

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: Strojírenské materiály a technologie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Využití metody Kemppi Wiseroot

Autor: Ondřej FRANTA
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Antonín KŘÍŽ, IWE

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Ondřej FRANTA
Osobní číslo: S21B0015P
Studijní program: B0715A270013 Strojní inženýrství
Specializace: Strojírenské materiály a technologie
Téma práce: Využití metody Kemppi WiseRoot
Zadávající katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Zásady pro vypracování

1. Úvod do problematiky svařování tenkých plechů
2. Svařování elektrickým obloukem
3. Představení svařovacího procesu WiseRoot a porovnání s konvenčními metodami
4. Experimentální část svaření tenkých plechů
5. Vyhodnocení svarových spojů – NDT, metalografická analýza, mechanické vlastnosti
6. Diskuse výsledků
7. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

KOVAŘÍK, Rudolf, Technologie svařování. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 185 s. ISBN 80-7082-697-5.

AMBROŽ, Oldřich, Technologie svařování. 1. vyd., Ostrava: ZEROSS, 2005. 393 s. ISBN 80-85771-81-0.

LIPPOLD John, C., KOTECKI, Damian, J. Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels. second edition Wiley-Interscience, 2005. 186 s. ISBN 0-471-43491-4.

ASM handbook: Welding, brazing and soldering. Vol. 6. 10 edition, USA: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-382-3.

BARTÁK, Jiří, PILOUS, Václav, KOVAŘÍK, Rudolf, Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-857-7197-7.

Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-857-7163-2.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Petr Beneš, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2021**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Ing. Josef Odehnal, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce panu prof. Dr. Ing. Antonínu Křížovi, IWE za rady a náměty užitečné při zpracování práce. Dále panu Bc. Martinu Brunclíkovi, IWE a Jiřímu Svobodovi ze společnosti ARC-H v Plzni za poskytnutí podkladů a zhotovení svařenců ve společnosti ARC-H. Zároveň bych také rád poděkoval výzkumným laboratořím na Západočeské univerzitě, díky kterým bylo možné bakalářskou práci celou realizovat.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Franta	Jméno Ondřej		
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Kříž, IWE	Jméno Antonín		
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KMM			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící	se
NÁZEV PRÁCE	Vyžití metody Kemppi Wiseroot			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	47	TEXTOVÁ ČÁST	35	GRAFICKÁ ČÁST	12
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem práce bylo představit metodu WiseRoot od firmy Kemppi. Metoda byla aplikována na svařencích z konstrukční oceli a porovnána s konvenční metodou 1-MIG. Byla zhotovena nedestruktivní analýza, mikroanalýza svarových spojů a změřena tvrdost napříč svarem.
KLÍČOVÁ SLOVA	Obloukové svařování, Kemppi, Wiseroot, MIG svařování, kořenová vrstva

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Franta	Name Ondřej
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Kříž, IWE	Name Antotnín
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR
TITLE OF THE WORK	Using the Kemppi WiseRoot method	
	Delete when not applicable	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	47	TEXT PART	35	GRAPHICAL PART	12
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The main goal of this bachelor's thesis was an introduction of the Kemppi WiseRoot method. The method was applied on construction steel and compared with conventional 1-MIG method. Non-destructive testing, microanalysis and hardness measurement was used.
KEY WORDS	Arc welding, Kemppi, Wiseroot, MIG welding, root weld

Obsah

Prohlášení o autorství	4
Přehled použitých zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
Seznam grafů.....	12
1 Úvod.....	13
2 Obloukové svařování.....	14
Elektrický oblouk	14
2.1 Ochranné plyny.....	15
2.2 Rizika při svařování.....	17
2.2.1 Vnitřní napětí.....	17
2.2.2 Deformace	18
2.3 Kořenová vrstva.....	19
2.3.1 Nejčastější vady kořene.....	19
2.4 Metoda MIG/MAG.....	20
2.5 Další druhy obloukového svařování	22
2.5.1 Svařování obalenou elektrodou – MMA	22
2.5.2 TIG	23
3 Svařovací technologie Wise	26
3.1 O výrobcí	26
3.2 WiseRoot+™	26
3.2.1 Historie vzniku	26
3.2.2 Charakteristika procesu	26
3.2.3 Výhody procesu WiseRoot.....	27
3.2.4 Využití procesu WiseRoot	27
3.3 Další softwary Wise.....	28
3.3.1 WiseFusion™	28
3.3.2 WisePenetration	29
3.3.3 Kemppi RGT.....	30
3.3.4 WiseThin™	31
3.3.5 WiseSteel.....	31
4 Experimentální část.....	32
4.1 Materiál experimentálních vzorků.....	33
4.2 Zhotovení svařenců.....	33

4.3	Povrchové vyhodnocení svařenců	35
4.4	Nedestruktivní analýza	39
4.5	Mikroanalýza	42
4.5.1	Příprava vzorků	42
4.5.2	Tepelně ovlivněná oblast.....	43
4.5.3	Výpočet vneseného tepla.....	47
5	Diskuse výsledků.....	52
6	Závěr.....	55
	Seznam použité literatury	56

Přehled použitých zkratk a symbolů

ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
ISO	Mezinárodní organizace pro standardizaci
MIG	Metal inert gas – Svařování v ochranné atmosféře inertního plynu tavicí se elektrodou
1-MIG	Konvenční MIG
MAG	Metal aktiv gas – Svařování v ochranné atmosféře aktivního plynu tavicí se elektrodou
TIG	Tungsten inert gas – Svařování v ochranné atmosféře wolframovou elektrodou
MMA	Manual metal arc – Ruční obloukové svařování
CO	Oxid uhelnatý
O ₂	Kyslík
Q	Vnesené teplo [kJ.mm ⁻¹]
K	Koeficient tepelné účinnosti [-]
U	Napětí [V]
I	Svařovací proud [A]
v	Rychlost svařování [mm.s ⁻¹]
°C	Stupeň Celsia
σ	Tahové napětí [Pa]
HF	High Frequency – Vysoká frekvence
C	cellulose – celulóza
A	acid – kyselý
R	rutile – rutilový
B	basic – zásaditý
mm	milimetr
s	sekunda

Seznam obrázků

Obrázek 1 Elektrický oblouk [6].....	14
Obrázek 2 Průběh napětí [8].....	18
Obrázek 3 Druhy deformací [8]	18
Obrázek 4 (a) Neprovařený kořen (b) Nadměrné převýšení kořene [12]	20
Obrázek 5 Proces MIG [13]	20
Obrázek 6 Hořák MIG. (a) Plynová tryska (b) Proudová kontaktní tryska (c) Držák trysky (d) Plynová hubice [14]	21
Obrázek 7 Přehled svařovacích poloh dle EN ISO 6947 včetně kódů ASME [17].....	22
Obrázek 8 Proces TIG [13]	24
Obrázek 9 Hořák TIG. (a) Tryska (b,c) kleština (d,f) Ochranný kroužek (e) Přívod plynu (g) O-kroužek (h) Kryt hořáku [14]	25
Obrázek 10 Průběh proudu WiseRoot [23]	27
Obrázek 11 Polohy svařování WiseRoot [23].....	28
Obrázek 12 WiseFusion [23].....	29
Obrázek 13 Výlev drátu WisePenetration [23]	30
Obrázek 14 WisePenetration [23]	30
Obrázek 15 Kemppi RGT [23].....	31
Obrázek 16 FastMIG X 450	34
Obrázek 17 Svařenec 1 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	36
Obrázek 18 Svařenec 2 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	36
Obrázek 19 Svařenec 3 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	37
Obrázek 20 Svařenec 4 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	37
Obrázek 21 Svařenec 5 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	38
Obrázek 22 Svařenec 6 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	38
Obrázek 23 Svařenec 7,8 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana	39
Obrázek 24 RTG Svařenec 1	40
Obrázek 25 RTG Svařenec 3.....	40
Obrázek 26 RTG Svařenec 4.....	41
Obrázek 27 RTG Svařenec 5.....	41
Obrázek 28 RTG Svařenec 6.....	42
Obrázek 29 RTG Svařenec 7, 8.....	42
Obrázek 30 (a) Metalografická pila (b) Hydraulický lis (c) Manuální bruska.....	43
Obrázek 31 Přejídná oblast S235.....	44
Obrázek 32 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařenec (4).....	44

Obrázek 33 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařenec (2).....	45
Obrázek 34 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařenec (6).....	45
Obrázek 35 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařenec (5).....	46
Obrázek 36 Vel. tep. ovlivněné oblasti svařenec (6).....	46
Obrázek 37 Vel. tep. ovlivněné oblasti svařenec (5).....	47
Obrázek 38 Linie vtisků	48
Obrázek 39 Manuálně označená oblast vtisku dle Vickerse	49
Obrázek 40 Vtisk v bodě 6 – struktura vzorku S355JR, WiseRoot, tvrdost 437 HV 0,1	54
Obrázek 41 Vtisk v bodě 6 – struktura vzorku S355JR, 1-MIG, tvrdost 231 HV 0,1	54

Seznam tabulek

Tabulka 1 Značení obalených elektrod [6].....	23
Tabulka 2 Chemické složení S235JR [24]	33
Tabulka 3 Chemické složení S355JR [25]	33
Tabulka 4 Vlastnosti přídavného materiálu [27].....	33
Tabulka 5 Technická specifikace FastMIG [31]	34
Tabulka 6 Seznam svařenců.....	35
Tabulka 7 Svařovací parametry.....	35
Tabulka 8 Vnesené teplo	48
Tabulka 9 Srovnání velikostí TOO	53

Seznam grafů

Graf 1 Průběh mikrotvrdosti S355 WiseRoot	49
Graf 2 Průběh mikrotvrdosti S355 1-MIG	50
Graf 3 Průběh mikrotvrdosti S355 Pulse+WiseFusion	50
Graf 4 Průběh mikrotvrdosti S355 1-MIG+WiseFusion.....	51
Graf 5 Průběh mikrotvrdosti S235 WiseRoot	51
Graf 6 Průběh mikrotvrdosti S235 1-MIG	52
Graf 7 Průběh tvrdosti S235.....	53
Graf 8 Průběh tvrdosti S355.....	54

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je ověřit vhodnost svařovací technologie WiseRoot ke zhotovování kořenových vrstev. Na kořenové vrstvy jsou v posledních letech kladeny čím dál tím vyšší jakostní nároky. Trendem v oblasti kořenových vrstev je snižování vneseného tepla a zvyšování produktivity. Technologie WiseRoot je aplikovatelná na zdrojích pro technologii MIG/MAG, proto je s ní dále porovnávána, jako s výchozí technologií.

V první části je věnována pozornost obloukovému svařování. Je zde vysvětlena podrobněji technologie MIG/MAG a dále práce zmiňuje další vhodné metody k přímému porovnání s Wise produkty, a to jsou metody MMA a TIG.

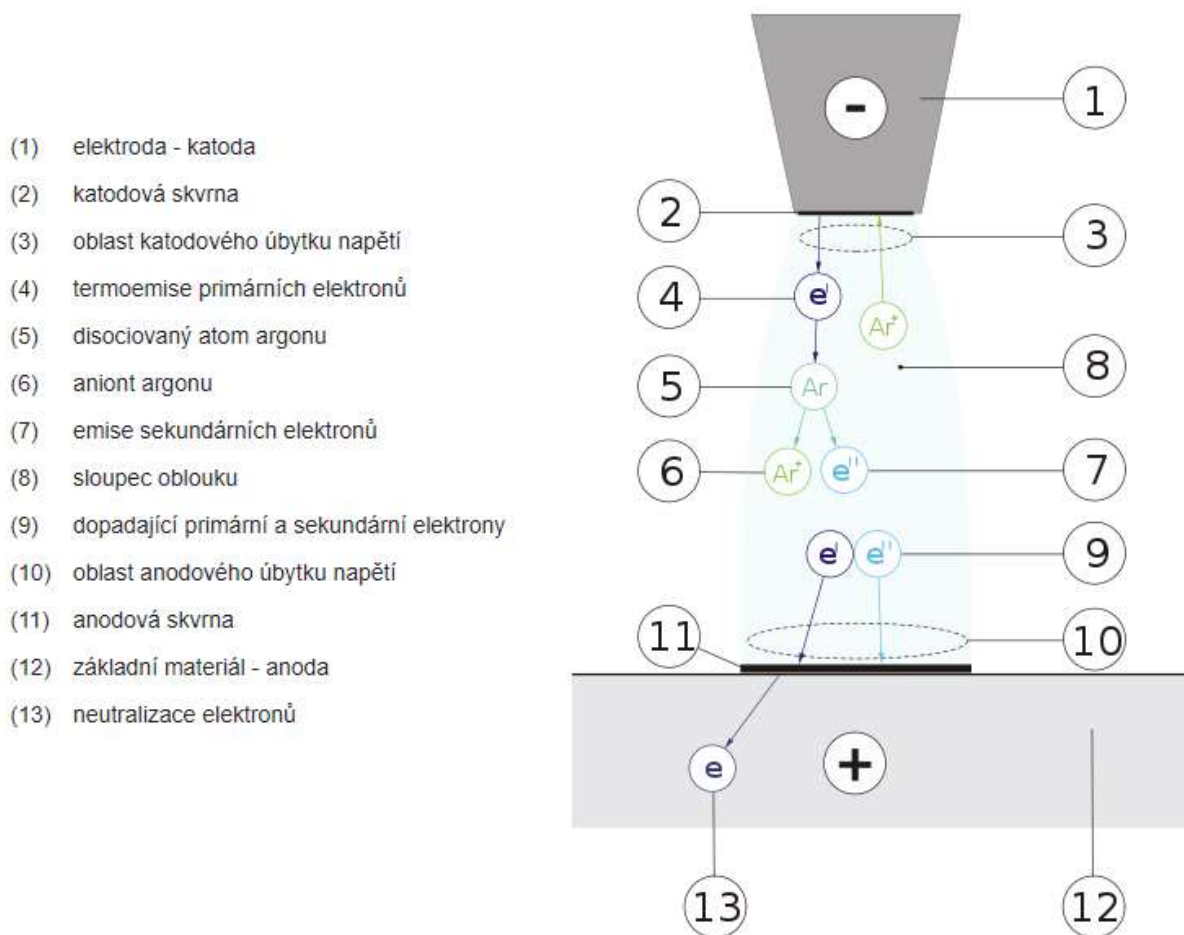
V experimentální části jsou použity jednotlivé technologie Wise a jsou porovnány s konvenčními metodami svařování. Dále jsou zhotoveny metalografické výbrusy jednotlivých svařenců, kontrola porozity svarů pomocí nedestruktivní technologie a porovnání mechanických vlastností jednotlivých svařenců.

2 Obloukové svařování

U obloukového svařování je jako zdroj tepla využíván elektrický oblouk hořící mezi elektrodou a základním materiálem. Jako elektroda se používá kovový drát, který se odtavuje. Spolu se základním materiálem tvoří základní svarovou lázeň. Nebo za použití wolframové elektrody, která se oproti předchozímu způsobu neodtavuje, je svarová lázeň tvořena pouze roztaveným základním materiálem. Svařování elektrickým obloukem se dá rozdělit dle různých kritérií, tato práce se ale bude zabývat pouze těmi nejzákladnějšími, jelikož tyto metody jsou vhodné pro srovnání s technologiemi Wise. Jsou číselně definovány normou ČSN EN ISO 4063 jako metoda 111 – Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (dále metoda MMA), metoda 131 – Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním ochranném plynu (MIG), 135 – Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním ochranném plynu (MAG) a metoda 141 – Obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním ochranném plynu (TIG). [1][2][3][4][5]

Elektrický oblouk

Přesně se jedná o nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj hořící v prostředí ionizovaného plynu. Na oblouku lze jednoznačně rozlišit několik oblastí. Každá z nich je významná pro fungování svařování elektrickým obloukem. Nejzásadnější oblasti jsou zde důkladněji popsány. [6]



Obrázek 1 Elektrický oblouk [6]

Katodová skvrna

Na konci záporné elektrody (katody) se nachází katodová skvrna. Jedná se o oblast nejvyšší teploty. Při rostoucím proudu se katodová skvrna zmenšuje a narůstá teplota, čímž se také zvyšuje proudová hustota. Katodová skvrna zodpovídá za termoemisi elektronů, tedy emisi elektronů způsobenou teplem. Je důležitá pro ionizaci a disociaci atomů a molekul ochranného plynu. K ionizaci dochází srážkami emitovaných elektronů s atomy plynu, které se při tom dále štěpí. Ionizované atomy rozložené na elektrony a ionty vedou dobře elektrický proud. Tyto částice jsou dále rozpohybovány vnějším napětím a dochází k dalším srážkám a následnému dělení. Tímto způsobem ionizace umožňuje zapálení oblouku. V přímé blízkosti katody dochází k úbytku napětí, v jehož oblasti získávají elektrony vyšší kinetickou energii. Tento úbytek například u metody TIG při napětí 100 A činí 8 V. Teplota katody se snižuje spotřebou práce při emisi elektronů a je opět zvyšována dopadajícími kladně nabitými částicemi. Teplota katody se pohybuje v rozmezí 2400-3000 °C.

Anodová skvrna

Jedná se o skvrnu, do které se soustřeďuje elektrický oblouk na anodě. Probíhá zde neutralizace a odvádí se tudy dopadající elektrony. Jejich kinetická energie se zde mění na teplo a elektromagnetické záření. Teplota oproti katodové skvrně je vyšší, a to zhruba v rozmezí 2700-3600 °C. Vyšší teplota je zde právě proto, že je zde vyšší dopadová energie urychlených elektronů. Vzniklým teplem zde dochází k odpařování malých částic ze svarové lázně. Tyto částice vstupují do plazmatu, kde jsou disociovány a ionizovány. Stejně jako na katodě je i zde úbytek napětí. A zrovna tak jako na katodě tento úbytek napětí vede ke zrychlení záporně nabitých částic.

Sloupec

Jedná se o ostře zářící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy. Nachází se mezi elektrodami. Hodnoty teploty zde dosahují 5000 až 7000 °C a společně s průběhem tlaku ve středu kopírují Gaussovu křivku, kde se uprostřed nacházejí nejvyšší hodnoty. Směrem od středu teplota klesá.

2.1 Ochranné plyny

Ochranné plyny využívá obloukové svařování metodami MIG/MAG a TIG. Plyny slouží k ochraně svarového kovu primárně před působením vzdušného kyslíku a dusíku proti oxidaci. Tvoří vhodné prostředí pro stabilní oblouk, zvyšuje odolnost elektrody poškozovanou oxidací, chrání svarovou lázeň před vnikáním nečistot, které by snižovaly jakost svaru, křehnutí a mohly by vést až k trhlinám. Dále má plyn vliv na odtavujících se kapky přídavného materiálu. V praxi se používají jak čisté plyny o čistotě 99,95 %, tak směsi plynů. Směsi jsou tvořeny až čtyřmi plyny a každý z nich ovlivňuje výsledné vlastnosti ochranné atmosféry.

Tepelná vodivost jednotlivých plynů je závislá na teplotě. Daný jev je způsoben intenzivnějším šířením tepla vedením v pevných částicích materiálu, sáláním v pórech a šířením tepla prouděním. [3][4][6][7]

Argon

Jedná se o bezbarvý inertní plyn bez chuti a zápachu, který je těžší než vzduch, nereaguje s ostatními látkami, dále je netoxický a nehořlavý. Je získáván ze vzduchu, který obsahuje přibližně až procento celkového argonu. Je těžší než vzduch a to znamená, že vytváří lepší ochranu i při nižším průtoku plynu svařovací hubicí. Jeho hustota má příznivý vliv na případné proudění okolního vzduchu, se kterým nereaguje. Při svařování se používá čistý

argon. Jeho minimální použitelná čistota je 99,95 %. Nejčastěji se využívá ke svařování oceli, hliníku a jeho slitin, hořčíku, mědi, niklu, zirkonu nebo tantalu. Pokud se s ním svařuje ocel, je kombinován s dalšími plyny, a to například s kyslíkem, oxidem uhličitým, vodíkem, dusíkem či heliem. Oblouk se v argonu zapaluje snadno díky nízkému ionizačnímu potenciálu argonu. Hoření je klidné a stálé, plamen je tenký a disponuje vysokou proudovou hustotou, díky které je průvar úzký a hluboký.

Argon + helium

Tato kombinace ochranných plynů se nejčastěji používá při svařování MIG a TIG. Směs argonu a helia poskytuje svářeči větší hloubku průvaru a dodává vyšší tepelný příkon. Díky tomu tato směs umožňuje rychlejší svařovací rychlosti. Směs je často využívána, jelikož argon zde působí tak, že oblouk při svařování se chová klidně, popřípadě působí čistícím účinkem a helium svým vyšším tepelným příkonem zvyšuje teplotu svarové lázně, což má za následek vyšší tekutost a tím pádem i lepší smáčení. Lepší smáčení je vyžadováno u svařování slitin kovů, hliníku a mědi.

Argon + vodík

Uvedená kombinace plynů se používá při mechanizovaném svařování TIG. Směs ochranných plynů zvyšuje napětí oblouku a disponuje redukčními schopnostmi. Redukční schopnosti vedou k vyšší čistotě povrchu svaru. Využívá se při svarech vysokolegovaných ocelí.

Argon + dusík

Směs plynů dobře vede teplo, a proto se využívá především ke svařování mědi a také při svařování netavící se elektrodou v inertním plynu metodou TIG.

Helium

Helium je plyn bez chuti a zápachu, který nereaguje s okolím. Je přibližně 10x lehčí než argon, a proto je pro dostatečný ochranný účinek tohoto plynu vyžadován vyšší objemový průtok než u argonu. Jelikož helium má vysoký ionizační potenciál, tak je zapalování oblouku obtížné. Z dalších vlastností má helium výbornou tepelnou vodivost a umožňuje vysoké napětí na oblouku. Díky těmto vlastnostem helium poskytuje vysoký tepelný výkon, který umožňuje zvýšit rychlost při svařování. Helium je dodáváno pro své účely, tak jako argon, o vysoké čistotě, která činí od 99,996 % až do 99,999 %. Čisté helium je využíváno při svařování mědi, hliníku a jejich slitin. Při svařování hliníku neposkytuje takový čistící účinek jako argon.

Oxid uhličitý

Oxid uhličitý je nejedovatý, bezbarvý plyn. Je těžší než vzduch a podílí se na chemických reakcích ve svarové oblasti. Tím pádem jde o aktivní plyn, používající se metodou svařování MAG. Při svařování v ochranné atmosféře je slyšet ostrý praskavý zvuk, jež vydávají kapky přídavného materiálu při oddělování. Za vysoké teploty se oxid uhličitý rozkládá na molekuly oxidu uhelnatého (CO) a kyslíku (O₂). Kyslíku je nutno se zbavit za pomoci legur, nejčastěji křemíku, který je součástí přídavného drátu a oxid uhelnatý se vyloučí do strusky, kde chrání povrch svarové lázně. K vlastnostem oxidu uhličitého patří dobré vedení tepla. To napomáhá dobrému tavení přídavného materiálu. Svary jsou pak po správně provedeném svařování celistvé – bez pórů a trhlin. Svařování je rychlé a průnik svaru je hluboký. Jako nevýhoda při svařování tímto plynem je často uváděn velký rozstřík, za předpokladu, že je použit plyn bez dalších přísad. Rozstřík je způsoben příliš vysokým napětím na oblouku. Jelikož by bylo svary nutné dále opracovat, používá se často ve směsích, které tuto vlastnost snižují. Mechanické vlastnosti při svařování metodou MAG jsou relativně dobré, ale přidáním dalšího plynu se dají vylepšit. Směs s argonem zvýší svarovou houževnatost. Nejčastěji je oxid

uhličitý tedy používán ve směsích, a to například s argonem a kyslíkem nebo argonem, heliem a kyslíkem. I přes to se čistým plynem svařuje. Využívají ho převážně kutilové nebo menší dílny, které nevyžadují dokonalý povrch svaru.

Kyslík

Kyslík zvyšuje povrchové napětí, tekutost svarové lázně, tím pádem i smáčivost. Zlepšuje se tím tvar svaru, snižuje se obsah oxidů a zlepšuje se splynutí základního s přídatným materiálem. Plyn je často používán v již zmíněných směsích s argonem nebo oxidem uhličitým díky jeho vlastnostem.

2.2 Rizika při svařování

Svařováním dochází k nerovnoměrnému ohřevu materiálu svaru, to má za následek, že se zde nacházejí oblasti jak o teplotách tavení materiálu, tak o teplotách okolí. V daném rozmezí teplot se pak výrazně mění jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti materiálu. Při chladnutí materiálu se projevují různé objemové změny a ty mají za příčinu vznik vnitřního napětí. To se na základě svarové tuhosti přenáší do celého svařence. Napětí může vyvolat následnou deformaci, či dokonce trhliny.

Při svařování tenkých plechů, lze předpokládat, že velikosti vnitřních napětí a deformací budou mnohonásobně větší než u větších svařenců, proto je nutné si tato rizika uvést.

2.2.1 Vnitřní napětí

Vnitřní neboli zbytkové napětí lze rozdělit podle jeho charakteru na:

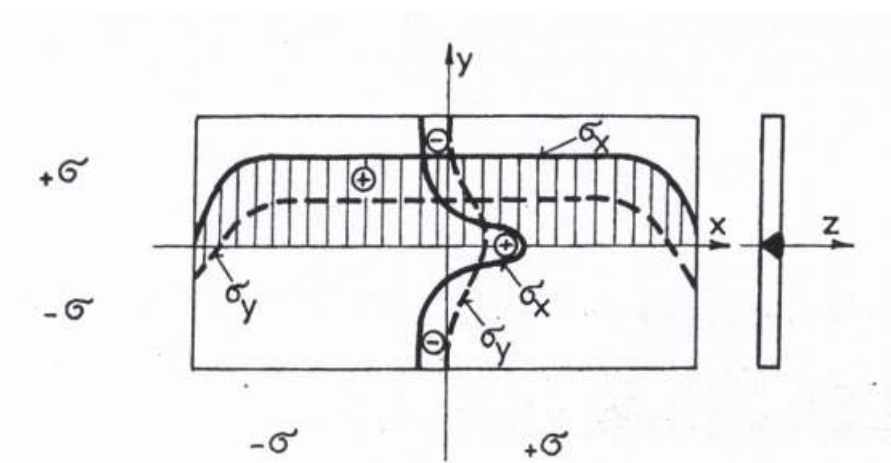
- Teplotní – setkání se ohřátého svařovaného materiálu, který má tendenci se rozpínat a materiálu o teplotě okolí má za následek vznik teplotního napětí
- Strukturní – změna objemu při strukturních přeměnách vede ke vzniku strukturního napětí

Podle doby působení na:

- Přechnodná – působí pouze omezenou dobu
- Zbytková – zůstane v materiálu i po ukončení technologického procesu

Pokud se ve svaru napětí nevyčerpá na tvorbu trhlin – napětí zde zůstane a svařenec se bude nacházet ve stavu napjatosti podle os lze napjatost rozdělit na:

- Jednoosou – napětí působící v jednom směru
- Dvojsoou – napětí působící ve více směrech, ale stále v jedné rovině
- Trojosou – napětí působící ve všech směrech



Obrázek 2 Průběh napětí [8]

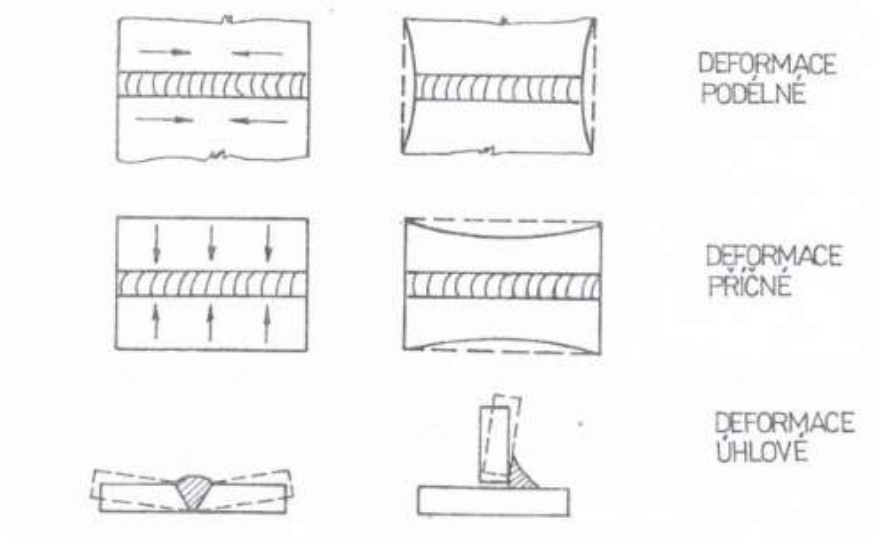
Podélné pnutí σ_x je na začátku a konci svaru rovno nule. Podél svaru je tahové a má hodnotu 0,7 až 1,15 meze kluzu. Napříč svaru přechází prudce z tahového do tlakového napětí a na okraji desky je buď tahové (je-li deska široká), či tlakové (deska úzká).

Příčné pnutí σ_y je na začátku a na konci svaru obvykle tlakové a dosahuje zde hodnoty 0,1 až 0,6 meze kluzu. Podél svaru je tahové s hodnotou 0,30 až 0,6 meze kluzu. Ve směru napříč svaru je tahové a pomalu klesá směrem ke krajům desky, kde má nulovou hodnotu.

2.2.2 Deformace

Deformace při svařování vznikají v důsledku již zmíněných působících napětí ve svarku. Deformace může působit v celém svarku, nebo pouze jako místní deformace, které pak lze rozlišovat dle směru smrštění na:

- *Podélné* – Ve směru osy svaru, velikost závisí na metodě svařování a tuhosti. U tenkých plechů dochází k nízké tuhosti k vyboulení
- *Příčné* – V kolmém směru na podélnou osu svaru v rovině povrchu plechu. Nejčastěji u tupých a koutových svarů
- *Úhlové* – Zvláštní druh příčné deformace – projevuje se odchýlením desky od původní roviny. Nejčastěji k ní dochází u svarů s úkosem, a to: U, V, W a u koutových svarů.



Obrázek 3 Druhy deformací [8]

Opatření ke snížení napětí a deformací

Při výrobě svaru je snaha minimalizovat zbytková napětí a deformace ve svarku. Především jim lze podle následujících hledisek:

Technologičnost konstrukce

- Celková tuhost – Velikost deformací závisí na rozměrech materiálu a tuhosti. Čím více tuhá konstrukce, tím budou vyšší vnitřní pnutí, naopak více elastická se bude deformovat. Tak jako svařování pevně upnutého dílu povede k rozměrové stálosti, ale vzniku vysokých vnitřních napětí. Naopak svařováním volného svařence nedojde ke vzniku takových pnutí, ale vznikne velké smrštění a deformace.
- Typ svaru – Rozdílný průřez svaru má za následek rozdílné velikosti napětí a deformací
- Velikost svaru – Dlouhé svary budou mít za následek velké napětí a svary o velkém průřezu se budou příčně deformovat.

Technologické parametry svařování

- Napětí – Zvýšené napětí ovlivňuje stabilitu elektrického oblouku, to má za následek zvýšený rozstřík roztaveného materiálu.
- Proud – S rostoucím proudem se současně zvyšuje teplota a tím dochází ke zvýšení množství nataveného kovu. To má za následek hlubší průvar.
- Rychlost svařování – Rychlost redukuje množství vneseného tepla. Výhodná je co nejvyšší rychlost za předpokladu, že pořád dochází k dostatečnému natavení materiálu. Pokud ale je rychlost příliš vysoká, může docházet k neprůvaru.
- Počet vrstev – Více vrstev vyvolá ve svaru větší deformace.

Následné zpracování

- Žíhání ke snížení pnutí
- Normalizační žíhání – Používá se k dosažení rovnoměrné struktury
- Kalení – Zvyšuje se tvrdost a otěruvzdornost
- Popouštění – Snižuje po kalení nadměrnou tvrdost a zvyšuje houževnatost materiálu
- Mechanické zatěžování – Materiál je mechanicky či vibračně namáhán tak, aby došlo uvnitř materiálu k plastické deformaci, která odstraní vnitřní pnutí.

2.3 Kořenová vrstva

Kořenovou vrstvou je míněna první vrstva svarového spoje, kde k zaplnění svarové mezery je nutné použít více než jednu svarovou housenku. [9]

2.3.1 Nejčastější vady kořene

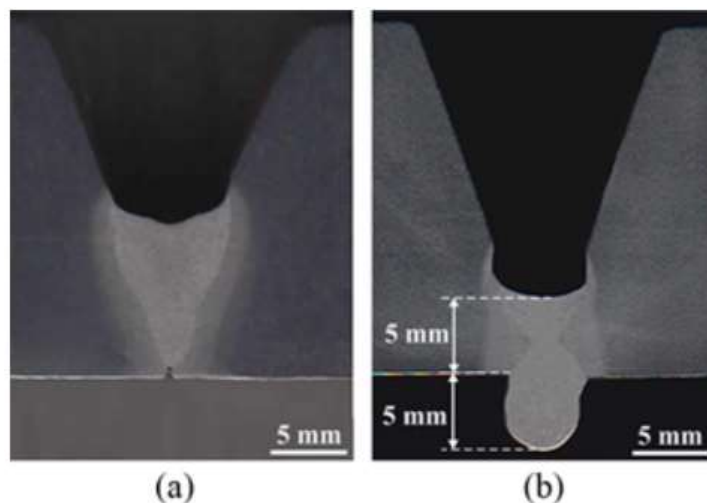
Příčiny vzniku vad jsou nejčastěji příliš vysoká rychlost svařování, nedostatečný proud, příliš velký průměr elektrody, malá mezera mezi svařovanými díly, vysoké otupení, špatně zvolené technologie, nebo nevhodné vedení elektrody v průběhu svařování.

Jako opatření ke vzniku vad v kořeni lze snížit rychlost svařování, volit elektrodu s menším průměrem, upnout nebo jinak zajistit optimální mezeru mezi svařovanými díly, zlepšit techniku svařování. [10][11]

K nejčastějším vadám v kořenových vrstvách patří (číselně označeno dle ČSN EN 6520):

- 4021 – Neprovařený kořen
- 504 – Nadměrné převýšení kořene
- 4014 – Studený spoj v kořeni

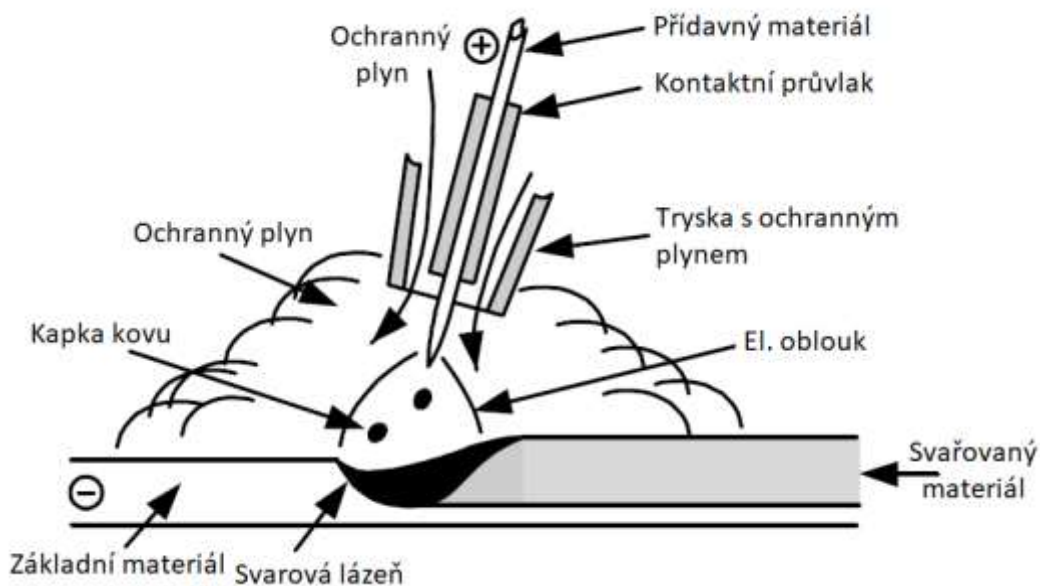
- 5013 – Vrub v kořeni
- 515 – Hubený kořen
- 5062 – Přetečení kořenové vrstvy



Obrázek 4 (a) Neprovařený kořen (b) Nadměrné převýšení kořene [12]

2.4 Metoda MIG/MAG

Zkratka MAG neboli Metal-arc Active Gas welding vychází z německého jazyka a značí metodu svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu. Oproti tomu zkratka MIG (I je zde pro inert gas) značí inertní plyn. Jedná se o druh obloukového svařování, kde se přídavný materiál taví pod ochranným plynem, který je přiváděn ze zásobníku. Ochranný plyn se aktivně podílí na procesech v elektrickém oblouku a chrání ho i tavnou lázeň před přístupem vzdušného kyslíku. Elektroda je holý drát navinutý na cívce. Elektrický oblouk hoří mezi anodou, kterou je přídavný drát a katodou tvořenou základním materiálem. MAG se používá pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí a MIG převážně při svařování hliníku. [1][2][3]



Obrázek 5 Proces MIG [13]

Druhy elektrod

Jako přídavné materiály pro svařování MIG/MAG používá drátové nebo trubičkové elektrody. Ty jsou navinuty na cívkách a zabaleny do vhodných obalů. Přídavné materiály musí doplnit objem svarové lázně, nahradit, které při svařování byly ze svarové lázně odstraněny, musí být vodičem el. proudu a dodávat vhodné legovací přísady. Vyrábějí se dva druhy:

- Drátové elektrody, které se využívají při svařování ocelí ručním i plně automatizovaným způsobem. Vyrábí se o průměru 0,6 až 1,2 mm. Jejich povrch je poměděný, která zabraňuje korozi a zvyšuje množství přivedeného proudu do svarové lázně.
- Trubičkové elektrody se též využívají při svařování ocelí ručním i plně automatizovaným způsobem. Dodávány jsou v průměru 1 až 2,4 mm. Dělí se dle složení náplně na trubičkové elektrody s rutilovou náplní, bazickou náplní a kovovou náplní. Bazická a kovová náplň se využívá pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí. Rutilová náplň je vhodná ke svařování nelegované, nízkolegované a vysokolegované oceli.

Podávací mechanismus drátu

Drát musí být přiváděn konstantní rychlostí k udržení elektrického oblouku a svarové lázně dobrých vlastností. K tomuto účelu slouží podavače drátů. Podavač drátu je umístěn uvnitř nebo přímo na zdroji svařovacího proudu. Je tvořen regulačním elektromotorem s mechanickou převodovkou a soustavou rovnacích a hnacích kladek. Mezi kladkami prochází drát, který se odvíjí z cívky. Nejspolehlivější zařízení bývá zpravidla vybaveno posuvem přes čtyři kladky.

Hořák

Hořák slouží k přívodu svařovacího proudu na tavící se elektrodu a k usměrnění plynu do místa svaru. Hořáky se dělí na ruční a strojní. Podle proudového zatížení na hořáky chlazené plynem a hořáky chlazené kapalinou pro proudy nad 200 A.



Obrázek 6 Hořák MIG. (a) Plynová tryska (b) Proudová kontaktní tryska (c) Držák trysky (d) Plynová hubice [14]

Přenos svařovacího proudu je realizován pomocí kontaktní trysky. Tryska je značně tepelně namáhána, a proto je vyrobena z dobře vodivé mědi. Tvar trysky a velikost otvoru se vždy odvíjí od průměru drátu. Průměr vodícího otvoru musí být vždy alespoň o 0,2 mm větší než průměr drátu, aby byl zaručen průchod drátu.

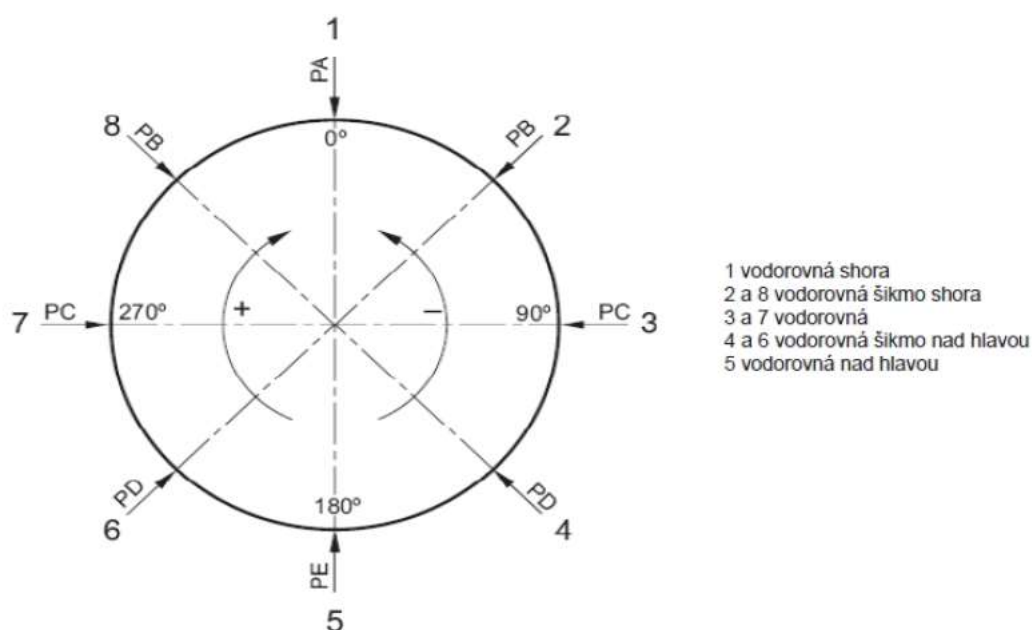
Další velmi tepelně namáhanou součástí hořáku je hubice. Ta slouží k usměrnění ochranného plynu vycházejícího z rozdělovače plynu k místu svaru. Hubice také bývají vyrobeny z mědi legované chromem nebo z keramiky, díky svým izolačním a tepelně odolným vlastnostem.

Velikost a tvar hubice se volí podle svařovacího proudu, šířky svaru a tepelné vodivosti svařovaného materiálu. Hubice rozdělujeme na tři typy: kónické, válcové a bodovací.

2.5 Další druhy obloukového svařování

2.5.1 Svařování obalenou elektrodou – MMA

Manual Metal Arc (MMA) v překladu ruční obloukové svařování je jedna z nejrozšířenějších obloukových metod svařování. Jedná se o ruční svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou. Teplem elektrického oblouku je taven svařovaný materiál. Vytvořená struska z obalu elektrody chrání odtavené kapky kovu před nežádoucí reakcí se vzduchem tak, že kapky obaluje a zároveň vytvoří plynnou clonu, která zabraňuje přístupu vzduchu ke kapkám odtaveného kovu. Dále struska slouží ke snížení rychlosti ochlazování, eliminaci vzniku teplotních pnutí a s tím spojenými deformacemi materiálu. Svařování se provádí nejčastěji ručně, a to ve všech polohách. [1][3][4][15][16]



Obrázek 7 Přehled svařovacích poloh dle EN ISO 6947 včetně kódů ASME [17]

Svařovací proud

Pro ruční obloukové svařování lze použít jak střídavý, tak stejnosměrný proud. Ale některé typy obalů tyčových elektrod nelze svařovat střídavým proudem, například pokud se jedná o bazické elektrody. Při svařování stejnosměrným proudem se u většiny elektrod záporný pól dává na elektrodu a kladný pól svařovanou součást. Výjimku tvoří bazické a celulózové elektrody, jež se lépe svařují obráceně. Podle způsobu spojování materiálu a základního materiálu jsou třeba různé síly proudu. Zatížení elektrod je omezeno jejich průměrem a délkou, a proto jsou tyčové elektrody dodávány v různých délkách a průměrech. Při větším průměru elektrody se zpravidla používají vyšší svařovací proudy.

Obalené elektrody

Obalené elektrody se skládají z jádra elektrody (přídavného drátu) a obalu, který obsahuje legury, které zlepšují pevnost a houževnatost svaru. Podle složení obalu se rozlišují základní a kombinované typy, dle písmen: C=cellulose (celulóza), A=acid (kyselý), R=rutile (rutil) a B=basic (zásaditý). Dále se u elektrod rozlišuje tloušťka obalu a to tak, že jsou tenké obalené, středně nebo tlustě obalené. Obal slouží ke tvorbě ochranné atmosféry, čímž zamezuje

přístupu kyslíku do svarové lázně. Obal usnadňuje jak zapalování, tak stabilizuje hoření oblouku a díky svým legurám může snižovat obsah nežádoucích prvků.

Označení druhu obalu elektrody dle ČSN EN 499	
Označení	Druh obalu, vlastnosti, použití
A	kyselý, jemný přenos, plochý šev, nevhodný pro nevýhodné pozice
R	rutilový, pro tenké plechy a všechny polohy
RR	rutilový tlustý, univerzální, jemná struktura svaru
RA	rutil – kyselý
RB	rutil – bazický, dobrá vrubová pevnost, polohy kromě svislé shora dolů
B	bazický

Tabulka 1 Značení obalených elektrod [6]

Parametry svařování

Při ručním svařování obalenou elektrodou svářeč nastavuje pouze intenzitu proudu, napětí svařovacího oblouku je dané délkou svařovacího oblouku. Při určování intenzity proudu je nutné vzít v úvahu možnost zatížení použitého průměru elektrod proudem. Platí zde pravidlo, že spodní mezní hodnoty platí pro svařování kořenových vrstev. S vyšší intenzitou proudu stoupá také odtavovací výkon, zvětšuje se závar a související rychlost svařování. Dané intenzity proudu platí pouze pro nelegované nebo nízko legované oceli. U vysokolegovaných ocelí a niklových materiálů se musejí z důvodu většího elektrického odporu tyče jádra nastavit na menší hodnoty.

Zapálení svařovacího oblouku

Proces svařování je při ručním svařování obalenou elektrodou zahájen vždy dotykovým zapálením. K uzavření proudového okruhu, je třeba vytvořit mezi elektrodou a obrobkem zkrat, tím se svařovací oblouk zapálí, a ihned poté elektrodu lehce nadzvednout. Zapálení oblouku by se mělo provádět mimo spoj a má být pouze tam, kde se po hoření svařovacího oblouku rychle opět zataví. Tato ohřátá místa, kde se takto nepostupuje jsou náchylná ke vzniku trhlin. U bazických elektrod, které mají sklon k počáteční poréznosti, musí zapalování probíhat výrazně dříve před vlastním začátkem svařování. Poté se svařovací oblouk vrátí na počáteční bod svaru a během dalšího svařování se první kapky, které jsou většinou porézní, opět roztaví.

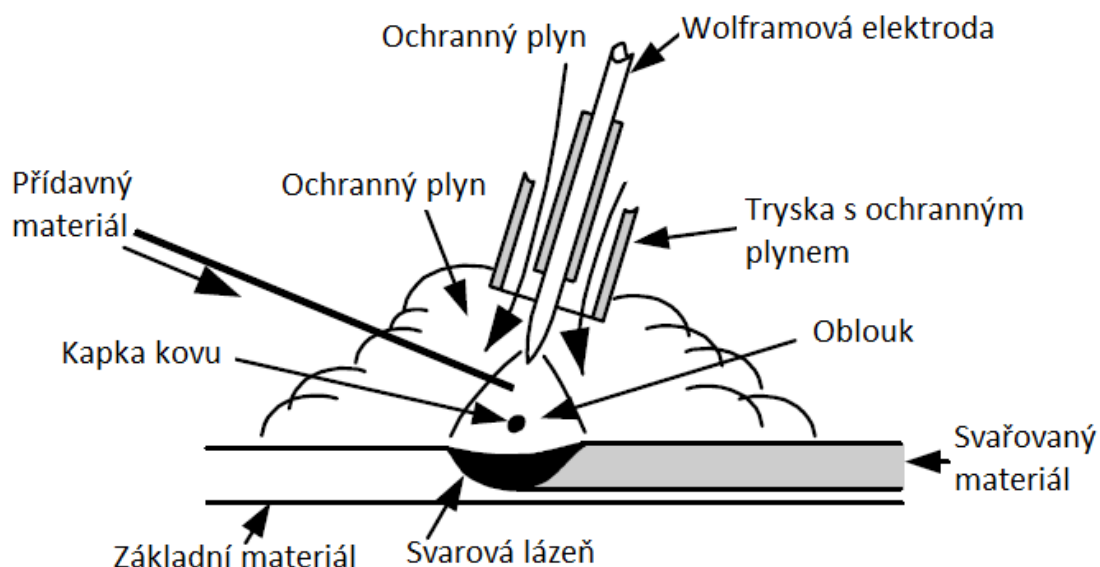
Vedení elektrody

Elektrodou lze svařovat svisle nebo s lehkým natočením. Sklonění se provádí do směru svařování. Viditelná délka svaru, by měla odpovídat přibližně průměru tyče v jádru. Bazické elektrody se musejí svařovat s velice krátkým svařovacím obloukem. Aby to bylo možné zaručit, musejí být vedeny s minimálním sklonem. Ve většině poloh se svařují šňůrkové housenky nebo se lehce přechází šířkou spáry, která je směrem nahoru větší. Pouze v kyvných housenkách se provádí tažení v celé šířce spáry. Zpravidla se svařuje vzad, pouze v poloze PF se elektroda nastavuje vpřed.

2.5.2 TIG

TIG je zkratka pro tungsten inert gas. Jedná se o proces svařování elektrickým obloukem za použití netavicí se wolframové elektrody. Při procesu je využíván ochranný plyn bez použití tlaku a může se provádět bez použití přídavného materiálu, jelikož svarovou lázeň tvoří pouze základní materiál. Přídavný materiál se přidává pouze tehdy, kdy je zapotřebí legování svarové

lázň. Při tomto způsobu svařování hoří oblouk mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem. Svarová oblast je chráněna ochranným plynem, který proudí keramickou trubicí kolem elektrody. Díky výborné kvalitě svarů má proces TIG vysoké uplatnění, zejména v leteckém, lodním, jaderném, petrochemickém a polovodičovém průmyslu. [1][2][3]



Obrázek 8 Proces TIG [13]

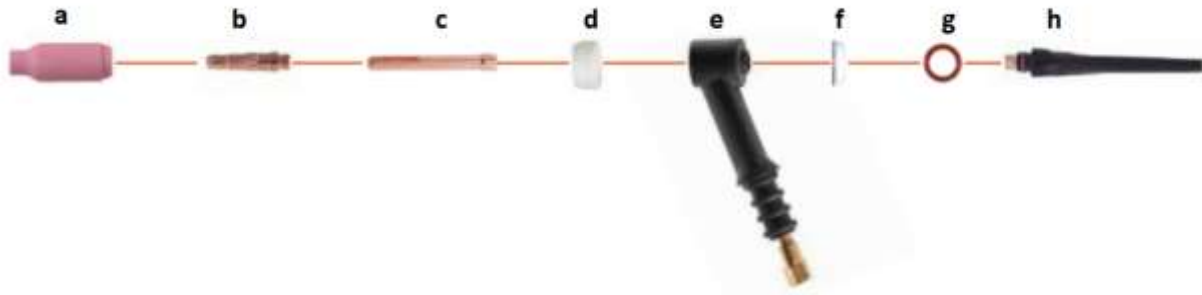
Druhy elektrod

Netavící se elektrody se dají rozlišovat dle legujících prvků, ze kterých jsou vytvořeny. Legující prvky zlepšují některé vlastnosti a tím pak vhodnost metody pro použití při svařování různých materiálů. Vždy je základním materiálem wolfram, a proto se používá označení wolframová elektroda i přes to, že je elektroda tvořena dalšími přísadami. Přísadové prvky tvoří cer, zirkon, thorium a lanthan. Tyto přísady pozitivně ovlivňují životnost elektrody. Dle jejich procentuálního složení jsou rozlišovány různými barvami. Například elektroda WT40 obsahuje jako základ wolfram, dále 4 % oxidu thoričitého a je konvenčně označována oranžovou barvou. Elektrody se brousí a jejich úhel hrotu má ovlivňuje výsledný svar. Tloušťka elektrody a přísady určují doporučené hodnoty proudu pro různé elektrody. Při překročení hodnot může dojít k jejímu poškození.

Pro svařování hliníku se používá čistě wolframová elektroda s použitím střídavého proudu a elektrody se zaobleným hrotem. Thorium zvyšuje emisi elektronů. To souvisí s tím, že jde o radioaktivní prvek. Z tohoto důvodu je nutná zvýšená hygiena pracovního prostředí s důsledným odsáváním vzniklých nebezpečných zplodin. Elektrody obsahující cer a lanthan mají obdobné přednosti jako thorium. Jejich značnou výhodou ale je, že nejsou radioaktivní a neemitují nebezpečné záření α . Lanthan také v některých případech usnadňuje zažehnutí oblouku. Zirkon zase zabraňuje uvolňování wolframových vměstků do svaru.

Svařovací hořáky

Svařovací hořák je nejvíce namáhanou komponentou celé svářečky. Probíhá v něm přívod proudu k elektrodě, přivádí se skrze něj ochranný plyn, který se je zde usměrňován. Je v něm upevněna svařovací elektroda a také jím prochází chladicí tekutina.



Obrázek 9 Hořák TIG. (a) Tryska (b,c) kleština (d,f) Ochranný kroužek (e) Přívod plynu (g) O-kroužek (h) Kryt hořáku [14]

Druhy hořáků

Hořáky se dělí převážně dle chladicího média na chlazené vzduchem a chlazené vodou. Chlazení plynem se využívá při ručním svařování. Ke chlazení vodou se přistupuje hlavně při strojním svařování. Vodní chlazení umožňuje použít vyšší proudy, což má vliv na svařovací výkon. Dalším rozdílem je, že trysky hořáků chlazených plynem bývají keramické, na rozdíl od trysek vodou chlazených hořáků, které jsou zpravidla vyráběny z mědi.

Zapálení oblouku

Zapalování oblouku při TIG svařování lze dělat dvěma způsoby. Zapalování s dotykem a bezdotykově. Dotykové zapalování umožňuje svářeči zapálit oblouk škrtnutím wolframové elektrody o základní materiál a jejím zdvižením, podobně jako u zapalování oblouku při svařování obalenou elektrodou. Wolframová elektroda je připojena na jeden pól zdroje proudu a základní materiál na druhý pól. Tomuto způsobu se také říká "start náškrabem" a často bývá jedinou možností zapálení oblouku při použití svářeček, které nejsou přímo určeny na TIG svařování.

Naopak při bezdotykovém zapalování oblouku se wolframová elektroda nedotkne základního materiálu, a přesto dojde k zapálení oblouku. Způsobuje to elektrický výboj generovaný zdrojem vysokého napětí o vysoké frekvenci. Proto se pro tento způsob ustálilo označení HF (High Frequency), které se nachází i v označení svářeček podporujících bezdotykové zapálení oblouku. Zdroj HF se obvykle nazývá ionizátor. Princip HF zapalování lze přirovnat k blesku při bouři. Vysokonapěťová jiskra, která přeskočí mezi elektrodou a svařovaným materiálem, zapálí oblouk bez rizika kontaminace svaru wolframem a wolframu základním materiálem. HF zapalování se tedy hlavně využívá pro spoje vysoké metalurgické kvality svaru. Také nedochází k opotřebení broušeného konce elektrody. [15]

Parametry svařování

Svařovací parametry značně ovlivňují vlastnosti svaru, jako jsou pevnost v tahu, rázová houževnatost, tvrdost a dále ovlivňují i geometrii svarového spoje. Svařovací hodnota proudu udává hloubku svaru a ovlivňuje i velikost napětí. Při konstantní délce oblouku vyšší proud znamená vyšší napětí. Elektrické napětí na oblouku je však ovlivňováno i tvarem hrotu elektrody a vzdáleností mezi hrotem elektrody a svarovou lázní. S vyšší vzdáleností napětí roste. Rychlostí svařování je ovlivňována zase šířka svaru a hloubka závaru. Při nižší rychlosti je závar hlubší. Další parametrem, který je třeba hlídat, pokud se pracuje s přídavným materiálem, je rychlost jeho podávání. Při snižující se rychlosti rovněž roste závar, ale také může docházet k vadě svaru v podobě zápalů. Ty vznikají v momentě, kdy není do svaru dodáváno dostatečné množství přídavného materiálu.

Vedení elektrody

Technika ručního svařování TIG je obdobná jako při svařování plamenem. Svařuje se dopředu, to znamená, že pravák pohybuje hořákem doleva. Přídavný materiál je přiváděn zepředu. Pomocí TIG lze svařovat ve všech polohách.

3 Svařovací technologie Wise

Jedná se o softwarové produkty pro multiprocesní zdroje FastMig od firmy Kemppi. Zdroje jsou určeny pro synergické a pulsní MIG/MAG svařování, které umožňují i svařování metodami MMA a TIG. Zdroje mají možnost úpravy svařovacích parametrů pomocí funkce Mobile Control, kde k úpravě stačí tablet nebo chytrý telefon. Díky této specifikaci je možnost svařovací proces kontrolovat nebo případně zdokumentovat a dále pak upravovat svařovací parametry za výsledkem nižší náročnosti, vyšší svařovací rychlosti a ušetření času, snížení množství přídavného materiálu, méně ochranného plynu, snížení nákladů na energie a snížení možných chyb při výrobě. [18][19][20][21][22]

3.1 O výrobcí

Dnešní firmu Kemppi Oy založil Martti Kemppi v roce 1949 jako Veljekset Kemppi Oy ve městě Lahti ve Finsku. Během 80. let se firma značně začala rozrůstat a stala se nejrychleji rostoucí firmou té doby na území Finska. Dodnes si firma drží prestiž na poli svařovacích technologií a má přes 800 zaměstnanců po celém světě, kteří poskytují svařovací zařízení, softwarové produkty a odborné služby

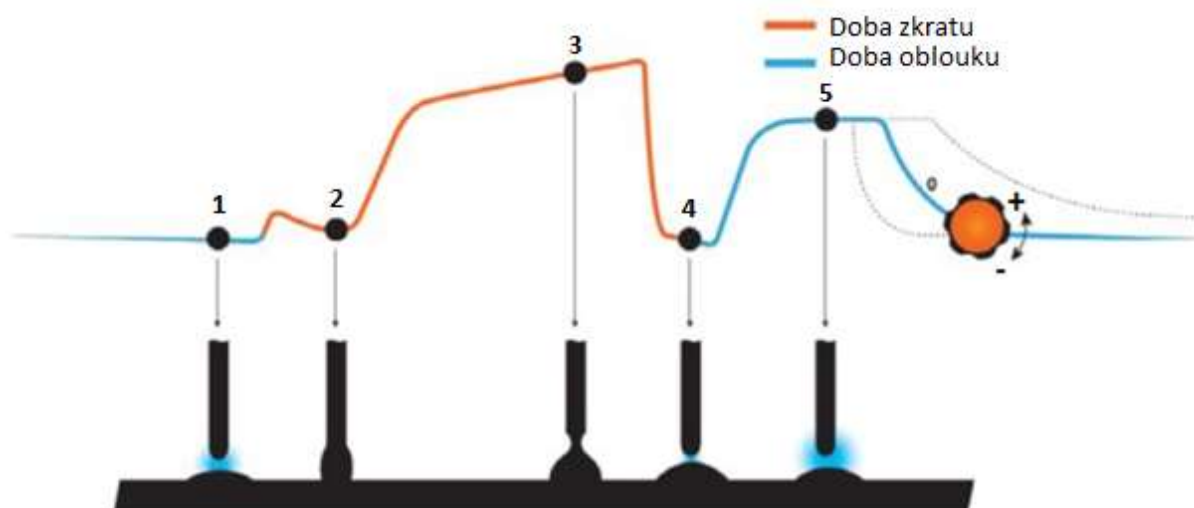
3.2 WiseRoot+™

3.2.1 Historie vzniku

Zájem zákazníků po technologii vhodnou přímo ke svařování kořenových vrstev a tenkých plechů rostl. Svařovací průmysl nemohl najít vyhovující způsoby, jak zvýšit rychlost a kvalitu při svařování kořenových vrstev a tenkých plechů, jelikož dostupné metody svařování kořenových vrstev MMA, TIG a MIG/MAG nebyly vyloženě určeny jen pro kořenové vrstvy. Existovala svařovací zařízení, která využívala upravený MIG/MAG proces pro svařování kořenových vrstev, ale i ta měla své nedostatky a omezení. Na to reagovala firma Kemppi ve spolupráci se svařovacím průmyslem a vyvinula technologii splňující požadavky pro daný problém. Technologie byla představena v roce 2005 v Essenu jako svařovací proces Wiseroot™. Tento proces byl v průběhu let inovován a získal označení WiseRoot+™.

3.2.2 Charakteristika procesu

WiseRoot™ je MIG/MAG svařovací proces pro použití se zařízeními Kemppi FastMig™. Jedná se o upravený krátko-obloukový svařovací proces. Nelze ho zaměnit s pulzním svařovacím procesem, který poskytne vyšší rychlost svařování a vyšší produktivitu než TIG svařování. Usnadňuje a urychluje svářečovi práci. Je vhodný pro konstrukční a nerezové oceli, používá se pro vytváření kořenových vrstev a spojování tenkých plechů. Svařovací proces WiseRoot™ umí digitálně řídit proud a napětí. Dále proces monitoruje zkrat, kontroluje správné načasování přenosu roztavené kapky kovu přídavného materiálu do svarové lázně.



Obrázek 10 Průběh proudu WiseRoot [23]

V bodě 1 na obrázku 10 se drát dotkne výrobku. Ve fázi nárůstu proudu (bod 2), je do svarové lázně přenesena kapka roztaveného přídavného materiálu, zároveň výkon oblouku vzrůstá a v průběhu druhé fáze zůstává na potřebné úrovni. Před první fází se proud na moment zvýší, díky čemuž dojde ke kontaktu přídavného drátu se svarovou lázní. Proud se po nárůstu dostane na potřebnou úroveň (bod 3), následuje oddělení kapky od špičky přídavného drátu. Jakmile se kapka oddělí, svařovací proud na moment poklesne (bod 4). Okamžitě co dojde k oddělení kapky kovu, fáze nárůstu proudu znovu započíná a podněcuje vznik další fáze oblouku.

Svařovací zdroj monitoruje čas oddělení kapky přídavného materiálu přes oblouk. Díky digitálně řízenému poklesu a nárůstu proudu nedochází k rozstříku tekutého kovu od zkratu k otevřenému oblouku. Ve druhé fázi je formována svarová lázeň a je zajištěn potřebný průvar v kořenové vrstvě. Dané dvě fáze vždy následují za sebou, vždy proud klesne na základní úroveň. Hladina základního elektrického proudu dále zaručuje, že další kapka kovu se přenesení až když budou splněny všechny podmínky. Rychlé a přesné časování zdroje umožňuje bezrozstříkové oddělení kapky přídavného materiálu a hladký přenos do svarové lázně. Díky tomu je oblouk stabilnější a proces lépe kontrolovatelný.

3.2.3 Výhody procesu WiseRoot

K nejdůležitějším výhodám udávaných firmou Kemppi patří zvýšení produktivity, snížení pracovních nákladů, snížení nákladů za přídavný materiál dále je to pak vyšší rychlost svařování v porovnání s TIG nebo MMA svařováním, vysoká kvalita povrchových a kořenových vrstev, minimální dokončovací práce, přizpůsobení se různým šířkám mezery, použití pouze jednoho zařízení pro kořenovou vrstvu i pro výplň, práce ve všech svařovacích pozicích a snadné zacházení.

3.2.4 Využití procesu WiseRoot

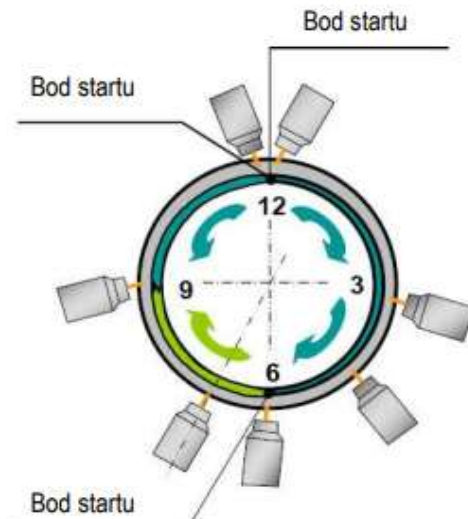
Svařování procesem WiseRoot™ umožňuje nastavit na zdroji svařovacího proudu rychlost podávání drátu dle potřeby, dále lze nastavit úroveň druhé fáze nárůstu proudu a výchozí úroveň proudu. Nejčastěji je proces využíván ke svařování trubek v námořním průmyslu, kde umožňuje trubky svařovat ve všech polohách oproti běžným metodám – zejména MIG/MAG. Dále je proces využíván ke svařování tenkých plechů a svařenců s minimální nutností dokončovacích prací.

WiseRoot™

- Úhel sklonu hořáku
- Oblouk "přenáší" svarovou lázeň
- Poloha svařování vertikálně shora dolů

MIG / MAG

- Úhel sklonu hořáku 90°
- Poloha svařování vertikálně zdola nahoru
- Svařovací hořák nasměrovaný do středu trubky
- Oscilace: ANO
- Oscilace s prodlevami v krajních polohách



WiseRoot™

- Úhel sklonu hořáku 10°-15°
- Nad hlavou 5 - 6°
- Oblouk "přenáší" svarovou lázeň
- Poloha svařování vertikálně zdola nahoru
- Oscilace:
- Na plocho / 12: ANO
- Vertikálně / 3 / 9: NE
- Nad hlavou / 6: ANO
- Při oscilaci se neprovádí prodlevy na stranách

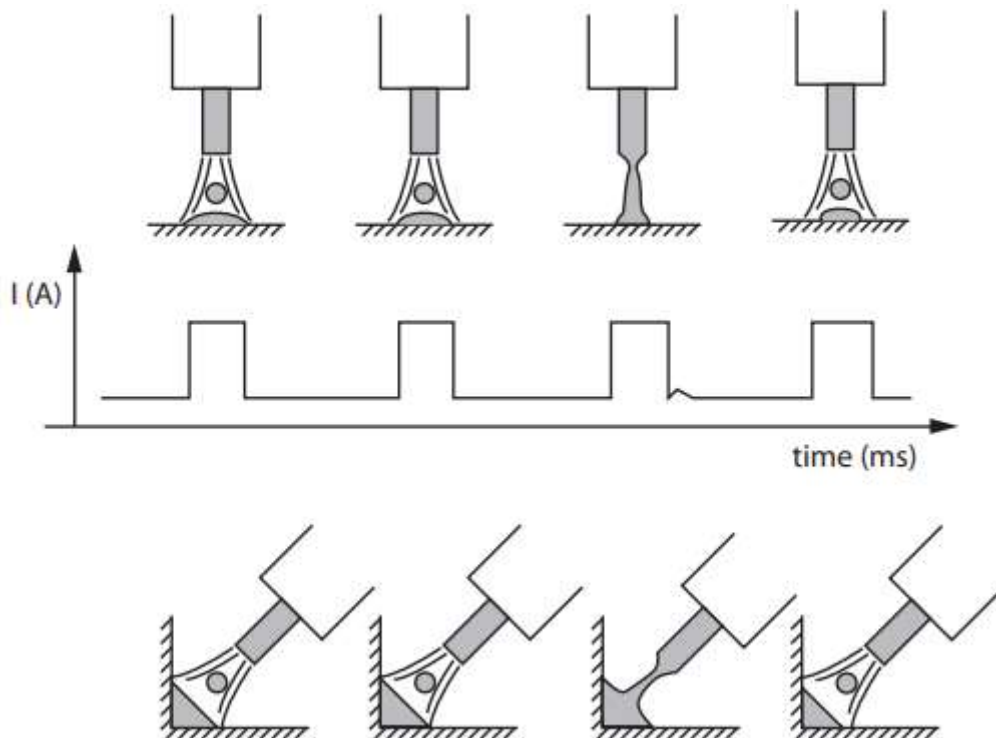
Obrázek 11 Polohy svařování WiseRoot [23]

3.3 Další softwary Wise

Wiseroot+ není v současné době jediný software upravující svařovací parametry, firma Kemppi již vyvinula celou řadu procesů. Jednotlivé procesy jsou zmíněné níže.

3.3.1 WiseFusion™

Jedná se o software umožňující automatickou regulaci délky svařovacího oblouku jak pro manuální, tak automatizované pulsní či synergické MIG/MAG svařování. Adaptivní regulace umožňuje udržet oblouk dostatečně krátký na to, aby se energie mohla fokusovat do menšího místa. To dopomáhá ke zvýšení a udržení konzistentní kvality svarové lázně. Díky kontrole délky oblouku lze svařovat tímto procesem ve všech pozicích. Soustředěním na menší povrch se dosáhne hlubší penetrace, vyšší rychlosti, méně vneseného tepla, snížení deformací a kratšího oblouku. [23]



Obrázek 12 WiseFusion [23]

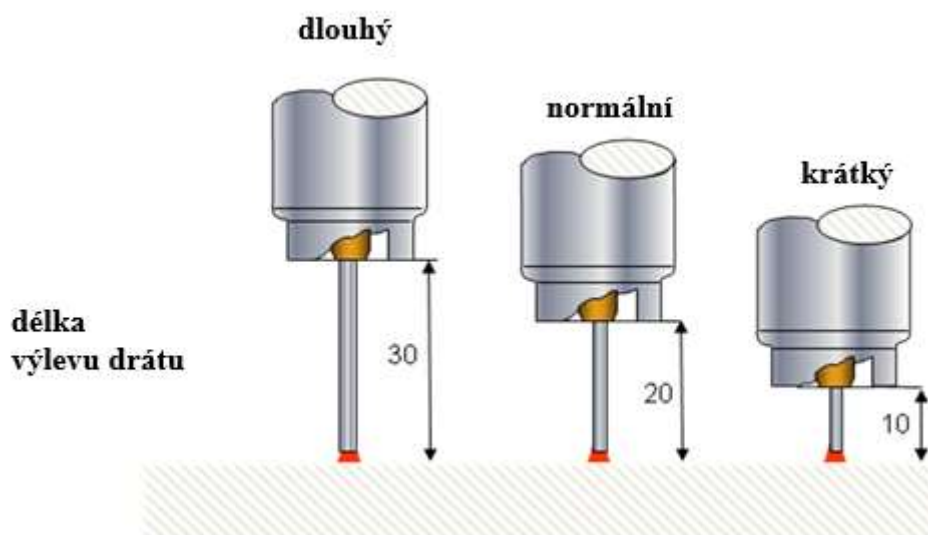
Na snímku 12 je znázorněno, jak proces WiseFusion dokáže ovlivnit pulsní MIG/MAG svařování. Na třetím obrázku lze vidět, že při zkratu nedochází k oddělení kapky a tím pádem se snižuje rozstřík.

Výhody

Software dle výrobce nabízí až o 30 % vyšší rychlost svařování, snížení vneseného tepla až o 25 %, snížení množství přídavného materiálu o 38 % a umožňuje snížení úkosu z 60° na 40°. Dále je snížena potřeba ladění oblouku, což je výhodné pro sváření v pozicích. Nejlepší výsledky v tomto procesu dosahují materiály jako korozivzdorné oceli a hliník.

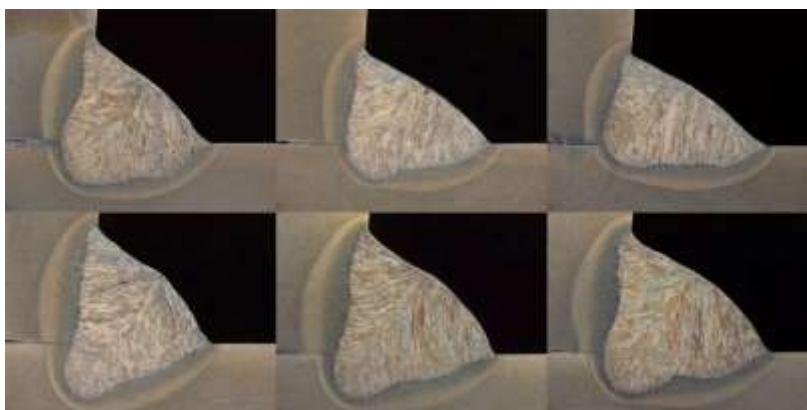
3.3.2 WisePenetration

Software je navržen pro manuální a automatizované synergické MIG/MAG svařování. Software umožňuje udržet konzistentní kvalitu svaru při rozdílném výlevu drátu, umožňuje svářet v náročných svařovacích pozicích a změnu délky svařovacího oblouku. WisePenetration zachovává nastavenou rychlost podávání a dodává konzistentní výkon do svarové lázně nezávisle na vzdálenosti a odchylce mezi svařovací tryskou hořáku a svařovaným materiálem.



Obrázek 13 Výlev drátu WisePenetration [23]

Technologie má uplatnění na špatně dostupných místech pro hořák, například při zhotovování koutového svaru. Na obrázku 14 je ukázka koutového svaru po svařování s různým výletem drátu znázorněným na obrázku 13, kde je díky WisePenetration (dole na obrázku 12, 1-MIG nahore) dosaženo konzistentní kvality.



Obrázek 14 WisePenetration [23]

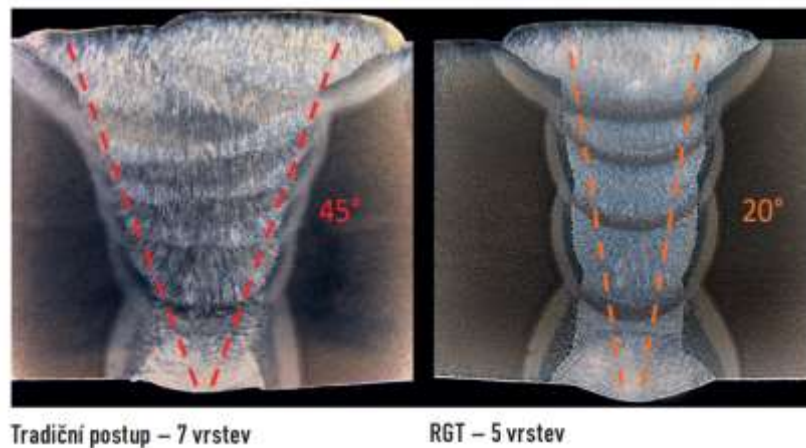
Výhody

Zajištění optimálního hoření oblouku, i pokud se přes tvarovou konstrukci musí svařovat v neideální pozici. Není nutno „zklepávat“ trysku hořáku, jak se to v praxi řeší, zařízení může poté pracovat dál.

3.3.3 Kemppi RGT

Snahou zjednodušit a zefektivnit svařování do úzké mezery společnost Kemppi vyvinula technologii Reduced Gap Technology (RGT), jež umožňuje MIG/MAG svařování do úzké mezery.

Mezera pro svar je zkosena místo 45-60° na 20°. Tím pádem je třeba i méně přídavného materiálu a zde na obrázku 15 lze pozorovat snížení počtu housenek ze 7 na 5. Snížením úhlu zkosení svarové mezery zefektivňuje proces a umožňuje svařovat materiály o tloušťce až 30 mm. RGT je kombinací již zmíněných svařovacích technologií WiseFusion a WisePenetration.



Obrázek 15 Kemppi RGT [23]

3.3.4 WiseThin™

WiseThin je MIG/MAG svařovací proces, kde je svařovací proud a napětí kontrolováno digitálně. Proces důkladně monitoruje zkrat a kontroluje správné načasování při přenosu kapky přídavného materiálu do svarové lázně. Jedná se o modifikovaný „studeného“ oblouk pro svařování tenkých plechů, kde se musí snížit vnesené teplo na minimum.

Výhody

Software snižuje až o 25 % nižší tepelný příkon oproti běžnému MIG/MAG svařování, umožňuje vyšší rychlosti svařování, snižuje deformace po svařování materiálu, výborné řízení svarové lázně i pro proměnlivou geometrii svařovacího spoje, snížení rozstříku u všech materiálů, včetně pozinkovaných a je možnost svařovat ve všech pozicích.

3.3.5 WiseSteel

WiseSteel je optimalizovaný proces MIG svařování, který snižuje globulární částice a tím snižuje rozstřík při svařování. Dochází k tomu tak, že se střídá přenos krátkého oblouku s přenosem rozstříku, následkem je zmiňované snížení rozstříku.

Výhody

Při přenosu zkratem WiseSteel adaptivně zlepšuje stabilitu oblouku, čímž poskytuje lepší možnosti svařování mimo polohu. Kromě toho mikropulzování proudu a napětí v režimu přenosu rozstříku omezuje oblouk a zvyšuje rychlost svařování až o 30 %. Snížení tvorby globulárních částí, snížení rozstříku až o 30 % a tvorba vysoce kvalitních svarů.

4 Experimentální část

V experimentální části byla provedena analýza vzorků dvou velmi často svařovaných konstrukčních ocelí, konkrétně se jednalo o oceli S235JR+N a S355JR+N. Před samotným svařováním bylo na svařovaných plechách zhotoveno sražení ve firmě Hofmeister. Samotné svařování proběhlo ve firmě ARC-H. Nedestruktivní analýza proběhla za spolupráce s Ing. Petrem Benešem, Ph.D. a ostatní materiálové analýzy byly provedeny v laboratořích katedry materiálů a strojírenské metalurgie na Západočeské univerzitě v Plzni.

Cílem experimentální části bylo:

- Porovnat svařovací parametry metody 1-MIG a WiseRoot.
- Odhalit případnou porozitu ve svařencích při nedestruktivní analýze.
- Provést metalografický rozbor.
- Změřit mikrotvrdost napříč svarovou oblastí.

4.1 Materiál experimentálních vzorků

Svařence byly zhotoveny ze dvou druhů ocelí, to konkrétně z oceli S235JR+N a S355JR+N. Jedná se o konstrukční oceli s nízkým obsahem uhlíku, jsou definovány i dle české technické normy jako oceli ČSN 11 375 a ČSN 11 523. Tento materiál byl zvolen na základě své dobré svařitelnosti, jež je dána hlavně obsahem uhlíku pod 0,2 % hm. objemu, a častému použití.

Jejich chemické složení je zobrazeno v tabulkách 2 a 3.

Chemické složení oceli S235JR					
C	Mn	P	S	N	Cu
max 0.2	max 1.4	max 0.04	max 0.04	max 0.012	max 0.55

Tabulka 2 Chemické složení S235JR [24]

Chemické složení oceli S355JR						
C	Si	Mn	P	S	N	Cu
max 0.24	max 0.55	max 1.6	max 0.04	max 0.04	max 0.012	max 0.55

Tabulka 3 Chemické složení S355JR [25]

Svarová výplň

Jako svarová výplň byl použit drát o průměru 1 mm s označením 12.50 G3SI1. Jedná se o poměděný drát s mezí kluzu po svaření až 470 MPa vhodný pro svařování v ochranných atmosférách směsi Ar/CO₂ nelegovaných konstrukčních ocelí s pevností do 530 MPa. [26]

Vrubová houževnatost	70 J
Mez pevnosti v tahu	560 MPa
Mez skluzu	470 MPa
Rychlost podávání	2,7-13 m/s

Tabulka 4 Vlastnosti přídatného materiálu [27]

Svařovací plyn

Jako svařovací plyn byla použita dvousložková směs inertního argonu a aktivního oxidu uhličitého v poměru 82/18 %. Komerčně je tato směs také označována jako Ferroline nebo Corgon. Směs je univerzální a vhodná ke svařování jak nízkolegovaných nízkouhlíkových ocelí, tak uhlíkových legovaných ocelí. Tlakové lahve plněny tímto plynem jsou označovány zeleným pruhem. [28][29]

4.2 Zhotovení svařenců

Svařence byly zhotoveny ve frimě ARC-H v Plzni, jež se zaměřuje na prodej a servis technologického vybavení pro strojírenskou výrobu.

Svařovací zdroj

Všechny plechy byly svařeny zdrojem od firmy Kemppi řady FastMIG X, konkrétně se jednalo o zdroj s označením FastMIG X450. Multiprocesní zdroj umožňuje svařovat synergicky, technologií MMA, TIG a pulzním svařování MIG/MAG. V základní konfiguraci obsahuje softwary WiseRoot+ a WiseThin+. Software lze snadno aktualizovat, či dokoupit. Má funkci měření napětí oblouku, jehož aktuální hodnotu umí zobrazit na display. Lze zapojit

dva podavače drátů najednou, nebo připojit mezipodavač SuperSnake pro svařování ve vzdálenosti až 25 metrů od zdroje. K jeho dalším přednostem patří možnost vzdáleného ovládání přes ARC Mobile Control. [30]



Obrázek 16 FastMIG X 450

FastMig X 450 – technické informace	
FastMig X 450	
Napětí 3-50/60 Hz	400V-15%...+20%
Stanovený výkon 60%ED	22.1kVA
80%ED	
100%ED	16.0kVA
Napájecí kabel/pojistka zpožděná	4G6(5m)/35A
Zatěžovatel 40C 60%	450A
100%	350A
Rozsah svař. proudu a napětí MMA	15A/20V-450A/46V
MIG	20A/12V-450A/46V
Max. svař. napětí MMA	46V
Napětí naprázdno MMA	U ₀ =70-98V, U _{VA} =50V
MIG/MAG, Pulse	U ₀ =80-98V
Příkon naprázdno	100W
Faktor výkonu při max. proudu	0.88
Účinnost na max. proud	87%
Rozsah skladovací teploty	-40C...+60C
Rozsah provozní teploty	-20C...40C
Ochranná třída	A
Min. krátký výkon SSC ze sítě	5.5MVA
Stupeň ochrany	IP23S
Rozměry dxšxv (mm)	590x230x430
Hmotnost (kg)	38
Napětí dodávané pro pomocná zařízení	50V DC/100W
Pojistka (zpožděná)	6,3A
Napětí dodávané pro chlad.jednotku	24V DC/50VA
Vhodné pro použití s generátorem	

Tabulka 5 Technická specifikace FastMIG [31]

Seznam zhotovených svařenců

Svařence z plechů o tloušťce 8 mm byly seřazeny do tabulky podle typu oceli, svařovací technologie a dalších detailů jako sražení hran či otupení.

Číslo svařence	Ocel	Technologie	Detail
1	S235	WiseRoot+	Rozšiřující se svarová mezera
2	S235	WiseRoot+	Otupení 2 mm, sražení 20°
3	S235	WiseRoot+	Bez otupení, sražení 20°
4	S235	1-MIG	Otupení 2 mm, sražení 30°
5	S355	WiseRoot+	Bez otupení, sražení 20°
6	S355	1-MIG	Bez otupení, sražení 20°
7	S355	Pulse, Fusion	Otupení 2 mm, sražení 20°
8	S355	1-MIG, Fusion	Otupení 2 mm, sražení 20°

Tabulka 6 Seznam svařenců

U svařenců (1) a (2) byla zhotovena pouze kořenová vrstva bez krycí housenky, ostatní svařence byly svařeny s výplňovou vrstvou. Svařenec (7) a (8) krycí housenku nevyžadoval, protože kořenová vrstva zde byla zároveň krycí vrstvou.

Svařovací parametry

V průběhu svařování byly zaznamenávány svařovací parametry jako je svařovací proud, napětí, či rychlost podávání přídatného drátu. Dále byla měřena doba zhotovení kořenové vrstvy 150 mm dlouhého svaru, která byla také uvedena do tabulky ke každé technologii právě jednou.

Číslo svařence	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Čas [s]
1	116	17,4	4,6	-
2	109	16,2	4,3	48,1
3	109	17,7	4,6	-
4	136	23,7	5,4	43,41
5	113	16,9	4,5	-
6	137	18,8	4,9	-
7	186	28,1	10,4	27,82
8	217	27,6	9,5	19,82

Tabulka 7 Svařovací parametry

4.3 Povrchové vyhodnocení svařenců

Jednotlivé svařence byly před rozřezáním na vzorky vizuálně klasifikovány dle normy ČSN EN ISO 6520-1. Byly zde posouzeny jak povrchové vady, tak i případné chyby vzniklé špatným postupem v průběhu svařování. Referenční čísla zmiňovaných vad jsou v textu napsány v závorkách. [11]

Na svařenci (1) z materiálu S235 s rozšiřující se mezerou kořenové vrstvy zhotoveného technologií WiseRoot+ nebyly nalezeny žádné chyby, jelikož se jednalo pouze o vzorek. V praxi by se dalo vytknout napojení svarové housenky na bodový spoj na začátku a na konci.



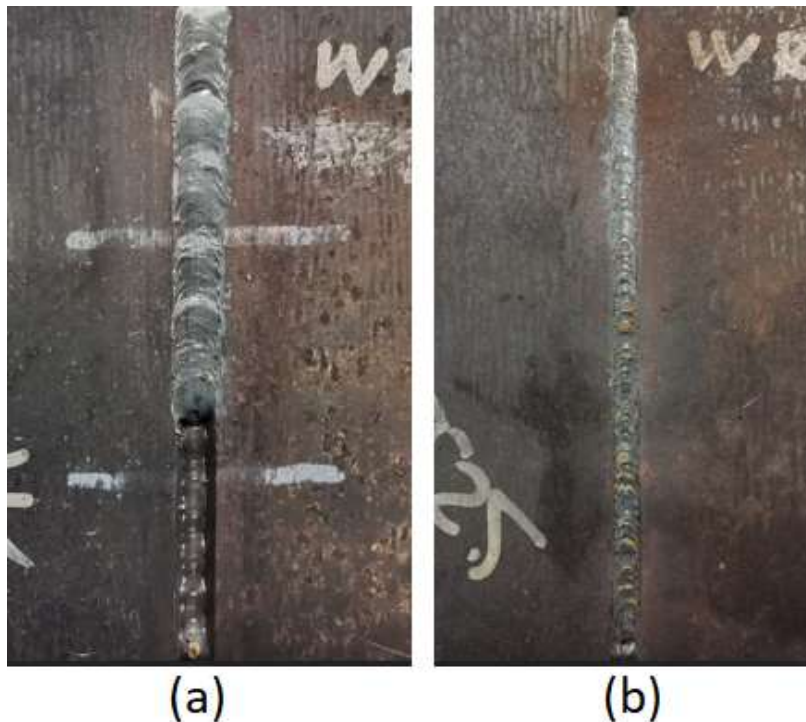
Obrázek 17 Svařenec 1 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

Na svařenci (2) lze vidět neprovařený kořen ze spodní strany svaru (Vada ISO 6520-1-4021).



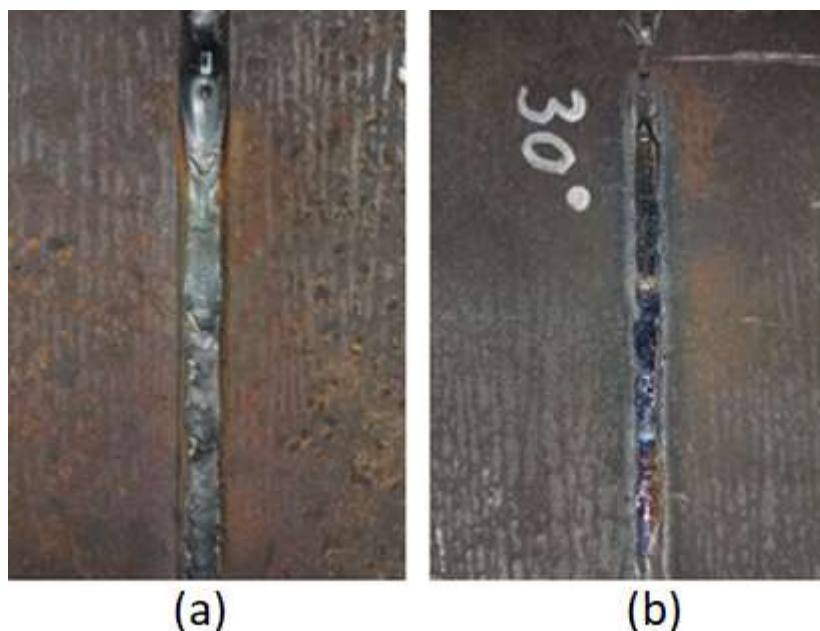
Obrázek 18 Svařenec 2 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

Svařenec (3) vykazuje vruby v krycí housence (Vada ISO 6520-1-5014). Příčinou vzniku vrubů je zde pravděpodobně příliš vysoká rychlost svařování.



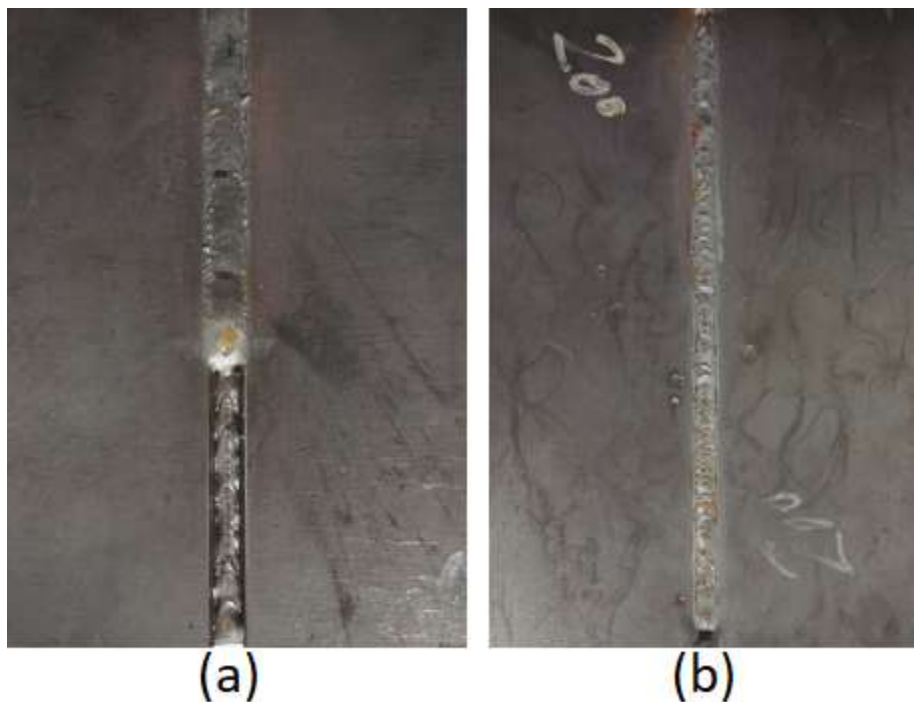
Obrázek 19 Svařenec 3 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

Čtvrtý svařenec má shora nedoplněnou housenku, chybí zde materiál. V tomto místě vznikla koncová povrchová staženina (Vada ISO 6520-1-2025). Dále se zde nachází neprovařený kořen (Vada ISO 6520-1-4021). Tyto vady zde byly pravděpodobně zapříčiněny předčasným zvednutím hořáku z tavné lázně. V ostatních částech svaru se vyskytuje souvislý nadměrný průvar (Vada ISO 6520-1-504).



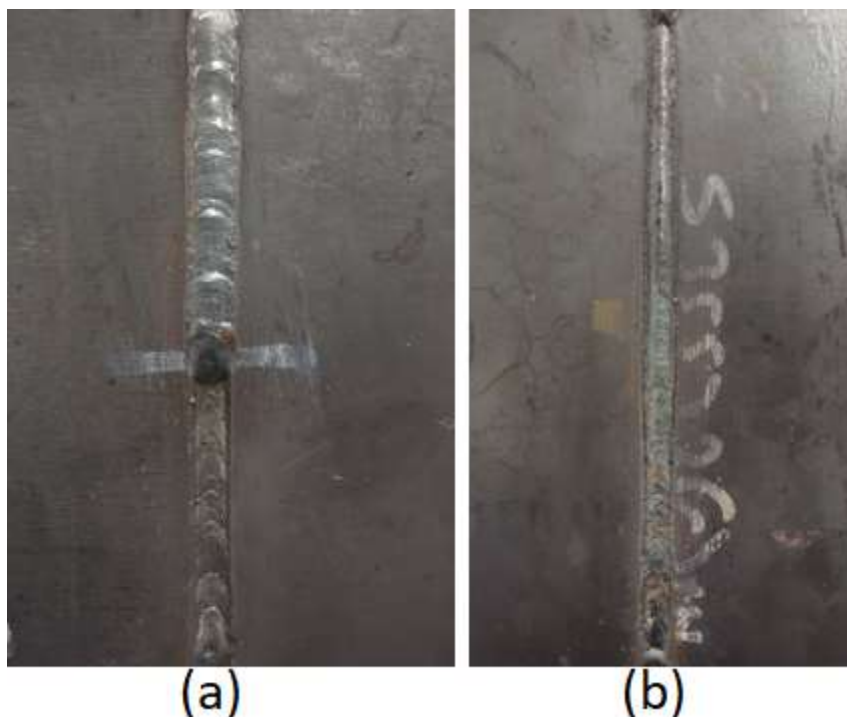
Obrázek 20 Svařenec 4 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

Na svařenci (5) lze vidět nepatrný rozstřík (Vada ISO 6520-1-602) v podobě kuliček kolem svaru při tvorbě krycí vrstvy. Dále zde není dostatečné množství vyplňujícího materiálu (neúplné vyplnění svaru – Vada ISO 6520-1-511) a je vidět hrana původního vzorku.



Obrázek 21 Svařenec 5 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

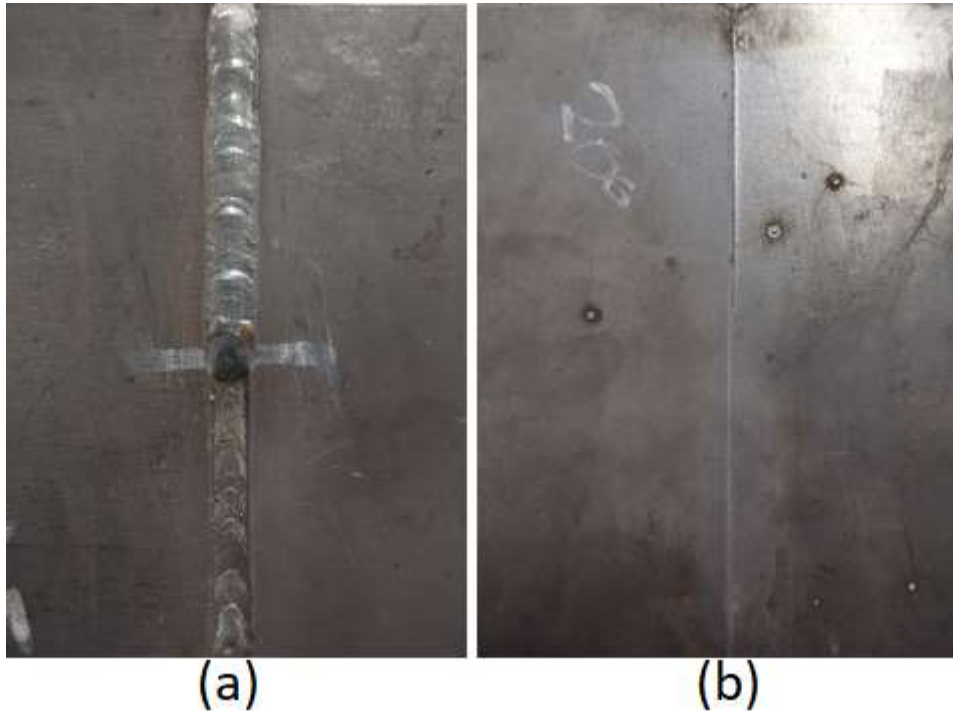
Svařenec (6) má propadlý kořen (Vada ISO 6520-1-5042), nedostatečné množství výplně (Vada ISO 6520-1-511), jako předchozí svařenec a v krycí vrstvě jsou vruby (Vada ISO 6520-1-5014) vzniklé špatným pohybem při tvorbě svaru.



Obrázek 22 Svařenec 6 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

Poslední svařenec (7,8) – kde je na horní polovině použita kombinace softwarů Pulse a WiseFusion a na spodní 1-MIG a WiseFusion. Svařenec disponuje koncovými staženinami (Vada ISO 6520-1-2025) viditelnými na obrázku 23 na pohledu z vrchní strany, dále je zde patrný rozstřík (Vada ISO 6520-1-602) a ze spodní strany lze vidět neprovařený kořen (Vada

ISO 6520-1-4041), zejména u kombinace 1-MIG a WiseFusion. Neprovařený kořen je zapříčiněn pravděpodobně vysokým otupením.

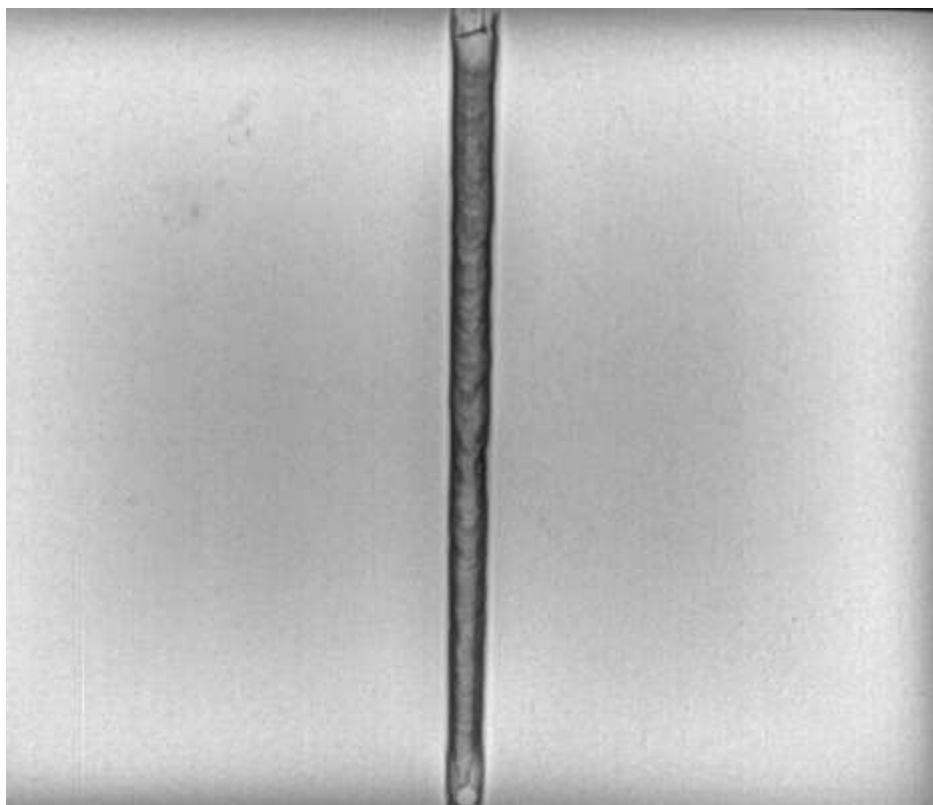


Obrázek 23 Svařenec 7,8 (a) Vrchní strana (b) Spodní strana

4.4 Nedestruktivní analýza

Nedestruktivní analýza svarů byla provedena formou prozařování. Byl použit rentgenový systém s digitálním detektorem obrazu GE DXR 250c-w. Výsledné snímky byly upraveny použitím filtru pro zvýraznění hran, odstranění šumu, zvýšení jasů a kontrastu.

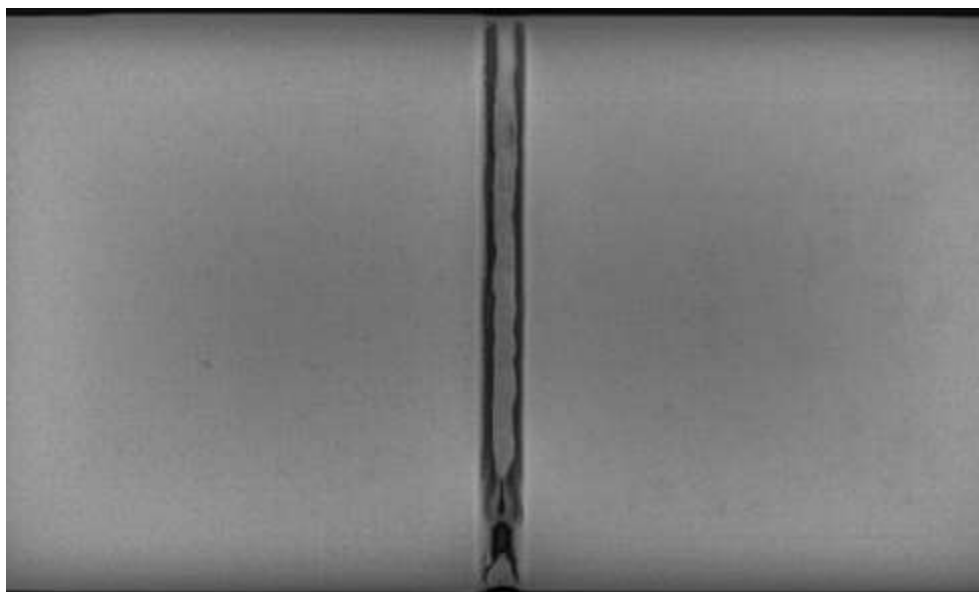
Na svařenci (3, 5) byly tímto experimentem objeveny póry mezi kořenovou vrstvou a na ní kladenou housenkou. Na snímcích jsou vyobrazeny jako černé body shlukující se podél svaru. Byly zapříčiněny nedostatkem přídavného materiálu nebo nízkým svařovacím proudem či napětím. Výskyt pórů byl dále potvrzen při rozřezu vzorků a mikroskopickém přezkoumání.



Obrázek 24 RTG Svařenec 1



Obrázek 25 RTG Svařenec 3



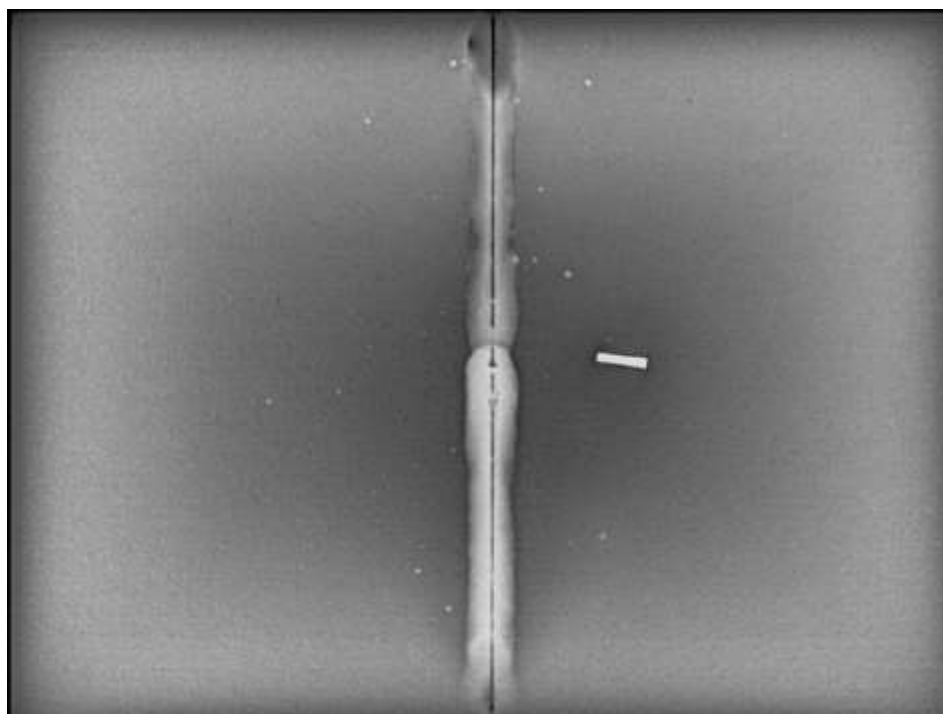
Obrázek 26 RTG Svařenec 4



Obrázek 27 RTG Svařenec 5



Obrázek 28 RTG Svařenec 6



Obrázek 29 RTG Svařenec 7, 8

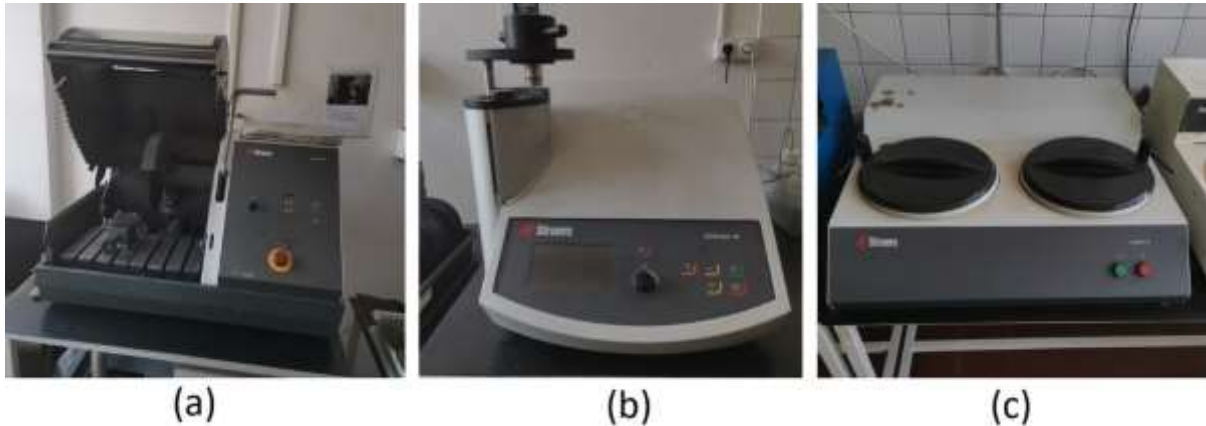
4.5 Mikroanalýza

4.5.1 Příprava vzorků

Vzorky byly rozřezány dělicím kotoučem s označením 50A24 na metalografické pile Struers Discatom-6. Délka nejdelsí hrany vzorku nesměla přesáhnout 30 mm pro možnost využití hydraulického lisu Struers Citopress-10, kde byla ke vzorkům přisypána pryskyřice pro

zalévání za tepla. Spolu se vzorkem po slisování a zapečení za teploty 180 °C utvořili pravidelný válec vhodnější k použití na manuální brusce a leštičce.

Manuální broušení probíhalo na přístroji Struers LaboPol-21. Byly použity brusné kotouče MD-Piano se zrnitostí 80 až 1200. K následnému broušení na Struers LabPol-1 byly použity 2 diamantové suspenze o velikosti částic 1-3 μm . V prvním kroku bylo využito leštící plátno MD-Mol se suspenzí o velikosti částic 3 μm , následovalo leštění na plátně označeném jako MD-Nap suspenzí o velikosti částic 1 μm .



Obrázek 30 (a) Metalografická pila (b) Hydraulický lis (c) Manuální bruska

Následně byl ke zviditelnění struktury vzorků využit proces leptání. Jako leptadlo byl využit 1% roztok HNO_3 v ethanolu zvaný Nital. Mezi jednotlivými kroky byly vzorky čištěny v ultrazvukové čističce k minimalizaci zanesení nečistot z předchozí operace.

Struktura povrchu byla pozorována světelným mikroskopem Carl Zeiss Observer Z1M. Z jednotlivých snímků o zvětšení 25x byl softwarově poskládán soulep každého ze svařenců.

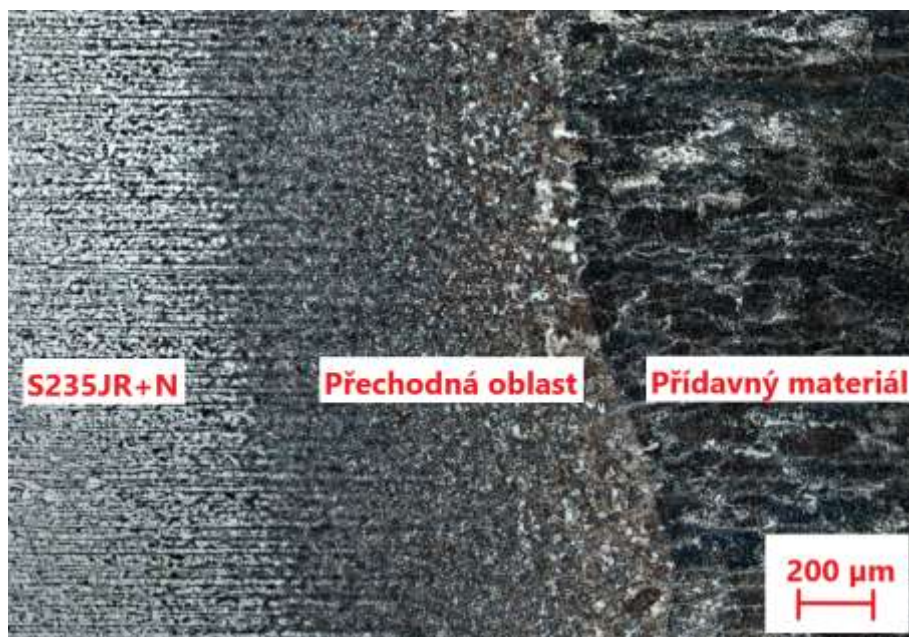
Na závěr byla na vybraných vzorcích vyhodnocena mikrotvrdost dle Vickerse.

4.5.2 Tepelně ovlivněná oblast

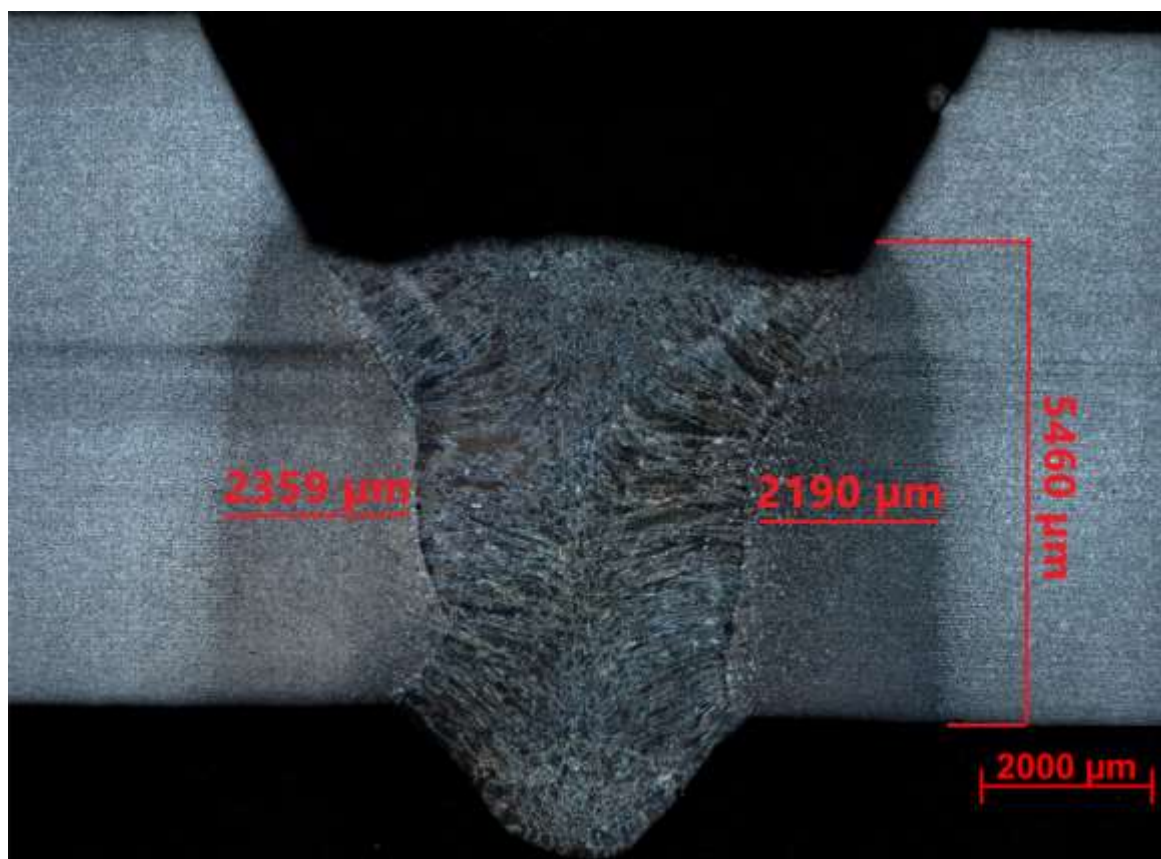
Tepelně ovlivněná oblast byla pozorována na naleptaných vzorcích světelným mikroskopem. Velikost tepelně ovlivněné oblasti byla měřena jako obdélníková oblast okótovaná na jednotlivých snímcích.

Snímky potvrdily výskyt pórů ve svařenci (5), zmiňované póry byly u tohoto svařence odhaleny již při nedestruktivní analýze.

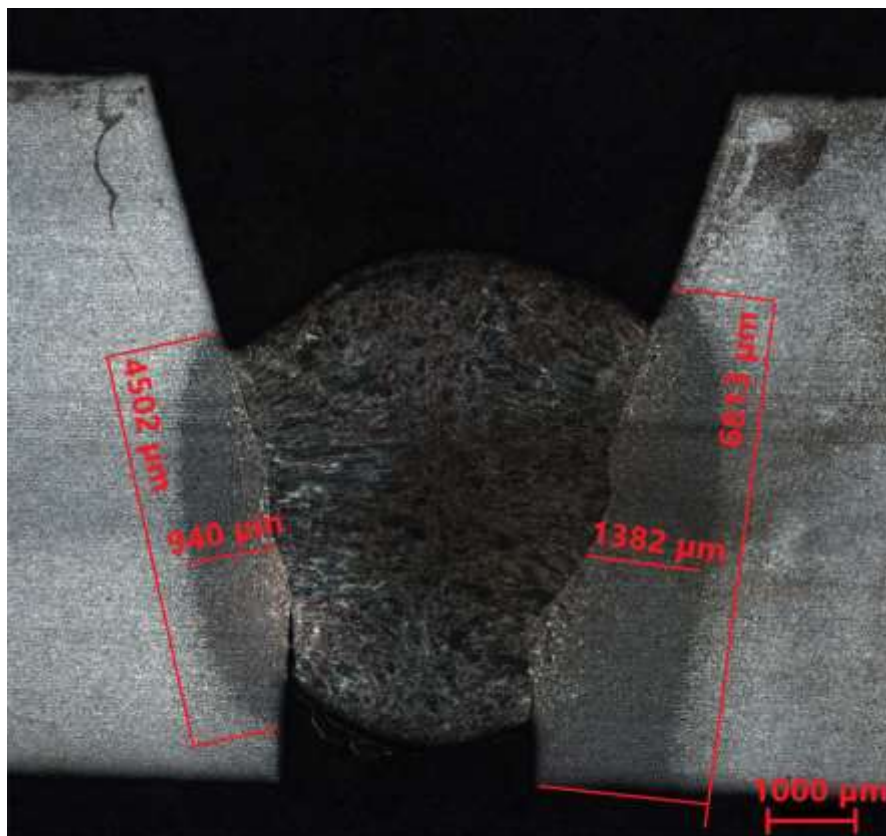
Na snímcích je patrné feriticko-perlitické vyřádkování vzniklé pravděpodobně válcováním. Výchozí materiál (vlevo na snímku 31) přechází z jemnozrnné struktury do hrubozrnné vlivem vneseného tepla.



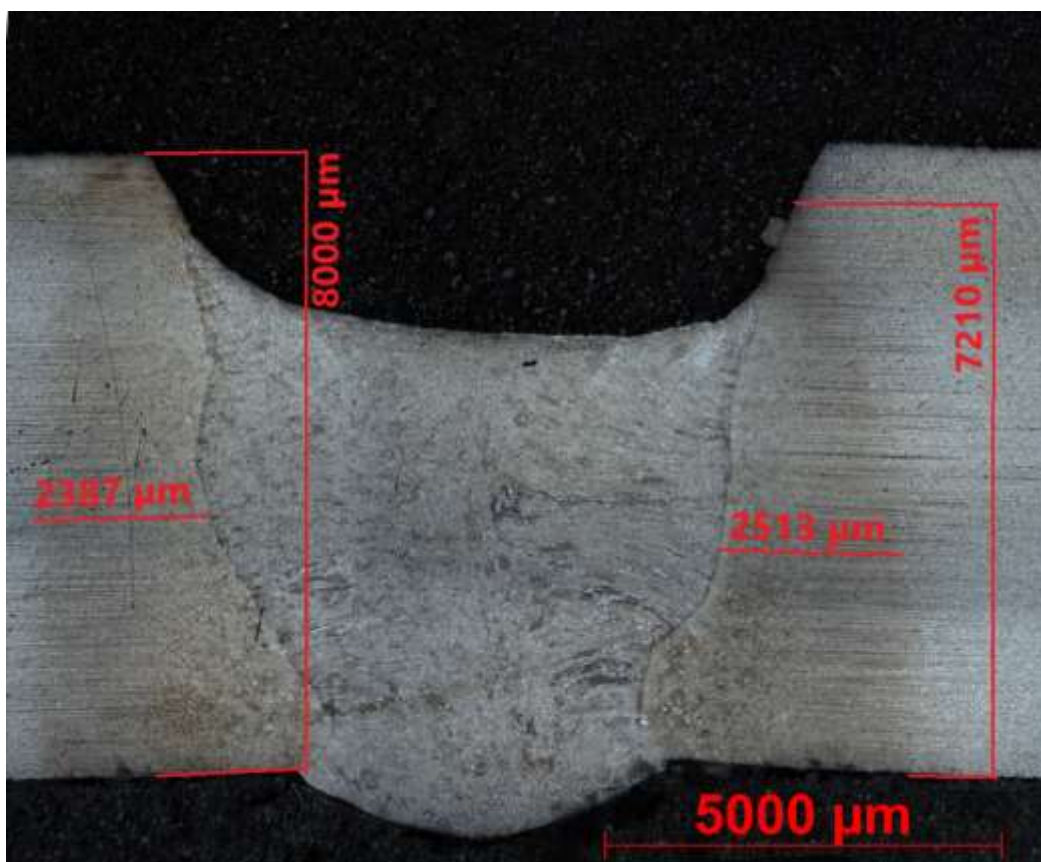
Obrázek 31 Přechodná oblast S235



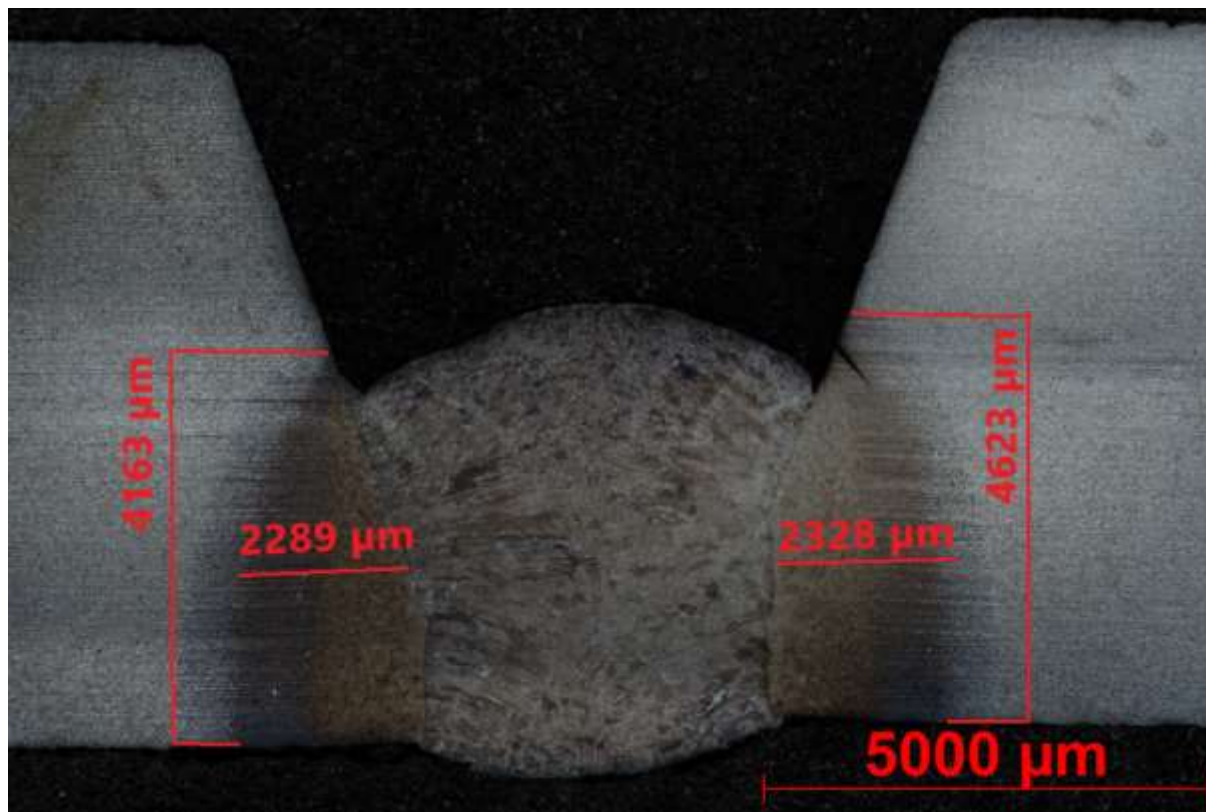
Obrázek 32 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařence (4)



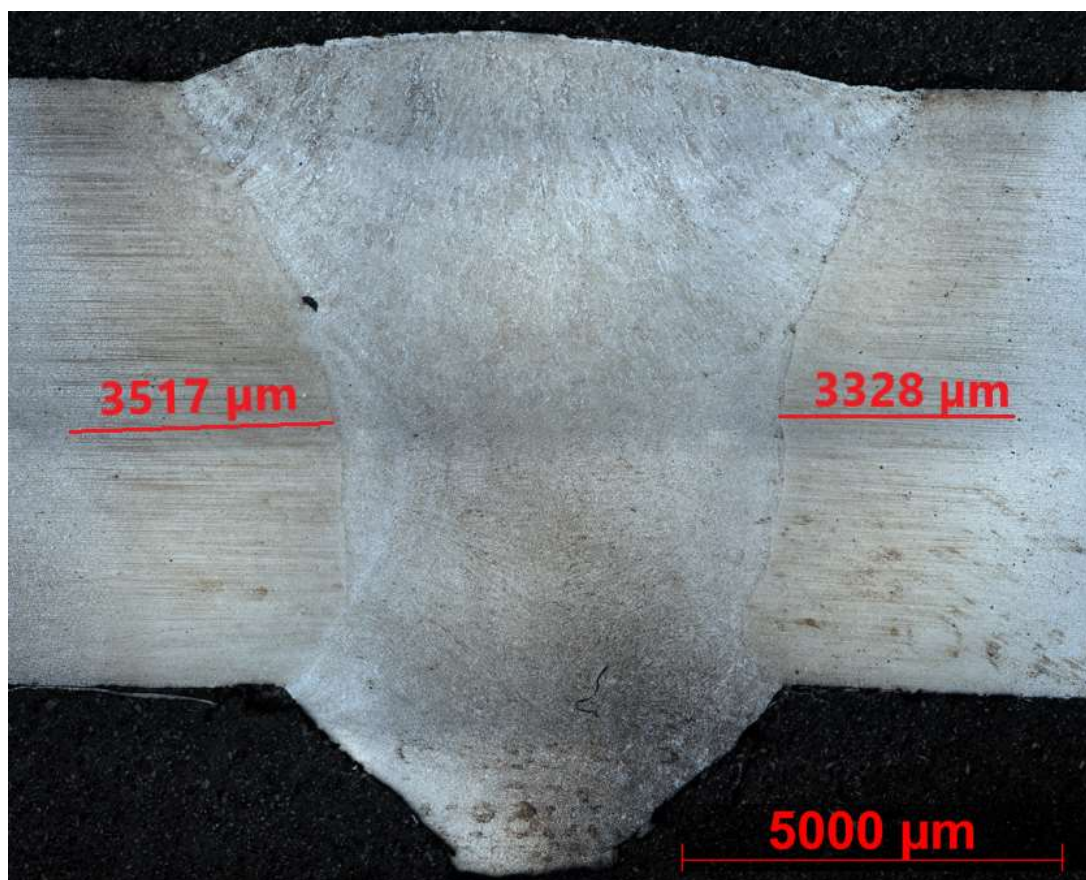
Obrázek 33 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařence (2)



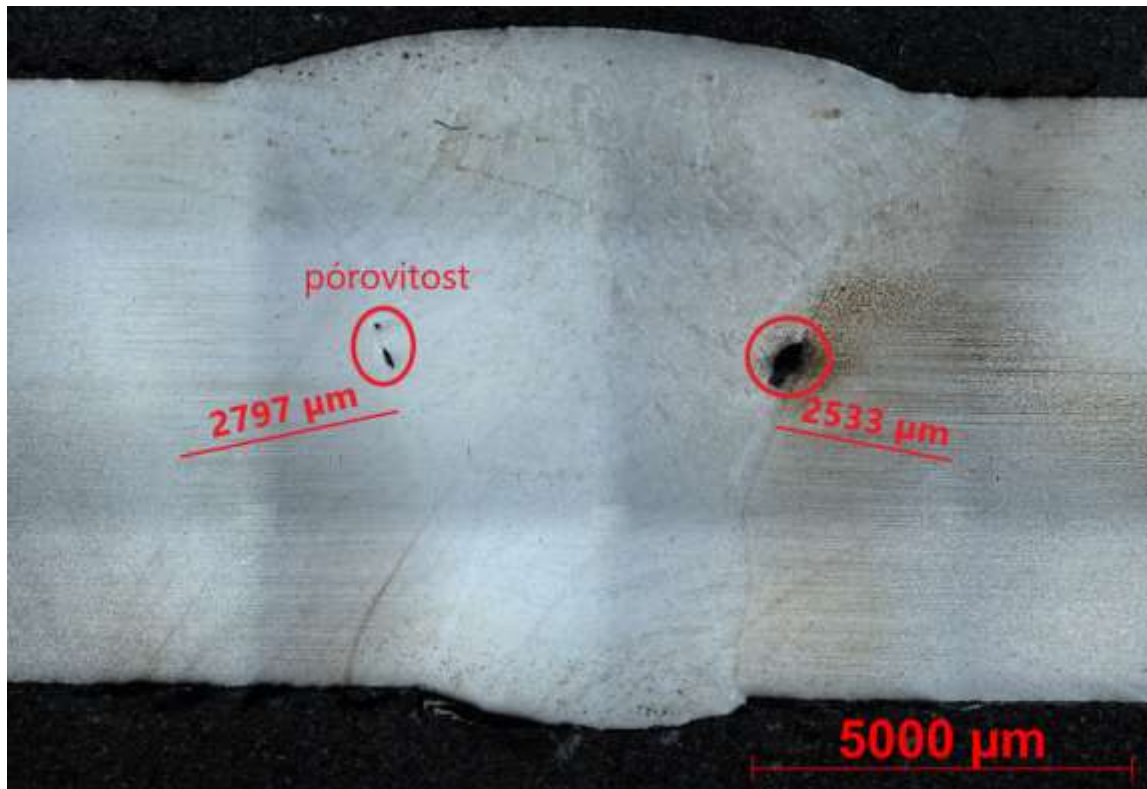
Obrázek 34 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařence (6)



Obrázek 35 Vel. tep. ovlivněné oblasti kořenové vrstvy svařence (5)



Obrázek 36 Vel. tep. ovlivněné oblasti svařence (6)



Obrázek 37 Vel. tep. ovlivněné oblasti svařenec (5)

4.5.3 Výpočet vneseného tepla

Pro výpočet vneseného tepla při svařování je nutné znát hodnoty svařovacího proudu, napětí, svařovací rychlost a účinnost procesu. Účinnost procesu je vždy udávána v určitém rozmezí. Pro metodu MIG se koeficient účinnosti dle dostupné literatury pohybuje v rozmezí 0,65 – 0,90. V tomto případě se používala velikost koeficientu k 0,8. Výpočet vneseného tepla se pak provádí dle rovnice (1). [32][33]

Rovnice 1 Výpočet vneseného tepla dle ČSN EN 1011-1:2009

$$Q = k * \frac{U * I}{v} * 10^{-3}$$

Kde:

Q je vnesené teplo [kJ.mm⁻¹]

k je koeficient tepelné účinnosti [-]

U je napětí na oblouku [V]

I je svařovací proud [A]

v je rychlost svařování [mm.s⁻¹]

Rychlost svařování byla získána ze svařovacích dat. Konkrétně doby svařování a délky svarové housenky. Proces 1-MIG i WiseRoot byl měřen pouze jednou, výpočet slouží pouze orientačně a bude tvořit předpoklad pro velikosti TOO jednotlivých metod.

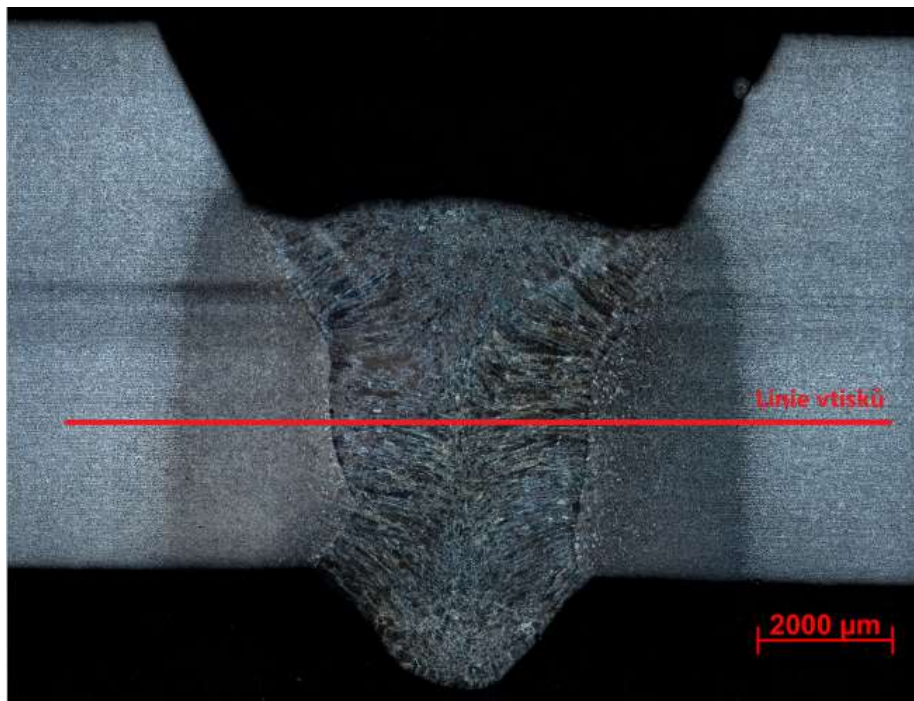
Číslo svařence	Rychlost svařování [mm/s]	Proud [I]	Napětí [V]	Koeficient tepelné účinnosti	Vnesené teplo [kJ/mm]
2	3,12	109	16,2	0,8	0,4528
4	3,46	136	23,7	0,8	0,7452
8	3,78	217	27,6	0,8	1,2676

Tabulka 8 Vnesené teplo

Měření tvrdosti

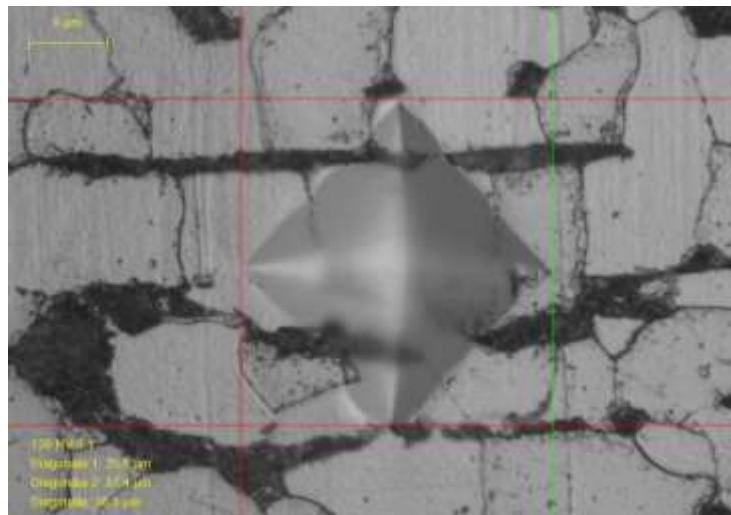
K měření tvrdosti byl použit přístroj Struers Durascan-G5. Jedná se o zařízení k měření mikrotvrdosti dle Vickerse. Indentor pro měření vtisků je diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136°. Velikost zkušebního zatížení byla 0,9807 N (100 g), což odpovídá měření mikrotvrdosti HV 0,1. [34]

Zkouška byla provedena ve vodorovné rovině vedené napříč svarovou plochou (viz. Obrázek 38). V každé oblasti bylo provedeno 3 až 5 vtisků. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 1 mm.



Obrázek 38 Linie vtisků

Vzorky musely zůstat naleptané pro správné odhadnutí tepelně ovlivněné oblasti. Proto se jednotlivé vtisky následně manuálně upravovaly, kvůli často nepřesnému výběru měřené geometrie dvou úhlopříček.

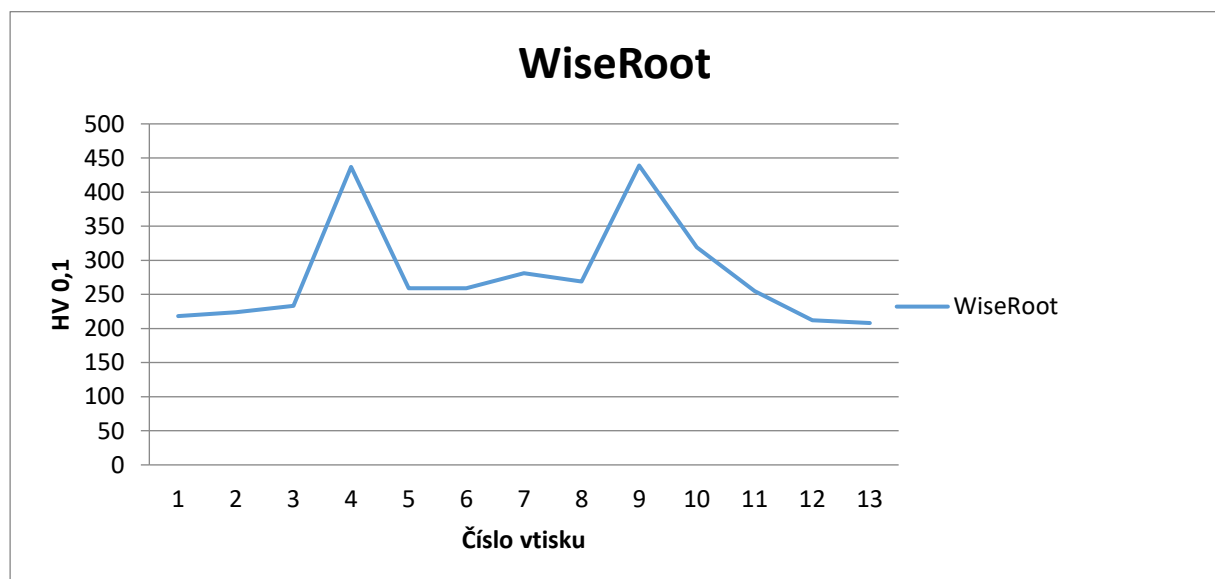


Obrázek 39 Manuálně označená oblast vtisku dle Vickerse

Získané hodnoty byly vneseny do grafů. Grafy vykazují, zvýšenou tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti vzorku. To mohlo být způsobeno lokálním zakalením a změnou struktury.

Hned v prvním grafu lze pozorovat zvýšenou hodnotu u vtisku 4 a 9. Zvýšené hodnoty symbolizují změnu struktury. Zde lze dle velikosti hodnot (nad 400 HV 0,1) předpokládat, že došlo k místnímu zakalení a tvorbě martenzitické struktury.

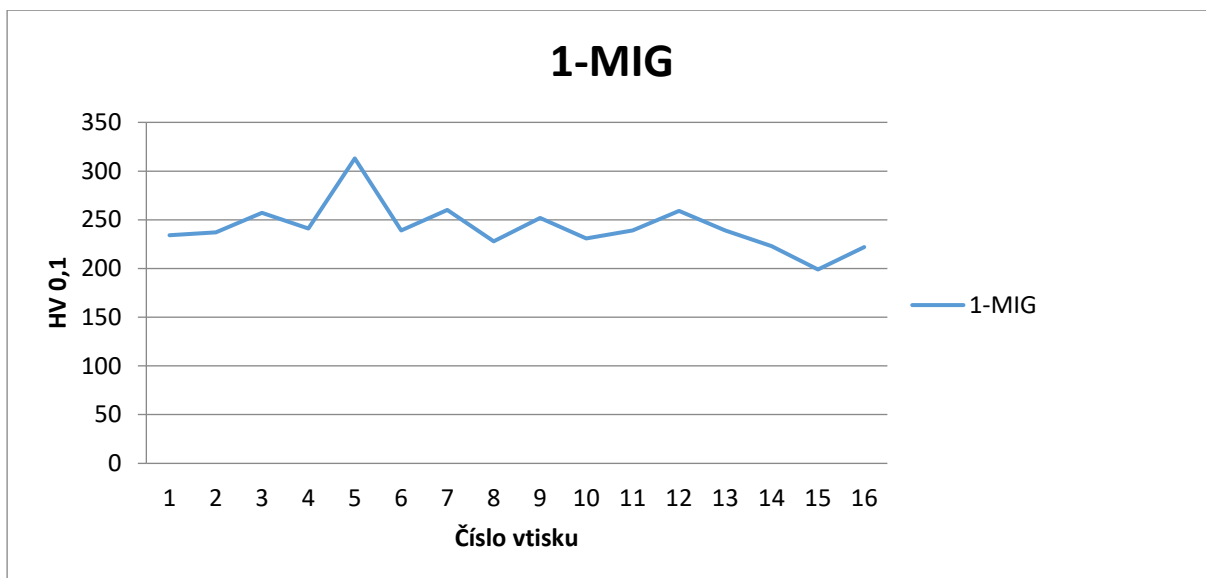
Vznik martenzitické struktury se pravděpodobně vyskytuje i u vzorků z grafu 3 a 4.



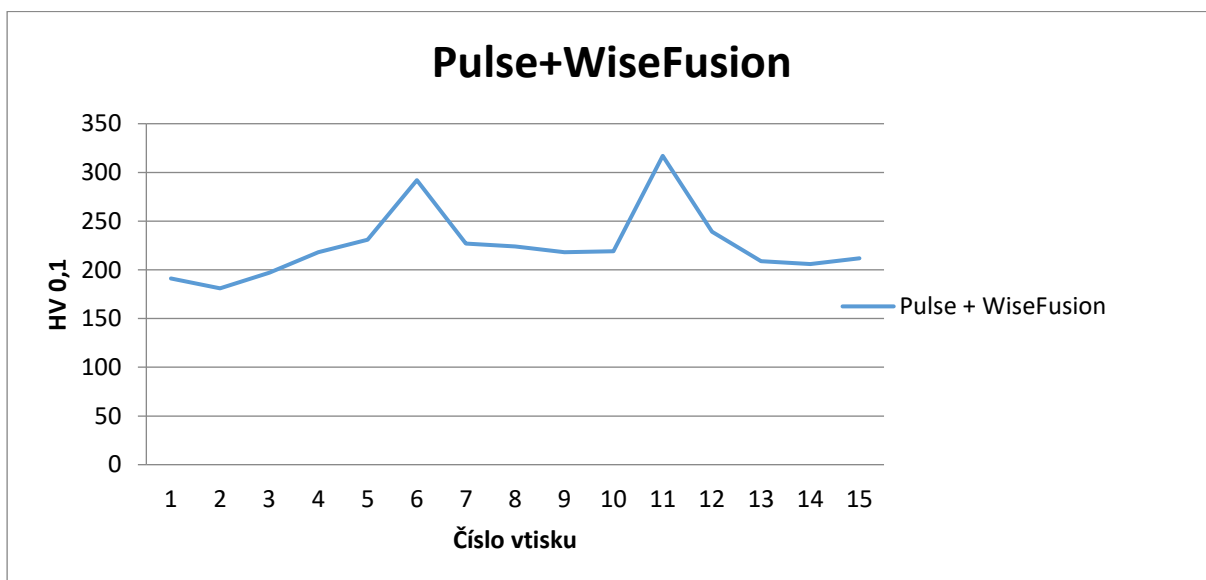
Graf 1 Průběh mikrotvrdomosti – vzorek S355JR, proces WiseRoot

Oproti tomu v grafu 2 nedošlo k výrazné změně tvrdosti jako v předchozím případě. Tudiž lze usuzovat, že svar by dosahoval vyšší houževnatosti, jelikož se zde nevyskytuje martenzitická struktura a není vyvoláno vysoké zbytkové napětí.

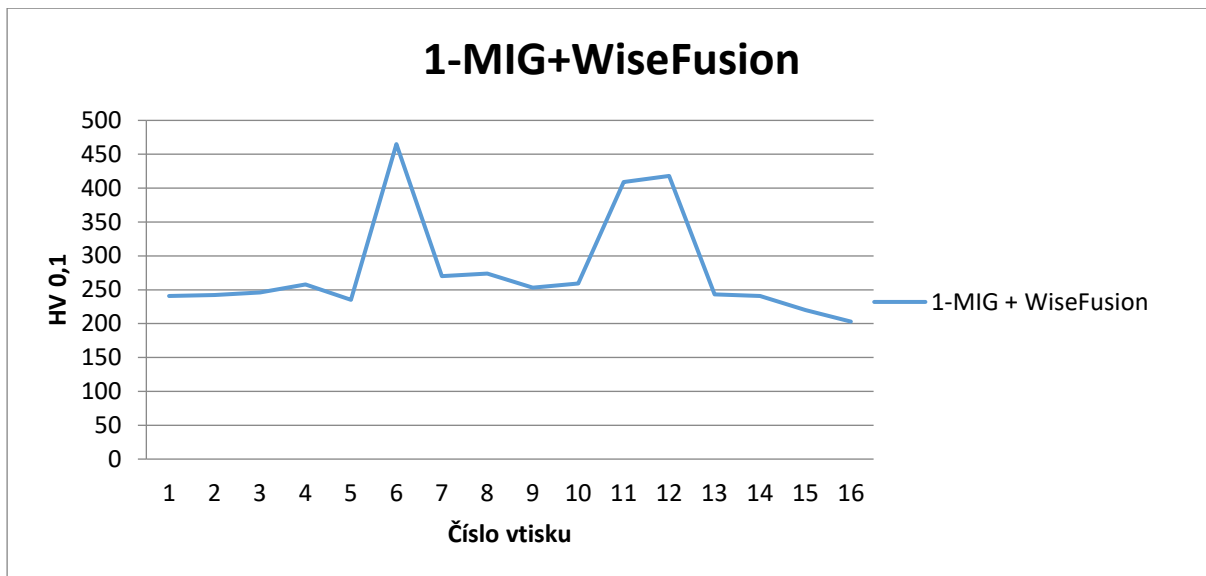
Stejný jev lze pozorovat na obou grafech vzorků S235JR.



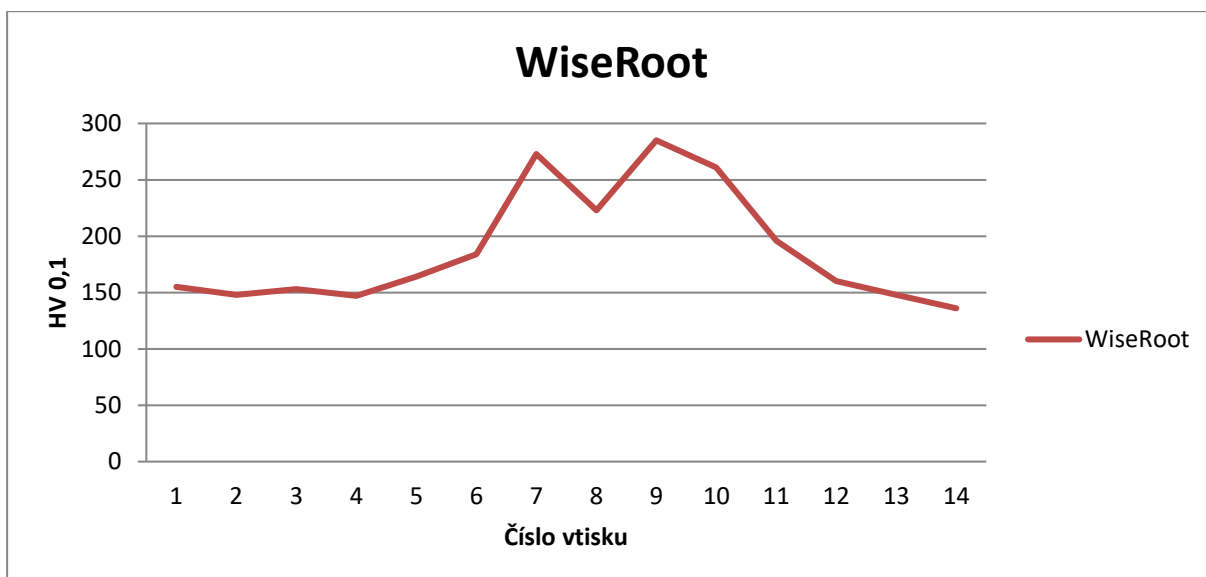
Graf 2 Průběh mikrotvrdosti – vzorek S355JR, proces 1-MIG



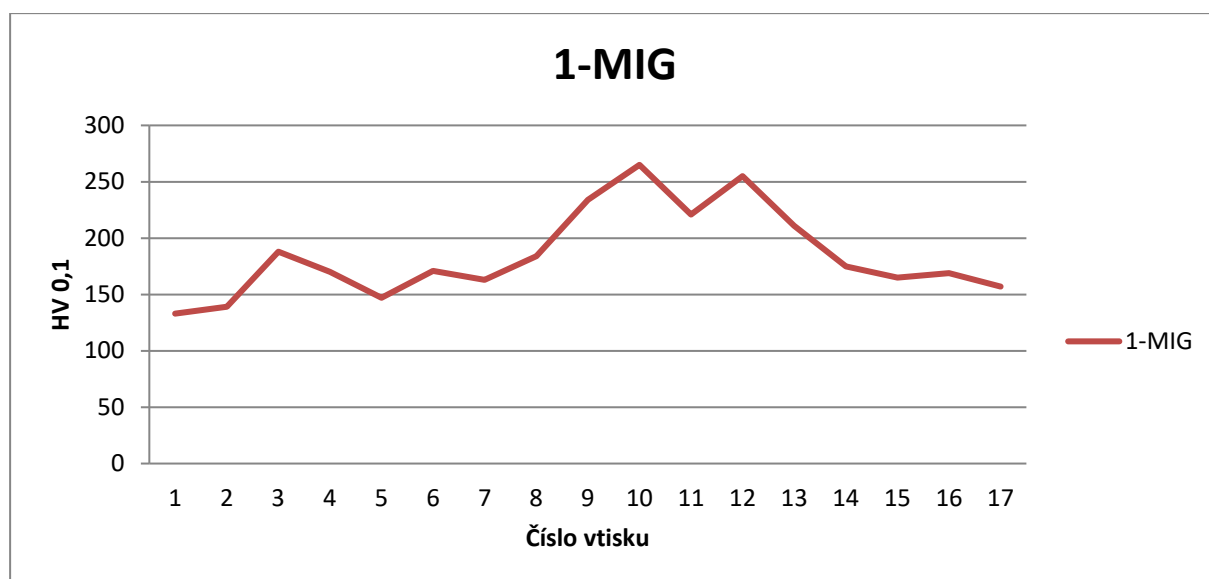
Graf 3 Průběh mikrotvrdosti – vzorek S355JR, proces Pulse+WiseFusion



Graf 4 Průběh mikrotvrlosti – vzorek S355JR, proces 1-MIG+WiseFusion



Graf 5 Průběh mikrotvrlosti – vzorek S235JR, proces WiseRoot



Graf 6 Průběh mikrotvrlosti – vzorek S235JR, proces 1-MIG

5 Diskuse výsledků

Prvním pozorovaným parametrem byl výskyt svarových chyb na povrchu. Ty byly vizuálně posouzeny a charakterizovány dle normy ČSN EN ISO 6520-1. Při jejich kontrole bylo odhaleno několik opakujících se vad, zejména se jednalo o vruby v krycí housence (Vada ISO 6520-1-5014), neúplné vyplnění svaru (Vada ISO 6520-1-511), propadlý kořen (Vada ISO 6520-1-5042) se dvakrát vyskytl u procesu 1-MIG a proces WiseRoot byl náchylnější k neprůvaru kořene (Vada ISO 6520-1-4021). Vruby v krycí housence svaru mohly být způsobeny špatným pohybem v průběhu zhotovování housenky. Neúplné vyplnění svaru bylo následkem špatně zvolených svařovacích parametrů nebo technologických parametrů svařování, kdy se ve svařencích měly vyskytovat krycí housenky dvě (viz. kapitola: Opatření ke snížení napětí a deformací). Neprovařený kořen byl snadno odstraněn zbrúšením hran. Nicméně propadlý kořen se nepodařilo úplně odstranit ani použitím keramických podložek. Tímto lze potvrdit, že ke tvorbě kořenové vrstvy z hlediska náročnosti a chyb v kořeni je výhodnější proces WiseRoot než proces 1-MIG.

V průběhu rentgenového prozařování byl u svařenců zhotovených za použití technologie WiseRoot prokázán výskyt pórovitosti v případě, kde byla kořenová vrstva překryta výplňovou vrstvou. Nicméně v samotných kořenových vrstvách nebyly odhaleny žádné nedokonalosti, dokonce ani svar s rozšiřující se mezerou nevykazoval žádné chyby v kořenové vrstvě o šířce 2 až 6 mm.

Rozřezem materiálu byl potvrzen výskyt pórů v oblasti, kde se setkává kořenová vrstva, základní materiál a krycí housenka. Výskyt pórovitosti a skutečnost, že v krycí vrstvě docházelo k místnímu neúplnému vyplnění svaru ukazuje na skutečnost, že tyto vady šlo odstranit lépe zvolenými technologickými parametry svařování, a to zejména vyšším počtem vrstev.

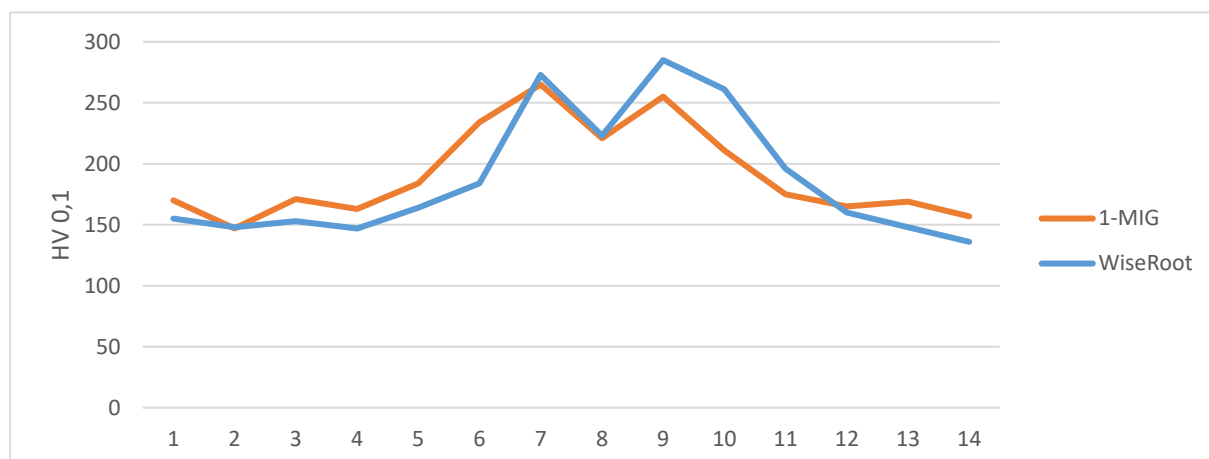
Dále destruktivní analýza odhalila velikost tepelně ovlivněné oblasti. Dle výpočtů vneseného tepla měla být tepelně ovlivněná oblast pro proces WiseRoot nejmenší (v tabulce 9 svařence 2 a 5). To se potvrzuje v případě materiálu S235JR+N. V případě S355JR+N je velikost tepelně ovlivněné oblasti menší, ale taktéž je menší velikost kořenové vrstvy, která sahá těsně pod polovinu tloušťky 8 mm plechu, kořenová vrstva 1-MIG naopak dosahuje výšky zhruba 6 mm. Pro vzorky zavařené s výplňovou housenkou je výsledná velikost tepelně ovlivněné

oblasti vyšší pro technologii 1-MIG. Výsledky mohou být nízkým počtem měřených vzorků méně přesné, ale i tak poukazují na menší velikost tepelně ovlivněné oblasti procesu WiseRoot.

Svařenec	Velikost TOO [mm ²]	
	Levá strana	Pravá strana
2	4,23	9,42
4	12,88	11,96
5	9,53	10,76
6	19,10	18,12
5 s výplní	22,38	20,26
6 s výplní	28,14	26,62

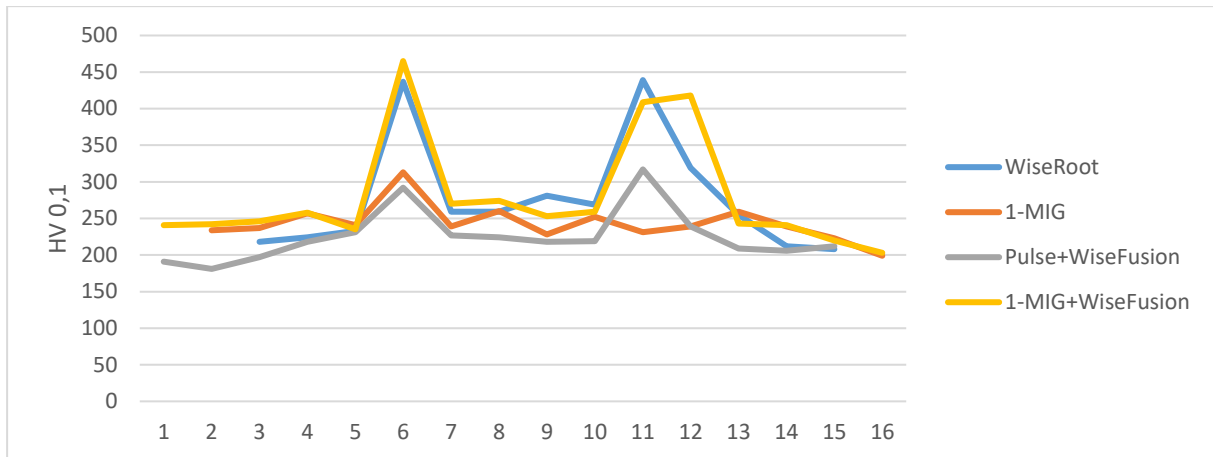
Tabulka 9 Srovnání velikostí TOO

Měření mikrotvrdomosti ukázalo dle grafu (7) v případě oceli S235JR+N podobný průběh tvrdostí napříč svarem u obou procesů. Nejprve pozvolna rostoucí hodnoty v přechodné oblasti (body 2 až 5), následně prudký nárůst v oblasti ovlivněné teplem k hodnotám až 280 HV. Mírný propad hodnot tvrdosti v oblasti přídavného materiálu, následný pokles hodnot ve stejném smyslu jako jejich nárůst.



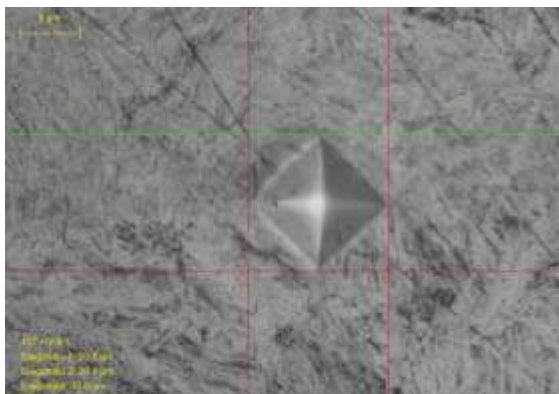
Graf 7 Průběh tvrdosti – vzorek S235JR

Oproti tomu v případě oceli S355JR+N hodnoty WiseRoot značně převyšovaly v tepelně ovlivněné oblasti hodnoty 1-MIG. Dle velikosti vneseného tepla bylo předpokládáno, že hodnoty WiseRoot budou nižší než hodnoty procesu 1-MIG. Oproti tomu svary zhotovené za využití technologie WiseFusion v případě kombinace s procesem 1-MIG dosahují srovnatelných hodnot jako WiseRoot. V kombinaci s pulzním svařováním jsou pak tyto hodnoty srovnatelné se samotným 1-MIG svarem. Při procesu WiseRoot a 1-MIG+WiseFusion muselo dle naměřených hodnot dojít k místnímu zakalení a tvorbě martenzitické struktury, jak lze vidět z obrázku 40, jelikož hodnota tvrdosti zde dosahuje velikosti 437 HV. Hodnoty se liší s předpokládanými výsledky a k jejich kontrole by bylo vhodné měření provést znovu. Dále je šance, zejména v bodě 11 v grafu (8), že vtisk v případě hodnot 1-MIG byl proveden v různých strukturních složkách, zde například do zbytkového austenitu, který nevykazuje takovou tvrdost, jako ferit, perlit, či martenzit.

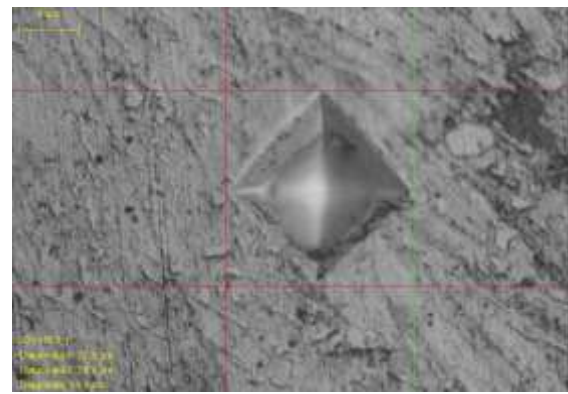


Graf 8 Průběh tvrdosti – vzorek S355JR

Na obrázcích 40, 41 je vidět oblast jednotlivých vpichů dvou procesů. Na obrázku 40, oproti obrázku 41, jsou jasně viditelné martenzitické jehlice, způsobující vysokou tvrdost, což objasňuje průběh oranžové a modré křivky z grafu 8.



Obrázek 40 Vtisk v bodě 6 – struktura vzorku S355JR, WiseRoot, tvrdost 437 HV 0,1



Obrázek 41 Vtisk v bodě 6 – struktura vzorku S355JR, 1-MIG, tvrdost 231 HV 0,1

6 Závěr

Tato práce byla zaměřena na porovnání technologie WiseRoot s konvenčními technologiemi, a to hlavně s technologií 1-MIG, na kterou jsou svařovací softwary aplikovatelné a není nutné měnit svařovací zdroj či jiné příslušenství.

V teoretické části bylo charakterizováno obloukové svařování a popsány jeho nejpoužívanější technologie MIG/MAG, MMA a TIG. Dále bylo vysvětleno, na jakém principu fungují jednotlivé systémy Wise od firmy Kemppi. Jednotlivé softwary byly charakterizovány s důrazem na software WiseRoot.

Experimentální část se zabývala ověřením svařovacích vlastností softwaru WiseRoot. Ke zhotovení svařenců byly použity softwary 1-MIG, WiseRoot, WiseFusion, WisePenetration a Pulse. Byly zdokumentovány svařovací parametry a proces WiseRoot byl přímo porovnán s konvenční technologií 1-MIG. Bylo zhotoveno 7 svařenců, kde byl porovnáván výskyt vad, porozity a průběh mikrotvrdomosti napříč svarem.

V experimentální části byl nejprve zdokumentován výskyt svařovacích chyb dle normy ČSN EN ISO 6520-1. Chyby byly pozorovány zejména v oblasti kořene, a to buď neprovařeným kořenem v případě procesu WiseRoot na vzorcích s nadměrným otupením hran, nebo naopak výskyt nadměrného průvaru v kořeni. Odstranění neprovařeného kořene je snazší, hrany se pouze zbrousí, tudíž dle výskytu vad v kořenové vrstvě je proces WiseRoot vhodnější než běžný 1-MIG.

Prozařovací analýza odhalila pórovitost po obou stranách svarů zhotovených technologií WiseRoot. Po rozřezu vzorků se výskyt pórů po obou stranách potvrdil. Této skutečnosti by se dalo předejít lepším technologickým návrhem, konkrétně zhotovením dvou krycích vrstev namísto jedné.

Vnesené teplo bylo dle výpočtů nejnižší pro proces WiseRoot. Velikost tepelně ovlivněné oblasti odpovídala předchozím výpočtům a byla pro proces WiseRoot menší než pro 1-MIG.

Měření tvrdosti jednotlivých oblastí napříč svarem vykazovalo nejvyšší zvýšení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti. Pro proces WiseRoot zde bylo dosaženo nejvyšších hodnot, což je nežádoucí. Avšak hodnoty 1-MIG v grafu (8) jsou nižší, než bylo předpokládáno. Je možnost, že vtisk byl proveden do měkčí strukturní složky.

Seznam použité literatury

- [1] AMBROŽ, O.; KUBÍČEK, J.; KANDUS, B. *Technologie svařování a zařízení*. svařování, 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2001. 398 p. ISBN: 80-85771-81-0.
- [2] BERNASOVÁ, Eva. *Svařování*. Praha: SNTL – Státní nakladatelství technické literatury, 1989. ISBN 04-212-87.
- [3] AMBROŽ, OLDŘICH. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava, Zeross, 2001. ISBN 80-85771-81-0
- [4] BARTÁK, JIŘÍ. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava, Zeross, 2002. ISBN 80-85771-97-7
- [5] *Technická norma ČSN EN ISO 4063. Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [6] KULHÁNEK, Karel. *Výukový vzdělávací modul svařování elektrickým obloukem* [online]. 2011 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: http://www.sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_elektricky_oblouk.pdf. Střední odborná škola a Střední odborné učiliště, Neratovice.
- [7] WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 2nd ed. Oxford: Woodhead Publishing, 2012. Woodhead Publishing in materials. ISBN 9780857095107.
- [8] KOVAŘÍK, R., R. *Technologie svařování. 1. vyd. Plzeň: ZČU, 2000. 185 s. ISBN 80-7082-697-5*
- [9] *Příručka svářeče* [online]. Děčín: AIR PRODUCTS spol. s.r.o, 2014 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <http://pekelnysvar.cz/img/prirucka-svarece.pdf>
- [10] *Problémy při obloukovém svařování* [online]. Vamberk: ESAB VAMBERG, 2011 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <http://pekelnysvar.cz/img/prirucka-svarece.pdf>
- [11] *Technická norma ČSN ISO 6520-1:2008. Svařování a příbuzné procesy – Klasifikace geometrických vad kovových materiálů – Tavné svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [12] ZHOU, Yan-Bin, Di-Sheng FANG a Li-Ming LIU. Root welding of V-groove thick plate without backing plate by MAG-TIG double-arc welding. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2017, 18(4), 623-628 [cit. 2022-05-26]. ISSN 2234-7593. Dostupné z: doi:10.1007/s12541-017-0074-8
- [13] KOU, Sindo. *WELDING METALLURGY*. Second edition. USA: A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION, 2002. ISBN 0-471-43491-4.
- [14] *PRODUCT CATALOGUE: Welding guns and torches* [online]. Kemppi, 2021 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://d3dbtvmfwwhlf2.cloudfront.net/pub/Products+and+Services/Product+catalogues/2022/Guns+%26+torches+/Lores/Kemppi_Flexlite_catalogue_2022_EN-lores.pdf
- [15] BENEŠ, Libor. *Svařování: Přehled svařování* [online]. Praha [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf. Výukový materiál. ČVUT.
- [16] Kolektiv autorů. *The Welding Handbook* [online]. Wilhelmsen Ships Service, 2017, 14th edition 2nd revision [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.wilhelmsen.com/globalassets/marine-products/welding/documents/wilhelmsen-ships-service---unitor-welding-handbook.pdf>
- [17] *Technická norma ČSN EN ISO 6947. Svařování a příbuzné procesy – Polohy svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.

- [18] *Základy ručního svařování obalenou elektrodou (MMA)* [online]. Mündersbach: EWM Group [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.ewm-group.com/cs/fachwissen/e-handgrundlagen.html>
- [19] *WiseRoot™ - nový svařovací proces pro kořenové vrstvy a svařování tenkých plechů* [online]. Plzeň: ARC-H a.s. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.arc-h.cz/files/2011/wiseroot.pdf>
- [20] *WiseRoot: HIGHLY EFFICIENT ROOT PASS WELDING* [online]. Kemppi [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/wiseroot/pdf/>
- [21] *Automatizované svařování a řešení provedení oblouku* [online]. Hradec Králové: ARC-H s.r.o., [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://vypalky.cz/wp-content/uploads/2018/06/Automatizovane_svarovani_reseni_oblouku.pdf
- [22] *Company history* [online]. Kemppi [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.kemppi.com/en-US/company/kemppi/kemppi-70/>
- [23] Podklady od firmy ARC-H Plzeň, a.s.
- [24] *European steel and alloys grades/numbers* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/number_steel_eu.php?number_kod=1.00
- [25] *European steel and alloys grades/numbers* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=8
- [26] *Katalog zboží* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/prislusenstvi/svareci-draty/svareci-drat-mig-mag-na-ocel/554-svareci-drat-1mm-15kg-civka-g3si1.htm>
- [27] *WELD G3Si1: Přídavné svařovací materiály* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.esab.co.uk/cz/cz/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/mild-steel-wires/weld-g3si1.cfm>
- [28] HÁJEK, Jaroslav. *Volba ochranného plynu pro svařování* [online]. 2006 [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/volba-ochranneho-plynu-pro-svarovani_17636.html
- [29] *Směsi pro svařování* [online]. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/shop/cs/cz-ig/plyny-a-z/směsi-pro-svařování/corgon/corgon-18-tlaková-lahev-273-1>
- [30] *Products and services: FastMig X* [online]. Kemppi [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.kemppi.com/en-US/offering/family/fastmig-x/>
- [31] *FastMig X 450 – MXP 37 Pipe* [online]. ARC-H a.s. [cit. 2022-05-26]. Dostupné z: <https://www.arc-h.cz/files/dokumenty/fastmig-x-1.pdf>
- [32] Technická norma ČSN EN 1011-1:2009. Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009
- [33] RADAJ, Dieter. *Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion*, Springer Science & Business Media, Springer-Verlag, 2012.
- [34] Technická norma ČSN EN ISO 6507-1:2018. *Kovové materiály – zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.