svařování: WIG – DC, WIG – AC/DC, Obalená elektroda

Sériové vybavení:

Automatické odpojení chladicího modulu, automatická tvorba kaloty, přepínatelné zapalování – dotyk / VF, zkouška plynu, programovatelný provoz, přepínání polarity, teplotně řízený větrák, možnost připojení na elektrocentrálu, regulace Up / Down na hořáku, 2 – taktní a 4 – taktní režim, bodovací a pulzní režim, digitální displej, stehovací program TAC, monitorování zkratu, možnost připojení na sběrnici, certifikace S a CE

Tab. 13 Technické údaje – svařovací zdroj MW 4000 (Job) [6]

Svařovací zdroj		MW 4000 (Job)	
Síťové napětí	+/- 10 %	50/60Hz	+/- 15% 3x400 V
Účinník		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	50 %	400 A
	10 min / 40 °C	60 %	365 A
	10 min / 40 °C (25 °C)	100 %	310 A
Napětí na prázdko		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

PlazmaModule 10

Plazmový modul (obr. 5.6) si řídí průtok plazmového plynu, řídí pilotní oblouk - start / stop, obsahuje i řídicí obvody pro vlastní plazmové svařování. Technické parametry plazmového modulu PlazmaModule 10 jsou uvedeny v tab. 14.

Tab. 14 PlasmaModule 10 [6]

Svařovací zdroj		TPS 4000	
Síťové napětí	+/- 10 %	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 (formovací plyn). Dle EN 439 byl zvolen plyn s označením I1 – od firmy SIAD – Argon Ar Technický 4.6, tj. je čistý argon (100 %).

Sériové vybavení:

Bezdotykové zapálení pilotního oblouku, teplotně řízený větrák, digitální ampérmetr pro údaj pilotního proudu, předvolba nastavení (interně / externě), startovací tlačítko pro pilotní

proud, digitální údaj průtoku plazmového plynu, plynulé nastavení pilotního proudu (podle typu hořáku), funkce zkouška plynu a možnost montáže na podvozek.

Přídavný materiál

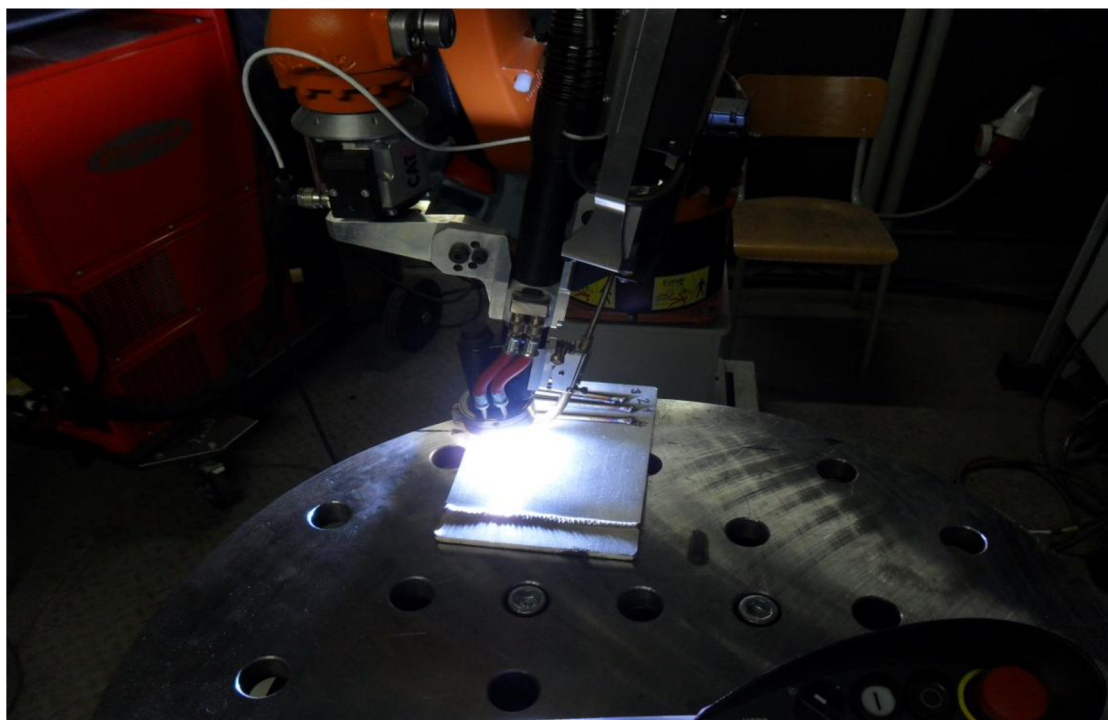
Pro svařování plazmou byl zvolen stejný přídavný materiál jako u svařování MAG, tzn. plný drát ESAB 13.13.

Nastavení parametrů pro svařování plazmou:

Základní materiál o tloušťce 12 mm byl svařován (obr. 5.7) nejdříve bez přídavného materiálu (nátav), následně byly vyzkoušeny 3 posuvy drátu (tab. 15), aby byl svar vzhledově co nejlepší obr. 5.8.

Tab. 15 Parametry svařování plazmou

	Svar č. 1 (nátav)	Svar č. 2	Svar č. 3	Svar č. 4	Svar č. 5	Jednotky
Svařovací proud	130	130	130	130	130	A
Svařovací napětí	20	20	20	20	20	V
Rychlost posuvu drátu	0	1,0	1,3	1,5	1,5	mm / s ⁻¹
Průměr přídavného drátu	1	1	1	1	1	mm
Svařovací rychlost	6,64	6,64	6,64	6,64	6,64	mm / s ⁻¹



Obr. 5.7 Svařování plazmou



Obr. 5.8 Návary provedené plazmou

Hodnocení

Svar č. 5 má stejné hodnoty jako svar č. 4, jen byla provedena úprava posuvu drátu do osy paprsku. Pro porovnávání technologií svařování byl vybrán svar č. 5, který má na pohled nejlepší kvalitu povrchu svaru. Na ostatních svarech je možné rozpoznat malou rychlost posuvu drátu.

5.4 Specifické vnesené teplo [8]

Specifické vnesené teplo, vysvětlené v kap. 2.1.2, bylo vypočítáno podle vzorce 2.1.

5.4.1 Svařování MAG

Při svařování metodou MAG byl svařovací zdroj nastaven na krátký oblouk se zkratovým přenosem. Hodnoty pro vzorec byly vzaty z tab. 9 pro svar vytvořený strojovým posunem.

η – 0,7
 U – 15,8 V
 I – 130 A
 v_s – 6,667 mm / s⁻¹

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,7 \cdot \frac{15,8 \cdot 130}{10^3 \cdot 6,667} = 0,2925 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Za tepelnou účinnost přenosu tepla (η) byla dosazena hodnota 0,7, protože podle tabulky 2 je možno použít hodnoty 0,66 – 0,75. Vypočítané specifické vnesené teplo pro technologii MAG, které ovlivňuje strukturu kovu je 0,2925 kJ.mm⁻¹.

5.4.2 Svařování plazmou

Při svařování plazmou byl svařovací zdroj na navařování. Hodnoty svařování byly vzaty z tab. 13 pro svar č. 5.

η – 0,6
 U – 20 V
 I – 130 A
 v_s – 6,64 mm / s⁻¹

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} = 0,6 \cdot \frac{20 \cdot 130}{10^3 \cdot 6,64} = 0,2349 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$$

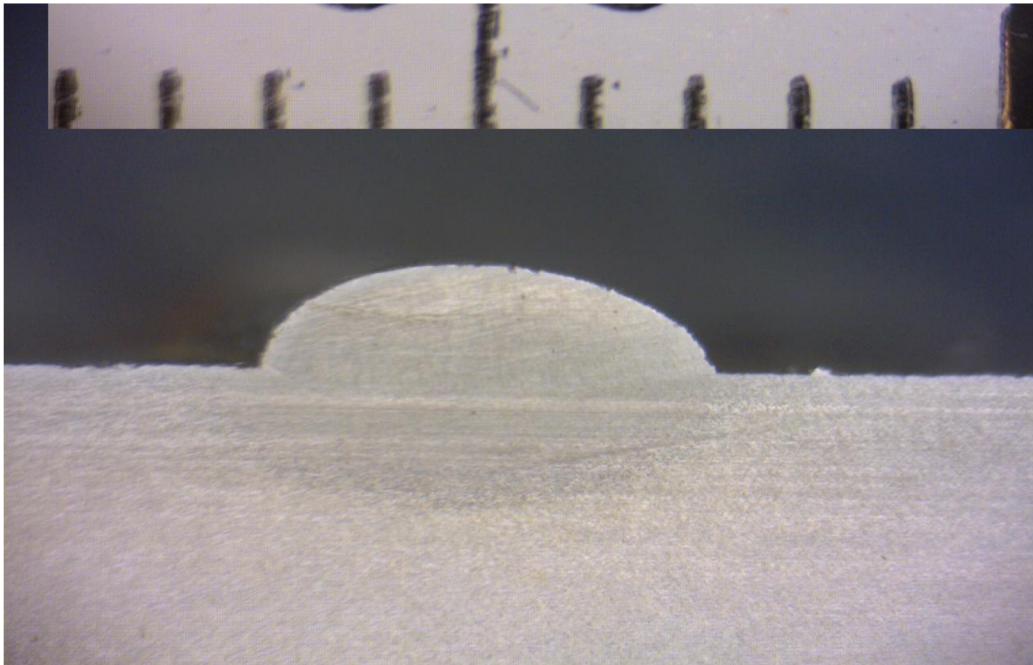
Tepelná účinnost přenosu tepla (η) pro svařování plazmou se podle tab. 2 může pohybovat mezi hodnotami 0,48 – 0,65, pro výpočet byla použita hodnota 0,6. Vypočítané specifické vnesené teplo pro svařování plazmou bylo 0,2349 kJ.mm⁻¹.

Porovnání

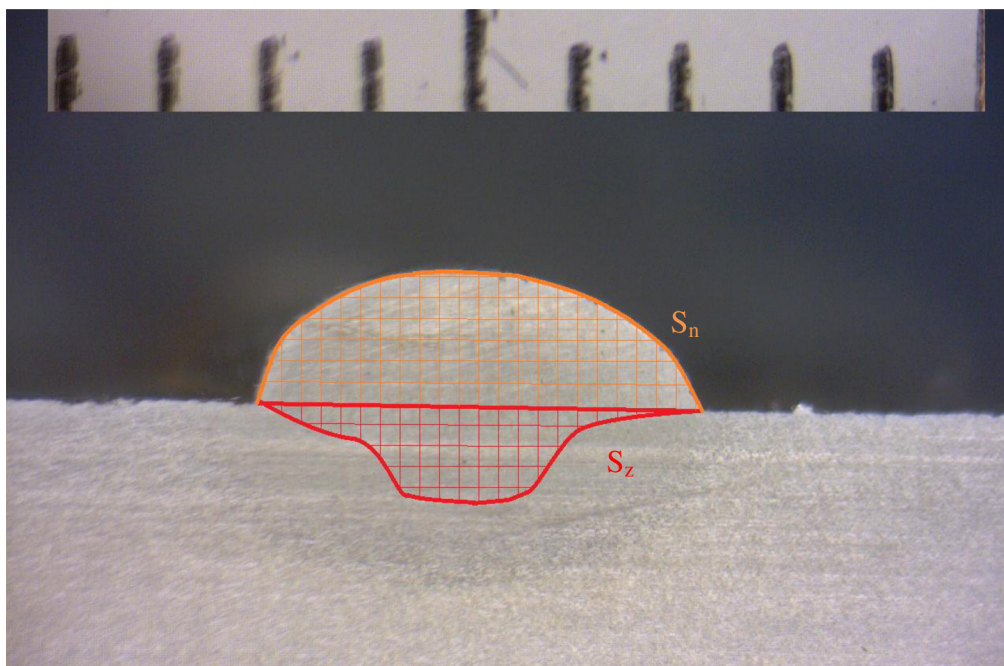
U svařování MAG je hodnota specifického vneseného tepla vyšší, jednak svařování plazmou má nižší účinnost přenosu tepla a také přenos tepla u metody svařování MAG je velmi vysoký díky použití ochranného plynu s obsahem CO₂, který podporuje přenos tepla v oblouku. A také byla plazma nastavena na navařování a tudíž co nejmenší závar a specifické vnesené teplo.

5.5 Makrostruktura svaru a zředění u metody MAG [15]

Na obr. 5.9 je makrostrukturní řez svarem provedený technologií MAG.



Obr. 5.9 Makrostruktura svaru svařováním MAG



Obr. 5.10 Makrostruktura svaru svařováním MAG - ohraničená

Plocha jednoho čtverce je $0,04 \text{ mm}^2$.

Zředění u metody MAG

$$Z = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

kde:

S_z – plocha závaru [mm^2]

S_n – plocha návaru [mm^2]

Plocha závaru a plocha návaru byla vypočítána pomocí programu a odečítání čtverců při velkém zvětšení z obr. 5.10. [12]

$$S_z = 2,04 \text{ mm}^2$$

$$S_n = 4,24 \text{ mm}^2$$

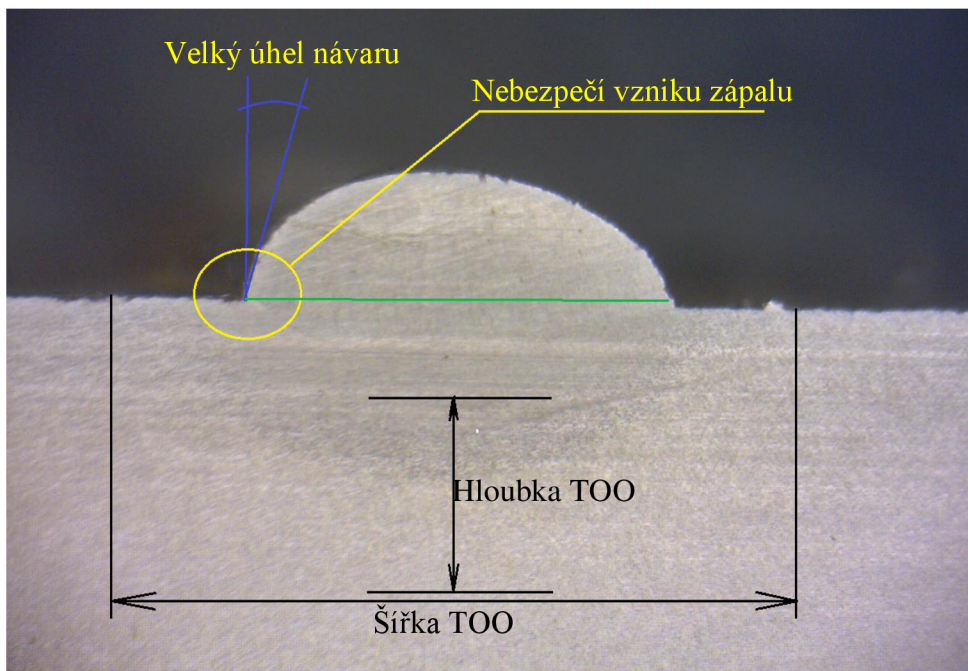
$$Z_{MAG} = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 = \frac{2,04}{2,04 + 4,24} \cdot 100 = 32,4 \%$$

Vypočítané zředění je ovlivněno nepřesností ohraničené oblasti závaru. Na obr. 5.9 není zřetelné ohraničení závaru a TOO. Tato hranice byla vytvořena s pomocí vzorku řezu svarem. Zředění bylo tedy spočítáno na 32,4 %.

Hodnocení makrostruktury a velikost TOO

Po vytvoření řezu svarem, vybroušením, byla zhodnocena makrostruktura. Nikde nebyla nalezena vady, až na velký úhel návaru, který by mohl zapříčinit zápal a následně by mohla vzniknout nebezpečná trhлина. Velký přechodový úhel by mohl být zmenšen a to při použití směšného plynu s malým obsahem O_2 . Použitím O_2 v ochranném plynu by byla zvýšena teplota oblouku, tím by došlo k většímu protavení svarové lázně a návar by neměl tak velký přechodový úhel.

Rozměry tepelně ovlivněné oblasti byly změřeny na řezu svarem s makrostrukturou (obr. 5.11). Šířka tepelně ovlivněné oblasti byla 6,5 mm a výška 1,93 mm.

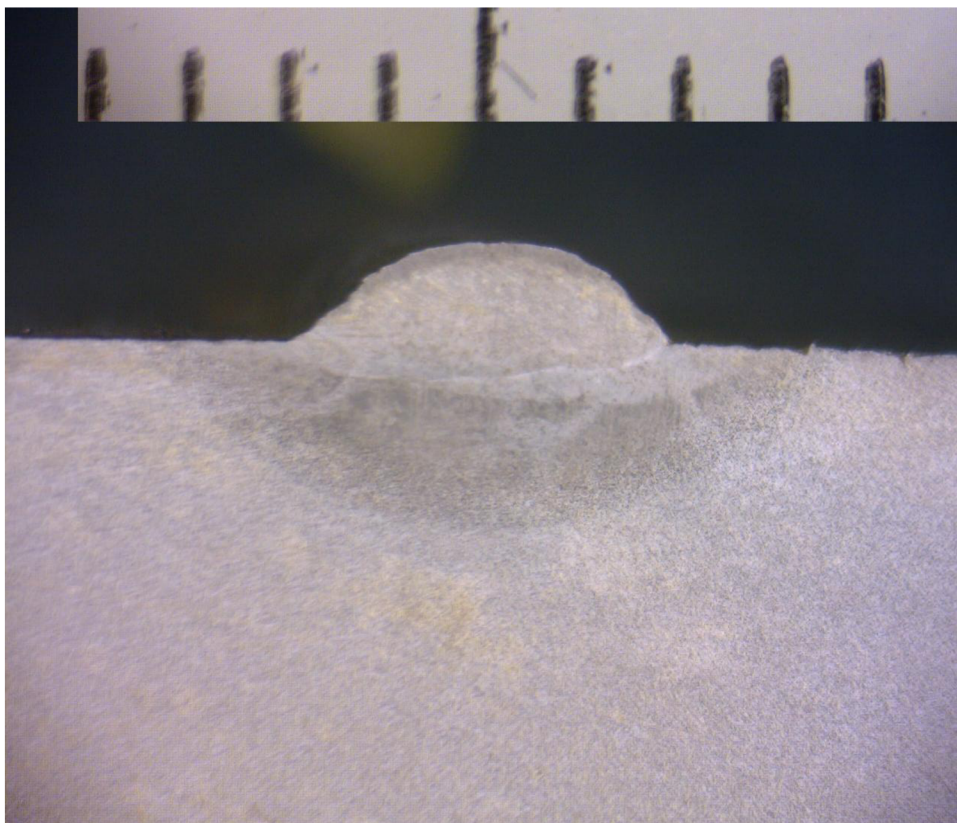


Obr. 5.11 Hodnocení TOO a makrostruktury svaru (MAG)

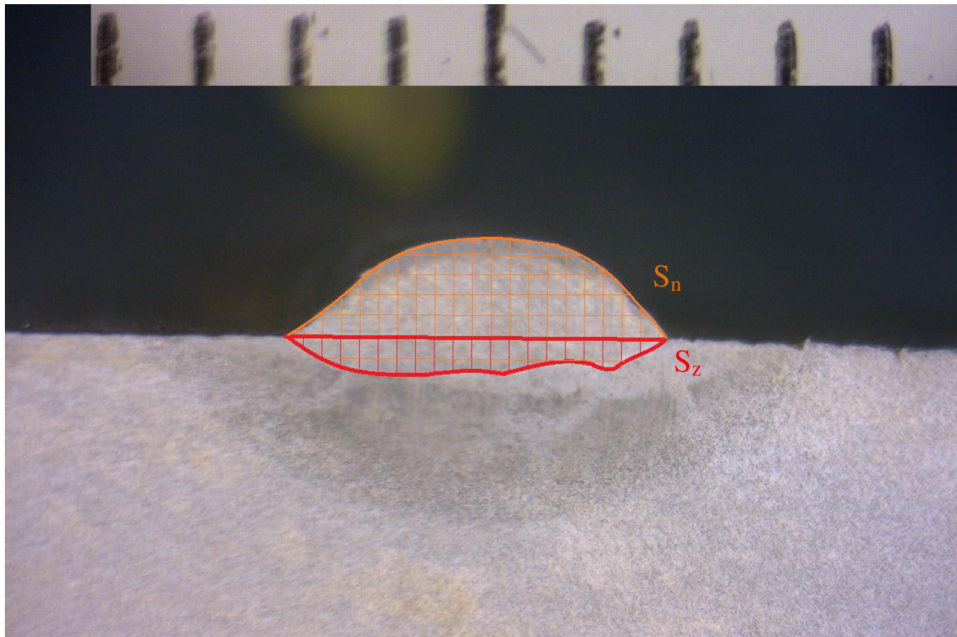
Šířka TOO – 6,9 mm

Hloubka TOO – 1,93 mm

5.6 Makrostruktura a zředění u svařování plazmou



Obr. 5.12 Makrostruktura svaru svařováním plazmou



Obr. 5.13 Ohraničená oblast pro svařován plazmou

Plocha jednoho čtverce je $0,04 \text{ mm}^2$.

Zředění u svařování plazmou

Jako u svařování MAG, je i u svařování plazmou plocha návaru a závaru spočítána pomocí programu a odečítáním čtverců z obr. 5.13 při zvětšení.[12]

Ohraničení plochy závaru u plazmy bylo zcela viditelné, proto je výpočet přesnější než u metody svařování MAG.

$$S_z = 0,96 \text{ mm}^2$$

$$S_n = 2,51 \text{ mm}^2$$

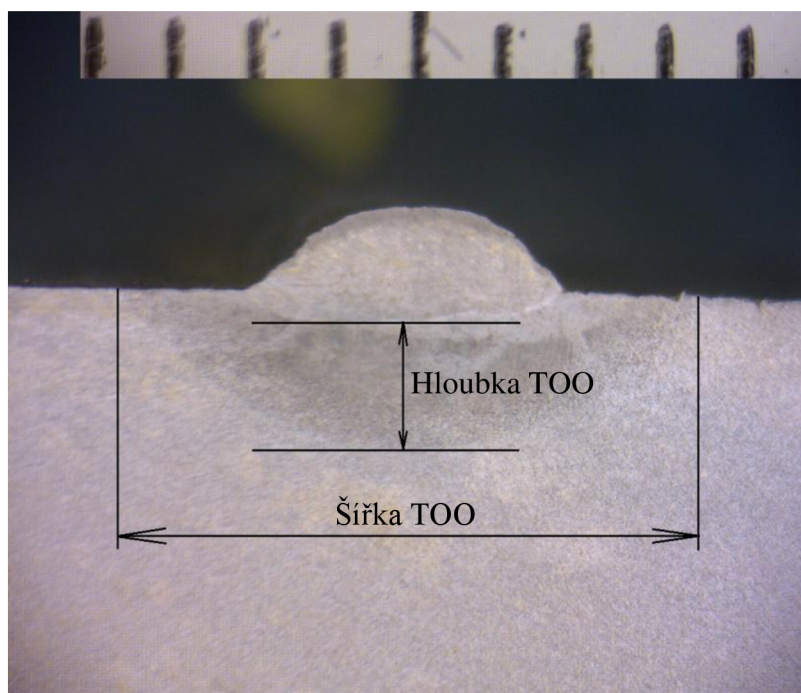
$$Z_{plazma} = \frac{S_z}{S_z + S_n} \cdot 100 = \frac{0,96}{0,96 + 2,51} \cdot 100 = 27,6 \%$$

Zředění u svařování plazmou bylo vypočítáno na 27,6 %. Hodnota zředění je malá, protože svařovací zdroj byl nastaven na navařování turbínových lopatek, kde je žádoucí co nejmenší závar a co největší návar. Záleží tedy na nastavení parametrů svařování.

Hodnocení makrostruktury a rozměry TOO

Hodnocení makrostruktury bylo provedeno z obr. 5.11. Nebyly nalezeny žádné vady, které by ovlivnily kvalitu svaru.

Rozměry TOO byly změřeny z obr. 5.14, kde byly zakótovány. Hloubka TOO je větší než u metody svařování MAG, ale šířka je přibližně stejná. Tepelně ovlivněná oblast u svařování plazmou je ovlivněna vysokou teplotou plazmy – velká hloubka TOO.



Obr. 5.14 Rozměry TOO u svařování plazmou

Hloubka TOO 1,46 mm.

Šířka TOO 7,07 mm.

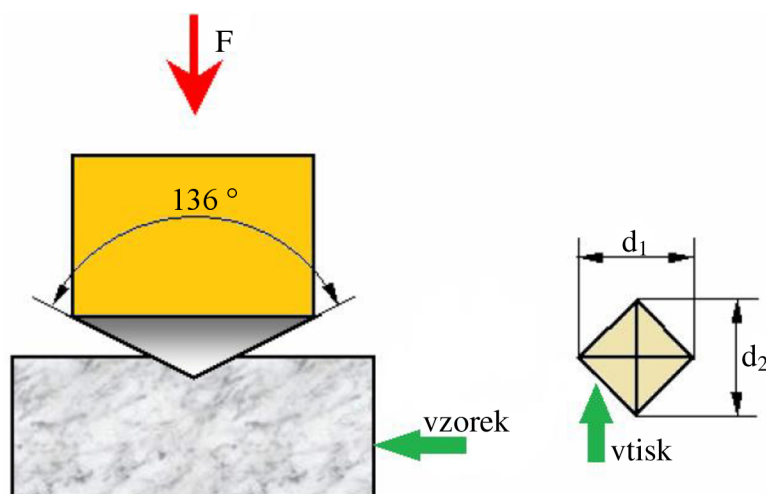
5.7 Zkoušky tvrdosti [4]

Zkoušky tvrdosti spolu se zkouškou v tahu a zkouškou vrubové houževnatosti patří k základním zkouškám mechanických vlastností. Principem je registrace odporu materiálu proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa.

Pro hodnocení svaru v příčném řezu bude použita zkouška tvrdosti dle Vickerse.

5.7.1 Zkouška tvrdosti dle Vickerse – HV – obecně [4]

Vnikajícím tělesem (identorem) je diamantový čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° (obr. 5.15). Tvrdost je hodnocena dle střední úhlopříčky vtisku. Zatížení dle běžných podmínek po dobu 15 s je 294 N, podle zkoušeného materiálu. Výpočet tvrdosti je dán podle vzorce 5.1.



Obr. 5.15 Zkouška tvrdosti dle Vickerse ČSN ISO 6507 – 1 [4]

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (5.2)$$

kde:

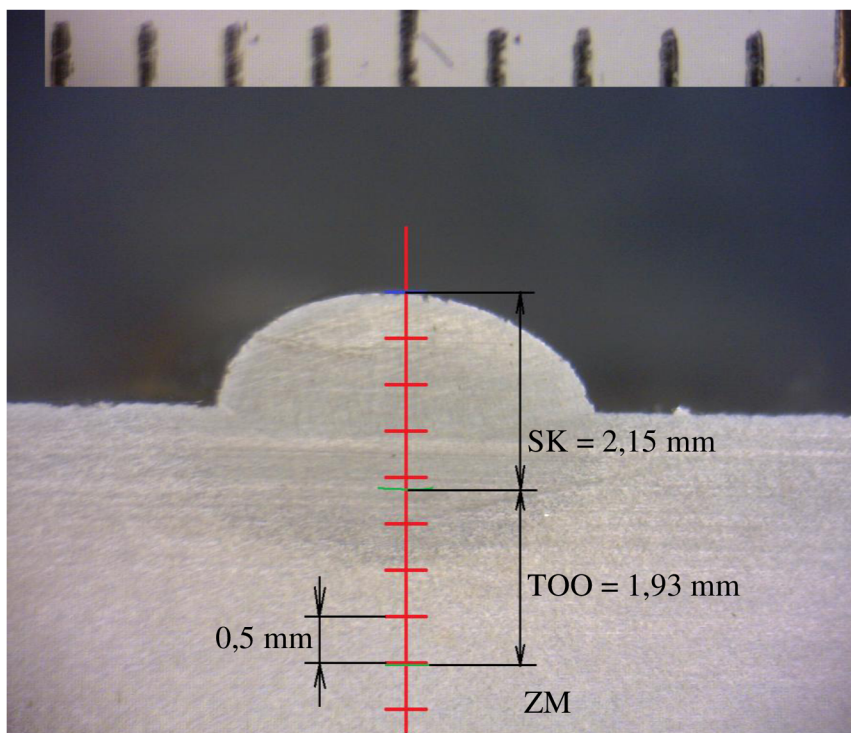
F – zatěžující síla [N]

u – střední úhlopříčka vtisku [mm]

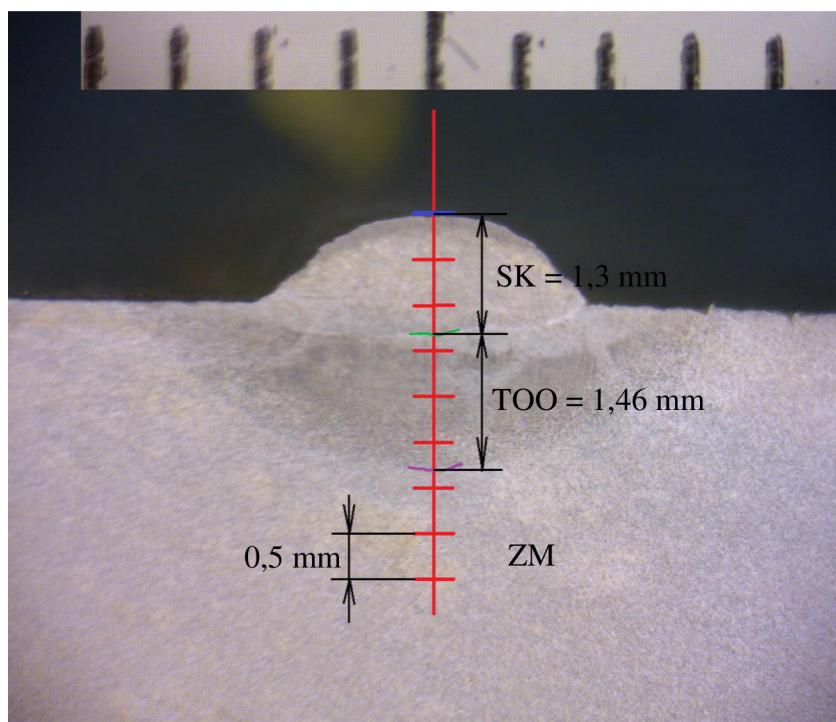
Podle ČSN EN 1043 – 1 je pro měření tvrdosti ve svarových spojích předepsána zkouška HV 10 s předepsaným zatížením 98 N. Pro hodnocení tvrdosti dle Vickerse lze použít pro hodnocení tzv. mikrotvrdosti jednotlivých strukturních fází je metalografická zkouška tvrdosti dle Hannemanna (HM), kde je jako vnikající tělíčko použit Vickersův jehlan usazený přímo do speciálního objektivu na optickém mikroskopu. Změření úhlopříček vtisku je přímo při metalografickém zvětšení. Mikrotvrdosti jednotlivých strukturních fází jsou pro svařeče velmi významné, zejména při hledání vhodných technologií svařování a při vývoji optimálních přídavných materiálů.

5.6.2 Vlastní zkouška tvrdosti v příčném řezu

Měření tvrdosti bylo provedeno v základním materiálu, v tepelně ovlivněných oblastech a ve svarovém kovu. Rozmístění a počet vtisků musí být volen tak, aby postačilo určení jednotlivých oblastí se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí v oblasti svaru. Jednotlivé řady vtisků musí mít minimálně 3 jednotlivé vtisky v každé uvedené oblasti. Místa měření tvrdosti jsou naznačena na obr. 5.16 pro metodu svařování MAG a pro metodu svařování plazmou na obr. 5.17. Jednotlivá měření jsou od sebe 0,5 mm.



Obr. 5.16 Místa měření tvrdosti u metody MAG



Obr. 5.17 Místa měření tvrdosti u metody plazmy

Tab. 16 Naměřené hodnoty tvrdosti HV 5.

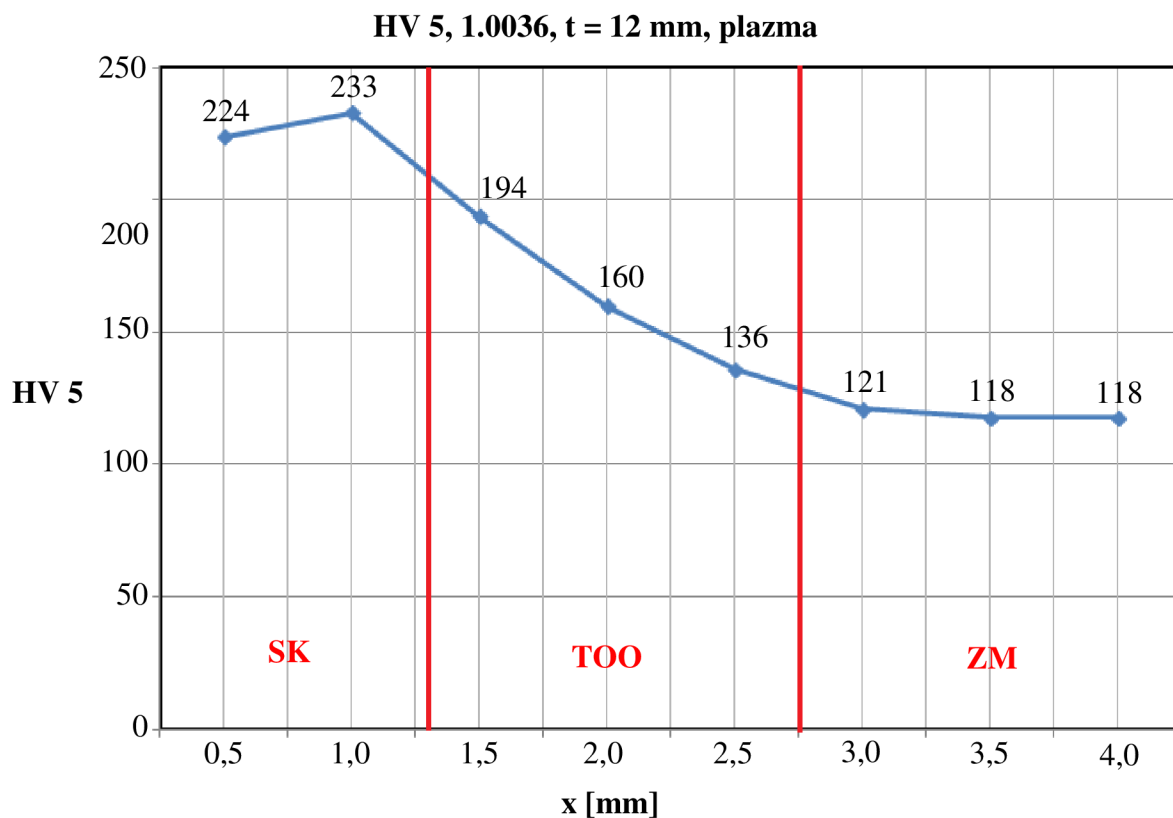
Metoda	Vzdálenost x [mm]										
	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5
MAG	194	212	210	208	208	206	197	197	133	119	119
Plazma	224	233	194	160	136	121	118	118			

Popis tabulky:

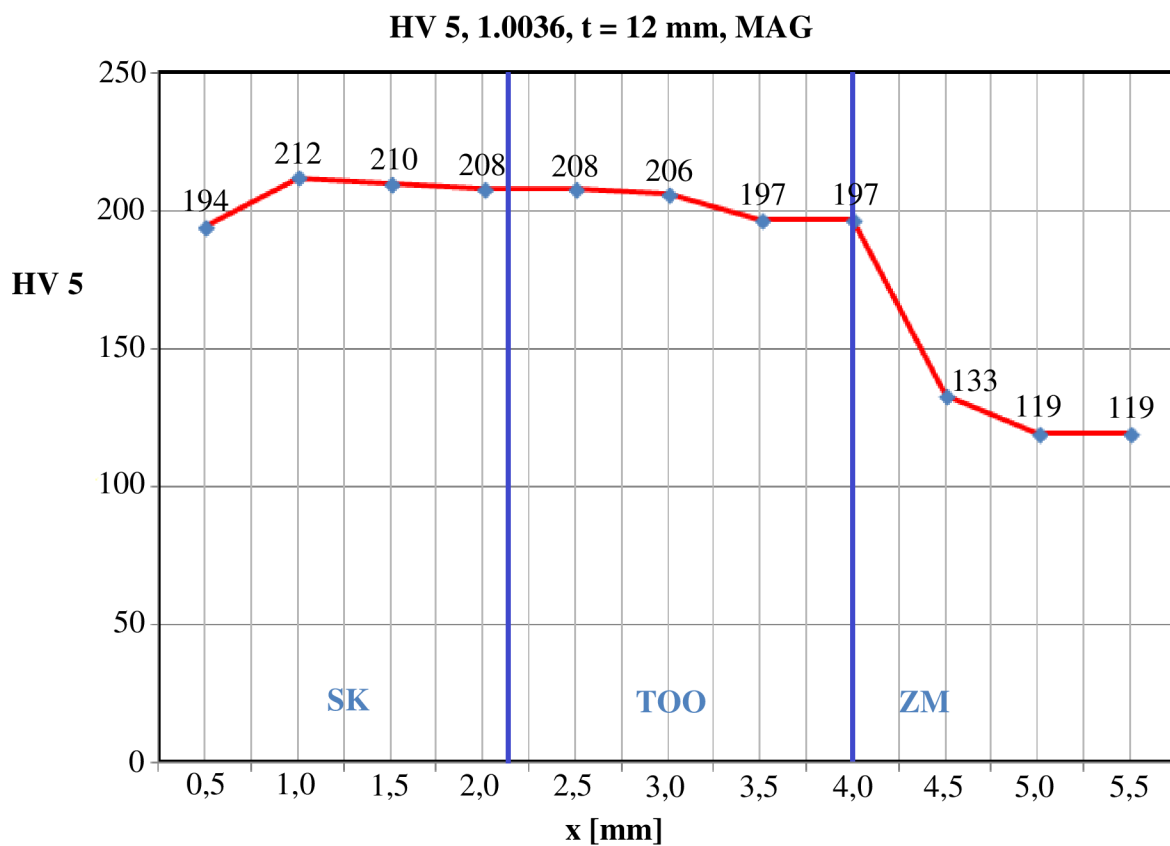
Modré označení - Svarový kov (SK).

Žluté označení - Tepelně ovlivněná oblast (TOO).

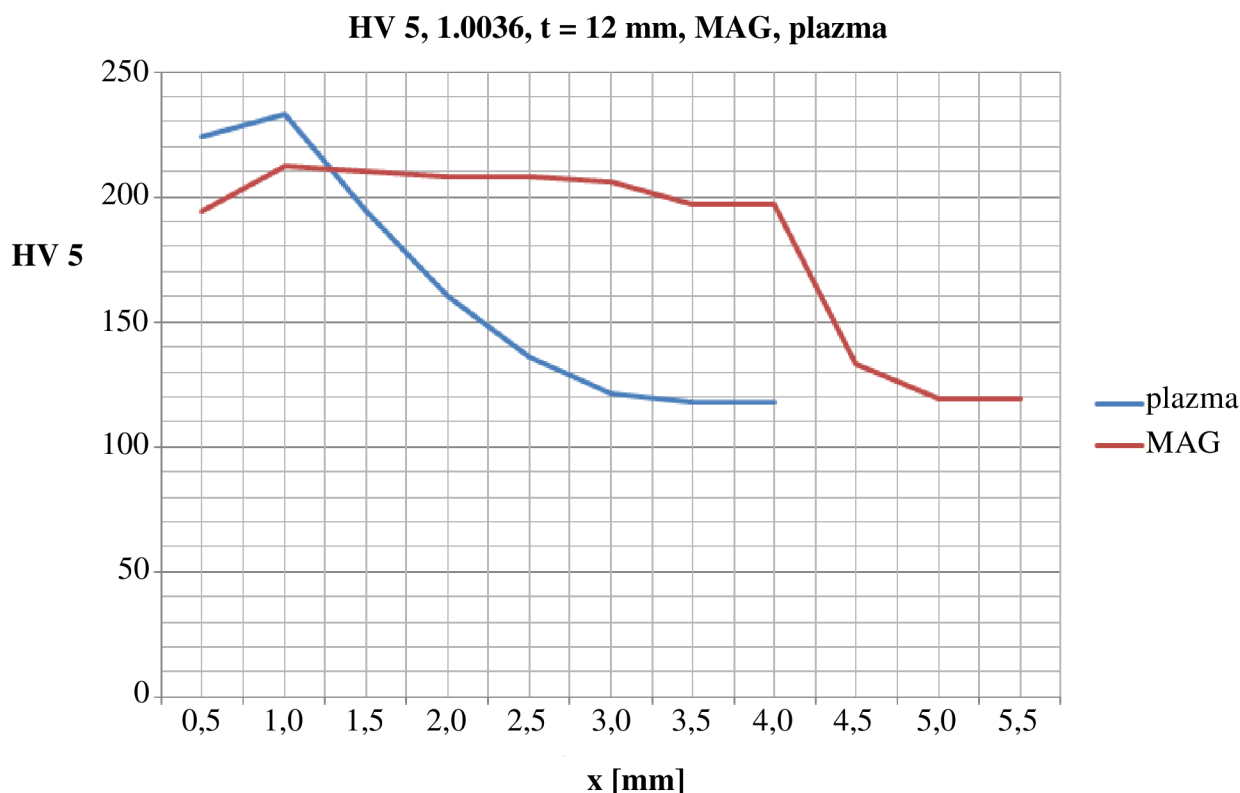
Zelené označení - Základní materiál (ZM).



Obr. 5.18 Charakteristický průběh tvrdosti v základním materiálu a svarovém spojem



Obr. 5.19 Charakteristický průběh tvrdosti v základním materiálu a svarovém spojem



Obr. 5.20 Porovnání průběhu tvrdostí v základním materiálu a svarovém spojem

Hodnocení

Pro měření tvrdosti v příčném řezu byla zvolena metoda HV 5. Měření bylo provedeno na tvrdoměru Zwig 3212. Na snímání a vyhodnocení vtisků je tvrdoměr vybaven souřadnicovým stolem a připojením na PC.

Naměřené hodnoty tvrdosti HV 5 v závislosti na vzdálenosti od povrchu návaru pro obě metody svařování jsou uvedeny v tab. 16.

Na obr. 5.18 a 5.19 jsou vyobrazeny grafy popisující průběh tvrdostí jednotlivými oblastmi, jako je svarový kov (SK), tepelně ovlivněná oblast (TOO) a základní materiál (ZM). Pro srovnání tvrdostí v příčném řezu jednotlivých metod svařování je vyznačen graf na obr. 5.20.

Při svařování plazmou došlo v TOO ke zvýšení tvrdostí, ale méně než u metody sváření MAG. Při sváření MAG došlo ke zvýšení tvrdostí do velké hloubky. Ovlivněná oblast je u svařování MAG větší než u svařování plazmou.

6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce je porovnání konvenční metody svařování MAG a svařování plazmou. Aby bylo možné tyto metody porovnat, bylo nutné použít stejné svařovací parametry, stejný přídatný materiál a jeden základní materiál, který je dobře svařitelný pro obě metody. Jako základní materiál byla vybrána ocel 1.0036 o tloušťce 12 mm a přídatný materiál OK AR 13.31 od firmy ESAB.

Po provedení návaru, na povrch základního materiálu, bylo vyhodnoceno specifické vnesené teplo a to jak pro svařování metodou MAG, tak plazmou. Specifické vnesené teplo pro MAG dosáhlo hodnoty vyšší hodnoty, než u technologie svařování plazmou. U svařování MAG je hodnota specifického vneseného tepla vyšší, jednak svařování plazmou má nižší účinnost přenosu tepla, ale také přenos tepla u metody svařování MAG je velmi vysoký díky použití ochranného plynu s obsahem CO_2 , který podporuje přenos tepla v oblouku. Dále bylo pomocí metalografického hodnocení makrostruktury zjištěny návary a závary, z kterých bylo spočítáno zředění. Zředění u technologie svařování MAG bylo vyšší než u svařování plazmou. Nižší zředění u svařování plazmou bylo dáno především nastavením svařovacího zdroje na navařování lopatek turbíny, kde je zapotřebí především malý závar. Velkou roli hraje také nastavení úhlu sklonu svařovacího hořáku, který nebyl při porovnávání technologií brán v potaz.

Provedené kontrole makrostruktury vyhověly oba vzorky, jen u svařování metodou MAG byl velký úhel návaru, který by mohl zapříčinit zápal a následně by mohla vzniknout nebezpečná trhлина. Velký přechodový úhel by mohl být zmenšen a to při použití směsného plynu s malým obsahem O_2 .

Tvrdość v příčném řezu HV 5 ukázala, jaký je rozdíl tvrdostí jak ve svarovém kovu, tak tepelně ovlivněné oblasti i základním materiálu. Při svařování plazmou byly sice ve svarovém kovu naměřeny vyšší tvrdosti, ale potom následoval prudký sestup tvrdostí až na tvrdost základního materiálu. Naopak při svařování metodou MAG byly tvrdosti vysoké jak ve svarovém kovu, tak tepelně ovlivněné oblasti. Tepelně ovlivněná oblast u svařování metodou MAG zasahovala do větší hloubky materiálu než u svařování plazmou.

Technologie svařování metodou MAG a plazmou má určité rozdíly, ale při upravení některých vstupních parametrů, například použití směsného plynu s obsahem O_2 , nebo nastavení svářecího zdroje MAG na svařování impulsním bezzkratovým přenosem kovu, by mohly tyto technologie být použity obě téměř bez rozdílů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Air Products se zúčastní veletrhu Welding a představí nové vývojové trendy. *Konstrukce* [online]. 2002 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/air-products-se-zucastni-veletrhu-welding-a-predstavi-nove-vyvojove-trendy/>
- [2] AMBROŽ, Oldřich, KANDUS, Bohumil, Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: Zeross, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
- [3] ČSN EN ISO 1011-2, *Svařování- Doporučení pro svařování kovových materiálů - část 2.- obloukové svařování feritických ocelí*. Praha: ÚNMZ, červenec 2011.
- [4] et al *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 292 s. ISBN 80-857-7185-3.
- [5] Fe360 (CEN-EN) Construction Steel Grade. *Matabase* [online]. 2004 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.matbase.com/material-categories/metals/ferrous-metals/construction-steel/material-properties-of-fe360-iso-630-steel-grade.html#properties>
- [6] Fronius. *Výrobní katalog 2006/2007 : Divize svařovací techniky.*, 2006. 74 s. Dostupný z WWW: <fronius.com>. ISBN 40,0006,2656.
- [7] Generátor. Citace [online]. 2004 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/>
- [8] HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 1989, 343 p. ISBN 80-224-0016-5.
- [9] *Katalog přídavných materiálů pro svařování*. Vamberk: Esab Vamberk. 2007.
- [10] Konstrukční oceli: Neušlechtilé uhlíkové konstrukční oceli třídy 11, jejich složení a tepelné zpracování. *TumliKOVO: Metal Cutting Technologies* [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/neuslechtilé-uhlíkovekonstrukcni-oceli-tridy-11-jejich-slozeni-a-tepelne-zpracovani/#more-3216>
- [11] KOVAŘÍK, R. a F. ČERNÝ. *Technologie svařování*. Plzeň, 2000, 185 s.
- [12] Kružnice - kruh. *Planimetrie* [online]. 2009 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://planimetrie.chytrak.cz/index.php?stranka=kruznice>.
- [13] KŘÍŽ, Rudolf a Pavel VRÁNA. *Strojírenská příručka 8. svazek: V-Tváření, W-Výrobky se slinovaných prášků, X- Výrobky z plastů, Z- Svařování součástí, Z-Protikorozi ochrana materiálu*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998, 255 s. ISBN 80-718-3054-2.
- [14] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie 2: Část svařování* [online]. 2006 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory.htm>
- [15] KUČERA, Jan. *Teorie svařování - část 1*. Ostrava: VŠB, 1994, 206 s.
- [16] Kvalitní trubičkový drát pro MIG/MAG - Coreshield 15. *Svářečské potřeby - Sadílek* [online]. 2009 [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://svarecskepotreby.cz/>
- [17] MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.

- [18] MIG/MAG (CO₂). *Automig* [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/>
- [19] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*, Scientia, Praha 2003, 241s. ISBN 80-7183-285-5.
- [20] OK AristoRod 13.13. *OK WELD* [online]. 2008 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: http://www.okweld.cz/PDF/draty-mig-mag/nizkolegovane/OK_AristoRod_13_13.pdf
- [21] ONDREJČEK, Peter. *Zváranie ocelí v ochrane plynov: Tavící se elektródou*. Bratislava: ETERNA PRESS, 2003, 202 s. ISBN 80-968359-5-5.
- [22] Příkladný materiál: Oceli. *Froweld: Svařovací technika* [online]. 2010 [cit. 2014-05-19]. Dostupné z: <http://www.froweld.cz/svarovaci-technika/eshop/8-1-PRIDAVNY-MATERIAL/343-3-Oceli>
- [23] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, c2001, 505 s. ISBN 80-720-4193-2.
- [24] STANĚK, Vlastislav. *Svařování pozinkovaných plechů* [online]. 2005 [cit. 2014-01-24]. Dostupné z: www.svarak.cz/c/cz/svarovani-pozinkovanychplechu-mig-pajeni.htm
- [25] Mechanismy podávání drátu u MIG/MAG svářeček: 2 - kladkové podavače. *Svarinfo.cz: Magazín praktického svařování* [online]. 2005, č. 2008020702 [cit. 2014-05-27]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008020702>
- [26] Sváření: Sváření plazmou. *Sváření - svářečky* [online]. 2003 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.svareni.eu/metoda-svarovani-plazmou/>
- [27] Svařovací technika: Plazma - mikroplazmové svařování, středněplazmové svařování. *Schinkmann* [online]. 1991 - 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/plazma-1>
- [28] Svařovací technika: Svařování MIG/MAG, MIG svařování, MAG svařování, svařování plněnou elektrodou. *Schinkmann* [online]. 1991 - 2014 [cit. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>
- [29] Svařování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-04-24]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování>
- [30] S.ASAI, T.Ogawa, Y.Ishizaki, T.Minemura, H.Minami, and S.Miyazaki are with Toshiba Corporation, Power Systems Company, Keihin Product Operations, Yokohama, Japan. Application of Plasma-MIG Hybrid Welding to Dissimilar Joint between Copper and Steel: OUTLINE OF PLASMA AND MIG HYBRID WELDING EQUIPMENT [online]. 2009, 6 s. [cit. 19-05-2014]. Dostupné z: <http://www.iiwindia.com/pdf/XII-1972-09.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotky
A_1, A_3, A_{c1}, A_{c3}	Teploty rovnovážného diagramu	-
APT	Svařování pod tavidlem	-
Ar	Argon	-
As	Arsen	-
B	Bór	-
C	Uhlík	-
C_e	Ekvivalentní obsah uhlíku	[%]
$C_{e(IIW)}$	Uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
CO_2	Kysličník uhličitý	-
Cr	Chrom	-
Cu	Měď	-
ESS	Elektrostruskové svařování	-
F	Zatěžující síla	[N]
Fe	Železo	-
Fe_3C	Rovnovážný diagram	-
GMAW	Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu	-
GTAW	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou	-
h	Tloušťka materiálu	[mm]
H. C. S	Rovnice hodnocení náchylnosti k horkým trhlinám	[%]
$H_{D(GI)}$	Obsah difundovaného vodíku	[ml / 100 g]
I	Svařovací proud	[A]
I_b	Základ proudu	[A]
I_p	Pulz impulsu	[A]
K	Intenzita tuhosti spoje	[N / mm]
K_0	Koeficient měrné tuhosti	-
l	Součet délek plošných vměstků	[μm^2]
L	Délka oblouku	[mm]
MAG	Obloukové svařování tavící se elektrodou Metal Active Gas	-
MIG	Obloukové svařování tavící se elektrodou Metal Inert Gas	-
MMAW	Svařování obalenou elektrodou	-
Mn	Mangan	-
Mo	Molybden	-
Ni	Nikl	-
P	Fosfor	-
P_{CM}	Uhlíkový ekvivalent	-
P_1	Parametr lamelární praskavosti dle množství vměstků	-
P_L	Parametr lamelární praskavosti dle obsahu síry	-
PM	Přídavný materiál	-
P_W	Parametr praskavosti	[%]
Q_{cel}	Celková energie oblouku	[J]
Q_s	Specifické vnesené teplo	[kJ.mm ⁻¹]
Q_{sv}	Energie vnesená do svarového spoje	[J]

Označení	Legenda	Jednotky
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
ROA	Svařování ruční obalenou elektrodou	-
ROS	Ruční obloukové svařování	-
s	Obsah síry	[%]
S	Síra	-
SAW	Svařování pod tavidlem	-
Sb	Antimon	-
Si	Křemík	-
SK	Svarový kov	-
Sn	Cín	-
t	Čas	[s]
T	Teplota	[°C]
tav.	Tavenina	-
Ti	Titan	-
T_{max}	Maximální teplota	[°C]
TOO	Tepelně ovlivněná oblast	-
U	Svařovací napětí	[V]
u	Střední úhlopříčka vtisku	[mm]
v_s	Svařovací rychlost	[mm / s ⁻¹]
W_o	Potenciální energie pro změnu polohy iontu uvnitř krystalu	-
W_p	Vliv povrchu krystalu na velikost potenciální energie	-
W_r	Potenciální energie na rozhraní fází	-
ZM	Základní materiál	-
Z_z	Kontrakce ve směru osy z	-
α	Fáze železa	-
αFe	Tuhý roztok	-
γ	Fáze železa	-
η	Celková tepelná účinnost	[%]

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Přehled metod značení dle jednotlivých předpisů
- Příloha 2 Svařovací zdroj MIG 445x S – V – MWF8
- Příloha 3 Svařovací zdroj TransPlus Synergic 400 CMT MV R

PŘÍLOHA 1

Přehled metod značení dle jednotlivých předpisů.				
EN ISO 4063	Evropské (EZ) a Americké (AZ) značení		Kompletní název	Český překlad
111	EZ	MMA	Manual Metal Arc Welding	Svařování obalenou elektrodou
	AZ	SMAW	Shielded Metal Arc Welding	
114	EZ	FCAW	Flux-Cored wire Metal Arc Welding	Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu
	AZ	FCAW	Flux-Cored Arc Welding	
12	EZ	SAW	Submerged Arc Welding	Svařování pod tavidlem
	AZ	SAW	Submerged Arc Welding	
13	EZ	MIG/MAG	Gas Shield Metal Arc Welding	Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranném plynu
	AZ	GMAW	Gas Metal Arc Welding	
131	EZ	MIG	Metal-arc Inert Gas Welding	Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu
	AZ	GMAW	Gas Metal Arc Welding	
135	EZ	MAG	Metal-arc Active Gas Welding	Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu
	AZ	GMAW	Gas Metal Arc Welding	
136	EZ	FCAW	Flux-Cored wire Metal-Arc Welding	Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (trubičkový drát)
	AZ	FCAW	Flux-Cored Arc Welding	
137	EZ	FCAW	Flux-Cored wire Metal-Arc Welding	Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (trubičkový drát)
	AZ	FCAW-S	Flux-Cored Arc Welding	
141	EZ	TIG	Tungsten Inert Arc Welding	Obloukové svařování netavící se wolframovou elektrodou
	AZ	GTAW	Gas Tungsten Arc Welding	

PŘÍLOHA 2

Svařovací zdroj MIG 445x S-V-MWF8



Obr. 1 Svařovací zdroj MIG 445x S-V-MWF8, hořák MV 450 Twist 3m KD

MIG 445x je robustní svařovací zdroj určen pro technologii svařování MIG/MAG. Svařovací parametry jsou řízeny skokově v rozsahu několika stupňů v závislosti na použití jemné nebo hrubé regulace. Velkým kladem je možnost použití různých typů tlumivky, která určuje tvrdost samotného zdroje. Svařovací zdroj umožňuje nastavení potřebných parametrů jako: napěťové stupně, rychlost posuvu drátu, výlet drátu, bodování apod. Podavač je ve snímatelném provedení, které zvyšuje akční rádius v kombinaci s použitým mezikabelem. Čtyřkladková konstrukce podavače a výkonnost předurčuje zdroj pro použití převážně pro středně lehký až těžší průmysl.

Svařovací zdroj MIG 445x S-V-MWF8 je vybaven vodním modulem, vodou chlazeným hořákem s regulací MV 450 Twist KD délky 3 m, 5 m síťovým kabelem, propojovacím kabelem délky 1,5 m (pro MWF8 napevno, pro MWF11 s rychlospojkami), 3m zemnicím kabelem, sadou kladek pro drát o průměru 1,2 mm, podvozkem a madlem.

Technická data		
Napájecí napětí		3 x 400 V
Pojistky		25 A
Účinnost		0,71
Účinník		0,99
Napětí naprázdno		17,4 – 53 V
Počet napěťových stupňů		24
Zatěžovatel	100%	265 A
Zatěžovatel	60 %	315 A
Zatěžovatel	35 %	405 A
Proudový rozsah		40 – 445 A
Počet odboček tlumivky		2
Podavač		snímatelný
Průměr drátu		0,8 – 1,6 (2,4 mm)
Rychlost podávání		1,3 – 18 (24) m/min
Vodní chlazení		True
Třída ochrany		IP 21
Rozměry d x š x v		94 x 51 x 143 cm
Hmotnost		191 kg

PŘÍLOHA 3

TransPuls Synergic 4000 CMT MV R

- Pulzní svařování až do 400 A,
- svařuje tenké plechy od tloušťky 0,3 mm,
- lze řídit pomocí analogového/digitálního rozhraní robota,
- vícenapěťový provoz.



Obr. 2 Svářecí zdroj TransPuls Synergic 4000 CMT MV R

Zcela digitalizovaný a mikroprocesorem řízený svařovací zdroj MIG/MAG pro krátký, rozstříkový a impulzní oblouk umožňuje nejlepší svařovací vlastnosti v každém ohledu a libovolně často reprodukovatelné výsledky svařování. Díky výkonu 400 A splňuje zařízení TransSynergic 4000 ty nejvyšší požadavky automobilového a dodavatelského průmyslu, výroby přístrojů, chemických zařízení, strojů, kolejových vozidel a lodí. Díky své schopnosti multiprocesního provozu se tento svařovací zdroj hodí i pro svařování MIG/MAG, WIG a svařování obalenou elektrodou v manuálním i robotizovaném provozu.

Zkratka CMT znamená Cold Metal Transfer. Pohyb drátu je začleněn do procesního řízení, díky tomu je teplo přiváděno pouze krátkou dobu, přenos materiálu probíhá téměř bez proudu. Výsledek: bezrozstříkové svařování MIG/MAG a pájení tenkých plechů od tloušťky 0,3 mm, pájení MIG pozinkovaných plechů a spojování oceli s hliníkem. Dálkové řízený svařovací zdroj je určen pro automatizovaný, resp. robotizovaný provoz a je řízený pomocí analogového nebo digitálního rozhraní robota.

Proces: MIG/MAG

Základní materiály:

- CrNi.
- Hliník.
- Ocel.
- Speciální kovy.

Doporučené oblasti použití:

- Automobilový a dodavatelský průmysl.
- Kovové konstrukce, architektonické prvky, zámečnictví a kovářství.
- Letecký a kosmický průmysl.
- Lodní a offshore průmysl.
- Robotové svařování.
- Výroba kolejových vozidel.
- Výroba průmyslových zařízení a potrubních vedení, montážní firmy.
- Výroba speciálních vozidel / výroba strojů.
- Výroba zařízení, zásobníku, strojní a ocelářský průmysl.
- Údržba a opravy.

Technická data	
Napájecí napětí	3 x 200 - 240 V nebo 3 x 380 – 460 V
Síťové jištění	63 A 35 A
Trvalý primární proud (100 %)	15,3 – 34,4 A
Trvalý primární výkon (kVA)	10,6 – 12,4 kVA
Účinnost	88 – 91 %
Účinník	0,99
Napětí naprázdno	17,4 – 53 V
Rozsah svařovacího proudu MIG / MAG	3 – 400 A
Rozsah svařovacího proudu WIG	3 – 400 A
Rozsah svařovacího proudu elektrody	10 – 400 A
Doba zapnutí při 10 min/40 °C (104° F)	50 % ED při 400 A
Doba zapnutí při 10 min/40 °C (104° F)	100 % ED při 280 - 320 A
Napětí naprázdno	68 - 78 V
Chlazení	AF
Izolační třída	F
Třída ochrany	IP 23
Rozměry d x š x v	625 x 290 x 475 mm
Hmotnost	35,2 kg
Certifikace	CE
Certifikace	CSA
Certifikace bezpečnostní třídy	S