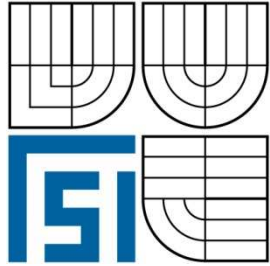




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**POSOUZENÍ EKONOMIKY KONVENČNÍHO
SVAŘOVÁNÍ MAG A TECHNOLOGIE ESAB-SAT**
ECONOMY COMPARISON OF WELDING TECHNOLOGY MAG AND ESAB-SAT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. David Lžičar

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. David Lžičař

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

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

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:

Posouzení ekonomiky konvenčního svařování MAG a technologie ESAB-SAT

v anglickém jazyce:

Economy comparison of welding technology MAG and ESAB-SAT

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zcela nová technika svařování v ochranném plynu tavící se elektrodou ESAB-SAT umožňuje vysoké výkony a kvalitní svary. Úkolem DP je provést rozbor teoretického základu a na praktických zkouškách ověřit aplikační možnosti nové technologie. V návaznosti na experimentální výsledky provést ekonomické zhodnocení metody ESAB-SAT.

Cíle diplomové práce:

- 1) Současný stav svařování tavící se elektrodou v ochranných plynech
- 2) Návrh experimentální práce
- 3) Rozbor teoretického základu techniky ESAB-SAT
- 4) Vypracování experimentální práce
- 5) Vyhodnocení a závěr

Seznam odborné literatury:

- 1) AMBROŽ, Oldřich, B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
- 2) ONDREJČEK, P. Zváranie oceli v ochrane plynov. Bratislava: ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
- 3) FOLDYNA Václav a kol. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- 4) ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
- 5) TURŇA, Milan. Špeciálne metódy zvarovania. 1.vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9
<http://hypertherm.com>
- 6) KRÍŽ, R. a P. VÁVRA. Strojirenská příručka. Praha: SCIENTIA. 1998. Svazek 8. 251 s. ISBN 80-7183-054-2
- 7) KOUKAL, J., D.SCHWARZ a J. HAJDÍK. Materiály a jejich svařitelnost. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav s.r.o. Ostrava, VŠB-Technická univerzita Ostrava. 2009. 241 s. ISBN 978-80-248-2025-5.

Abstrakt

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru 2303T005 předkládá analýzu porovnání metody konvenčního svařování MAG a technologie svařování *ESAB SATTM*. *ESAB SATTM* je nová inovovaná metoda svařování vycházející z principu svařování MAG. Experimentální část projektu je zaměřena na posouzení jakosti svarových spojů, vytvořených metodou *ESAB SATTM*, jehož součástí je vykonání vybraných destruktivních zkoušek. Ekonomická analýza následně porovnávací metodou vyhodnocuje naměřené a vypočtené parametry svařování.

Klíčová slova

Svařování, MAG, *ESAB SATTM*, produktivita

ABSTRACT

This project, elaborated in terms of Master's studies in domain 2303T005 presents an analysis comparing conventional method of welding MAG and welding technology *ESAB SATTM*. *ESAB SATTM* is the new innovative method based on the principle of welding by the method MAG. The experimental part of the project is aimed to assessing the quality of welded joints, produced by *ESAB SATTM*, which part is performing selected destructive tests. Afterwards economic analysis by comparative method evaluates the measured and calculated parameters of welding.

Key words

Welding, MAG, *ESAB SATTM*, productivity

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LŽIČAŘ, D. *Posouzení ekonomiky konvenčního svařování MAG a technologie ESAB-SAT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 97 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jaroslav Kubíček.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Posouzení ekonomiky konvenčního svařování MAG a technologie ESAB-SAT“ vypracoval samostatně s využitím uvedené odborné literatury a pramenů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

19.05.2012

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za odborné vedení mé práce, vstřícný přístup a cenné rady.

Dále bych chtěl poděkovat panu Jiřímu Šulcovi za jeho odborné rady a vyhotovení zkušebních svarů. Děkuji tímto také kolektivu mechanických laboratoří pod vedením Tomáše Zavadila DiS. a kolektivu metalografických laboratoří pod vedením Jaroslava Hynka, za umožnění vykonání potřebných zkoušek.

Obsah

Abstrakt	4
PROHLÁŠENÍ	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
Obsah	8
Úvod.....	10
1 Technologie svařování.....	11
1.1 Historie procesu svařování	11
1.2 Technologie obloukového svařování	12
1.2.1 Elektrický oblouk	12
1.2.2 Tepelné účinky oblouku	15
1.2.3 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)	16
1.2.4 Voltampérová charakteristika oblouku.....	17
1.2.5 Přenos kovu mezi elektrodou a materiálem.....	18
1.3 Obloukové svařování v ochranných atmosférách.....	19
2 Vady ve svarových spojích.....	21
2.1 Rozlišení vad ve svarech.....	21
2.2 Příčiny vzniku vad	22
2.3 Připustnost vad ve svarech	22
2.4 Základní metody kontroly jakosti svarů	23
2.4.1 Nedestruktivní metody zkoušek svarů:.....	23
2.4.2 Destruktivní metody zkoušek svarů:	25
3 Svařování metodou MAG	26
3.1 Princip svařování MAG	26
3.2 Přednosti svařovací metody MAG.....	28
3.3 Svařovací zařízení pro metodu MAG.....	29
3.4 Přenos kovu v průběhu svařování MAG	30
3.4.1 Zkratový přenos kovu	31
3.4.2 Zrychlený zkratový oblouk	31
3.4.3 Kapkový oblouk	32
3.4.4 Sprchový oblouk.....	32
3.4.5 Impulsní oblouk.....	33
3.4.6 Rotující oblouk	33
3.5 Stanovení parametrů svařování	33
3.5.1 Svařovací proud	33
3.5.2 Svařovací napětí.....	34
4 Úvod do experimentální práce.....	35
4.1 Návrh experimentu	35
4.2 Zkušební vzorky	36
4.2.1 Zhotovení vzorků.....	36
4.2.2 Volba materiálu.....	37
4.2.3 Svařovací zařízení	40
4.3 Návrh provedení destruktivních zkoušek	43
4.3.1 Příčná zkouška tahem.....	43
4.3.2 Zkouška ohybem	44
4.3.3 Zkouška rázem v ohybu	45
4.3.4 Makroskopická zkouška	47

4.3.5 Zkouška tvrdosti	48
5 ESAB Swift Arc Transfer (SATTM).....	50
5.1 Princip procesu <i>ESAB SATTM</i>	50
5.2 Přídavné materiály	52
6 Provedení experimentu.....	54
6.1 Svaření zkušebních vzorků	54
6.1.1 Vzorky tupých spojů – BW	54
6.1.2 Vzorky koutových spojů - FW	56
6.2 Destruktivní zkoušky.....	56
6.2.1 Příčné zkoušky tahem	56
6.2.2 Zkoušky rázem v ohybu	60
6.2.3 Zkoušky ohybem	62
6.2.4 Makrostruktura	64
6.2.5 Zkoušky tvrdosti.....	67
6.2.6 Hodnocení destruktivních zkoušek.....	71
7 Ekonomická a technologická analýza	72
7.1 Proces svařování tupého svaru	72
7.2 Analýza svařování koutových svarů.....	76
7.2.1 Srovnávací analýza pro svar FW- a4.....	76
7.2.2 Srovnávací analýza pro svar FW- a5.....	82
7.2.3 Analýza vneseného tepla pro svar FW – a5.....	86
Závěr	88
Seznam použitých zdrojů.....	89
Seznam použitých zkratk a symbolů	91
Seznam příloh	92

Úvod

Procesy svařování v současné době můžeme vnímat jako značně rozšířenou a stěžejní technologii zpracování kovových materiálů. Nepřetržitě dochází k dynamickému rozvoji technologií svařování v ochranných atmosférách. Neustálou snahou na poli inovací svářečských technologií je zajistit optimální výkony těchto procesů, jenž povedou ke zvýšení konkurenceschopnosti a stávají se otázkou úspěšnosti firem v tržním prostředí.

Svařování se s výhodou uplatňuje ve strojírenské výrobě, v automobilovém a lodním průmyslu, při výrobě rozličných typů ocelových konstrukcí, u tlakových nádob pro chemický či potravinářský průmysl apod. Nová konstrukční řešení svařovacích zdrojů a metod nám umožní lepší řešení technologických, ekonomických a také ekologických aspektů spojených s procesy svařování.

Úkolem této diplomové práce je analýza metod svařování v ochranné atmosféře *MAG* a nové technologie *ESAB SATTM*. Součástí projektu je vzájemné porovnání obou metod a to jak z hlediska technologického, tak z pohledu ekonomického. Metody svařování kovových materiálů odtavující se elektrodou v ochranné atmosféře jsou v současné době velmi používané z důvodu své vysoké efektivity v porovnání s ostatními svářecími metodami.

Svařované výrobky často nahrazují např. odlitky, které jsou pracnější na přípravu výroby a to obzvláště u tvarově komplikovaných dílců. Svařování sebou ovšem přináší určité komplikace, které při nesprávné použité technice svařování celý proces časově prodlužují a také prodražují. Jedním z problémů bývá teplotní ovlivnění svařovaného materiálu, které způsobuje vnitřní pnutí a s tím spojenou nežádoucí deformaci. Cílem inovací svařovacích procesů je tedy minimalizovat negativní ovlivnění svařence vneseným teplem a při tom zajistit požadované mechanické vlastnosti svaru.

Diplomová práce řeší ekonomický pohled na inovovaný proces svařování *MAG* uvedený pod názvem *ESAB SATTM* a vyvinutý společností *ESAB VAMBERK s.r.o.*.

1 Technologie svařování

1.1 Historie procesu svařování [1] [4]

Svařování je součástí skupiny strojírenských technologií jako jsou obrábění, tváření, povrchové úpravy apod. Technologie svařování zpracovává přibližně 30% kovových materiálů což je největší podíl mezi příbuznými technologiemi. Do procesu svařování se promítá celá řada vědních oborů, jako jsou například matematika, fyzika, metalurgie, chemie a další.

Za prvotní technologický postup svařování považujeme svařování kovářské. Až koncem 19. Století se rozvinuly nové metody svařování. Patřilo mezi ně svařování elektrickým obloukem, plamenné svařování a odporové svařování.

Průkopníkem svařování elektrickým obloukem byl angličan sir Humpree Davy, který v roce 1801 provedl první pokusy vytvoření elektrického oblouku ve vysokonapěťovém obvodu. O dva roky později již o této metodě píše ruský fyzik V.V.Petrov. První úspěšný pokus svaření olověných desek pomocí uhlíkové elektrody provedl v roce 1881 Auguste de Meritens, kdy součást připojil na kladný a elektrodu na záporný pól stejnosměrného napětí. Za nositele prvního patentu v technologii obloukového svařování je však považován až Nocolas de Benardos, který v roce 1889 na světové výstavě v Paříži předvedl několik způsobů využití svařování kovů za pomoci uhlíkové elektrody.

Vznik procesu svařování označované jako MIG/MAG (Metal Inert Gas/ Metal Aktiv Gas) lze datovat do roku 1947, kdy byly v USA uvedeny na trh první použitelná zařízení umožňující tuto techniku svařování. V té době se tato technologie označovala jako S.I.G.M.A., což byla zkratka názvu "Shielded Inert Gas Metal Arc", odpovídající dnešnímu označení MIG. Za počátky vzniku metody MAG, lze považovat rok 1953, kdy ruští inženýři poprvé při procesu svařování využily jako ochranný plyn „aktivní“ kysličník uhličitý (CO_2). Jeho užívání se později rozšířilo vzhledem k jeho nízké ceně. V Československu se MAG prosadil nejprve ke svařování konstrukčních nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Později se s poklesem ceny argonu začalo více využívat směsných ochranných plynů, které spolu se zdokonalující se technologií umožnily zavedení dnešních technicky vyspělých svařovacích postupů MIG/MAG. Svařování MIG/MAG získává v průběhu posledních let stále více na významu nejen svařování nelegovaných, nízkolegovaných ocelí či ocelí vysokolegovaných ale také pro procesy svařování hliníku a hliníkových slitin.

1.2 Technologie obloukového svařování

1.2.1 Elektrický oblouk [1]

Elektrický oblouk využívaný ve svařování je nízkonapěťový elektrický výboj kruhového průřezu, který prochází horkým ionizovaným plynem. Proud k udržování plazmy v ionizovaném stavu musí být dostatečný a napětí vyšší než je ionizační napětí. Ionizační napětí je napětí, kterým musíme urychlit elektron, aby byl schopen odtrhnout jiný elektron z valenční vrstvy daného prvku. Metalurgické a fyzikální děje probíhají v elektrickém oblouku velmi rychle a za extrémně vysokých teplot.

Mezi základní znaky oblouku patří:

1. Proud v řádech jednotek až tisíců ampér
2. Vysoká proudová hustota katodové skvrny
3. Malý anodový úbytek napětí
4. Malý potenciální rozdíl na elektrodách
5. Vyzařování UV záření
6. Intenzivní světelné vyzařování z elektrod i sloupce oblouku

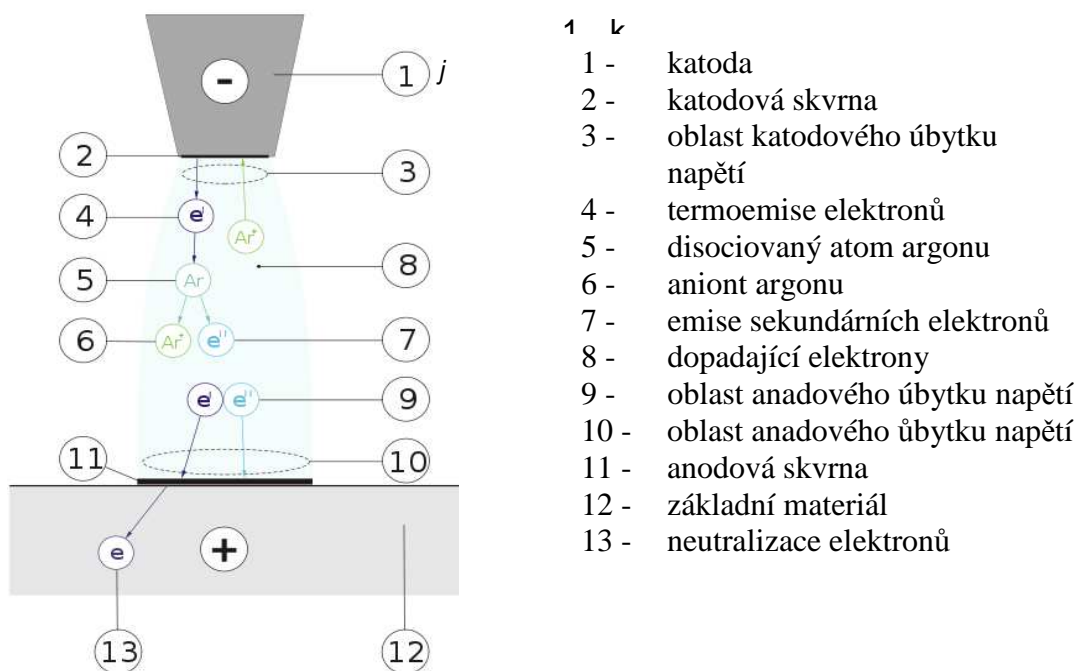
Velikost zápalného napětí závisí na materiálu elektrod a odvíjí se též od ionizační schopnosti ochranného plynu. Obvyklá velikost napětí pro elektrický oblouk se pohybuje v rozpětí 10 až 50V. Nižší velikost napětí je nezbytná z důvodu bezpečnosti. Svařovací proud se pak pohybuje v rozpětí 10 až 2000A.

Elektrický oblouk je možno zapálit několika možnými způsoby. Jedním z nich je krátkodobý kontakt elektrody se svařovaným materiálem a to při správném nastavení svařovacího proudu. Místo kontaktu se ohřeje elektrickým zkratovým proudem na vysokou teplotu, čímž se zajistí termoemise elektronů a dojde k ionizaci plynného prostředí. Nastalý stav je poté vhodný pro vedení elektrického proudu v okolním plynu. Tento způsob zapalování oblouku se používá u metod MMA (ruční obloukové svařování obalenou elektrodou), MAG a MIG. Dalším způsobem je zapálení oblouku vysokonapěťovým vysokofrekvenčním ionizátorem, který na vzdálenost několika milimetrů zapálí elektrická jiskra a dochází k ionizaci plynného okolního prostředí. Ionizace je možná pouze díky termoemisi elektronů z katodové skvrny na elektrodě.

Tato metoda zapalování se využívá u metody WIG. Důležité je také vzpomenout způsob zapalování elektrického oblouku dotykem tzv. startovacím proudem. Tato metoda je založena na principu startovacího proudu, jehož nízká intenzita dosahuje maximálně 10 A a ohřívá pouze hrot wolframové elektrody (WIG).

Jak je již zmíněno výše, zapalování oblouku především střídavého proudu je závislé na ionizačním napětí par kovů. Tyto páry se nacházejí v oblasti mezi elektrodou a svařovaným materiálem. Takto vniklá ionizace se nazývá nárazová. Jako příklad jsou zde uvedeny hodnoty pro vybrané prvky, kdy například ionizační napětí železa je 7,8 V, niklu 7,6 V, wolframu 8,1 V atd.

Elektrický oblouk vytváří v elektrickém obvodu odpor, jehož velikost záleží na parametrech svařování. Na obrázku č.1 jsou popsány jednotlivé části elektrického oblouku při svařování metodou WIG, tedy při použití neodtavující se elektrody připojené na záporný pól zdrojového stejnosměrného napětí.



1

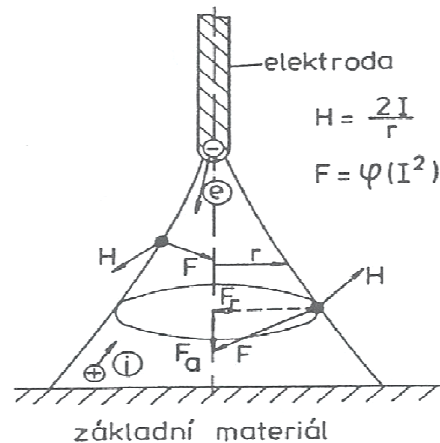
- 1 - katoda
- 2 - katodová skvrna
- 3 - oblast katodového úbytku napětí
- 4 - termoemise elektronů
- 5 - disociovaný atom argonu
- 6 - aniont argonu
- 7 - emise sekundárních elektronů
- 8 - dopadající elektrony
- 9 - oblast anodového úbytku napětí
- 10 - oblast anodového úbytku napětí
- 11 - anodová skvrna
- 12 - základní materiál
- 13 - neutralizace elektronů

Obr. 1: Složení elektrického oblouku [10]

Části elektrického oblouku: [1],[4]

- 1) **Katodová skvrna**, tj. oblast na povrchu žhavé katody, která elektrony emituje, čímž iniciuje vznik oblouku a ionizaci plynného prostředí. V místě katodové skvrny dochází k úbytku napětí a elektrony zde získávají velkou kinetickou energii, která jim umožní při srážkách ionizovat neutrální atomy na kladné ionty. Skvrna setrvává na stejném místě, nebo se po povrchu katody přemísťuje vlivem geometrie elektrody, tepla a velikosti proudu. Teplota se v oblasti katodové skvrny zvyšuje v závislosti na hodnotě protékajícího proudu. Vlivem ochlazovacího efektu termoemise elektronů pohybuje kolem hodnoty 2400 – 3000 °C. Proudová hustota je zde vysoká a dosahuje hodnoty 1000 – 1500 A.mm⁻². Kladné ionty, pohybující se ve směru záporného pólu vlivem elektrostatických sil, dopadají na katodovou skvrnu. Ionty se na jejím povrchu neutralizují předávají svoji energii na katodu což ve svém důsledku přispívá k termoemisi elektronů.
- 2) **Anodová skvrna** je oblast na anodě, kde jsou „pohlcovány“ elektrony. Kinetická energie částic se mění na tepelnou energii a částečně také na emisi elektromagnetického záření. Teplota anodové skvrny se pohybuje v rozmezí teplot 2700 – 3600 °C. Tato vyšší teplota se připisuje přeměně kinetické energie letících elektronů na energii tepelnou a často dosahuje teploty varu svařovaných materiálů. Oblast anodového úbytku napětí má malou tloušťku (10⁻² až 10⁻³ mm). V této části dochází k prudkému úbytku napětí.
- 3) **Sloupec oblouku**, tj. prostor mezi elektrodami. Je to zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy, která dosahuje vysokých teplot (přes 5000°C). Maximální teplota závisí především na počtu srážek částic v oblouku, jenž je dán intenzitou proudu a velikostí napětí. Vedení proudu ve sloupci oblouku zajišťují především elektrony, neboť mají znatelně menší hmotu nežli ionty a pohybují se tudíž mnohem rychleji ve směru spádu napětí. Kladné ionty, které jsou tvořeny hmotnými částicemi plazmového plynu se při nižších teplotách pohybují od anody ke katodě vlivem působení přitažlivých elektrostatických sil. Od určité „kritické hodnoty proudu začne ale plazma proudit pouze od elektrody k základnímu materiálu, bez ohledu na polaritu. Tento jev souvisí s intenzitou kruhového magnetického pole **H**, indukovaného protékajícím elektrickým proudem (viz obr. č.2) . Toto pole působí následně na plazmu silou

\mathbf{F} , jejíž směrnice je vždy směrem k základně oblouku. Tepelné a mechanické účinky oblouku ovlivňuje rychlost proudění plazmatu, která je vyvolána právě silou \mathbf{F} .



Obr. 2: Elektromagnetické síly působící v elektrickém oblouku [1]

1.2.2 Tepelné účinky oblouku [1]

Vhodnou úpravou parametrů svařování lze korigovat tepelné i mechanické účinky elektrického oblouku a ovlivňovat tak charakter i rozměry svarové lázně. Výkon oblouku je možné vyjádřit jako jeho energetický příkon:

$$P = k \cdot U \cdot I \quad [\text{J}] \quad k \dots \text{součinitel vlivu napětí a proudu} \quad (1.1)$$

Teoreticky můžeme rozdělit teplo vzniklé v oblouku na 1/3 předanou katodě a 2/3 předanými anodě. Při svařování tavící se elektrodou (MMA, MIG, MAG), se přenáší do materiálu tepelná energie Q_c o velikosti:

$$Q_c = Q_i + Q_p + Q_r + Q_m \quad (1.2)$$

Q_i ... energie přímého tepla na katodě a anodě, způsobená dopadem částic

Q_p ... energie přenášená tokem plazmatu.

Q_r ... energie radiačního záření

Q_m ... energie přenášená do svaru kinetickou energií dopadu kapek přehřátého kovu

Samotná elektroda se taví především odporovým teplem dle Joule-Lenzova zákona. Takto vzniklé teplo závisí primárně na proudové ustátě a na délce volného konce elektrody. Takto vzniklé teplo dominuje především u metod MIG, MAG a MMA.

Vztah pro výpočet odporového tepla:

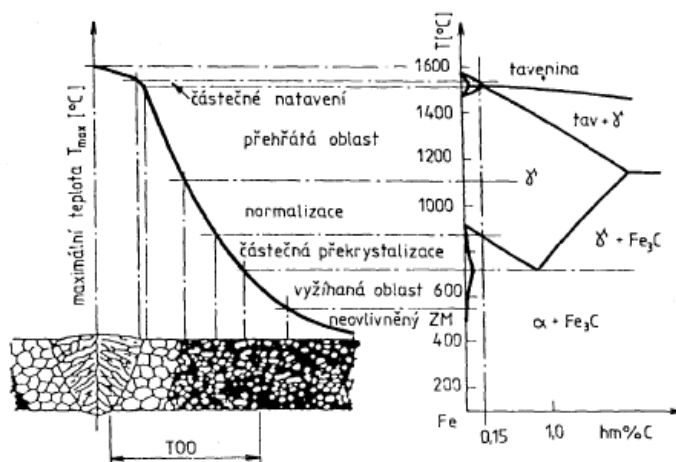
$$Q = R \cdot I^2 \cdot t \quad [J] \quad (1.3)$$

Hluboký závar je všeobecným požadavkem na jednotlivé metody svařování. Na hloubku závaru má nejvýznamnější vliv tlak proudu plazmatu, který je vyvolán jeho vysokým proudem toku.

1.2.3 Tepelně ovlivněná oblast (TOO) [3]

V těsné blízkosti svaru probíhá v základním materiálu jeho poměrně rychlý ohřev s následným rychlým ochlazením. Současně probíhá také plastická deformace, vyvolaná hlavně nestejnou teplotou. Mikrostruktury vzniklé v tepelném pásmu lze studovat podle rovnovážného diagramu Fe-C, jak nám ukazuje obr. 3. TOO ovlivňuje ve značné míře teplotní cyklus, kterému byl materiál vystaven a který závisí především na vzdálenosti sledovaného bodu od rozhraní mezi svarem a základním materiálem.

Šíře jednotlivých oblastí TOO je pro různé technologie svařování rozdílná a je odvozena od hodnot svářecích parametrů. V průběhu svařování většinou dochází k nárůstu velikosti zrn. Míra růstu zrn závisí na chemickém složení a míře tepelného ovlivnění.



Obr. 3: Struktura svarového spoje v závislosti na tepelném ovlivnění [3]

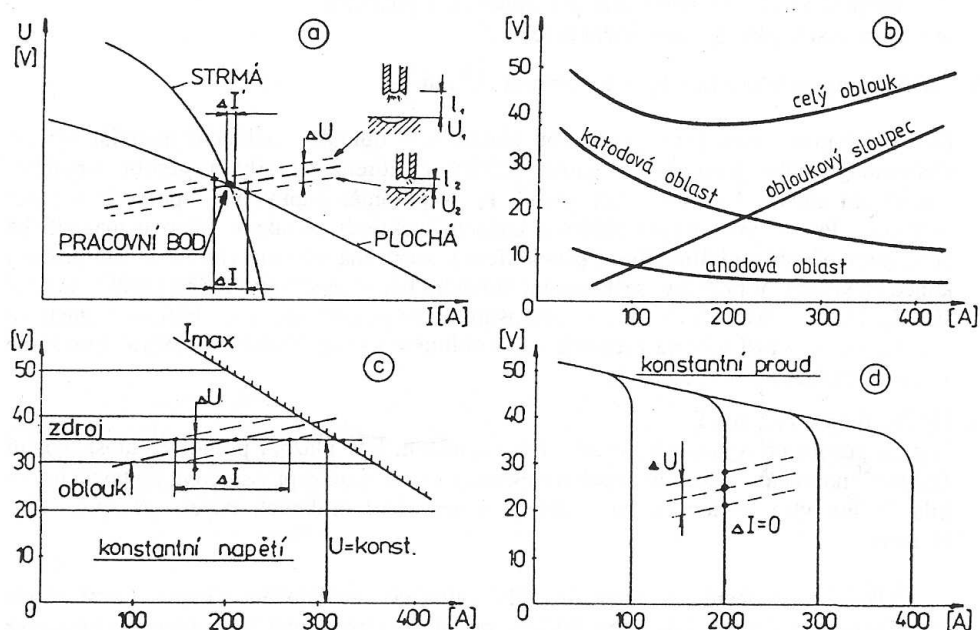
Zhrublé zrno v TOO výrazně zhoršuje plasticitu, zvyšuje náchylnost k praskání, brzdí kinetiku rozpadu austenitu, protože upřednostňuje vylučování feritu v štěpných rovinách austenitu a snižuje pevnost v této oblasti.

1.2.4 Voltampérová charakteristika oblouku [1],[4]

Statická voltampérová charakteristika oblouku vyjadřuje závislost proudu na napětí oblouku při konstantní délce oblouku. Na vlastní tvar a polohu charakteristiky oblouku má významný vliv chemické složení elektrody, geometrie elektrody, složení plazmy oblouku a také průměr elektrody. Na obr.4 jsou znázorněny statické charakteristiky zdroje a oblouku v závislosti na změně parametrů.

Jednotlivé charakteristiky:

- vliv ploché a strmé charakteristiky na kolísání proudů
- statické charakteristiky jednotlivých částí oblouku
- vliv zdroje s konstantním napětím
- vliv zdroje s konstantním proudem



Obr. 4: Statické charakteristiky zdrojů, oblouků a jeho částí [1]

1.2.5 Přenos kovu mezi elektrodou a materiálem

Při svařování tavící se elektrodou dochází v elektrickém oblouku k přenosu roztaveného kovu elektrody do svarové lázně. Tento proces primárně ovlivňuje především proudová hustota. Dále pak velikost napětí a druh ochranného plynu. Samotné oddělení odtavené „kapky“ materiálu elektrody a následný přechod na základní materiál závisí na mnoha chemických a fyzikálních faktorech. Do tohoto procesu jsou zapojeny silové účinky iontů a elektronů, elektrodynamické síly vyvolané elektromagnetickým polem, silový účinek vypařování, silový účinek gravitační síly a také síla povrchového napětí.

➤ **Gravitační síla :**

$$- F_G = m * g \quad (1.4)$$

(m... hmotnost; g... gravitační zrychlení)

- působí na oddělující se část tavící se elektrody. Problematicky působí při svařování v nestandardních polohách.

➤ **Elektromagnetická síla:**

$$1. \quad F_E = k * I^2 * \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (1.5)$$

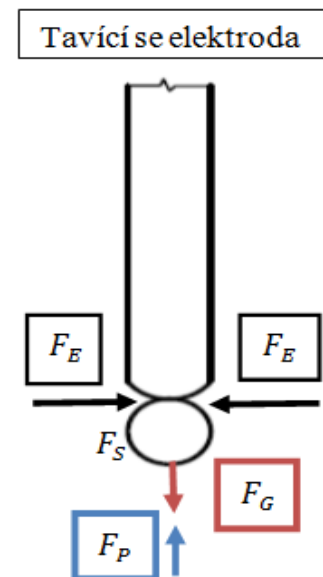
(I... elektrický proud; k... konstanta; r_2 ...poloměr kapky; r_1 ... poloměr v místě zužení)

2. síla, s jejíž pomocí kterou působí elektromagnetické pole na elektricky nabitě částice. Elektromagnetické pole je vytvořeno protékajícím proudem. Jeho silové účinky působí v radiálním i axiálním směru.

➤ **Síla povrchového napětí:**

$$3. \quad F_S = 2\pi * r * \gamma \quad (1.6)$$

(r...poloměr kapky; γ ... povrchové napětí)



Obr. 5: Síly při odtavování kovu

4. snaží se udržet kapku na konci odtavující se elektrody a získat její kulový tvar. Se vzrůstající se hodnotou proudu se úměrně zvyšuje teplota a povrchové napětí klesá.

➤ **Síla vyvolaná vypařováním kovových par:**

$$F_p = S_s * I * j \quad (1.7)$$

- působí proti gravitační síle odtavující se kapky, vlivem tlaku odpařovaného kovu dopadajícího z katodové nebo anodové skvrny.

V praxi je také používá svařovací poloha nad hlavou, kdy se kapka utavená z konce elektrody pohybuje proti síle vyvolané zemskou tíhou. Hlavní význam při tomto procesu mají silové účinky elektronů a iontů. Využívá se svařování s obráběnou polaritou. Elektroda se pak více zahřívá a v procesu oblouku převládá tok iontů.

1.3 Obloukové svařování v ochranných atmosférách

Majoritní podíl mezi používanými svařovacími metodami patří právě oblasti svařování v ochranných plynech. V současné době se tato metoda řadí mezi metody nejproduktivnější s širokou škálou použití. V této oblasti je také zaznamenán největší vývoj, jenž je veden k neustálému zdokonalování technologických a ekonomických aspektů metod svařování.

Při tomto druhu svařování je samotná elektroda obklopena ochranným plynem, která chrání elektrický oblouk a svarovou lázeň před negativním vlivem vzdušného kyslíku a dusíku obsažených v atmosféře.

Základní metody svařování v ochranných plynech

- **MIG** (Metal Inert Gas) – Svařovací proces tavící se elektrodou v inertním (netečném) ochranném plynu.

- **MAG** (Metal Activ Gas) – Svařovací proces tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu.
- **TIG** (Tungsten Inert Gas) – Svařovací proces s netavicí se wolframovou elektrodou inertním ochranném plynu. V němčině je tato metoda značena **WIG** (Wolfram Inert Gas).

V zahraničních literaturách se můžete setkat s různými modifikacemi názvů těchto metod, jako například MAGM; MAGC; GMAW; GMAW-P; GMAV-S, apod.

Ochranné plyny

Jak již bylo uvedeno výše, primárním úkolem ochranného plynu je ochránit svarovou lázeň a svářecí oblouk před působení okolního vzduchu. Vzdušný kyslík způsobuje oxidaci kovu, naplynění a pórovitost, což jsou procesy nežádoucí, které negativně ovlivňují mechanické vlastnosti svaru.

Ke svářecím procesům (MIG a MAG) se používají jednosložkové nebo vícesložkové plyny. V minulosti byl nejvíce rozšířený jednosložkový plyn CO₂, který je ekonomicky nejvýhodnější. V současné době se díky svým dobrým účinkům na kvalitu svaru těší velké oblibě dvousložkové plyny, které tvoří směs argonu (Ar) s oxidem uhličitým (CO₂) nebo kyslíkem (O₂).

Ochranný plyn svým složením ovlivňuje především tvar a rozměry oblouku, tvar a rozměry svaru, síly působící v oblouku, charakter přenosu kovu v oblouku, kvalitu povrchu svaru a jeho přechod na základní materiál a v neposlední řadě mechanické a fyzikální vlastnosti svarových spojů.

Inertní plyny

Do této skupiny plynů patří argon, helium a jejich směsi. Nereagují se svarovou lázní a nemají vliv na konečné chemické složení svarového kovu. Inertní plyny využíváme při svařování metodou WIG pro všechny svařitelné materiály a při svařování metodou MIG pro hliník a jeho slitiny, měď, nikl aj.

Aktivní plyny

Do skupiny aktivních plynů dle normy ČSN EN 439 plyny skupiny M1, M2, M3 a C. Jedná se o CO₂, O₂ a jejich směsi s Ar. Aktivní plyny ovlivňují chemické složení svaru.

Ochranné plyny dělíme podle indexu oxidačního účinku konstantou od čísla 0 až 10. Nejvyšší oxidační účinek má samotný oxid uhličitý (CO_2), který spadá do skupiny C a jeho hodnota je 10. Při svařování metodou MAG se v současné době nejvíce používají dvousložkové směsné plyny skupiny „M2“. Často používanou směsí pro konstrukční nízkolegované oceli je typ Ar + 18% CO_2 . Pro svařování tenkých plechů se pak používá trojnožková směs Ar + 5% O_2 + 15% CO_2 se značným oxidačním účinkem – 6,5. Při svařování vysokolegovaných ocelí se nedoporučuje používat jako ochranného plynu CO_2 z důvodu nežádoucího nauhličení a tím také snížení odolnosti proti mezikrystalické korozi. V těchto případech se používá směs Ar + 1% O_2 , kde nauhličení nenastává a zaručuje se neměnný obsah uhlíku ve svarovém kovu.

2 Vady ve svarových spojích

2.1 Rozlišení vad ve svarech

Vadou se rozumí jakákoliv odchylka od vlastností jenž jsou předepsané technickými normami. Jednotlivé vady jsou ve svaru nežádoucí a to především z hlediska snížení mechanických vlastností svarového spoje. Vady ve svarech mohou ovlivňovat mez únavy materiálu svaru a mohou být příčinou křehkého lomu. To je samozřejmě z hlediska funkčnosti a bezpečnosti nepřijatelné. Tolerovány jsou pouze ty vady, které z vzhledem k požadavkům na funkci svařované součásti netvoří rizikový faktor z pohledu požadované bezpečnosti. Vady v oblasti svaru rozlišujeme podle jejich geometrie a také oblasti výskytu ve svaru.

Dělení podle geometrie:

- *plošné (mikropóry, vměstky apod.)*
- *prostorové (trhliny, studené spoje, neprůvody apod.)*
- *bodové (plynové bubliny, dutiny a póry, vměstky, staženiny apod.)*

Dělení podle oblasti vad ve svaru:

- *povrchové (zápaly, póry, trhliny apod.)*
- *vnitřní (vměstky, studené spoje, póry, neprůvody apod.)*

Definicemi jednotlivých vad, které se v běžné výrobě mohou objevovat se zabývá mezinárodní norma ČSN EN ISO 5817.

2.2 Příčiny vzniku vad

Mezi hlavní možné příčiny vzniku vad ve svaru patří:

- chybně nastavené parametry svařování
- nedostatečná přítomnost ochranné atmosféry
- nevhodný postup a zvolený typ svařování
- svařování těžkosvařitelných materiálů
- nevhodné chemické složení přídavného materiálu
- nevhodný průměr odtavujícího se drátu (elektrody)
- nedodržení technologického postupu – „technologická nekázeň“

2.3 Přípustnost vad ve svarech

Přípustnost vad ve svarových spojích je obecně stanovena typem, velikostí a četností vyskytující se vady v závislosti na typu výrobku, konstrukci a namáhání. Hodnocení přípustnosti některých dalších druhů vad ve svarech vychází z možné interakce následujících faktorů:

- geometrie svařované konstrukce
- typu, orientace a velikosti vady
- mechanických vlastností svarového spoje (R_m , R_e atd.)
- charakter namáhání
- celkový vliv pracovního prostředí

Při stanovení přípustnosti zjištěných vad se zohledňuje vhodnost pro každý jednotlivý daný účel. Posuzuje se například možnost iniciace křehkého lomu vlivem stanoveného pracovního zatížení. Přípustné meze velikosti vad jsou rozděleny na tři stupně jakosti (B, C, D) a jsou obsaženy ve výše zmíněné normě, kde „B“ je nejpřísnější.

2.4 Základní metody kontroly jakosti svarů

2.4.1 Nedestruktivní metody zkoušek svarů:

1. Ke zjišťování povrchových vad:

- vizuální kontrola,
- magnetická a magnetoinдукtivní zkouška
- kapilární zkouška,

2. Ke zjištění vad vnitřních:

- ultrazvuková zkouška,
- prozařování ionizujícím (RTG) zářením.

Vizuální kontrola

Jedná se o základní kontrolní metodu, sloužící k odhalení zjevných povrchových vad jako jsou například trhliny, zápaly, převýšení svarů, zjevné vady z kořenové oblasti apod..

Vizuální kontrola se dále dělí na kontrolu přímou a nepřímou.

Přímá kontrola – provádí se pouhým okem na dostupném místě. Nutnou podmínkou je dostatečná intenzita denního světla, nebo bílého umělého světla o intenzitě minimálně 500 luxů.

Nepřímá kontrola – provádí se za pomoci optických přístrojů tzv. endoskopů. Svě využití tento způsob kontroly nachází primárně v těžkodostupných nebo nedostupných částech svařenců a v prostorech s rizikem ohrožení zdraví pracovníků (chemický průmysl).

Magnetická a magnetoinдукtivní zkouška

Tato zkouška slouží ke zjišťování povrchových nečelivostí, ovšem dokáže také odhalit vady ležící těsně pod povrchem svaru. Jistým omezením u tohoto typu zkoušky je nutnost feromagnetických vlastností zkoušeného materiálu. Tento předpoklad splňují oceli obvyklých jakostí.

Metoda je založena na skutečnosti, že ve zmagnetovaném feromagnetickém materiálu se v místě necelistvostí zvýší magnetický odpor, který způsobí deformaci šířícího se magnetického pole, běžně označovanou jako rozptyl. Rozptylem se rozumí část magnetického toku, která probíhá mimo předpokládanou dráhu.

Kapilární (penetrační) zkouška

Fyzikální princip této zkoušky umožňuje zjišťovat pouze povrchové otevřené vady, které umožní vniknutí zkušební detekční kapaliny. Tato zkušební metoda je tedy vhodná ke kontrole povrchových trhlin, zápalů, otevřených pórů apod.

Ultrazvuková zkouška

Metoda je založena na principu šíření akustického (mechanického) vlnění jež prochází zkoušeným materiálem. Vnitřní vady, které se mohou objevovat např. ve formě vměstků, bublin, pórů apod., jsou při průchodu detekovány jako změny vyvolané průchodem akustického vlnění dané frekvence přes nehomogenní materiály s rozdílnými akustickými vlastnostmi.

Jako zdroje generování ultrazvukovým impulsů se používají ultrazvukové zkušební sondy. K přeměně elektrického signálu na mechanický akustický signál se používají piezoelektrické. Elektromagnetické a elektroindukční měniče.

Ultrazvuk pracuje s frekvencí, která se nachází nad hranicí slyšitelnosti zvuku, tedy nad 20 kHz. Metodou postupu zkoušení a vyhodnocení zkoušek se zabývá norma ČSN EN 1714 a ČSN EN 1712.

Zkouška prozařováním ionizujícím zářením (radiologická zkouška)

Princip spočívá v pronikání RTG nebo gama záření zkoušenou hmotou a v následném zviditelnění prošlého záření za pomoci vhodného detektoru.

Zkouška svarů prozařováním se provádí na svarku až ve chvíli, kdy již nedochází ke změně svaru. To znamená až ve finálním stavu po případné tepelné úpravě.

Podmínky zkoušky prozařováním určují normy ČSN EN 444, ČSN EN 1435 A ČSN ISO 5579.

2.4.2 Destruktivní metody zkoušek svarů:

- a) zkouška tahem,
- b) zkouška ohybem,
- c) zkouška rázem v ohybu,
- d) zkouška tvrdosti spojů,
- e) zkouška únavové pevnosti,
- f) makroskopická kontrola,
- g) mikroskopická kontrola

Příčná zkouška tahem

Příčnou zkoušku tahem zjišťujeme na speciálních zkušebních trhacích strojích. Vzorek svařeného materiálu musí být před samotnou zkouškou upraven do normou předepsaného tvaru a rozměrů. Podmínky zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 4136.

Podstatou zkoušky je plynulé postupné zatěžování zkušební vzorku až do jeho přetržení. Touto zkouškou se zjišťují následující mechanické parametry svarového spoje. R_m - mez pevnosti [MPa], R_e – mez kluzu [MPa], Z – kontrakce [%], A – tažnost [%].

Zkouška ohybem

Zkouška ohybem určuje pomocí ohybu deformační schopnost svarového spoje. Rozlišujeme zatěžování ze strany kořene svaru, líce svaru, příčně na svar, podélně na svar a z boku. Zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 5173. Tato norma udává také rozměry zkušebních tyčí.

Zkouška se provádí způsobem, kdy se zkušební tyč položí na dva rovnoběžné podpěrné válečky. Poloměr ohýbacího trnu musí být v souladu s danou normou. Úhel ohybu je stanoven normou výrobku. Po ohnutí se kontroluje vnější povrch a boční strany zkušební tyče.

Zkouška rázem v ohybu

Tento typ zkoušky slouží k vyhodnocení náchylnosti ocelí a svarů ke křehkému porušení. Zkouška musí být provedena podle ISO 148. Zkouší se zkušební tělísko jehož rozměry jsou stanoveny normou a v příčném směru je vněm vytvořen vrub. Standardně „V“ vrub do hloubky 2 mm nebo také „U“ vrub. Tato zkouška se provádí na tzv. Charpyho kladivu. Podle velikosti úhlu výkyvu kladiva po přeražení zkušebního vzorku se určí velikost spotřebované práce v Joulech. Z té se poté spočítá vrubová houževnatost [J/cm^2]. Zkoušky rázem v ohybu svarových spojů se provádějí podle normy ČSN EN ISO 9016.

Makroskopická kontrola

Umožňuje hodnocení struktury lomových ploch (makrofraktografie), nebo pozorování drobných detailů na upravené ploše vzorku (makrostruktura). Připravený vzorek se pozoruje pomocí oka nebo lupou. Při použití mikroskopu se pozoruje při zvětšení do 50:1.

3 Svařování metodou MAG

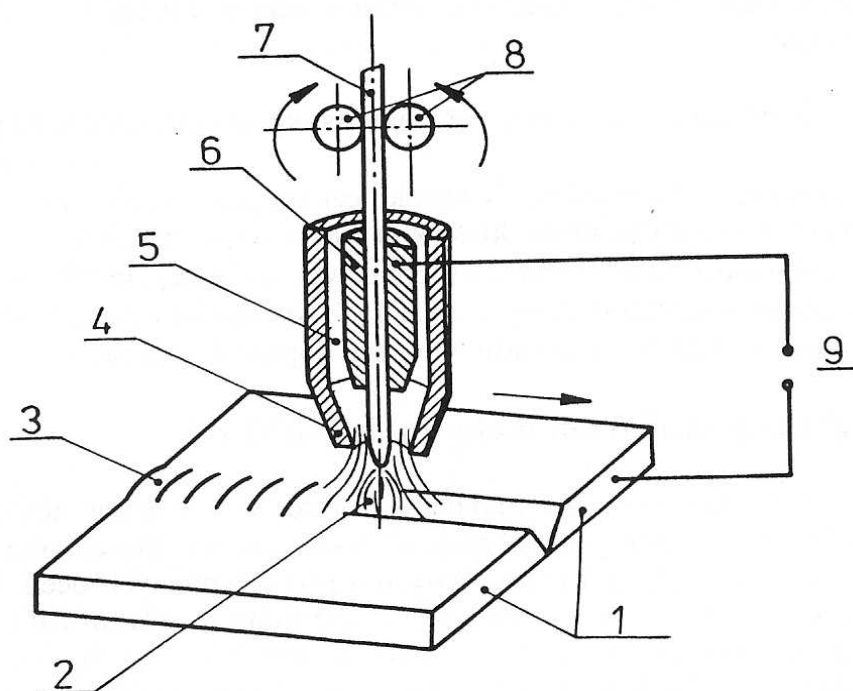
3.1 Princip svařování MAG [1]

Tato svařovací metoda se v současné době používá pro téměř všechny svářečské operace ve všech svařovacích polohách a pro své nesporné výhody zaujímá primární podíl v odvětvích využívajících svářecí procesy. Její využití můžeme nalézt v mnoha odvětvích strojírenského a stavebního průmyslu. Například při stavbách ocelových strojních či stavebních konstrukcí, v automobilovém a leteckém průmyslu, při výrobě tlakových nádob apod. Současné zdroje využívají polovodiče k práci v tzv. pulzním režimu, jenž řídí přenos kovu obloukem.

MAG využívá principu hoření oblouku mezi kovovou tavící se elektrodou a základním svařovaným materiálem v ochranné atmosféře. Ochrannou atmosféru tvoří u této metody samotný oxid uhličitý (CO_2), nebo směs oxidu uhličitého, Argonu (Ar) a případně také kyslíku (O_2).

Ochrana svarové lázně před působením okolní atmosféry zajišťuje výše zmíněný ochranný aktivní plyn. Aktivní z toho důvodu, jelikož se účastní chemických reakcí ve svarové lázni. Obdobná svařovací metoda MIG, se od metody MAG odlišuje pouze jiným typem požitého ochranného plynu. MIG využívá při svařování inertních (netečných) plynů jako jsou například Argon a Helium (He). Tyto inertní plyny na rozdíl od CO_2 se svarovou lázní nereagují.

Velikost proudové hustoty je u metody MAG největší ze všech konvenčních metod obloukového svařování a dosahuje hodnot 150 až $600 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Hodnoty svařovacích proudů se pohybují v přibližném rozmezí hodnot od 30A do 800A v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu a použitého svářecího zdroje.



1. svařovaný materiál
2. elektrický oblouk
3. svar
4. plynová hubice
5. ochranný plyn
6. kontaktní průvlak
7. přídavný drát
8. podávací kladky
9. zdroj proudu

Obr. 6: Princip svařování pro metody MIG/MAG [1]

3.2 Přednosti svařovací metody MAG

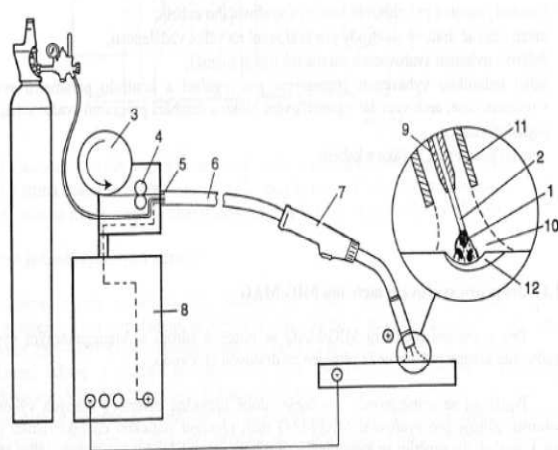
Mezi významné přednosti použití metody svařování MAG patří především:

- svařování materiálu od tloušťky 0,6 mm
- efektivita svařování \Rightarrow tzv. nekonečná elektroda (cívka svařovacího drátu)
- vysoká rychlost svařování
- odstranění prostojů na výměnu klasických obalených elektrod
- hluboký průvar
- nižší produkce škodlivých emisí oproti MMA
- vysoká kvalita vzhledu svaru
- na rozdíl od metody MMA je eliminován vznik strusky
- nízká pórovitost svaru
- možnost aplikace na robotizované systémy

Metoda MAG je úspěšně používána při svařování nelegovaný, nízkolegovaných a také vysokolegovaných ocelí. Pro daný druh svařovaného materiálu je zapotřebí zvolit odpovídající typ a průměr svařovacího drátu. S ohledem na vysokou hodnotu svářecích proudů se rychlost svařování může činit až 25 mm/s a rychlost přechodu odtavených kapek v oblouku přesahuje 130 m/s.

3.3 Svařovací zařízení pro metodu MAG

Svařovací zařízení MAG je složeno z následujících základních částí:



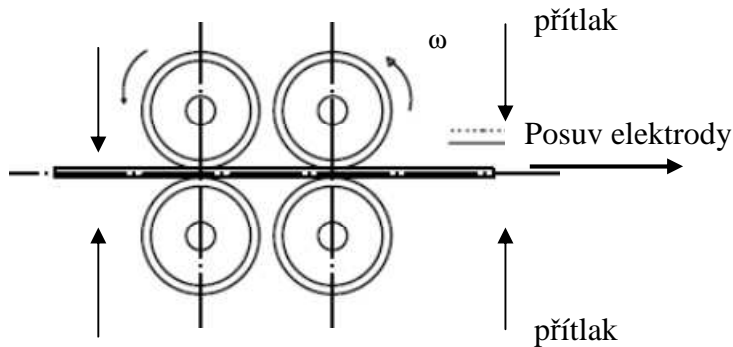
- 1 - elektrický oblouk
- 2 - elektroda
- 3 - cívka s tavící se elektrodou
- 4 - přítlačné podávací kladky
- 5 - rychloupínací konektor
- 6 - hořákový kabel
- 7 - svařovací hořák
- 8 - zdroj svařovacího U a I
- 9 - svařovací průvlak
- 10 - ochranný plyn
- 11 - plynová tryska
- 12 - svarová lázeň

Obr. 7: Schéma zařízení pro svařování metodou MAG [1]

Tyto základní svařovací jednotky pak mohou být v závislosti na určitých parametrech svařování doplněny dalšími technickými doplňky jako např. dálkové ovládání svařovacích parametrů, mezipodavač drátové elektrody, chladicí zařízení hořáku a svařovacího kabelu apod.

Jako zdroje elektrického svařovacího stejnosměrného napětí se v dnešní době používají invertory různých výkonnostních vlastností. Tyto zdroje mají plochou statickou charakteristiku se stálou hodnotou napětí. Ta umožňuje značnou změnu elektrického proudu při malé změně délky svařovacího oblouku a tím také napětí na oblouku. V praxi to znamená, že se při změně délky oblouku mění poloha pracovního bodu na již zmíněné statické charakteristice, což vede k výrazné změně svařovacího proudu. Délka oblouku se stabilizuje v tzv. rovnovážné poloze.

Svařovací tavící se elektroda je do hořáku podávána za pomoci přítlačných kladek, které ji svým rotačním pohybem posunují. V přímé závislosti na zvolených parametrech (U, I) je možné plynulé nastavení rychlosti posunu drátu.

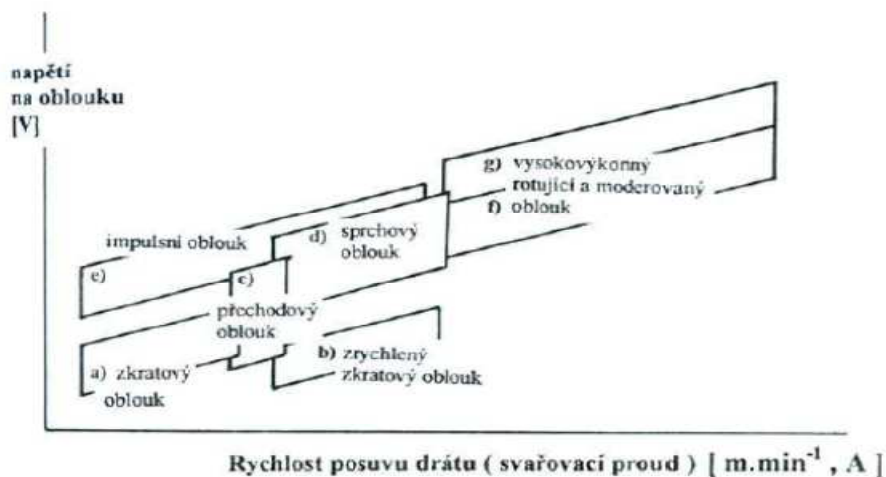


Obr. 8: Čtyřkladkový podavač drátu

V závislosti na počtu hnacích kladek dělíme podavače na jednokladkové, dvoukladkové a čtyřkladkové. U moderních svařovacích zařízeních se často pro své výhody, mezi něž patří především malý přítlak kladek, malý otěr drátu a možnost dlouhého vedení k hořáku u lehkých slitin, využívá čtyřkladkového podavače.

3.4 Přenos kovu v průběhu svařování MAG [5],[1],[4]

Přenos kovu je závislý především na velikosti napětí a proudu, chemickém složení použitého ochranného plynu a také na zvoleném typu přídavného materiálu. Jednotlivé druhy přenosů kovu obloukem znázorňuje obr.9.



Obr. 9: Typy oblouku a jejich využitelné oblasti [1]

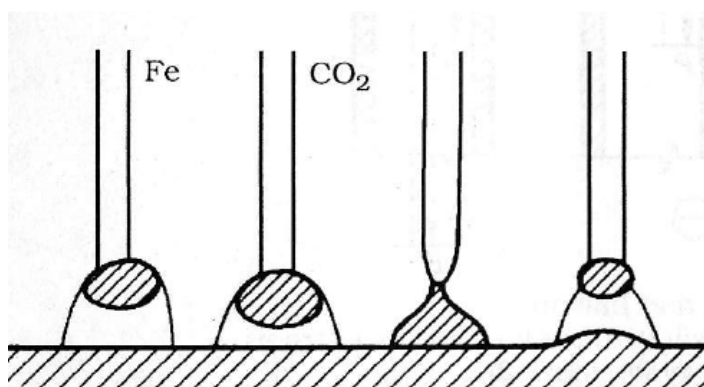
3.4.1 Zkratový přenos kovu

Tento druh přenosu kovu se uplatňuje při nižších svařovacích hodnotách napětí a podkritických hodnotách proudu (přibližně v rozmezí hodnot od 60 do 170 A). Princip přenosu kovu je založen na přerušování oblouku zkratem, při kterém dochází k oddělení části odtavené elektrody.

Kapka odtavené části elektrody vytvoří po dotyku s tavnou lázní zkrat mezi odtavující se elektrodou a svařovaným materiálem. Sníží se hodnota napětí (U) na oblouku stoupne hodnota protékajícího proudu (I). Po přerušení zkratového spojení se opět zapálí oblouk. Zvýší se hodnota napětí a klesne hodnota protékajícího proudu.

Celý proces je charakterizován cyklickými změnami hoření oblouku a zkratem mezi elektrodou a tavnou lázní. Dynamické vlastnosti zdroje, které umožňují vhodný proudový vrchol jsou pro zkratový proces nezbytné.

Zkratový přenos je realizovatelný jak v aktivní, tak v inertní ochranné atmosféře. Rozdíl je pouze v rozdílném nastavení hodnoty napětí na oblouku.



Obr. 10: Průběh zkratového přenosu kovu v oblouku [4]

3.4.2 Zrychlený zkratový oblouk

Napětí na oblouku je na přibližně stejné hodnotě jako při konvenčním zkratovém přenosu kovu, ovšem proud společně s rychlostí podávání drátu je typický pro oblast sprchového přenosu. Výkon navaření je v porovnání s přenosem zkratovým vyšší a odpovídá hodnotám sprchového přenosu.

Tímto typem přenosu kovu je možné svářet vysokou rychlostí plechové dílce od tloušťky 1 mm a je s ním možné svářet ve všech polohách.

3.4.3 Kapkový oblouk

Při tomto typu přenosu kovu se zpravidla využívá hodnot napětí na oblouku v rozmezí 20 až 30 V a proudu od 200 A do 300 A. Při tomto typu přenosu nedochází ke zkratům. Kapky roztaveného kovu se odtavují s frekvencí 20 až 50 kapek za sekundu a při použití pulzního režimu odpovídá počet odtavených kapek frekvenci proudu.

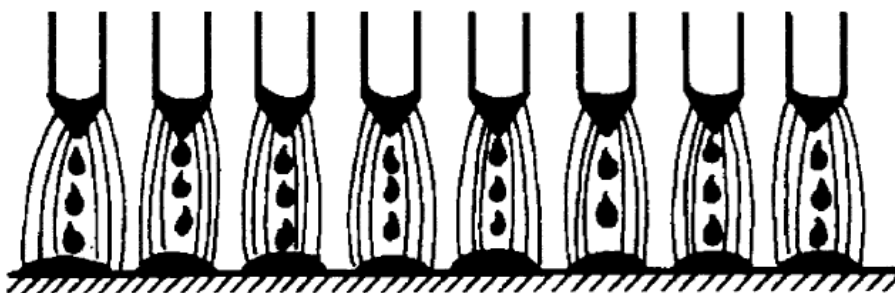
Je typický pro svařování v ochranné atmosféře CO₂. Pro tento druh přenosu je charakteristický větší rozstřík odtavených kapek a hrubší povrchová struktura svarové housenky.

3.4.4 Sprchový oblouk

Jedná se také o bezzkratový přenos kovu. Je typický pro nadkritické hodnoty svařovacího proudu od 200 A do 500 A a napětí až 40 V. Vyznačuje se vysokými hodnotami navaření a větší hloubkou závaru.

Kapky tekutého kovu jsou při něm jemně rozptýleny a vytvářejí tzv. sprchu. Z důvodu vysokého povrchového napětí CO₂ ho nelze v tomto ochranném plynu realizovat. Vhodné jsou např. směsné plyny tvořené Ar (min. 80%), CO₂ a O₂.

Tento druh přenosu je vhodný pro svařování ve vodorovných polohách (PA,PB). V ostatních polohách je jeho využití omezené.



Obr. 11: Průběh sprchového přenosu kovu obloukem [17]

Průměr drátu (mm)	Rychlost posuvu drátu (m/min)	Svařovací proud (A)	Svařovací napětí (U)
0,8	11	180	26
1,0	10	220	28
1,2	8	280	30

Tab. 1: Teoretické nastavení parametrů pro sprchový přenos [2]

3.4.5 Impulsní oblouk

Specifická forma bezzkratového přenosu kovu, která svými parametry překrývá oblasti zkratového i sprchového oblouku. Jeho průběh je řízen elektronicky s danou frekvencí impulsního proudu. Moderní zdroje umožňují střídání impulsní frekvence od 20 do 500 Hz s dlouhými pulsy od 0,5 do 10 Hz. Mezi hlavní výhody využití nižší efektivní hodnoty impulsního proudu v porovnání s proudem konstantním, což má za následek menší hodnotu vneseného tepla do svaru.

3.4.6 Rotující oblouk

Využívá vyššího napětí na oblouku (až 65 V) a delší výlet drátu (nad 20 mm). Hodnoty svařovacího proudu se pohybují v rozmezí 400 až 600 A, což tento proces předurčuje ke strojnímu svařování. Výkon navaření se pohybuje mezi 2 až 5 Kg/ hod. Vysokou hodnotou silového magnetického pole působícího na natavený konec odtavujícího se drátu dochází k jeho „roztáčení“ a vytváření kuželové plochy. Výhodou tohoto procesu je široký a hluboký svarový spoj.

3.5 Stanovení parametrů svařování

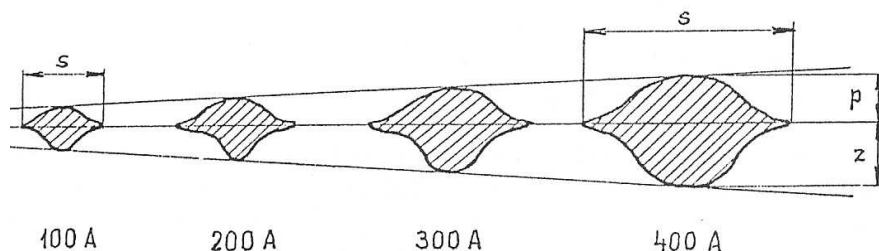
3.5.1 Svařovací proud [1][5]

Hodnota protékajícího proudu má na samotný svar rozhodující vliv. Zvýšíme-li hodnotu protékajícího proudu, zvětší se hodnota proudové hustoty, což má vliv na velikost a tekutost svarové lázně. S narůstající hodnotou proudu se při zachování napěťových hodnot výrazně prohlubuje hloubka závaru, ovšem šířka svaru se zvyšuje relativně málo.

Svařovacím proudem se výrazně ovlivňuje charakter přenosu kovu v oblouku:

- růstem proudu roste frekvence kapek,
- intenzita proudu podle složení ovlivňuje síly působící na kapky kovu,
- růstem proudu se u běžných typů přenosů kovu zmenšuje objem kapek.

Z hlediska kvality svaru je výhodnější menší průměr drátu, jelikož dává větší počet drobných kapek a výsledná kvalita povrchové housenky je velmi dobrá.



Obr. 12: Závislost tvaru svaru na velikosti elektrického proudu [1]

3.5.2 Svařovací napětí [1]

Napětí na oblouku se mění podle délky oblouku a na odtavovací výkon má zanedbatelný vliv. Výrazný vliv má napětí na šířku svarové housenky (viz obr.13). Hloubku závaru však ovlivňuje napětí pouze nepatrně. Napětí na oblouku má důležitý vliv na dosažení optimálních podmínek samoregulace délky oblouku a ustálení pracovního bodu.

Obecná platnost nastavení hodnoty napětí:

$$U = 15 + 0,035 \cdot I_s \quad [V] \quad (3.1)$$

U= pracovní napětí

I_s= svařovací proud

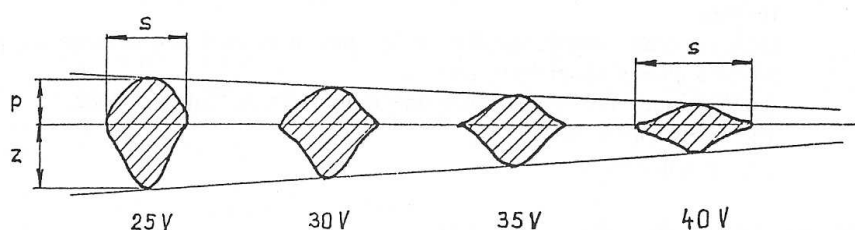
Vliv velikosti pracovního napětí na přenos s ohledem na použitý plyn:

- rozsah napětí od 14 do 21 V odpovídá zkratovému procesu v CO₂ a ve směsných plynech,

- při napětí nad 21 V probíhá bezzkratový proces,
- v rozmezí od 22 do 27 V odpovídá bezzkratovému přenosu kovu ve směsném plynu a částečně zkratový přenos s velkými kapkami kovu v ochranné atmosféře CO₂,
- při napětí nad 27 V probíhá při směsném plynu sprchový přenos.

Vysoké napětí zvyšuje délku oblouku a také propal svařovaných dílců. Zvyšuje se pravděpodobnost značného rozstříku kovu. Svarová lázeň je značně široká a mělká a v polohách, vyjma poloh PA a PB, se obtížně ovládá.

Nízká hodnota napětí pak bývá spojována s nestabilitou procesu, úzkou svarovou housenkou se značným převýšením svaru při vysoké rychlosti svařování. Mohou se vyskytovat tzv. studené spoje a dochází k nedokonalému natavení svarových hran.



Obr. 13: Závislost tvaru svaru na velikosti elektrického napětí [1]

4 Úvod do experimentální práce

4.1 Návrh experimentu

Samotný experiment je zaměřen na metody posouzení technologie svařování konvenční metodou MAG a inovovanou metodou ESAB SAT. Cílem zkušebního projektu je vytvoření vzorků, které budou následně podrobeny mechanické a ekonomické analýze.

Zkušební vzorky svařené metodou ESAB SAT™ budou podrobeny vybraným destruktivním zkouškám, které pro technologické posouzení svarů plně dostačují. Vzorky budou posouzeny na základě typu zvoleného vzorku dle následujících destruktivních zkoušek:

- Příčná zkouška tahem (ČSN EN ISO 4136)
- Zkouška lámavosti (ČSN EN ISO 5173)
- Zkouška rázem v ohybu (ČSN EN ISO 9016)
- Zkouška tvrdosti (ČSN ISO 9015)
- Zkouška makrostruktury (ČSN EN 1321)

Vzorky s tupým svarem – BW (Butt Weld) budou podrobeny všem typům destruktivních zkoušek. Vzorky se svarem koutovým – FW (Fillet Weld) budou podrobeny zkoušce tvrdosti a makroskopické kontrole.

Ekonomická část experimentu bude zaměřena na posouzení časů rychlosti svařování konvenční metody MAG a ESAB SAT™, energetickou náročnost obou metod či případnou eliminaci operací podružných, jako například rovnání, začišťování apod.

Cílem experimentu je specifikovat výhody pro jednotlivé oblasti posouzení se zaměřením pro využití v praxi. Potřebné vzorky a veškeré zkoušky budou provedeny v prostorách svařovny a laboratořích společnosti ESAB VAMBERK s.r.o.

4.2 Zkušební vzorky

4.2.1 Zhotovení vzorků

Pro získání potřebného počtu dat nezbytných pro posouzení obou metod bude svařen potřebný počet vzorků viz. tab. č.2 . Část vzorků poslouží jak pro destruktivní zkoušky, tak pro ekonomickou analýzu. Vybrané druhy vzorků budou svařeny oběma metodami, konvenční MAG i ESAB SAT™, zbylé pak pouze metodou SAT™.

Pro obě metody svařování je zvolen stejný typ ochranné atmosféry. Jedné se o směsný ochranný plyn – *feroline 10*, který je složen z 90-ti % argonu a 10-ti % oxidu uhličitého.

Č	Typ svaru (velikost svaru)	Metoda svařování	Rozměry 1 dílu svařovaného vzorku [mm]	Počet vzorků [ks]
1	BW	SAT TM MAG	15x350x200	3
2	FW (a2)	SAT TM	3x150x60	1
3	FW (a3)	SAT TM	10x150x60	1
4	FW (a4)	SAT TM MAG	10x150x60	4
5	FW (a5)	SAT TM MAG	10x150x60	3
6	FW (a8)	SAT TM	10x150x60	1
7	FW (a3)	SAT TM	3x150x60 (10x150x60)	1

Tab. 2: Celkový počet svařených vzorků

Vzorky ze sad číslo 1; 4 a 5 budou použity kromě destruktivních zkoušek také pro ekonomickou. Pro ty účely ekonomické porovnávací analýzy byly voleny odlišné parametry svařování.

4.2.2 Volba materiálu

K výrobě vzorků byla zvolena uhlíková konstrukční ocel S 355 J2 (11 503 dle ČSN). Materiál dodala společnost Feron a.s. v Hradci Králové. Tento materiál byl vybrán s ohledem na dobrou svařitelnost a dostupnost materiálu ve skladu svařovny. Ocel S 355 J2, klasifikovaná normou ČSN EN 10025-2 X jako nelegovaná ocel, je pro potřeby svařovny společnosti ESAB válcována za tepla a dodávána ve formě plechových tabulí. Zkušební kusy jsou následně děleny v závislosti na tloušťce plechu tabulovými nůžkami nebo plasmou.

Dobrá svařitelnost zvolené uhlíkové oceli je dána hlavně podílem obsahu uhlíku. Je-li jeho obsah do hodnoty 0,22 %, je zaručena dobrá svařitelnost.

S vyšším obsahem procentuelního podílu uhlíku v oceli se sice zvyšuje mez kluzu, mez pevnosti a tvrdost, to vše však na úkor snížení plasticity a zhoršení podmínek pro svařování. Obsah uhlíku je tedy u svařitelných ocelí omezena na hodnotu $C \leq 25\%$. Při dodržení těchto hodnot uhlíku se svarové spoje nemusejí přehřívát. Nižší svařitelnost může způsobit také větší tloušťka materiálu nad 25 mm. Pro experiment byly zvoleny ocelové plechy tloušťky 3, 10 a 15 mm.

Zvolená ocel S 355 J2 se používá pro svařovaných, šroubovaných nebo nýtovaných konstrukcí. Ve stavebním průmyslu nachází tato ocel své uplatnění například při výrobě mostních nebo jeřábových konstrukcí či hal. Ve strojírenství pak v oblasti výroby nosných konstrukcí strojů a méně namáhaných strojních dílů. Všeobecné požadavky pro svařování ocelí jakostních stupňů JR, J0, J2 a K2 jsou podrobně uvedeny v normě EN 1011-2 (obloukové svařování feritických ocelí).

Jakost J2 označuje ocel plně uklidněnou (FF). Ta obsahuje prvky se silnou schopností vázat dusík a musí obsahovat jejich dostatečné množství (např. obsah Al min. 0,02 %).

Důležité vlastnosti oceli S 355 J2 z pohledu prováděných zkoušek:

- Rm (mez pevnosti) - 510 MPa
- Re (mez kluzu) - 355 MPa
- Zaručená min. nárazová práce - 27 J při teplotě: -20°C

Svařitelnost oceli S 355 J2 – uhlíkový ekvivalent (CE):

K eliminaci vodíkového praskání, známého také jako studené praskání, existuje několik metod pro stanovení přehřevu. Zvolená metoda je založena na rozsáhlých praktických zkušenostech a informacích vztažených převážně pro uhlíko-manganové typy ocelí a je popsána v ČSN EN ISO 1011-2. Dle této normy je stanovení vhodného přehřevu ve snaze zamezit vodíkovému praskání závislé na chemickém složení základního materiálu a uhlíkovém ekvivalentu CE.

C	Mn	Si	P	S
Max. [%]	Max. [%]	Max. [%]	Max. [%]	Max. [%]
0,20	1,60	0,55	0,025	0,025

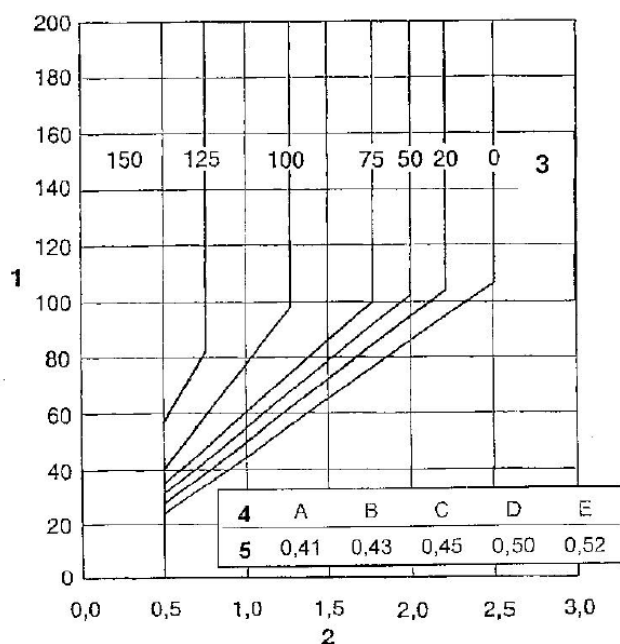
Tab. 3: Katalogové hodnoty chemického složení oceli S355J2.

Uhlíkový ekvivalent (CEV) se vypočte dle empirického vzorce :

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Cu+Ni}{15} \quad [\%] \quad (4.1)$$

Jelikož do uhlíkového ekvivalentu započteme pouze prvky C a Mn, připočteme k vypočtené hodnotě konstantu 0,03, která zahrnuje stopové prvky. Maximální podíl uhlíku je vyjádřen pro oceli tloušťky ≤ 16 mm. Maximální hodnota CEV je tedy 0,45. Je-li $CEV \leq 0,45$ a je-li zároveň $C \leq 0,20$ hm%, nejsou vyžadována další přípravná opatření. Svařitelnost oceli S355J2 je tedy zaručena.

Nejúčinnější možností eliminace vodíkového praskání je snížení přechodu vodíku do svaru z přídavných svařovacích materiálů. Případné použití předeřevu při svařování je tedy závislé na hodnotě obsahu vodíku v přídavném materiálu, tloušťce svařovaných materiálů a velikosti tepelného příkonu. Dle normy ČSN EN ISO 1011-2 je přídavnému materiálu *AristoRodTM* přiřazen stupeň obsahu vodíku – „C“. Toto zařazení představuje hodnotu obsahu difúzního vodíku od 5 do 10 ml ve 100g svarového materiálu. Druhou významnou hodnotou je určení kombinované tloušťky svařovaných materiálů, která je stanovena jako součet průměrných tloušťek základních materiálů do vzdálenosti 75 mm od svarové hrany. Tyto získané hodnoty slouží spolu s velikostí tepelného příkonu, k vyhodnocení podmínek pro svařování ocelí. Postup svařování tedy určíme z grafu viz. obr. 14.



Obr. 14: Určení teploty předeřevu [16]

Kombinované tloušťky základních materiálů pro námi vytvořené vzorky nedosahují v kombinaci s teplotním příkonem ani v jednom případě hodnot, které by vyžadovaly použití přehřevu.

4.2.3 Svařovací zařízení

Zdroj svařování

Jelikož pro obě svařovací metody MAG i ESAB SATTM fungují na stejném principu, můžeme použít jediný svařovací zdroj – OrigoTMMig 5002c. Tento, svojí konstrukcí robustní konvertorový svařovací zdroj je předurčen pro plnění náročných aplikací. S OrigoTMMig 5002c lze svařovat metodami MIG/MAG a MMA. Digitální komunikace je zajištěna pomocí sběrnice CAN a díky menšímu počtu kabelů je zajištěna zvýšená provozní spolehlivost.



Obr. 15: Svářecí zdroj OrigoTMMig 5002c [12]

Napájecí zdroje jsou kompatibilní s moderními podávacími systémy Aristo™ Feed 3004 U6, Aristo™ Feed 4804 U6 a Aristo™ YardFeed 2000. Origo™ Mig 5002c se používá při svařování konstrukcí, stavbě lodí, ve slévárenském průmyslu apod.

Technické údaje

• Napájecí napětí	400-415; 3 x 50/60	[V;Hz]
• Přípustné zatížení při:		
• 60 % DZ	500; 39	[A;V]
• 100 % DZ	400; 34	[A;V]
• Nastavitelný rozsah proudu	16 – 500	[A]
• Nastavitelný rozsah napětí	8 – 60	[V]
• Napětí naprázdno	62	[V]
• Výkon (P) naprázdno	550	[W]
• P s chladicí jednotkou	750	[W]
• Účinník při maximálním proudu	0,90	[-]
• Účinnost při max. proudu	72	[%]
• Rozměry dxšxv	830x640x835	[mm]
• Hmotnost	185	[kg]
• Hmotnost s chlad. jednotkou	199	[kg]
• Provozní teplota	od -10 do +40	[°C]
• Třída krytí	IP 23	

Podávací jednotka

Elektronicky řízená podávací jednotka Aristo™ Feed 3004 U6 zajišťuje přesné nastavení pro zajištění stabilního hoření oblouku. Její součástí je čtyřkladkový podávací mechanismus zajišťující rovnoměrný posuv přídatného drátu. Klady jsou dimenzovány pro maximální velikost drátu o průměru 1,6 mm. Veškeré hodnoty se nastavují na přehledném panelu ovládání.

Všechny podávací jednotky řady AristoFeed splňují požadované bezpečnostní standardy IEC – 60974-5 pro výkon operací pod nízkým napětím. Samotný podávací mechanismus je pro obsluhu snadno přístupný což značně usnadňuje mechanickou část výměny drátu.



Obr. 16: Podavač
Aristo™ Feed 3004 U6 [12]

QSet™ – funkce, která je součástí podavačů řady Aristo™ Feed a nabízí automatický způsob nastavení všech parametrů svařování pro kombinaci drát – plyn. QSet™ je rychlá volba pro nastavení zadaných parametrů bez nutnosti volby synergických linií. Vše je funkčně zajištěno pouze jedním tlačítkem.

Jednotlivé funkce panelu: [12]

- QSet™
- 2/4 takt
- Vyplňování kráterů
- Creep start, Hot start a nastavitelný čas dohřívání
- Předfuk a dofuk plynu
- Digitální V/A metr
- Zavádění drátu, profuk plynem
- Paměť na deset parametrů
- Pulz

Technické parametry

- | | | |
|---------------------------|-------------|-----------|
| • Napájení | 42; 50/60 | [V;Hz] |
| • Kapacita cívky | 18 | [kg] |
| • Rychlost podávání drátu | 0,8 – 25 | [m/min] |
| • Rozměry | 690x275x420 | [mm] |
| • Hmotnost | 15 | [kg] |

4.3 Návrh provedení destruktivních zkoušek

4.3.1 Příčná zkouška tahem

Tato zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 4136 – Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem. Norma stanovuje rozměry zkušebních tyčí a postup provedení zkoušky, která slouží ke zjištění pevnosti v tahu místa lomu tupého svarového spoje. Norma je platná pro kovové materiály všech výrobních tvarů.

Touto zkouškou se zjišťují následující mechanické parametry svarového spoje.

- mez pevnosti- R_m [MPa],
- mez kluzu - R_e [MPa],
- kontrakce - Z [%],
- tažnost - A [%].

Princip zkoušky: - zkušební vzorek vytvořený napříč svarového spoje bude v trhacím zařízení plynule zatěžován až do přetržení. Není-li stanoveno jinak, provádí se zkouška tahem při okolní teplotě $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. [16]

Zkušební vzorek musí být vytvořen ze svarku, kolmo na svarový spoj tak, aby po mechanickém opracování zkušebního vzorku zůstal svar v jeho středu. Každý vzorek bude označen způsobem, ze kterého bude patrné z jaké části zkušebního svařeného dílu byl odebrán. Není-li výrobkovou normou stanoveno jinak, nesmí se na svarovém spoji nebo zkušební tyči provádět povrchová úprava, která by „zkreslila“ výsledky tahové zkoušky.

Pro dělení materiálu ve směru rovnoběžně s původním povrchem svařeného vzorku se nesmí použít tepelné řezání. Z důvodu možného tepelného ovlivnění bude vzorková tyč odebrána třískovým obráběním. Tloušťka zkušebního vzorku t_s musí být stejná jako tloušťka vzorku vedle svarového spoje. Zkušební tyče musí mít konstantní rozměr po celé rovnoběžné délce L_C . Rozměry musí odpovídat tabulce č.4. (dle ČSN EN ISO 4136)

Označení		Značka	Rozměry [mm]
Celková délka zkušební tyče		L_t	Dle zkušebního stroje
Šířka hlavy		b_1	$b+ 12$
Šířka rovnoběžné délky	plechy	B	12 pro $t_s \leq 2$ 25 pro $t_s > 2$
	trubky	B	6 pro $D \leq 2$ 12 pro $50 < D \leq 168,3$ 25 pro $D > 168,3$

Tab. 4: Rozměry zkušebních kusů dle normy ČSN EN ISO 4136 [15]

Zkouška bude provedena elektromechanickým zkušebním zařízením INSTRON 1197.

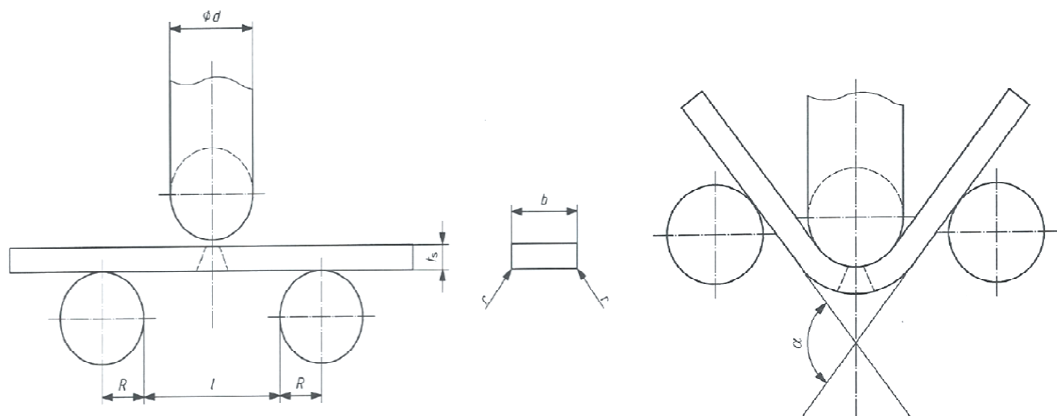
Postup zkoušky: - zkušební tyč bude plynule a postupně zatěžována a následně vyhodnocena dle ISO 6892. Poloha lomu se musí zaznamenat a uvést v protokolu. Po přetržení zkušební tyče budou vyhodnoceny lomové plochy a případné vady, které by mohly negativně ovlivnit zkoušku. Pokud se vyskytnou tzv. rybí oka, budou zaznamenána do zkušebního protokolu a jako vady se budou považovat pouze jejich středové oblasti. [15]

Tato zkouška bude provedena pro vzorky svařené metodou ESAB SAT™.

4.3.2 Zkouška ohybem

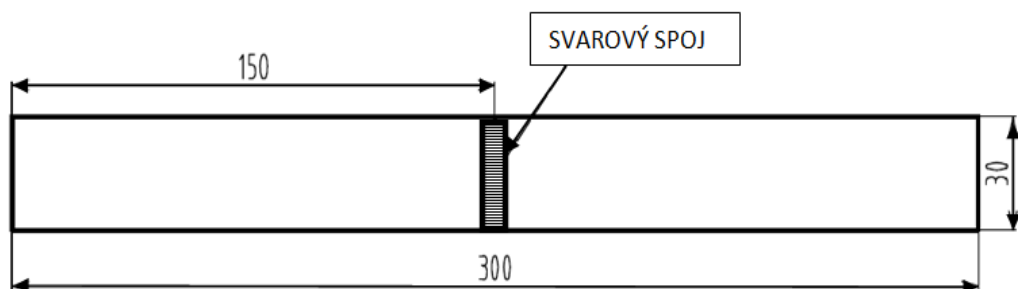
Tvar a rozměry zkušebních tyčí musí být v souladu s normou ČSN EN ISO 5173. Výše zmíněná norma stanovuje postup pro správné provedení příčné zkoušky ohybem. Vzorkové kusy se musí být ohýbány ze strany lící (vrchní část svaru) a ze strany kořene svaru. Není-li ustanoveno jinak, provádí se zkouška při okolní teplotě $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$.

Hrany zkušebního vzorku musí být mechanicky zaobleny. Poloměr zaoblení však nesmí překročit hodnotu $0,2t_s$ a maximálně do 3 mm.



Obr. 17: Zkouška ohybem – ze strany kořene svaru [13]

K relevantnímu vyhodnocení pro náš experiment je zapotřebí vyrobit cca 6 ks vzorků (viz obr. 18). 3 ks budou ohýbány na úhel 180° z vrchní strany svaru 3 ks ze strany kořene.

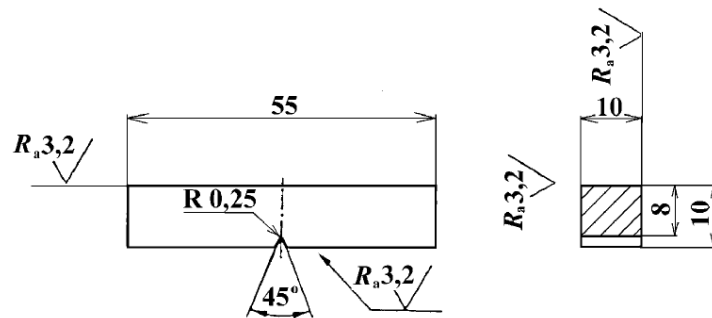


Obr. 18: Rozměry zkušební tyče

4.3.3 Zkouška rázem v ohybu

Jedná se o dynamickou mechanickou zkoušku. Dochází při ní k plastické deformaci zkušební tyče a bude se při ní uplatňovat vliv vnějších činitelů, kterými jsou například teplota zkušebního vzorku a rychlost deformace. Zkouška se řídí normou ČSN EN ISO 9016 a musí být provedena podle ISO 148.

Úkolem této zkoušky je zjištění vrubové houževnatosti svarového materiálu a materiálu z TOO. Zkouška se provádí na kyvadlovém kladivu – Charpyho kladivo.



Obr. 19: Rozměry zkušební tyče s V – vrubem [13]

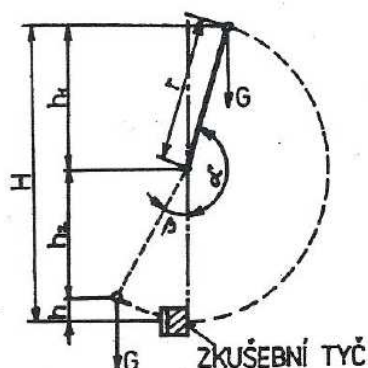
Pro zkoušku je zapotřebí vyrobit 9 ks zkušebních tyčí, kdy je zapotřebí vyrobit 3 ks s vrubem z oblasti svaru a 3 ks s vrubem z oblasti linie natavení (viz. obr. 20) a 3 ks s vrubem v oblasti základního materiálu.

Střed svaru	Pojmenování	Linie natavení/spoje
Zobrazení		Zobrazení
	VHS a/b (Tlakový svar)	
	VHS a/b (Tavný svar)	

Obr. 20: Povrch tyče s vrubem rovnoběžným s povrchem zkušební tyče [14]

Pro vybraný materiál S 355 J2 je zkouška prováděna při teplotě zkušebního vzorku - 20°C. K ochlazení se používá tekutý dusík, nebo CO_2 .

Hodnota vrubové houževnatosti (KCV) se vypočítá z poměru nárazové práce (K) a průřezu (S_0) zkušební tyče v oblasti vrubu.



Obr. 21: Kinematika pohybu Charpyho kladiva

$$KCV = \frac{KV}{S_0} \quad [\text{J.cm}^{-2}] \quad (4.2)$$

Spotřebovaná práce je určena vztahem:

$$K = Gr. (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (4.3)$$

Účelem celé zkoušky je porovnání houževnatosti materiálu z oblasti svarového spoje, tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a základního materiálu. Další úlohou je zjištění případných typů a rozměrů vad.

4.3.4 Makroskopická zkouška

Makroskopická zkouška se provádí podle normy ČSN EN 1321 – Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů. Tato metoda předepisuje metody přípravy vzorku a postup zkoušky pro objektivní makroskopickou a mikroskopickou zkoušku. Ta zaměřena především na pozorování vad materiálu, hodnocení chemické nestejnorodosti a pozorování makrostruktury obvykle příčného řezu vzorku.

Předepsaný vzorek bude zkoumán při malém zvětšení (do 50:1) po chemickém naleptání. Zkouška makrostruktury musí obsahovat neovlivněný základní materiál a musí být řádně zdokumentována minimálně jedním snímkem makrostruktury.

Pro naleptání bude použito chemické cesty, kdy je vzorek ponořen do leptacího roztoku, nebo je leptadlem potírán. Chemické složení leptadla lze nalézt v závislosti na složení materiálu vzorkového kusu v metalografické příručce. Před samotným naleptáním bude vzorek vybroušen a následně vyleštěn.

Makroskopická zkouška nám umožní posoudit kvalitu svaru. Bude posouzena míra tepelného ovlivnění spoje s charakterem přechodu mezi strukturou materiálu a svaru a případná přítomnost vad ve svarovém spoji.

Počet vzorků:

- FW – a-2-3-3: 1ks
- FW – a-3-10-3: 1ks
- FW – a-3: 1ks
- FW – a-4-2x: 1ks
- FW – a-8: 1ks
- BW: 1ks

4.3.5 Zkouška tvrdosti

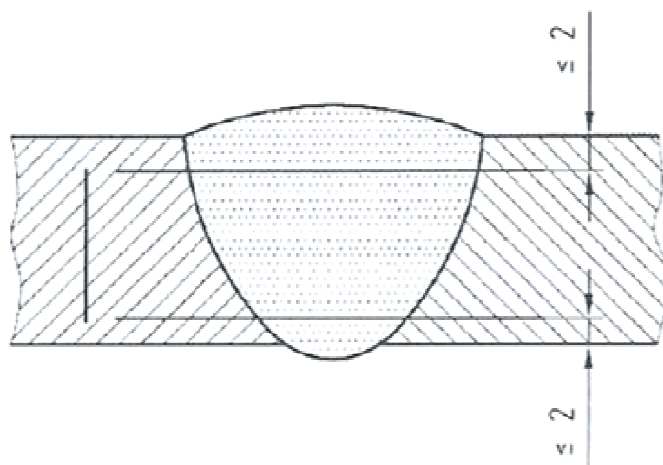
Zkouška tvrdosti se provádí za účelem stanovení nejvyšší a nejnižší hodnoty tvrdosti svarového materiálu, přechodové tepelně ovlivněné oblasti a základního materiálu. Zkoušení tvrdosti musí být provedeno podle ISO 6507-1, nebo ISO 6506 -1. Zkoušky tvrdosti mohou být provedeny formou řady vtisků - R, nebo jednotlivými vtisky –E. Nebude-li stanoveno jinak, bude zkouška uskutečněna při teplotě okolí (23 ± 5) °C.

Norma ISO 9015 ustanovuje podmínky zkoušky na příčných řezech svarových spojů obloukově svařených kovových materiálů. Odpovídá zkouškám podle Vickerse dle ISO 6507 – 1, se zkušebním zatížením 98,07 N (HV 10). Do zkušebního vzorku bude vlačován konstantní silou vlačován diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136°. Následně budou změřeny střední rozměry obou úhlopříček u vtisku.

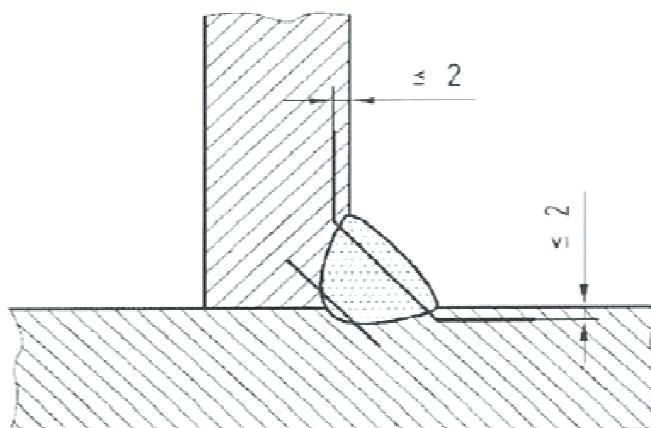
Počet vzorků:

- FW – a-4-2x: 1ks
- FW – a-8: 1ks
- BW: 1ks

Na obr. jsou znázorněny příkladové linie pro aplikování zkušebních vtisků pro námi požadované druhy svarových spojů.



Obr. 22: Linie rozložení vtisků – tupý svar [12]



Obr. 23: Rozložení vtisků – koutový svar [12]

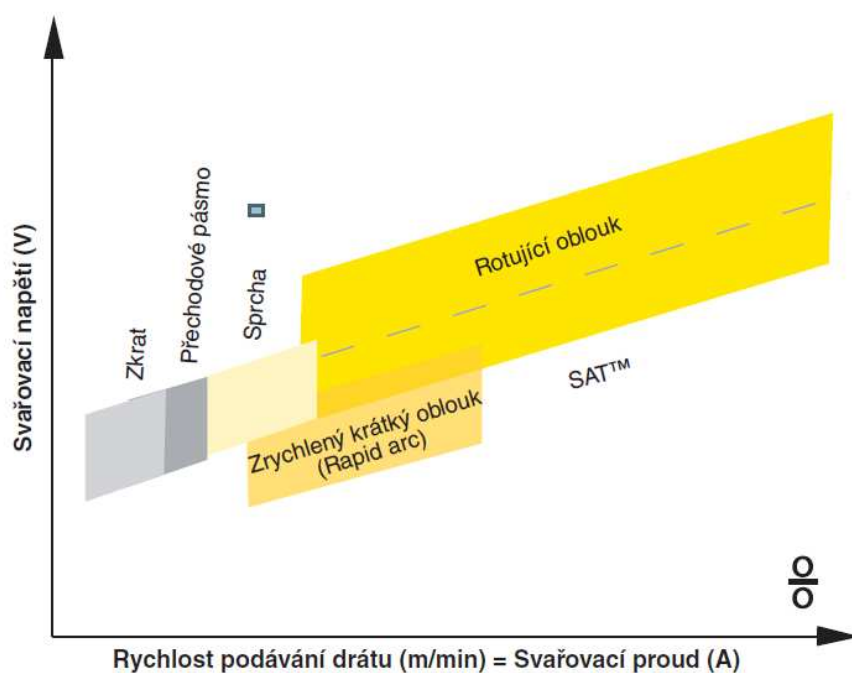
Rozmístění a počet musí být dostatečný k určení oblastí se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí, které vznikají v důsledku svařování. Pro náš materiál S355J2 je voleno zatížení jehlanu HV 10, tj. 98 N (10kp) působící po dobu 10 až 15 s. Povrch materiálu musí být rovný a hladký bez okujené vrstvy. Při úpravě povrchu nesmí dojít ke změně vlastností materiálu vlivem ohřevu nebo případných deformací za studena.

5 ESAB Swift Arc Transfer (SATTM)

5.1 Princip procesu *ESAB SATTM* [12]

Proces *ESAB SATTM* je velmi produktivní metodou svařování MAG, která používá velice stabilní nepoměděné dráty *OK AristoRodTM*.

ESAB SATTM je ve své podstatě inovativním způsobem upravena metoda svařování MAG, která využívá podstatně větší rychlosti podávání drátu než jakou využívá konvenční MAG. Pro proces svařování *SATTM* je vhodný moderní invertorový zdroj, klasicky používaný pro metodu svařování MAG společně s podavačem drátu např. *RoboFeed 3004* od společnosti *ESAB* a s ovládací jednotkou *U8₂* dokáže zajistit rychlost podávání drátu až 30 m/min. Synergické linie jsou dostupné pro tři průměry drátu *OK AristoRodTM* a různé druhy ochranných plynů. Převážně se využívají směsné ochranné plyny skládající se z kombinací Argonu, CO_2 a O_2 .



Obr. 24: Oblasti použití jednotlivých typů oblouků pro metody MIG/MAG.[12]

Na obrázku č. 24 jsou znázorněny druhy svařovacích oblouků, ke kterým dochází během procesů svařování metodami MIG a MAG. Jednotlivé oblasti jsou zde zobrazeny v závislosti svařovacího napětí na rychlosti podávání drátu. Zrychlený krátký oblouk vzniká v oblasti parametrů, jež jsou vhodné pro sprchový přenos a to tím způsobem, že je výrazně sníženo svařovací napětí.

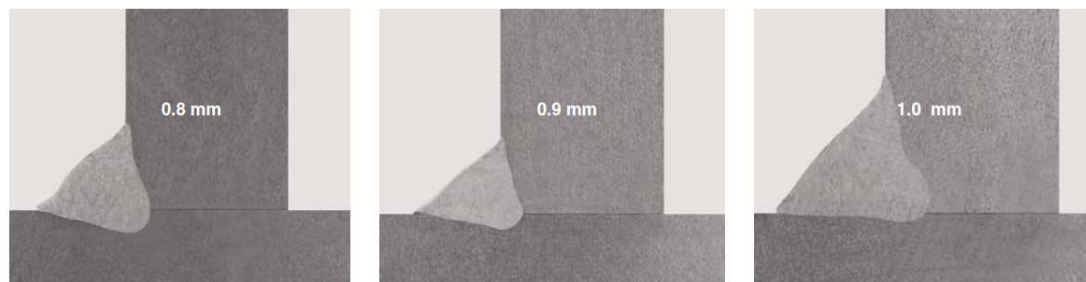
Swift Arc Transfer (SATTM) je představitelem doposud nepoužívaného způsobu svařování MAG. Tento typ svařování byl společností ESAB intenzivně vyvíjen pro své přednosti a s ohledem na odstranění nedostatků typických pro konvenční MAG. Pod hlavičkou SATTM je skryt celý kompletní balíček technologického vybavení, přídavných svařovacích materiálů a v neposlední řadě také know-how správného procesního postupu.

Samotný proces ESAB SATTM je schopen operovat s několika průměry drátu s různou hodnotou odtavujícího výkonu. ESAB SATTM využívá vzhledem k vysoké rychlosti posuvu přídavného materiálu menší průměry drátů. Při větším průměru přídavného drátu a vysoké rychlosti posuvu drátu stoupají hodnoty svařovacího proudu na velmi vysoké hodnoty (viz tab. 5). Maximální hodnota proudu, při které je možné svařovat ručním vedením, je těsně nad hranicí 300 A. ESAB SATTM tedy využívá převážně menší průměry drátů (0,8 a 0,9 mm) při rychlostech posuvu až 25 m/min. Vzhledem k vysoké dynamice oblouku a velkému průvaru lze např. drátem \varnothing 0,8 mm svařovat materiál tloušťky 20 mm.

Na obr. 25 jsou ukázky průvaru koutových svarů provedených metodou SATTM při použití různých průměrů přídavných drátů, ovšem s konstantní hodnotou rychlosti posuvu. Tab.6 uvádí další svařovací parametry vztahující se ke svarovým spojům na obr. 21.

\varnothing sv. drátu [mm]	0,8	1,0	1,2
Rychlost podávání svářecího drátu	25 [m/min]	16 [m/min]	11,11 [m/min]
	220 [A]	240 [A]	330 [A]
		20 [m/min]	13,9 [m/min]
		300 [A]	400 [A]
Hodnota svářecího proudu		22 [m/min]	15,3 [m/min]
		330 [A]	450 [A]
		25 [m/min]	17,4 [m/min]
		375 [A]	500 [A]

Tab. 5: Teoretické hodnoty proudu v závislosti na posuvu drátu při ESAB SATTM



Obr. 25: Průvar koutových svarů plechů tl. 10 mm pro tři různé průměry přídatného drátu vytvořený metodou ESAB SATTM [9]

Průměr drátu	0,8 mm	0,9 mm	1,0 mm
Svařovací proud [A]	210	260	305
Rychlost podávání drátu [m/min]	20	20	20
Svařovací rychlost [cm/min]	75	95	125
Odtavný výkon [kg/hod]	4,7	6,1	7,4
Výlet drátu	19	19	20

Tab. 6: Hodnoty svařovacích parametrů koutových svarů k obr. 21

5.2 Přídavné materiály [9]



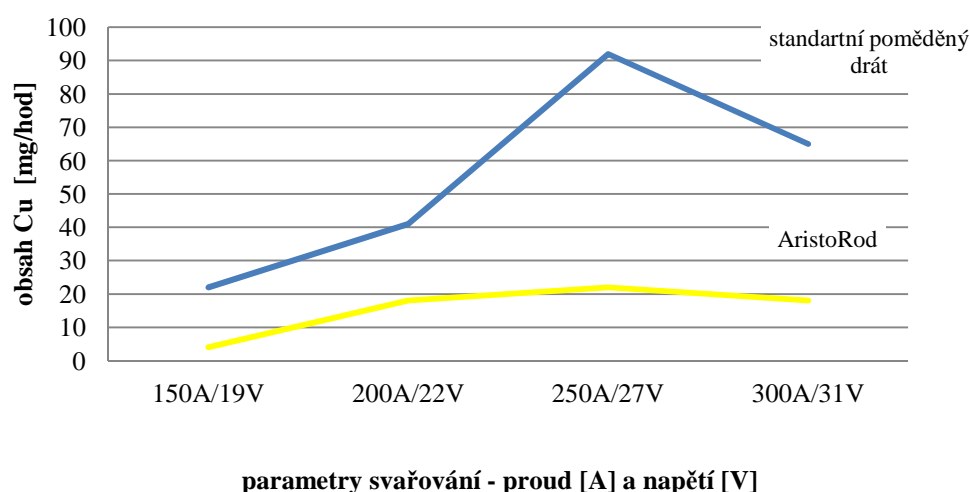
Obr.26: OK AristoRodTM [9]

Součástí metody ESAB SATTM je použití kvalitního přídatného drátu OK AristoRodTM. Jedná se o nový typ nepoměděných drátů, které svými speciálními vlastnostmi povrchu odolávají korozi během skladování, zlepšují průběh podávání přídatného drátu a zvyšují stabilitu svařovacího oblouku. OK AristoRodTM neznečišťuje podavač drátu, vodící bowdeny a kontaktní špičky částicemi mědi. Pomědění klasicky používaných drátů se provádí chemickou cestou, která nezajistí dokonalé spojení nanesené mědi

s materiálem přídavného drátu. To při dlouhodobém provozu způsobuje uvolňování mědi a zadírání bowdenů a kontaktních špiček. Vyráběný sortiment je součástí přílohy č. 1.

Dle výsledků testů zaměřených na množství produkovaných emisí, které se řídí normou ISO 15011 mají přídavné dráty značkové řady *OK AristoRodTM* výrazně nižší podíl zdraví škodlivých emisí nežli standardní poměděné dráty. Výsledky z měření, které provedl Institut für Schweibtechnik und Fügetechnik v Aachenu jsou znázorněny v grafu č. 1 .

Množství mědi ve svařovacích dýmech [mg/hod]



Graf. 1: Porovnání emisí Cu používaných přídavných materiálů [9]

Z hlediska ochrany zdraví svářečů se používání nepoměděných drátů jeví jako velice vhodné, jelikož měď obsažená ve svařovacích dýmech je zdraví značně škodlivá. Ve vyspělých zemích je požívání nepoměděných drátů podporováno mnohými zdravotnickými autoritami. Neméně podstatnou výhodou drátů *OK AristoRodTM* vysoká odolnost proti korozi při zhoršených skladovacích podmínkách. Přídavné dráty výrobní řady *OK AristoRodTM* jsou vyráběny v klasickém nebo ekonomickém balení viz. tabulka 7, v níž jsou uvedeny vybrané tři druhy drátů AristoRod, vhodné ke svařování námi zvoleného materiálu S355J2 (viz přílohy 3 až 5). Pro svaření zkušebních vzorků byl vybrán *OK AristoRodTM 12.50*. Společnost zaručuje dodržení kruhovitosti přídavných drátů s tolerancí 0,03 mm.

Typ drátu	ø 0,8 mm	ø 1,0 mm	ø 1,2 mm
OK AristoRod 12.50	69-0/ 15 kg	69-1/ 18 kg	69-1/ 18 kg
OK AristoRod 12.63	93-0/ 200 kg	93-2/ 250 kg 94-0/ 475 kg	93-2/ 250 kg 94-0/ 475 kg
OK AristoRod 12.57	69-0/ 15 kg	69-1/ 18 kg	69-1/ 18 kg

Tab. 7: Přehled vybraných balení **OK AristoRodTM** [9]

6 Provedení experimentu

6.1 Svaření zkušebních vzorků

6.1.1 Vzorky tupých spojů – BW

Vzorky tupého spoje byly zavařeny metodou konvenční MAG a metodou *ESAB SATTM* svářecím zdrojem *OrigoTM Mig 5002c* (viz kap. 4.2.3). V průběhu procesu svařování byly zaznamenány parametry svařování a jednotlivé svářecí časy, které se později sloužily jako podklad pro ekonomickou analýzu. Na kořenovou část byla z důvodu zvýšení kvality svaru použita keramická podložka. Všechny vzorky byly svařeny ručně.

- Konvenční MAG: (mat.: S 355 J2 – 330x400x15)

Bylo zapotřebí provést 4 svarové vrstvy. Pro každou vrstvu byly nastaveny odlišné svařovací parametry (viz tab.8).

Svar č.	Posuv drátu [m/min]	Proud [A]	Napětí [V]
1	3,2	130	17
2	7	260	26
3	8	280	25,7
4	11	310	29

Tab. 8 : Nastavené parametry svařování – konvenční MAG



Obr. 27: BW svar provedený metodou – konvenční MAG

- **ESAB SAT™**: (mat.: S 355 J2 – 330x400x15)

Na svaření postačily 3 svarové vrstvy.

Svar č.	Posuv drátu [m/min]	Proud [A]	Napětí [V]
1	16	230	27,5
2	16	250	28,5
3	22	295	31

Tab. 9 : Nastavené parametry svařování - ESAB SAT™



Obr. 28: BW svar provedený metodou ESAB SAT™

6.1.2 Vzorky koutových spojů - FW

Vzorky s koutovými svary (viz kap. 4.2.1) svařené metodou *ESAB SATTM* byly určeny pro zkoušku makrostruktury a vybrané pro zkoušku tvrdosti. Parametry zaznamenané při svařování vzorků oběma metodami jsou zaznamenány a vyhodnoceny v ekonomickém porovnání.

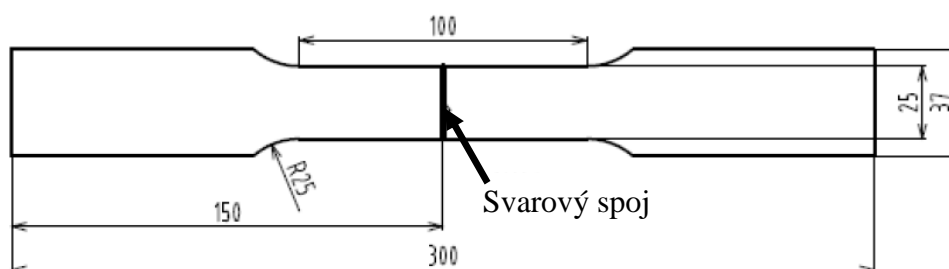


Obr. 29: Ukázky vybraných vzorků s koutovými svary - *ESAB SATTM*

6.2 Destruktivní zkoušky

6.2.1 Příčné zkoušky tahem

Ze svařených vzorků (BW svar) , byly metodou třískového obrábění vytvořeny zkušební tyče. Jejich geometrie a rozměry se řídí normou ČSN EN ISO 4136 a jsou závislé na síle použitého materiálu. Rozměry pro námi zvolený materiál tloušťky 15 mm je uveden na obr. 30.



Obr. 30: Rozměry zkušební tyče pro příčnou zkoušku tahem

Pro tuto zkoušku byly vyrobeny tři zkušební tyče požadovaných rozměrů. Podélně byla zkušební tyč frézou obrobena na tloušťku 13 mm.

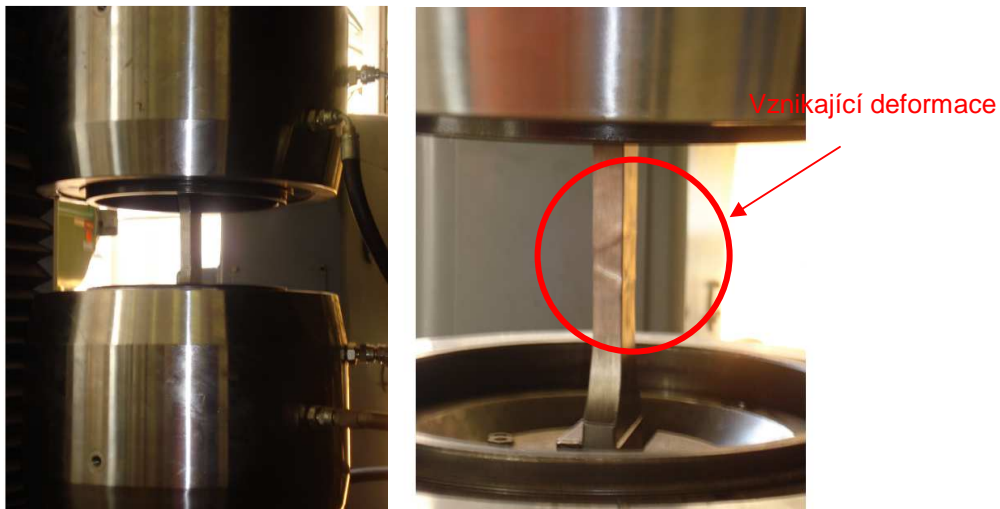


Obr. 31: Zkušební tyč pro zkoušku tahem



Obr. 32: Zkušební tyč – boční pohled

Zkušební tyče byly postupně upnuty do kleštin zkušebního stroje a postupně zatěžovány až do přetržení. Průběžné hodnoty tahové zkoušky byly postupně zaznamenány a graficky vyhodnoceny v tahovém diagramu. Ke kladnému vyhodnocení tahové zkoušky je zapotřebí aby k lomu u zkoumaného vzorku nedošlo ve svaru, ale v oblasti základního materiálu nebo tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 33: Upnutí zkušební tyče do kleštin s postupným zatížením

Při postupné zatěžování byla patrná deformace v oblasti TOO svarového spoje. Po dosažení mezních hodnot došlo k přetržení tyče.



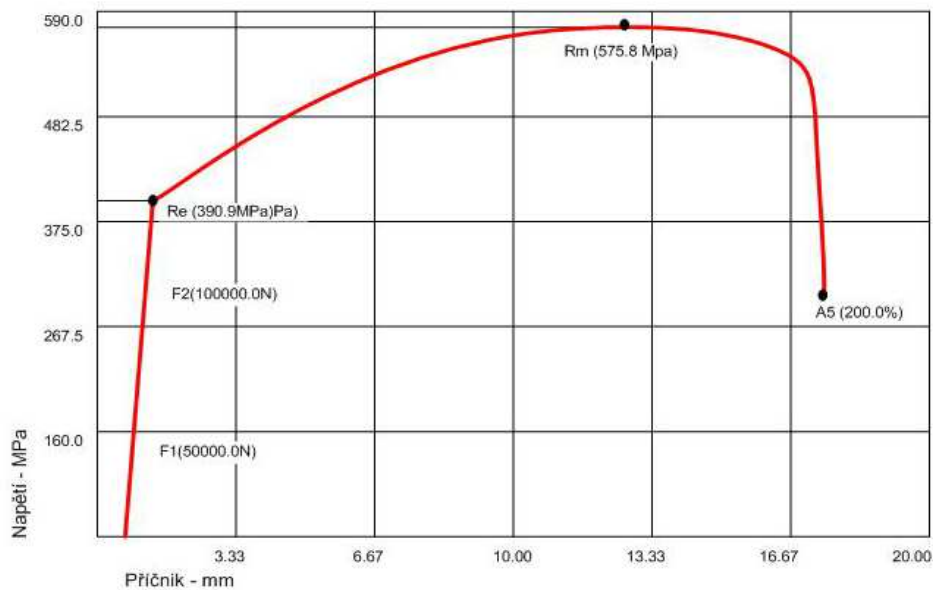
Obr. 34: Oblast přetržení zkušební tyče

Naměřené hodnoty:

1. Zkušební vzorek č. 1

Rozměr – a [mm]	Rozměr – b [mm]	Teplota (°C)	R _{p 0,2} MPa	R _m Mpa
13	24,9	+ 20 °C	390,99	575,80

Tab. 10: Hodnoty tahové zkoušky vzorku č.1

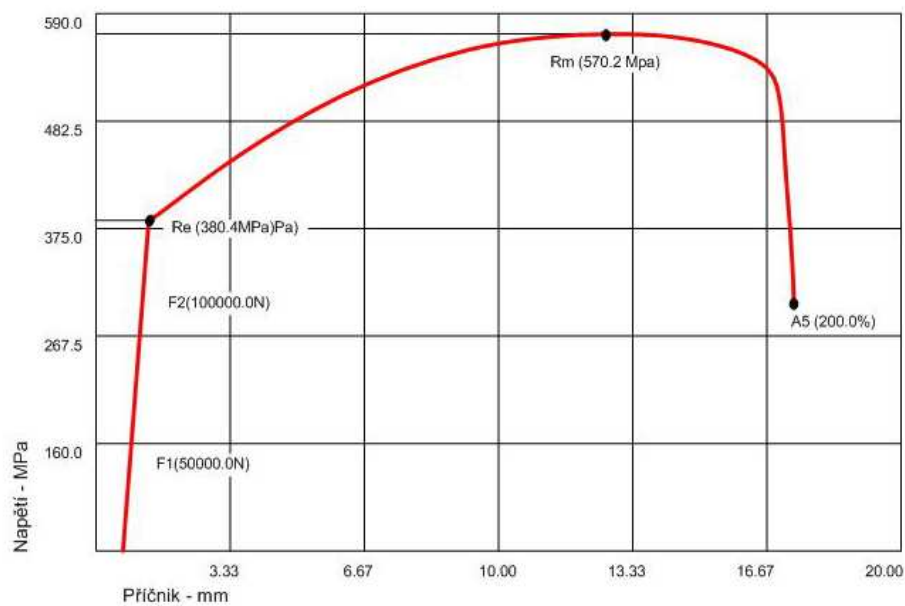


Graf. 2: Tahový diagram – vzorek č. 1

2. Zkušební vzorek č. 2

Rozměr – a [mm]	Rozměr – b [mm]	Teplota (°C)	Rp 0,2 Mpa	Rm Mpa
13	24,9	+ 20 °C	380,40	570,20

Tab. 11: Hodnoty tahové zkoušky vzorku č.2

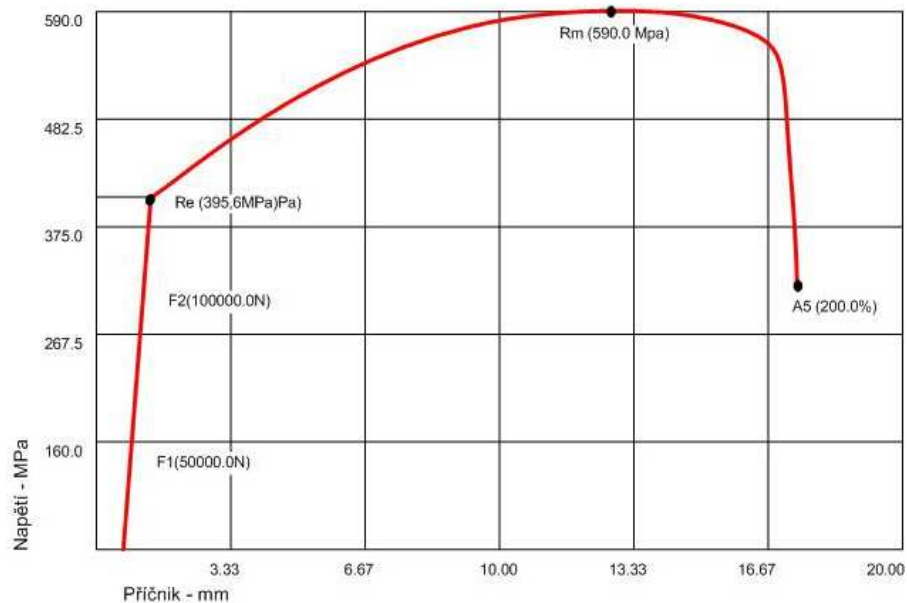


Graf. 3: Tahový diagram – vzorek č. 2

3. Zkušební vzorek č. 3

Rozměr – a [mm]	Rozměr – b [mm]	Teplota (°C)	Rp 0,2 Mpa	Rm Mpa
13	24,9	+ 20 °C	395,60	590,00

Tab. 12: Hodnoty tahové zkoušky vzorku č. 3



Graf. 4: Tahový diagram – vzorek č. 2

6.2.2 Zkoušky rázem v ohybu

Bylo vyrobeno celkem 9 ks vzorků, každý s V vrubem v jiné zkoušené oblasti (svar, TOO a základní materiál). Zkoušky se řídí normou EN ISO 148-1.

Průběh zkoušky a naměřené hodnoty:

Měřili jsme energii spotřebovanou k přerážení vzorku při teplotě -20°C. Hodnoty nárazové práce byly odečteny ze stupnice kyvadlového kladiva a spočtena hodnota vrubové houževnatosti (KCV). Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tab. 13 až 15.

1. Vzorové tyče z oblasti svaru

Vzorek č.	Teplota (°C)	Rozměr vzorku [mm] ŠxVxVvrub			Náraz.práce KV (J)	Vrub. houževnatost KCV (J/cm ²)
1	-20	10	10	8	71,8	89,7
2	-20	10	10	8	73,9	92,4
3	-20	10	10	8	72,5	90,6

Tab. 13: Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti pro oblast svaru

Průřez v ploše vrubu:

$$S_0 = a \cdot b = 10 \cdot 8 = 80 \text{ mm}^2 = 0,8 \text{ cm}^2 \quad (6.1)$$

Hodnotu vrubové houževnatosti KCV můžeme zkontrolovat výpočtem použitím vzorce - $KCV = \frac{K}{S_0} [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}]$

Příklad pro hodnou vzorku č.1 z tab.č.13.

$$KCV = \frac{KV}{S_0} = \frac{71,8}{0,8} = 89,7 [\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

2. Vzorové tyče z oblasti TOO

Vzorek č.	Teplota (°C)	Rozměr vzorku [mm] ŠxVxVvrub			Náraz.práce KV [J]	KCV [J/cm ²]
1	-20	10	10	8	74,4	93,0
2	-20	10	10	8	74,1	92,6
3	-20	10	10	8	77,0	96,4

Tab. 14: Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti pro oblast TOO

3. Vzorové tyče z oblasti základního materiálu

Vzorek č.	Teplota (°C)	Rozměr vzorku [mm] ŠxVxVvrub			Náraz.práce KV [J]	KCV [J/cm ²]
1	-20	10	10	8	81,0	101,2
2	-20	10	10	8	78,4	98,0
3	-20	10	10	8	80,5	100,6

Tab. 15: Výsledné hodnoty vrubové houževnatosti pro oblast zákl. mat.

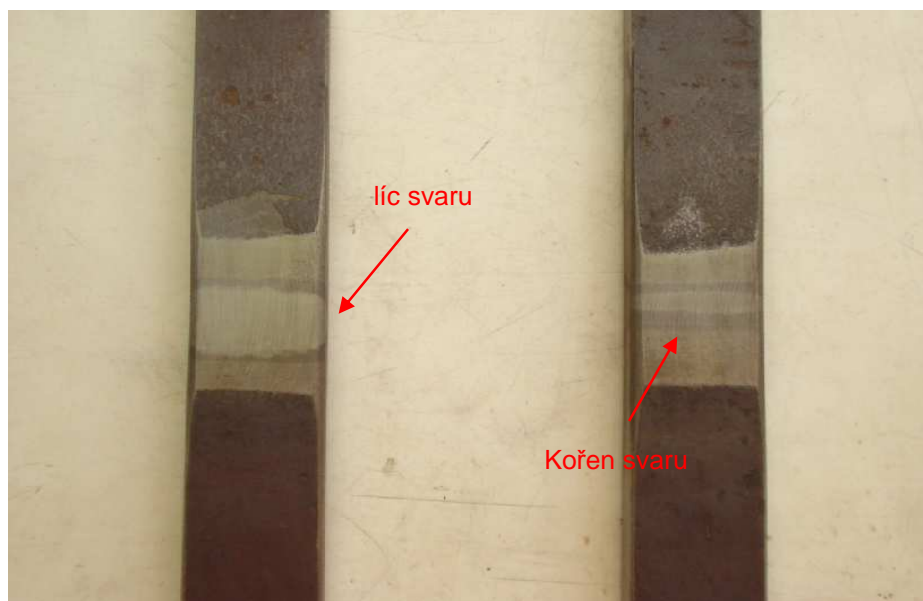
KCV ...Vrubová houževnatost [J/cm^2]

6.2.3 Zkoušky ohybem

Zkouška ohybem byla provedena na zkušební stroji německé firmy LOS - LOSENHAUSEN z roku 1938 s maximálním zatížením 35 000kg. Zkušební tyče (6ks) byly ze zkušebního svařeného vzorku mechanicky odděleny a upraveny na rozměry 300x30x13 (viz obr. 35).

Úprava povrchu:

Konečný stav byl upraven strojním třískovým obráběním a v oblasti svaru broušením



Obr. 35: Zbroušené zkušební tyče pro zkoušku ohybem

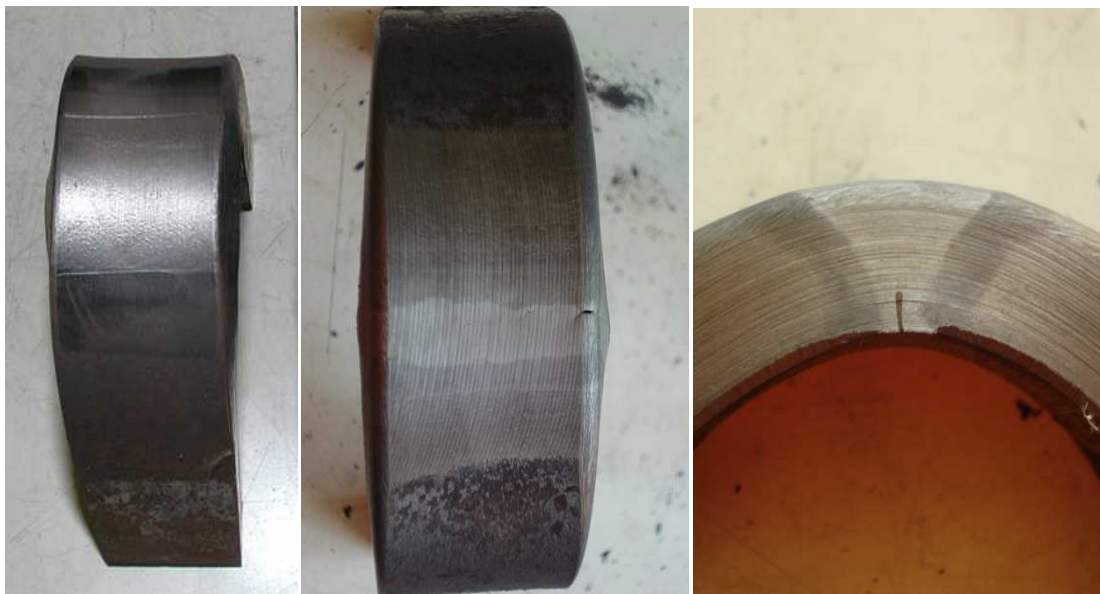
Průběh zkoušky:

Zkouška byla provedena tak, že se zkušební tyč položila mezi dva rovnoběžné podpěrné válečky se svarem ve středu vzdálenosti mezi nimi. Ohyb byl uskutečněn vertikálním pohybem trnu na osu svaru (viz obr. 36). Zkušební tyče byly postupně ohýbány ze strany kořene svaru (3 ks) a ze strany líce svaru (3 ks) na úhel 180° u všech zkoumaných vzorků. Zkouška probíhala při teplotě vzorků 20°C .



Obr. 36: Ohyb zkušební tyče ze strany kořene

Výsledný stav:



Obr. 37: Obr. : Výsledný povrch vzorků po ohybu

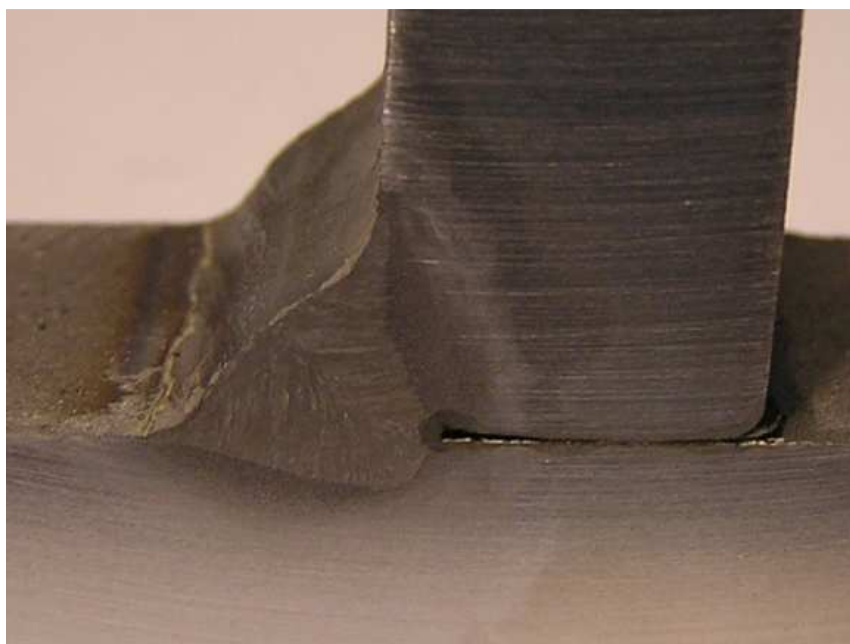
6.2.4 Makrostruktura

Počet a typ vzorků:

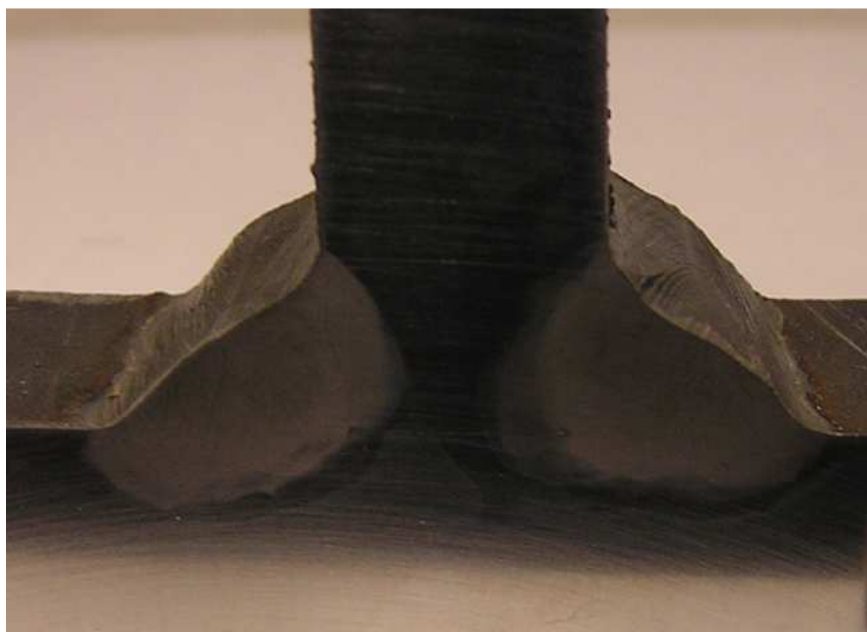
- | | |
|------------------|-----|
| 1) FW – a3-10-10 | 1ks |
| 2) FW – a4-2x | 1ks |
| 3) FW – a8 | 1ks |
| 4) FW – a3-10-3 | 1ks |
| 5) BW | 1ks |
| 6) FW – a2 | 1ks |

Vzorky pro makroskopické hodnocení byly připraveny způsobem sestávajícím z broušení za mokra na metalografických papírech, s postupně se snižující zrnitostí. Makrostruktura byla vyvolána 10% roztokem bromu (Br) v metylalkoholu (CH_3OH).

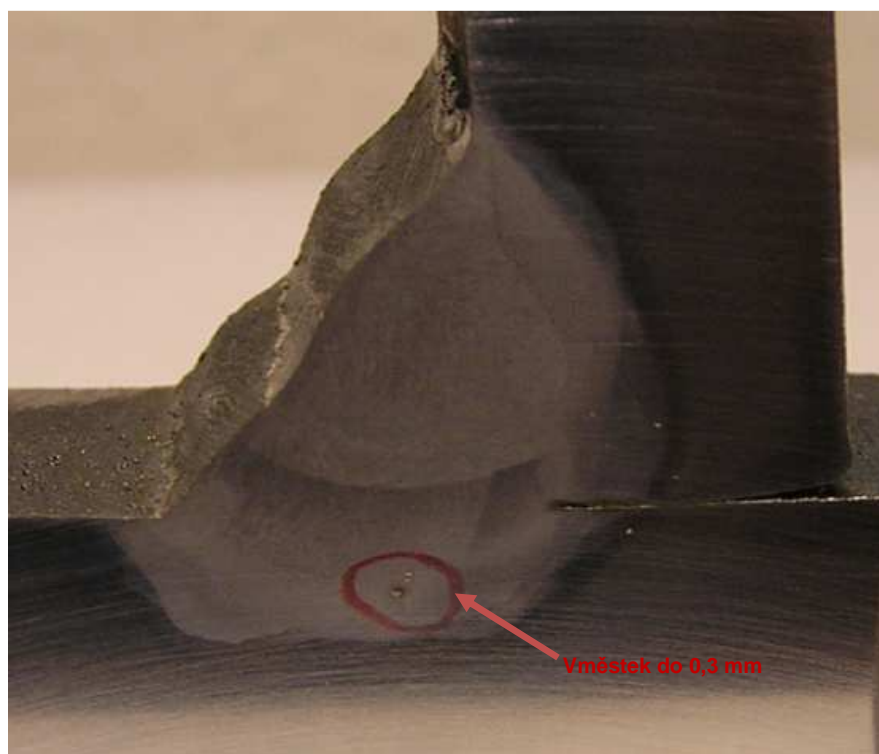
Makroskopické snímky jednotlivých vzorků svařených metodou ESAB SATTM:



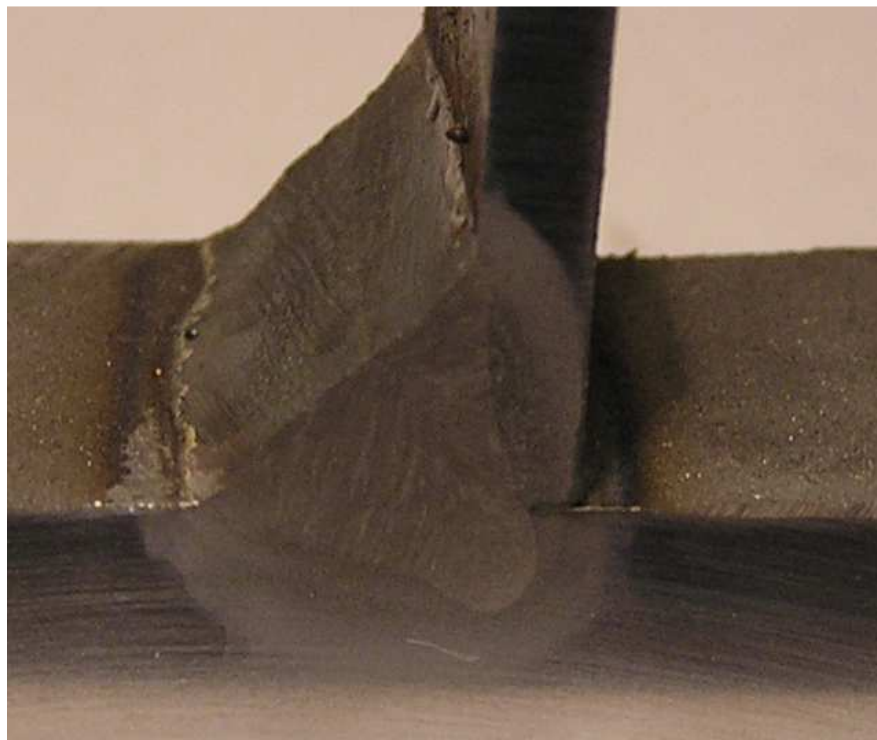
Obr. 38: Zkušební vzorek č.1 – FW – a3-10-10



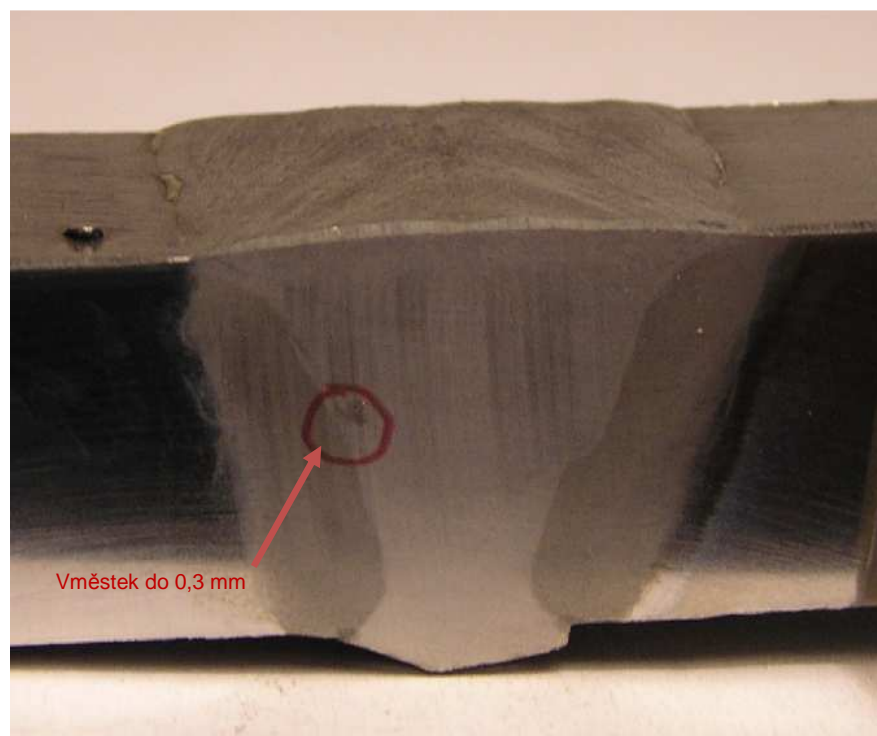
Obr. 39: Zkušební vzorek č.2 – FW – a4 -2x



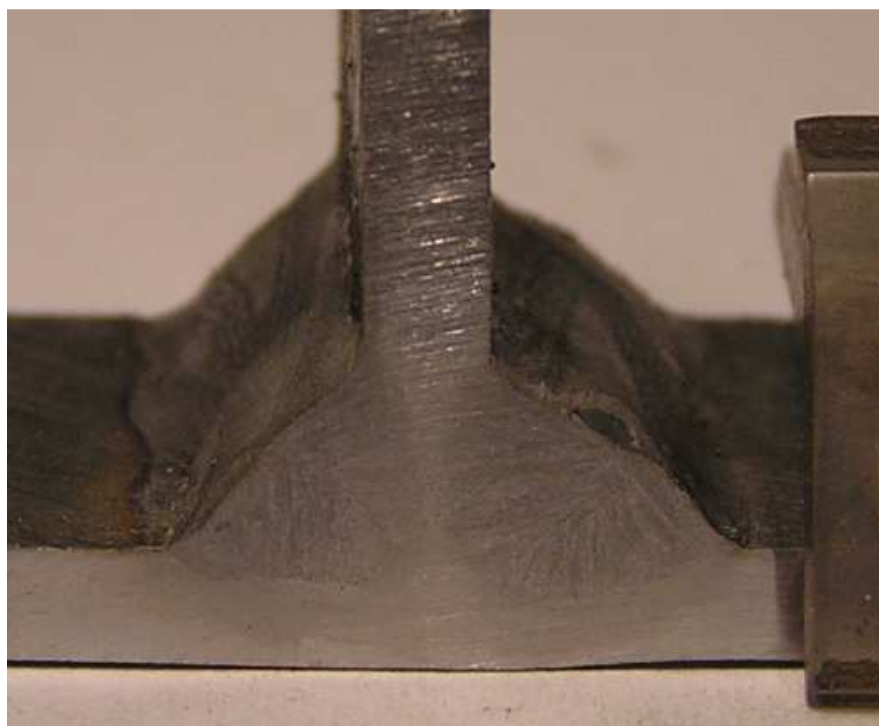
Obr. 40: Zkušební vzorek č.3 – FW – a8



Obr. 41: Zkušební vzorek č.4 – FW – a3-10-3



Obr. 42: Zkušební vzorek č.5 – BW



Obr. 43: Zkušební vzorek č.6 – FW – a2

6.2.5 Zkoušky tvrdosti

K měření tvrdosti byl použit Vickersův tvrdoměr Heckert HPO 250. Naměřené hodnoty tvrdosti jednotlivých zkoušených vzorků jsou uvedeny v tab. 16 - 18 a zaneseny do grafů č. 5 – 7. Zkouška se provedla za účelem zjištění odolnosti svarového spoje proti vzniku trhlin za tepla.

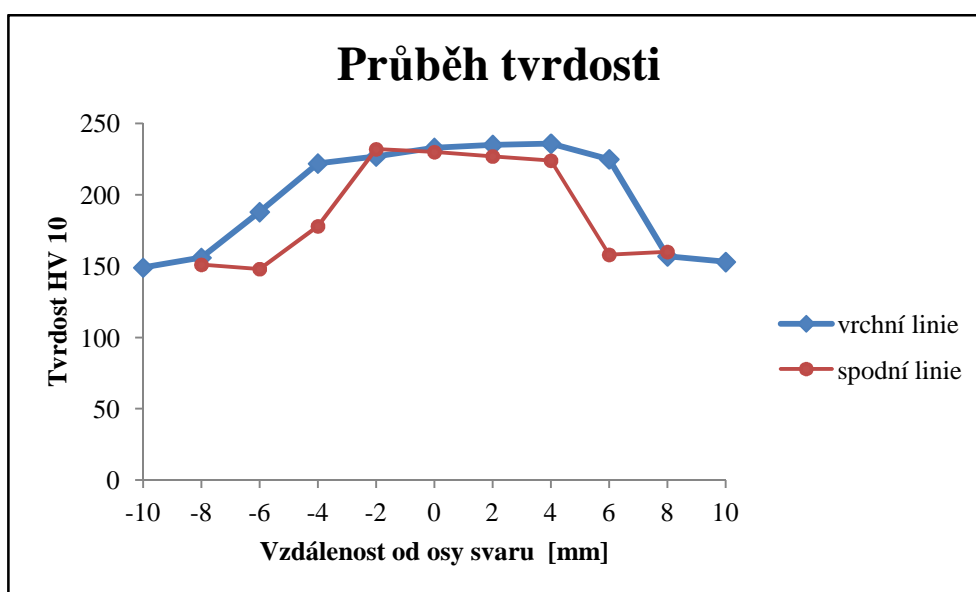
Tvrdość HV10 byla měřena na těchto vybraných vzorcích:

- FW – a4-2x (vzorek č. 2)
- FW – a8 (vzorek č. 3)
- BW (vzorek č. 5)

Tvrlosti HV10 - svar FW – a4-2x

Vrchní linie: ZM 149, 156 ; SVAR 188, 222, 227, 233, 235, 236, 225,
ZM 157, 153

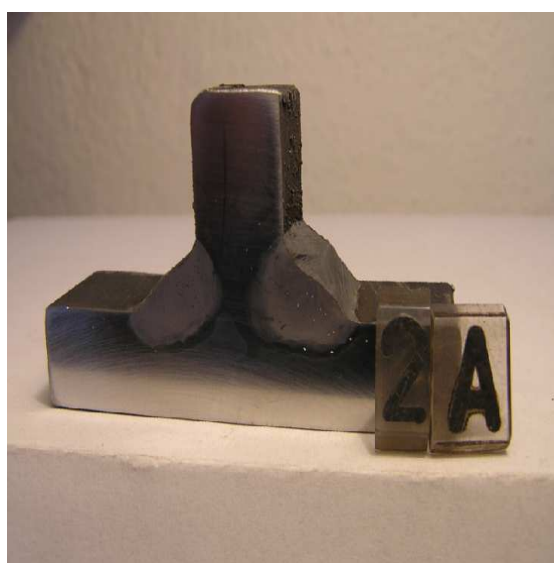
Spodní linie: ZM 151, 148; SVAR 178, 232, 230, 227, 224
ZM 158, 160



Graf. 5: Průběh tvrdosti vzorku - a4 -2

Materiál: S 355 J2		
Př. drát: OK AristoRod™		
x [mm]	Tvrdość HV 10	
-10	149	151
-8	156	148
-6	188	178
-4	222	232
-2	227	230
0	233	227
2	235	224
4	236	158
6	225	160
8	157	153
10	153	153

Tab. 16: Hodnoty tvrdosti- a4 -2x

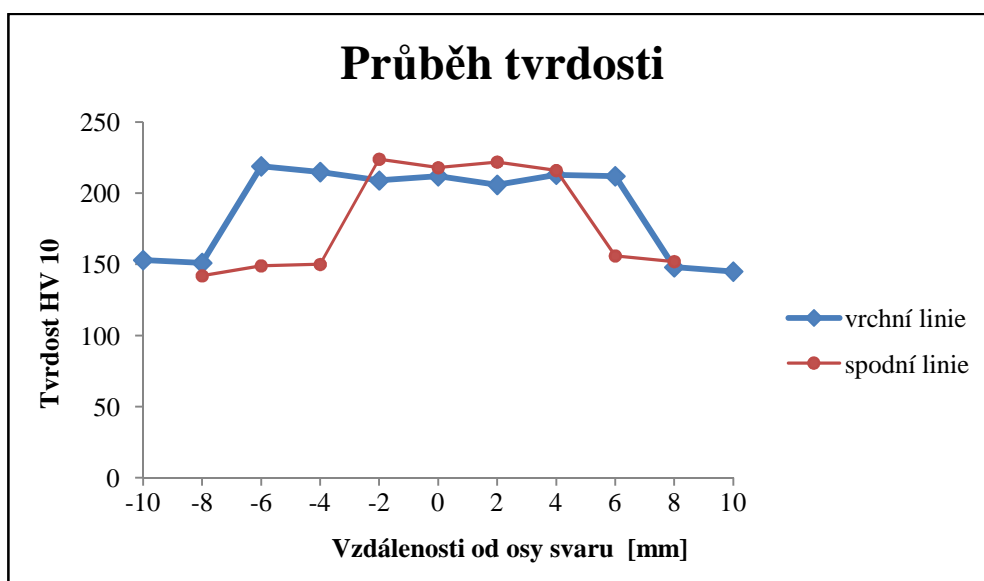


Obr. 44: Zkouška tvrdosti – a4-2x

Tvrdosti HV10 - svar FW – a8

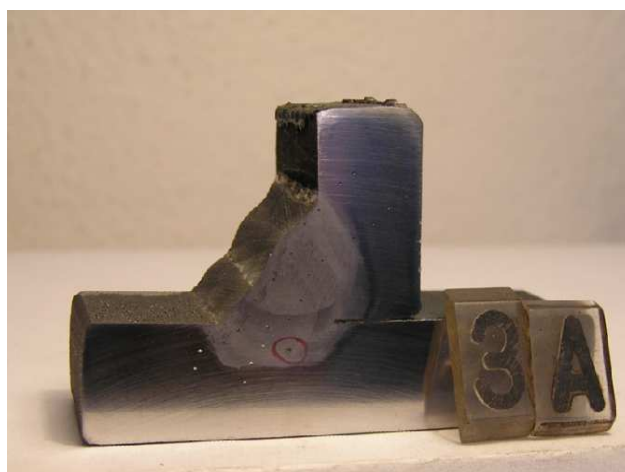
Vrchní linie: ZM 153, 151 ; SVAR 219, 215, 209, 212, 206, 213, 212
ZM 148, 145

Spodní linie: ZM 142, 149, 150 ; SVAR 224, 218, 222, 216
ZM 156, 152



Graf. 6: Průběh tvrdosti vzorku a8

Materiál: S 355 J2		
Př. drát: OK AristoRod™		
x [mm]	Tvrdost HV 10	
-10	153	
-8	151	142
-6	219	149
-4	215	150
-2	209	224
0	212	218
2	206	222
4	213	216
6	212	156
8	148	152
10	145	



Obr. 45: Zkouška tvrdosti – a8

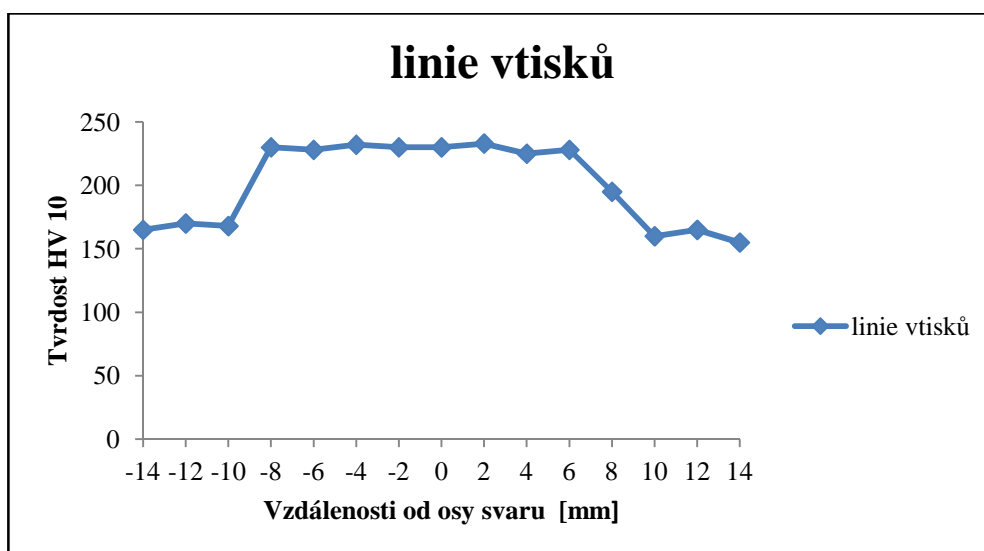
Tab. 17: Hodnoty tvrdosti – a8

Tvrlosti HV10 - svar BW

Vrch.vod. z leva: ZM 165, 170, 168 ; PŘ. 230, 228 ; SVAR 232, 230

Střed dolů: 232, 236, 228, 226, 232, 234, 227

Dolní vod.zprava: SVAR 233, 225; PŘ 228, 195; ZM 160, 165, 155



Graf. 7: Průběh tvrdosti vzorku BW

Materiál: S 355 J2	
Př. drát: OK AristoRod™	
x [mm]	Tvrdot HV 10
-14	165
-12	170
-10	168
-8	230
-6	228
-4	232
-2	230
0	230
2	233
4	225
6	228
8	195
10	160
12	165
14	155



Obr. 46. Zkouška tvrdosti – svar BW

Tab. 18: Hodnoty tvrdosti – BW

6.2.6 Hodnocení destruktivních zkoušek

1. Příčná zkouška tahem

Tahové zkoušky byly provedeny v mechanických laboratořích firmy ESAB VAMBERK s.r.o. dle ČSN EN ISO 4136 (příčná zkouška tahem) při teplotě +20°C. Při zkoušce došlo třikrát k lomu v tepelně ovlivněné oblasti čímž byly splněny požadavky této zkoušky. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

2. Zkoušky rázem v ohybu

Výsledky zkoušek dopadly příznivě. Hodnoty vrubové houževnatosti v oblasti svaru a oblasti TOO odpovídají hodnotám deklarovaným výrobcem přídavného materiálu *OK AristoRod 12.50TM* (viz příloha č. 3). Vezmeme-li v úvahu námi svařovaný materiál S 355 J2 a posuzujeme-li svar jako celek můžeme konstatovat, že provedené svarové spoje budou z hlediska vrubové houževnatosti plně vyhovovat všem technologickým a konstrukčním požadavkům.

3. Zkoušky ohybem

V průběhu zkoušení nedošlo na žádném ze šesti zkoušených vzorků ke vzniku trhliny v oblasti plochy svaru. U všech zkoušených vzorků bylo dosaženo úhlu ohnutí 180°. Na jednom ze vzorků došlo k drobné okrajové trhlině na hraně tyče (obr.37), což je z hlediska zkoušky vada přípustná.

4. Analýza makrostruktury

U vzorků číslo 3 a 5 (viz obr.40 a 42) byly zjištěny drobné makrostrukturní vady. Jedná se vždy o jeden vměstek na každém vzorku, mající zanedbatelnou velikost. Jelikož vady takto malých rozměrů nemají jakýkoliv vliv na výslednou jakost zkoušených svarových spojů, můžeme konstatovat, že všechny zkoušené vzorky makroskopické analýze vyhověly.

5. Zkouška tvrdosti HV 10

Z tabulek a grafů je patrné, že tvrdost v tepelně ovlivněné části stoupá a nejtvrďší oblast se na zkušebním vzorku nachází přímo ve svarovém kovu. Svarové kovy všech zkoušených vzorků zkoušce odolnosti proti vzniku trhlin za tepla vyhověly.

7 Ekonomická a technologická analýza

7.1 Proces svařování tupého svaru

Předmětem měření je rychlost posuvu přídavného materiálu, rychlost svařování a velikost vneseného tepla.

1. Konvenční MAG

Základní materiál: S 355 J2 - 330 x 400 x 15 [mm]

Přídavný drát: OK Autrod 12.58, \varnothing 1,2 mm

Naměřené hodnoty při svařování: (délka svaru č.1= 280 mm; č.2,3,4 = 330mm)

Svar č.	Posuv drátu [m/min]	Proud [A]	Napětí [V]	Čas svařování [s]
1	3,2	130	17	72
2	7	260	26	70
3	8	280	25,7	86
4	11	310	29	97

Tab. 19: Parametry svařování

Rychlost svařování:

$$v_s = \frac{s \cdot 60}{t \cdot 10} \quad (7.1)$$

kde: v_s [cm/min] - rychlost svařování
 s [mm] - délka svaru
 t [s] - čas svařování

- Svar č.1: $v_s = \frac{280}{72} \cdot \frac{60}{10} = \frac{16800}{720} = 23,3$

- Svar č.2: $v_s = \frac{330}{70} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{700} = 28,2$

- Svar č.3: $v_s = \frac{330}{86} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{860} = \mathbf{23,0}$
- Svar č.4: $v_s = \frac{330}{97} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{970} = \mathbf{20,4}$

Teplo vnesené do svaru:

$$Q = \frac{I \cdot U \cdot 6}{v_s \cdot 10^3} \cdot k \quad (7.2)$$

kde: Q [kJ/mm] - vnesené teplo
 k [-] - koeficient účinnosti svařování
 I [A] - elektrický proud
 U [V] - elektrické napětí

- Svar č.1: $Q = \frac{130 \cdot 17 \cdot 6}{23,3 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{0,46}$
- Svar č.2: $Q = \frac{260 \cdot 26 \cdot 6}{28,2 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{1,15}$
- Svar č.3: $Q = \frac{280 \cdot 25,7 \cdot 6}{23 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{1,50}$
- Svar č.4: $Q = \frac{310 \cdot 29 \cdot 6}{20,4 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{2,12}$

Svar č.	Svařovací rychlost - v_s [cm/min]	Vnesené teplo - Q [kJ/mm]
1	23,3	0,46
2	28,2	1,15
3	23	1,50
4	20,4	2,12

Tab. 20: Výsledné hodnoty vneseného tepla

2. ESAB SATTM

Přídavný drát: OK AristoRodTM 12.50, \varnothing 0,9 mm

Naměřené hodnoty při svařování: (délka svaru - 330mm)

Svar č.	Posuv drátu [m/min]	Proud [A]	Napětí [V]	Čas svařování [s]
1	16	230	27,5	67
2	16	250	28,5	79
3	22	295	31	94

Tab. 21: Parametry svařování – ESAB SAT

Rychlost svařování: viz (7.1)

- Svar č.1: $v_s = \frac{280}{67} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{670} = \mathbf{29,6}$
- Svar č.2: $v_s = \frac{330}{79} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{790} = \mathbf{25,1}$
- Svar č.3: $v_s = \frac{330}{94} \cdot \frac{60}{10} = \frac{19800}{940} = \mathbf{21,1}$

Teplota vnesená do svaru: viz (7.2)

- Svar č.1: $Q = \frac{230 \cdot 27,5 \cdot 6}{29,6 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{1,03}$
- Svar č.2: $Q = \frac{250 \cdot 28,5 \cdot 6}{25,1 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{1,36}$
- Svar č.3: $Q = \frac{295 \cdot 31 \cdot 6}{21,1 \cdot 10^3} \cdot 0,8 = \mathbf{2,08}$

Svar č.	Svařovací rychlost - v_s [cm/min]	Vnesené teplo - Q [kJ/mm]
1	29,6	1,03
2	25,1	1,36
3	21,1	2,08

Tab. 22: Výsledné hodnoty vneseného tepla

Výsledný čas svařování

t_{A131} ... čas hoření oblouku při svařování

$\sum t_{A131}$... souhrn časů jednotlivých svarových vrstev

Svař. metoda	Počet svarů	\varnothing rychlost posuvu drátu [m/min]	$\sum t_{A131}$ [s]
Konv. MAG	4	23,7	325
<i>ESAB SATTM</i>	3	25,3	240

Tab. 23: Porovnání rozhodujících výsledných hodnot

Hodnocení analýzy svařování tupého svaru

Pro svarový spoj byl u metody konvenční MAG použit \varnothing drátu 1,2 mm, který se u takto velkých svarů standardně používá vzhledem k velikosti odtavného výkonu. Metoda *ESAB SATTM* použila přídavný drát \varnothing 0,9 mm a výhodnost jejího použití dokazují tab. 19 – 23. Použití většího průměru drátu zajišťuje sice relativně velký odtavný výkon, avšak při vyšších hodnotách svařovacího proudu. To má za následek vyšší hodnotu nežádoucího vneseného tepla a následně větší deformace. Jako hlavní aspekt, jenž rozhodl o více než 26% úspoře času je fakt, že na zavaření tupého svaru materiálu tloušťky 15mm bez výrazného převýšení vrchní vrstvy, jsme použily u metody *ESAB SATTM* o jeden svar méně. Výsledná vysoká jakost povrchu obou svarů byla podobná. Další výhodou je stálost nastavení vstupních parametrů. Zatímco u metody MAG je na každou svarovou vrstvu použita jiná hodnota posuvu přídavného materiálu, u metody *SATTM* se hodnota posuvu změnila až při svařování poslední vrstvy. Časy na „vyladění“ parametrů svařování jsou pak u metody MAG vyšší. Z výsledků analýzy vychází metoda *ESAB SATTM* jako výrazně produktivnější metoda svařování.

7.2 Analýza svařování koutových svarů

Analýza procesu svařování koutových svarů vycházela z hodnot nastavení maximální rychlosti podávání drátu při zachování požadované kvality a velikosti svaru. Cílem bylo porovnat obě metody z pohledu velikosti odtavného výkonu, rychlosti svařování a celkových nákladů na 1 metr svaru.

Obě metody byly porovnávány při svařování FW svarů o velikostech a4 a a5, při rozdílné kombinaci průměrů přídavného drátu. Jedna vybraná varianta a5 byla hodnocena také z pohledu velikosti vneseného tepla do svarové lázně. Tloušťka základního materiálu byla pro všechny zkoušky 10 mm.

7.2.1 Srovnávací analýza pro svar FW- a4

Výchozí parametry:

Metoda svařování	Přídavný materiál	Rychlost podávání drátu - v_D [m/min]
Konvenč. MAG	Standart. MAG poměděný drát \varnothing 0,8mm	18
ESAB SAT™	OK AristoRod™ \varnothing 0,8mm	25

Tab. 24: Základní vstupní parametry

➤ Výpočet potřebných hodnot – konvenční MAG:

Odtavný výkon :

$$m_h = \frac{v_D \cdot m_{dr} \cdot 60}{1000} \quad (7.3)$$

kde: m_h [kg/hod] - odtavný výkon
 m_{dr} [g/m] - hmotnost drátu
 v_D [m/min] - rychlost podávání drátu

$$m_h = \frac{v_D \cdot m_{dr} \cdot 60}{1000} = 4,3$$

Čas svařování za směnu :

$$t_{A131} = t_{sm} \cdot k_v \quad (7.4)$$

kde: t_{A131} [hod] - čas svařování
 t_{sm} [hod] - čas směny
 k_v [-] - koeficient využití času svařování

$$t_{A131} = t_{sm} \cdot k_v = 8 \cdot 0,3 = \mathbf{2,4} \quad (144 \text{ min})$$

Odtavný výkon za směnu :

$$m_{sm} = m_h \cdot t_{A131} \quad (7.5)$$

kde: m_{sm} [kg/t_{sm}] - odtavené množství za čas směny
 m_h [kg/hod] - odtavný výkon
 t_{A131} [hod] - čas svařování

$$m_{sm} = m_h \cdot t_{A131} = 4,3 \cdot 2,4 = \mathbf{10,32}$$

Odtavené množství na metr svaru :

$$m_M = v_{sv} \cdot \rho \quad (7.6)$$

kde: m_M [kg/m] - odtavené množství
 ρ [kg/m³] - hustota přídavného materiálu
 V_{sv} [m³/m] - objem svarového spoje

$$m_M = V_{sv} \cdot \rho = 0,000016 \cdot 7580 = \mathbf{0,1256}$$

Délka svaru vytvořená za směnu :

$$l_{sm} = \frac{m_{sm}}{m_M} \cdot \eta \quad (7.7)$$

kde: l_{sm} [m] - délka svaru za t_{sm}
 m_M [kg/m] - odtavené množství
 m_{sm} [kg/t_{sm}] - odtavené množství za čas směny

$$l_{sm} = \frac{m_{sm}}{m_M} \cdot \eta = \frac{10,32}{0,1256} \cdot 0,75 = \mathbf{61,62}$$

Rychlost svařování :

$$v_s = \frac{l_{sm}}{t_{A131}} \quad (7.8)$$

kde: v_s [cm/min] - rychlost svařování

$$v_s = \frac{l_{sm}}{t_{A131}} = \frac{6162}{144} = \mathbf{42,79}$$

Náklady na obsluhu a materiál – konvenční MAG:

- Náklady na svářeče + fixní náklady - N_{hod} ...750,- Kč/hod (hrubý odhad)
- Cena přídatného materiálu - C_{mat} ...35,- Kč/kg
- Náklady na ochranný plyn/litr - N_{pl} ...0,09 Kč/l (průtok – 12 l/min)

Náklady na plyn na 1 m svaru :

$$N_p = \frac{100}{v_s} \cdot P_p \cdot N_{pl} \quad (7.9)$$

kde: N_p [Kč/m] - náklady na plyn vztažené na metr svaru

N_{pl} [Kč/l] - náklady na jeden litr plynu

P_p [l/hod] - průtok plynu za hodinu

$$N_p = \frac{100}{42,79} \cdot 12 \cdot 0,09 = \mathbf{2,52}$$

Náklady na přídatný materiál na 1 m svaru :

$$N_{přm} = m_M \cdot C_{mat} \cdot 1,25 \quad (7.10)$$

kde: $N_{přm}$ [Kč/m] - náklady na přídatný materiál na metr svaru

C_{mat} [Kč] - cena přídatného materiálu

$$N_{přm} = 0,1256 \cdot 35 \cdot 1,25 = \mathbf{5,5}$$

Náklady na svářeče + fixní náklady na 1 m svaru :

$$N_m = \frac{N_{hod} \cdot t_{sm}}{l_{sm}} \quad (7.11)$$

kde: N_m [Kč/m]- náklady na svářeče a pracoviště na metr svaru
 N_{hod} [Kč] - náklady na svářeče
 l_{sm} [m] - délka svaru za t_{sm}

$$N_m = \frac{N_{hod} \cdot t_{sm}}{l_{sm}} = \frac{750 \cdot 8}{61,62} = \mathbf{97,37}$$

CELKOVÉ NÁKLADY NA 1M SVARU - N_C

$$N_C = N_m + N_{přm} + C_p \quad (7.12)$$

$$N_C = N_m + N_{přm} + C_p = 97,37 + 5,5 + 2,52 = \mathbf{105,39} \quad [\text{Kč/m}]$$

➤ Výpočet hodnot – ESAB SAT™:

Odtavný výkon : viz (7.3)

$$m_h = \frac{v_D \cdot m_{dr} \cdot 60}{1000} = \mathbf{5,9}$$

Čas svařování za směnu : viz (7.4)

$$t_{A131} = t_{sm} \cdot k_v = 8 \cdot 0,3 = \mathbf{2,4} \quad (144 \text{ min})$$

Odtavný výkon za směnu : viz (7.5)

$$m_{sm} = m_h \cdot t_{A131} = 5,9 \cdot 2,4 = \mathbf{14,16}$$

Odtavené množství na metr svaru : viz (7.6)

$$m_M = V_{sv} \cdot \rho = 0,000016 \cdot 7580 = \mathbf{0,1256}$$

Délka svaru vytvořená za směnu : viz (7.7)

$$l_{sm} = \frac{m_{sm}}{m_M} \cdot \eta = \frac{14,16}{0,1256} \cdot 0,75 = \mathbf{84,55}$$

Rychlost svařování : viz (7.8)

$$v_s = \frac{l_{sm}}{t_{A131}} = \frac{8455}{144} = \mathbf{58,72}$$

Náklady na obsluhu a materiál –ESAB SATTM:

- Náklady na svářeče + fixní náklady ...750,- Kč/hod.
- Cena přídatného materiálu ...45,- Kč/kg
- Náklady na ochranný plyn ...0,09 Kč/l (průtok – 12 l/min)

Náklady na plyn na 1 m svaru : viz (7.9)

$$N_p = \frac{100}{v_s} \cdot 12 \cdot 0,09 = \mathbf{1,84}$$

Náklady na přídatný materiál na 1 m svaru : viz (7.10)

$$N_{přm} = m_M \cdot C_{mat} \cdot 1,25 = 0,1256 \cdot 45 \cdot 1,25 = \mathbf{7,06}$$

Náklady na svářeče + fixní náklady na 1 m svaru : viz (7.11)

$$N_m = \frac{N_{hod} \cdot t_{sm}}{l_{sm}} = \frac{750 \cdot 8}{84,55} = \mathbf{70,96}$$

CELKOVÉ NÁKLADY NA 1M SVARU - N_C viz (7.3)

$$N_C = N_m + N_{přm} + C_p = 70,96 + 7,06 + 1,84 = \mathbf{79,86} \text{ [Kč/m]}$$

Porovnání obou metod

	Konvenční MAG	ESAB SAT™	Jednotkový rozdíl	Procentuelní rozdíl N_C
Odtavný výkon [kg/hod]	4,3	5,9	1,6	
Rychlost svařování [cm/min]	42,79	58,72	15,93	
Délka svaru za směnu [m]	61,62	84,55	22,93	
Náklady - N_m [Kč/m]	97,37	70,96	-26,41	
Náklady - $N_{přm}$ [Kč/m]	5,50	7,06	1,56	
Náklady - N_p [Kč/m]	2,52	1,84	-0,68	
Celkové náklady na 1m svaru [Kč]	105,39	79,86	-25,53	24 [%]

Tab. 25: Výsledná porovnávací tabulka – svar a4

Hodnocení analýzy – svar FW a4:

V tomto testu byly použity stejné průměry přídavného materiálu. Princip obou metod je shodný, rozdíl v produktivitě je tedy dán pouze vysokou rychlostí podávání přídavného materiálu u SAT^{TM} a použitím kvalitního nepoměděného přídavného drátu *AristoRodTM* 12.50, který prokázal zvýšenou schopnost podpory stability hoření oblouku s minimálním rozstříkem. Rozdíl celkových nákladů vztažených k jednomu metru svarového spoje je tomto případě značný. Použitím metody *ESAB SATTM* bychom při zachování těchto parametrů docílili úspory 24 % celkových nákladů N_C a to i přes vyšší náklady spojené s použitím přídavného materiálu OK *AristoRodTM*.

7.2.2 Srovnávací analýza pro svar FW- a5

Výchozí parametry:

Metoda svařování	Přídavný materiál	Rychlost podávání drátu - v_D [m/min]
Konvenč. MAG	Standart. MAG poměděný drát \varnothing 1,2mm	11
ESAB SAT™	OK AristoRod™ \varnothing 0,9 mm	22

Tab. 26: Vstupní parametry

➤ Výpočet potřebných hodnot – konvenční MAG:

Odtavný výkon : viz (7.3)

$$m_h = \frac{v_D \cdot m_{dr} \cdot 60}{1000} = 5,9$$

Čas svařování za směnu : viz (7.4)

$$t_{A131} = t_{sm} \cdot k_v = 8 \cdot 0,3 = 2,4$$

Odtavný výkon za směnu : viz (7.5)

$$m_{sm} = m_h \cdot t_{A131} = 5,9 \cdot 2,4 = 14,16$$

Odtavené množství na metr svaru : viz (7.6)

$$m_M = V_{sv} \cdot \rho = 0,000025 \cdot 7580 = 0,1895$$

Délka svaru vytvořená za směnu : viz (7.7)

$$l_{sm} = \frac{m_{sm}}{m_M} \cdot \eta = \frac{14,16}{0,1895} \cdot 0,75 = 56,04$$

Rychlost svařování : viz (7.8)

$$v_s = \frac{l_{sm}}{t_{A131}} = \frac{5604}{144} = \mathbf{38,92}$$

Náklady na obsluhu a materiál – konvenční MAG:

- Náklady na svářeče + fixní náklady ...550,- Kč/hod (hrubý odhad)
- Cena přídatného materiálu ...35,- Kč/kg
- Náklady na ochranný plyn ...0,09 Kč/l (průtok – 15 l/min)

Náklady na plyn na 1 m svaru : viz (7.9)

$$N_p = \frac{100}{v_s} \cdot 15 \cdot 0,09 = \mathbf{3,47}$$

Náklady na přídatný materiál na 1 m svaru : viz (7.10)

$$N_{přm} = m_M \cdot C_{mat} \cdot 1,25 = 0,1895 \cdot 35 \cdot 1,25 = \mathbf{8,29}$$

Náklady na svářeče + fixní náklady na 1 m svaru : viz (7.11)

$$N_m = \frac{N_{hod} \cdot t_{sm}}{l_{sm}} = \frac{550 \cdot 8}{56,04} = \mathbf{78,52}$$

CELKOVÉ NÁKLADY NA 1M SVARU - N_C viz (7.12)

$$N_C = N_m + N_{přm} + N_p = 78,52 + 8,29 + 3,47 = \mathbf{90,28} \text{ [Kč/m]}$$

➤ Výpočet hodnot – ESAB SAT™:

Odtavný výkon : viz (7.3)

$$m_h = \frac{v_D \cdot m_{dr} \cdot 60}{1000} = \mathbf{6,6}$$

Čas svařování za směnu : viz (7.4)

$$t_{A131} = t_{sm} \cdot k_v = 8 \cdot 0,3 = \mathbf{2,4} \quad (144 \text{ min})$$

Odtavný výkon za směnu : viz (7.5)

$$m_{sm} = m_h \cdot t_{A131} = 6,6 \cdot 2,4 = \mathbf{15,84}$$

Odtavené množství na metr svaru : viz (7.6)

$$m_M = V_{sv} \cdot \rho = 0,000025 \cdot 7580 = \mathbf{0,1895}$$

Délka svaru vytvořená za směnu : viz (7.7)

$$l_{sm} = \frac{m_{sm}}{m_M} \cdot \eta = \frac{15,84}{0,1895} \cdot 0,75 = \mathbf{62,69}$$

Rychlost svařování : viz (7.8)

$$V_s = \frac{l_{sm}}{t_{A131}} = \frac{6269}{144} = \mathbf{43,53}$$

Náklady na obsluhu a materiál –ESAB SATTM:

- Náklady na svářeče + fixní náklady ...550,- Kč/hod.
- Cena přídatného materiálu ...45,- Kč/kg
- Náklady na ochranný plyn ...0,09 Kč/l (průtok – 15 l/min)

Náklady na plyn na 1 m svaru : viz (7.9)

$$N_p = \frac{100}{v_s} \cdot 15 \cdot 0,09 = \mathbf{3,1}$$

Náklady na přídatný materiál na 1 m svaru : viz (7.10)

$$N_{\text{přm}} = m_M \cdot N_{\text{mat}} \cdot 1,25 = 0,1895 \cdot 45 \cdot 1,25 = \mathbf{10,66}$$

Náklady na svářeče + fixní náklady na 1 m svaru : viz (7.11)

$$N_m = \frac{N_{\text{hod}} \cdot t_{\text{sm}}}{l_{\text{sm}}} = \frac{550 \cdot 8}{62,69} = \mathbf{70,19}$$

CELKOVÉ NÁKLADY NA 1M SVARU - N_C viz (7.12)

$$N_C = N_m + N_{\text{přm}} + C_p = 70,19 + 10,66 + 3,1 = \mathbf{83,95} \text{ [Kč/m]}$$

Porovnání obou metod

	Konvenční MAG	ESAB SAT™	Jednotkový rozdíl	Procentuelní rozdíl N_C
Odtavný výkon [kg/hod]	5,9	6,6	0,7	
Rychlost svařování [cm/min]	38,92	43,53	4,61	
Délka svaru za směnu [m]	56,04	62,69	6,65	
Náklady - N_m [Kč/m]	78,52	70,19	-8,33	
Náklady - $N_{\text{přm}}$ [Kč/m]	8,29	10,66	2,37	
Náklady - N_p [Kč/m]	3,47	3,1	-0,37	
Celkové náklady na 1m svaru [Kč]	90,28	83,95	-6,33	7 [%]

Tab. 27: Výsledná porovnávací tabulka – svar a5

Hodnocení analýzy – svar FW a5:

Z výsledných hodnot uvedených v tab.27 , vyplývá celková ekonomická výhodnost metody svařování *ESAB SATTM*, přestože je v tomto testu výsledný rozdíl celkových nákladů vztažených na jeden metr délky svaru „pouze“ sedmiprocentní. Je nutno vzít v úvahu maximální možnou rychlost podávání přídatného materiálu pro metodu konvenční MAG, kdy je výše zakalkulovaná hodnota 11 m/min pro tuto metodu hraniční. Navýšil se tím odtavný výkon konvenční metody avšak při vysokých hodnotách svařovacího proudu (viz kap. 7.2.3), který je již na samotné hranici schopnosti kvalitního ručního svařování.

ESAB SATTM pracoval s pro svářeče příznivějšími parametry svařování, větší rychlostí svařování při celkovém menším rozstřiku kovu a nižší hodnotou vneseného tepla do svaru.

7.2.3 Analýza vneseného tepla pro svar FW – a5

Parametry svařování

Metoda svařování	∅ drátu [mm]	Rychlost posuvu drátu [m/min]	Rychlost svařování [cm/min]	I [A]	U [V]
MAG	1,2	11	38,92	315	31
<i>ESAB SATTM</i>	0,9	22	43,53	295	31

Tab. 28: Parametry svařování obou metod

Hodnota vneseného tepla

$$Q_{MAG} = k \cdot \frac{I \cdot U \cdot 6}{v_S \cdot 1000} = 0,8 \cdot \frac{315 \cdot 31 \cdot 6}{38,92 \cdot 1000} = 1,204 \text{ [kJ/mm]}$$

$$Q_{SAT} = k \cdot \frac{I \cdot U \cdot 6}{v_S \cdot 1000} = 0,8 \cdot \frac{295 \cdot 31 \cdot 6}{43,53 \cdot 1000} = 1,008 \text{ [kJ/mm]}$$

	MAG	ESAB SATTM	Rozdíl [%]
∅ přídavného materiálu [mm]	1,2	0,9	
Napětí - U [V]	31	31	
Proud - I [A]	315	295	
Vnesené teplo – Q [kJ/mm]	1,204	1,008	16,3

Tab. 29: Výsledné porovnání hodnot vneseného tepla

Hodnocení analýzy

Ze získaných výsledných hodnot (viz tab. 29) můžeme konstatovat, že z pohledu velikosti vneseného tepla do svaru je jednoznačně výhodnější metoda *ESAB SATTM*, kdy je velikost vneseného tepla nižší o 0,221 kJ/mm. Tedy o přibližně 16%. Tato hodnota je pouze orientační a je závislá na dílčích svářecích parametrech porovnávaných metod. Nižší tepelný příkon způsobí menší tepelné ovlivnění materiálu, což má za následek užší TOO a nižší tepelnou degradaci základního materiálu.

Závěr

Cílem diplomové práce bylo porovnání inovované metody svařování MAG užívané pod názvem *ESAB SATTM* a metody konvenční MAG. Všechny provedené zkoušky měly za úkol zhodnotit kvalitu svarových spojů zhotovených novou metodou *ESAB SATTM* v porovnání s deklarovanou vyšší produktivitou této metody svařování.

V experimentální části projektu byly svařeny zkušební vzorky tupých a koutových svarů metodou *ESAB SATTM*, které byly následně podrobeny vybraným destruktivním zkouškám. Vzorky svařené metodou konvenční MAG sloužily pouze k ekonomické analýze. Jako základní materiál byla zvolena nelegovaná jakostní konstrukční ocel S355J2. U metody konvenční MAG byly jako přídavný materiál použity běžně používané poměděné dráty. Součástí metody *ESAB SATTM* jsou nové nepoměděné přídavné dráty OK AristoRodTM.

Příčné zkouška tahem a zkouška ohybem prokázaly vysokou kvalitu svarů provedených novou metodou. U žádného ze tří vzorků nedošlo při příčné zkoušce tahem k lomu ve svaru. Během zkoušky ohybem vznikla u jednoho vzorku drobné trhlinka na hraně vzorku, která byla vyhodnocena jako přípustná vada bez vlivu na mechanické vlastnosti svarového spoje. Provedené kontrole makrostruktury vyhovělo všech šest zkušebních vzorků. U dvou vzorků byly při kontrole zjištěny drobné makrostrukturní vady. Jedná se vždy o jeden vměstek na každém vzorku zanedbatelné velikosti, nemající vliv na kvalitu svaru. Při zkoušce tvrdosti HV10 vyhověly všechny tři zkoušené vzorky odolnosti proti vzniku trhlin za tepla.

Ekonomická analýza se zaměřila na hodnocení jednotlivých parametrů svařování a porovnání s klasickou konvenční metodou MAG. *ESAB SATTM* dosahuje díky vysoké rychlosti posuvu přídavného materiálu, při použití menších průměrů přídavných drátů, minimálně stejnou, zpravidla však vyšší hodnotu odtavného výkonu. Hodnoty svařovacích proudů byly u vzorků svařovaných metodou *ESAB SATTM* nižší, což mělo pozitivní dopad na hodnoty vneseného nežádoucího tepla do svaru. Hodnota celkových úspor vztahených na jeden metr svaru dosáhla u jednoho ze zkoumaných vzorků hodnoty 24%.

Metoda svařování *ESAB SATTM* se ukázala jako vysoce produktivní metoda, která má potenciál stát s jednou z nejrozšířenějších metod, především v oblasti automatizovaného svařování.

Seznam použitých zdrojů

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

[2] KOLEKTIV AUTORŮ. *Výroba a aplikované inženýrstvím svařování*, Zeross, Ostrava 2000, 213s. ISBN 80-85771-72-1.

[3] KOUKAL, Jaroslav; SCHWARZ, Drahomír ;HAJDÍK, Jiří. *Materiály a jejich svařitelnost*, Český svářečský ústav s.r.o. , Ostrava 2009, 1.vyd.,395s. ISBN 978-80-248-2025-5.

[4] MINAŘÍK, Václav. *Obloukové svařování*, Scientia, Praha 2003, 241s. ISBN 80-7183-285-5.

[5] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie svařování* [online]. ust.fme.vutbr.cz, 1994, [cit. 2012-04-20]. Dostupné z WWW: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_vyroby_l_svarovani_kubicek.pdf

[6] Wikipedia.org: cs.wikipedia.org [online]. [cit. 2012-04-15]. Svařování v ochranné atmosféře tavící se elektrodou. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD_v_ochrann%C3%A9_atmosf%C3%A9r%C5%99e_tav%C3%ADc%C3%AD_se_elektrodou>

[7] ČSN EN ISO 5817, *Svařování- Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním – Určování stupňů kvality*. Praha: ÚNMZ, leden 2008.

[8] ČSN EN ISO 15614-1, *Svařování- Stanovení a kvalifikace postupu svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování- Část1.Obloukové a plamenové svařování ocelí*. Praha: ÚNMZ, květen 2005.

[9] *Katalog přídavných materiálů pro svařování*. Vamberk: ESAB Vamberk s.r.o. 2011.

[10] Wikipedia.org: cs.wikipedia.org [online]. [cit. 2012-04-15]. Obloukové svařování. Dostupné z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Obloukov%C3%A1n%C3%AD_sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD

[11] SKÁLOVÁ, Jana; KOVAŘÍK, Rudolf ;BENEDIKT, Vladimír. *Základní zkoušky kovových materiálů*, Západočeská univerzita v PLzni. , Plzeň 2010, 175 str. ISBN 978-80-7043-417-8.

[12] ESAB VAMBERK s.r.o. [Prospekt - CD -ROM]. ESAB Swift Art Transfer *SAT™*.2012. [cit. 2012-04-20].

[13] ČSN EN ISO 9015-1, *Svařování- Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů –Část1.Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: ÚNMZ, červenec 2011

[14] ČSN EN ISO 5173, *Svařování- Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů –Zkoušky ohybem*. Praha: ÚNMZ, duben 2010

[15] ČSN EN ISO 9016, *Svařování- Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů –Zkoušky rázem v ohybu – Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: ÚNMZ, červenec 2011

[16] ČSN EN ISO 4136, *Svařování- Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem* . Praha: ÚNMZ, červenec 2011

[17] ČSN EN ISO 1011-2, *Svařování- Doporučení pro svařování kovových materiálů-část 2.- obloukové svařování feritických ocelí* . Praha: ÚNMZ, červenec 2011

[18] MARTINEC, Jiří. *Vliv svařování trubičkovými dráty na vlastnosti svařitelných vysokopevnostních ocelí*. Praha: ČVUT 2001. Diplomová práce, ČVUT, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství

Seznam použitých zkratek a symbolů

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
I_s	[A]	Svařovací proud
A	[%]	Tažnost
KCV	[J. cm ⁻²]	Vrubová houževnatost
KV	[J]	Nárazová práce
g	[m. s ⁻²]	Gravitační zrychlení
R _m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
R _{p02}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
R _e	[MPa]	Mez kluzu
t _{A131}	[s]	Čas hoření el. oblouku
Q	[kJ/mm]	Vnesené teplo
m _h	[kg/hod]	Odtavný výkon
m _{sm}	[kg/směna]	Odtavný výkon za směnu
m _M	[kg/m]	Odtavný výkon na metr svaru
m _{dr}	[kg]	Hmotnost drátu
ρ	[kg/m ³]	Hustota
l _{sm}	[m]	Délka svaru
v _s	[cm/min]	Rychlost svařování
N _p	[Kč/m]	Náklady na plyn na metr svaru
N _{přm}	[Kč/m]	Náklady na přídatný materiál na metr svaru
N _m	[Kč/hod]	Náklady na svářeče
N _C	[Kč/m]	Celkové náklady na metr svaru
V _{sv}	[m ³]	Objem svarového spoje
H	[A/m]	Intenzita magnetického pole
U	[V]	Elektrické napětí
I	[A]	Elektrický proud
R	[Ω]	Elektrický odpor
F	[N]	Síla
η	[-]	Koeficient využití přídatného materiálu
k	[-]	Koeficient tepelné účinnosti svařování
k _v	[-]	Koeficient využití pracovní doby
TOO		Tepelně ovlivněná oblast
MAG		Metoda svařování v ochranné atmosféře

Seznam příloh

- Příloha 1 Výrobní řada - *OK AristoRodTM*
- Příloha 2 Vlastnosti oceli S355J2 dle katalogu výrobce
- Příloha 3 Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.50
- Příloha 4 Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.57
- Příloha 5 Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.63

OK AristoRod™ - Sortiment

Klasifikace AWS a EN

Výrobek	Klasifikace drátu		Klasifikace drátu a svařence			Ochranný plyn		Typ oceli
	AWS	EN-ISO				EN-ISO 14175		
OK AristoRod™	A5.18	A5.28	14341-A	18834-A	21952-A/-B	M21	C1	
12.50	ER70S-6		G3S1			G 42 4	G 38 2	konstrukční oceli
12.57	ER70S-3		G2S1			G 38 3	G 35 2	konstrukční oceli
12.62	ER70S-2		G2T1			G 46 4	G 42 3	konstrukční oceli
12.63	ER70S-6		G4S1			G 48 4	G 42 2	konstrukční oceli
12.65	ER70S-6		G4S1			G 46 4	G 42 2	konstrukční oceli
13.08		EF80S-D2	G4Mo		G 4Mo / G 1M3	G 50 4	G 46 0	žárupevné
13.09		ER80S-G	G2Mo		G MoSi / G 1M3	G 46 2	G 38 0	žárupevné
13.12		EF80S-G			G CrMoCrSi / G 1CM3			žárupevné
13.16		EP80S-B2			G 55A 1CM			žárupevné
13.22		EF90S-G			G CrMoCrSi			žárupevné
13.26		EP80S-G	G0			G 46 4	G 42 0	Atmofix/Corten
55 (13.13)		ER100S-G		G Mn3NiCrMo		G 55 4		vysokopevnostní
68 (13.29)		ER110S-G		G Mn3NiCrMo		G 59 4		vysokopevnostní
79 (13.31)		ER120S-G		G Mn4Ni2CrMo		G 79 4		vysokopevnostní
89 (13.96)		ER120S-G		G Mn4Ni2CrMo		G 89 4		vysokopevnostní

Příloha 2: Vlastnosti oceli S355J2 dle katalogu výrobce



Přehled vlastností oceli S355J2		1.0577						
Druh oceli	Nelegovaná jakostní konstrukční ocel							
TDP	ČSN EN 10025-2: 2005							
Dřívější označení	S355J2G4 podle EN 10025: 1990 +A1: 1993; St 52-3 N podle DIN 17100; 11 503 podle ČSN							
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C max. pro tloušťku v mm			Mn	Si	P	S	N
	≤16	>16 ≤40	40 ¹⁾	max.	max.	max.	max.	max.
	0,20 ²⁾	0,20 ⁴⁾	0,22	1,60	0,55	0,025	0,025	-
Složení hotového výrobku	0,23 ⁵⁾	0,23 ⁴⁾	0,24	1,70	0,60	0,035	0,035	-
Mechanické vlastnosti pro zkoušky v podélném směru	Minimální mez kluzu R_{eH} MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
	≤10	>10 ≤40	>40≤63	>63 ≤80	>80 ≤100	>100 ≤150	>150≤200	>200 ≤250
	355	345	335	325	315	295	285	275
	Pevnost v tahu R_m MPa pro výrobky jmenovité tloušťky v mm:							
	≥3≤100		>100≤150			>150≤250		
	470-630		450-600			450-600		
	Minimální tažnost v % ($L_0 = 5,65S_0$) pro výrobky jmenovité tloušťky v mm v ⁸⁾ :							
	≥5≤40		>40≤63		>63 ≤100	>100≤150		>150≤250
	22		21		20	18		17
	Minimální nárazová práce KV (J) při 20°C pro výrobky jmenovité tloušťky v mm ^{7),8)} :							
≤150				>150≤250				
27 ⁶⁾				27 ⁶⁾				
Maximální hodnota CEV ²⁾	Pro výrobky jmenovité tloušťky v mm							
	≤30		>30≤40		>40≤150		>150≤250	
	0,45		0,47		0,47		0,49 ⁷⁾	
Technologické vlastnosti								
Svařitelnost	Vhodná ke svařování všemi obvykle používanými způsoby svařování. S rostoucí tloušťkou výrobku a rostoucí hodnotou uhlíkového ekvivalentu se zvyšuje riziko výskytu trhlin za studena v oblasti sváru. Je účelné dbát doporučení, stanovující podmínky pro svařování, jak je ku příkladu uvádí ECSC IC 2 (EN 1011).							
Tváření za tepla	Jsou-li dodané výrobky dále tvářeny za tepla, splňují uvedené mechanické hodnoty pouze po následném normalizačním žitání.							
Tvářitelnost za studena	Ocel určená pro tvářování za studena musí být označena písmenem C (S355JOC). To se týká i tažení za studena.							
¹⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm se obsah C stanoví po dohodě.								
²⁾ pro profily o jmenovité tloušťce nad 100 mm je hodnota naho dohodnout								

Příloha 3: Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.50



OK AristoRod 12.50

SFA/AWS A 5.18: ER 70S-6
EN ISO 14341A: G3Si1

Použití:

Lesklý (nepoměděný) svařovací drát určený pro svařování většiny běžných nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností v tahu do 530 MPa, např. pro výrobu ocelových konstrukcí, tlakových nádob, transportních zařízení apod. Je vhodný i pro svařování jemnozrnných ocelí s mezí kluzu do 420 MPa. Výborné podávací vlastnosti umožňují použití vysokoproduktivní metody SAT™.

Vhodnost pro svařování, např.:

P 235/S 235 až P 420/S 420 a jiné

Klasifikace, certifikace:

CE EN 13479
ABS 3YSA
BV SA3YM
DB 42.039.29
DNV III YMS
GL 3YS
LR 3S, 3YS
TÜV 10052
další: CWB, RS

Ochranný plyn (EN ISO 14175):

M21, C1

Klasifikace svarového kovu:

EN ISO 14341-A: G 38 2 C G3Si1
EN ISO 14341-A: G 42 4 M G3Si1

Svařovací proud: (-) (+)

Typické chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn
0,10	0,90	1,50

Polohy svařování:



Jiné údaje:

W.Nr. 1.5125

Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R _m MPa	R _{el} (R _{p0,2}) MPa	A ₅ %	KV (J)/°C				
						+20	-20	-30	-29	-40
EN	TZ 0	M21	560	470	26	130	90	70		60
EN	TZ 1	M21	495	370	28	120	90			
EN	TZ 0	C1	540	440	25	110	70			
AWS	TZ 0	C1	>480	(>400)	>22					>27

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po žihání 620°C/15 h,

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu g/100g drátu	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,8	60 - 200	18 - 24	95	14	3,2 - 10,0	0,8 - 2,5
1,0	80 - 300	18 - 32	96	16	2,7 - 15,0	1,0 - 5,5
1,2	120 - 380	18 - 35	97	18	2,5 - 15,0	1,3 - 8,0
1,6	225 - 550	28 - 38	98	20	2,3 - 15,0	2,1 - 11,4

Příloha 4: Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.57



OK Aristorod 12.57

EN ISO 14311-A: G2Si
SFA/AWS A5.18: ER70S-3

Použití:

OK Aristorod 12.57 je nepoměřený svařovací drát určený pro svařování nelegovaných ocelí především tam, kde jsou požadovány vysoké svařovací parametry a nejvyšší podávací rychlosti drátu. Jeho vlastnosti lze uplatnit na mechanizovaných a robotizovaných pracovištích, např. pro výrobu ocelových konstrukcí, tlakových nádob a transportních zařízení. Je vhodný i pro svařování jemnozrnných ocelí, např. P235/S235 a dalších typů.

Klasifikace, certifikace:

CE EN 13479
DB 42.039.10
VdTUV 10615

Ochranný plyn M21, C1 (EN ISO 14175):

Klasifikace svařového kovu:

EN ISO 14311-A G 38 3 M G2Si
EN ISO 14311-A G35 2 C G2Si

Typ legování: ocel Mn/Si

Svařovací proud: \square (+)

Typické chemické složení - čistý svařový kov (%):

C	Si	Mn
0,1	0,5	0,8

D

Polohy svařování:



Typické mechanické hodnoty čistého svařového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R _m MPa	R _{eL} (R _{p0,2}) MPa	A ₅ %	KV (J)/°C		
						+20	-20	-30
EN	TZ 0	M21	515	420	26	140	110	90
EN	TZ 0	C1	485	385	25	115	90	

TZ 0 - stav po svaření

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí svar. kovu (V)	Výtěžnost plynu g/100g drátu	Spotřeba podávání (l/min)	Rychlost (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
1,2	100 - 320	16 - 32	95	20	1,8 - 12,0	1,3 - 7,5

Příloha 5: Charakteristika přídavného materiálu AristoRod 12.63



OK AristoRod 12.63

SFA/AWS A 5.18:ER 70S-6
EN ISO 14341-A: G4Si1

Použití:

Nepoměděný drát pro svařování nízkolegovaných jemnozrnných ocelí s minimální mezí kluzu do 460 MPa ve směsném plynu Ar/CO₂ nebo do 420 MPa v CO₂. Drát umožňuje svařování vysokým proudem (sprchový proces) a má krátký přenos oblouku v poloze vodorovně i mimo ni.

Vhodnost pro svařování, např.:

P 235/S 235 až P 460/S 460 a jiné

Klasifikace, certifikace:

ABS 3YSA
BV SA3YM
CE EN 13479
DB 42.039.30
DNV III YMS
GL 3YS
LR 3S, 3YS
TÜV 10051
další: CWB

Ochranný plyn (EN ISO 14175):

M21, C1

Klasifikace svarového kovu:

EN ISO 14341-A: G 42 2 C G4Si1
G 46 4 M G4Si1

Svařovací proud:

Typické chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn
0,10	1,00	1,70

D

Polohy svařování:



Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R _m MPa	R _{el} (R _{p0,2}) MPa	A ₅ (A ₄) %	KV (Jy°C)				
						+20	-20	-30	-29	-40
EN	TZ 0	M21	595	525	26	130	90	70		60
EN	TZ 1	M21	385	520	28	120	90			
EN	TZ 0	C1	570	475	25	110	70			
AWS	TZ 0	C1	>480	(>400)	(>22)					>27

TZ 0 - stav po svařování, TZ 1 - stav po žhání 650°C/15h.

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu g/100g drátu	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,8	60 - 185	18 - 24	95	14	3,2 - 10,0	0,8 - 2,5
1,0	80 - 300	18 - 32	96	16	2,7 - 15,0	1,0 - 5,5
1,2	120 - 380	18 - 35	97	18	2,3 - 15,0	1,2 - 8,0