

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Svařování vysokotlakého potrubí hydraulických lisů

Autor: **Bc. Miroslav VOMÁČKA**

Vedoucí práce: **Doc. Ing. Jan Kalous, CSc., IWE**

Akademický rok 2013/2014

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

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Bc. Vomáčka	Jméno Miroslav	
STUDIJNÍ OBOR	„Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulu) Doc. Ing. Kalous, CSc., IWE	Jméno Jan	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Svařování vysokotlakého potrubí hydraulických lisů		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2014
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	74	TEXTOVÁ ČÁST	46	GRAFICKÁ ČÁST	28
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Diplomová práce se zabývá svařováním vysokotlakého potrubí hydraulických lisů. V práci je základní rozdělení metod svařování s bližší specifikací metod obloukového svařování použitých v práci. Dále je řešena svařitelnost materiálů a druhy zkoušek materiálů po svaření zkušebních kusů. V experimentální části jsou na svařených kontrolních spojích provedeny příslušné zkoušky a jejich vyhodnocení včetně detailního pozorování makro a mikrostruktury. Navržená technologie svařování je numericky simulována.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Svařování, sváření, vysokotlaké potrubí, S355, WIG, TIG, svařování obalenou elektrodou, MMA, svařitelnost, kapilární zkouška, penetrační zkouška, zkoušení ultrazvukem, vizuální kontrola, numerické simulace svařování</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Bc. Vomáčka	Name Miroslav		
FIELD OF STUDY	“ Materials Engineering and Engineering Metallurgy“			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Doc. Ing. Kalous, CSc., IWE	Name Jan		
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	High pressure tube welding of hydraulic presses			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	214
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	-----

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	74	TEXT PART	46	GRAPHICAL PART	28
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This diploma thesis deals with welding of high pressure tubes used in hydraulic presses. Theoretical part gives general information about welding and joints testing. Numerical simulations are also described. Experimental part present results of destructive and non-destructive test with detailed examination of macro and microstructure. Results of numerical simulation are also presented.
KEY WORDS	Welding, tube welding, high pressure tubes, S355, WIG, TIG, manual metal arc, penetration test, ultrasonic testing, visual testing, numerical simulation of welding

Poděkování:

Rád bych touto cestou poděkoval panu Doc. Ing. Janu Kalousovi, CSc., IWE za odborné vedení a spolupráci při vypracovávání této diplomové práce. Dále pak konzultantovi Zdeňkovi Novému, IWT a Ing. Jaroslavovi Kraftovi, EWE z firmy TS Plzeň a.s. za čas strávený při konzultacích a ochotu při řešení problémů během řešení práce. Ing. Josefu Tejcovi z MECAS ESI s.r.o. za vedení během vytváření numerické simulace. Ing. Ivanovi Vorlovi za rady a pomoc při vyhodnocování mikrostruktury svarových spojů a v neposlední řadě rodině za podporu.

Obsah

1.	Úvod	3
2.	Charakteristika problému a důvody řešení.....	4
2.1.	Představení společnosti TS Plzeň a.s.	4
2.2.	Řešená problematika.....	5
2.2.1.	Tvary a rozměry svarových spojů	6
2.2.2.	Základní materiál	7
3.	Návrh optimální technologie svařování	9
3.1.	Definice svařování	9
3.2.	Rozdělení metod svařování	10
3.3.	Elektrický oblouk	11
3.3.1.	Zapálení elektrického oblouku	11
3.3.2.	Části oblouku.....	12
3.4.	Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem	13
3.4.1.	Inventory.....	14
3.5.	Metoda WIG (TIG).....	15
3.5.1.	Ochranné plyny.....	16
3.5.2.	Formovací plyny	17
3.6.	Ruční svařování obalenou elektrodou	19
3.6.1.	Charakteristiky oblouku	20
3.7.	Svařitelnost materiálů.....	21
3.7.1.	Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost ocelí.....	22
3.8.	Zkoušky a kontroly svarových spojů	23
3.8.1.	Destruktivní zkoušky	23
3.8.2.	Nedestruktivní zkoušky.....	30
4.	Numerické simulace procesů svařování	34
4.1.	Metoda konečných prvků.....	34
4.2.	Simulační program Visual-Environment	35
5.	Svaření a experimentální vyhodnocení svarových spojů	37
5.1.	Svaření zkušebních svarových spojů	37
5.2.	Použitá zařízení.....	37
5.2.1.	Svařovací zdroje	38
5.2.2.	Svařovací přípravky	39

5.3.	Přídavný materiál	40
5.3.1.	Přídavný materiál GI 133	40
5.3.2.	Přídavný materiál OK 48.00.....	41
5.4.	Vyhodnocení kontrolních svarových spojů	41
5.4.1.	Výsledky zkoušky tahem	42
5.4.2.	Výsledky zkoušky lámavosti	43
5.4.3.	Výsledky zkoušky rázem v ohybu	44
5.4.4.	Makrostruktura svarového spoje.....	45
5.4.5.	Mikrostruktura svarového spoje	46
5.4.6.	Průběh tvrdosti.....	57
5.4.7.	Vizuální kontrola	61
5.4.8.	Kapilární zkouška	62
5.4.9.	Ultrazvuková zkouška	63
6.	Numerická simulace svařování	64
6.1.	Vytváření modelu	64
6.2.	Zadání parametrů svařování	65
6.3.	Výsledky numerické simulace	65
7.	Vypracované WPS.....	67
8.	Technicko-ekonomické hodnocení.....	70
9.	Závěr.....	72
10.	Reference	73

1. Úvod

V dnešní době si již bez techniky nedokážeme život představit. I přes to, že technologický boom započal již v minulém století, nezdá se, že by se technologický pokrok zpomaloval. Naopak. Od té doby lidstvo po desítky let neustále zdokonaluje nebo nalézá nové a nové technologie. Stále je co objevovat, stále je co zlepšovat. To platí i o svařování, které od svého rozmachu (nepočítáme-li svařování kovářské, které má tisíciletou historii) na počátku 19. století zaznamenalo mnoho nových technologií a vylepšení a jeho důležitost na poli průmyslu stále stoupá. Svařování je dlouhodobě jedna z nejvýznamnějších strojírenských výrobních technologií. Má rozhodující vliv na jakost řady výrobků a na výrobní náklady, proto má klíčové postavení mezi výrobními technologiemi. Patří také mezi technologie zpracovávající největší objem kovových materiálů (cca 25%). Svařence jsou stále složitější, svařují se jak velké hmotné svařence, tak i malé, tenkostěnné. Svařence jsou často z velké části zhotovovány z normalizovaných dílů (plechy, trubky, profily atd.), což je ekonomicky výhodné a je možné v průběhu výroby provádět potřebné změny jako například změnu tloušťky nebo profilu. To je velká výhoda proti odlitkům, u kterých je jakákoli tvarová změna značně složitá a většinou je nutné zhotovit nový model. Výroba odlitků se tak vyplatí je při velkých sériích. Náhradou odlitku svařencem se také zpravidla uspoří podstatná část hmotnosti a tím i materiálu. V porovnání s ostatními technologiemi zpracovávajícími kovy (slévání a tváření) je svařování investičně nenáročné na výrobní zařízení. Další výhoda svařenců spočívá i v tom, že je možno jednotlivé dílce, které potřebují složitější obrábění (jako třeba příruby, závity atd.) obrobít samostatně na menších strojích před svařením a hotový svařenec pak nepotřebuje další obrábění, které by bylo u takto velkých a hmotných součástí značně složitě, jako u obrábění odlitků. Dnešní moderní technologie svařování umožňují zhotovovat velmi jakostní, pevné a bezpečné svarové spoje. Je možno svařovat i spoje heterogenní, kdy jsou spojované díly z různých materiálů. To je další nesporná výhoda v porovnání s odlitky, kdy je možné mít určité části svařence například z korozivzdorných materiálů a zbytek z běžných konstrukčních ocelí. Díky této univerzálnosti, neustálému zlepšování a pokroku, si svařování snadno udrží svoji pozici na poli průmyslu a jeho důležitost i nadále stále poroste. [1]

2. Charakteristika problému a důvody řešení

Tato diplomová práce byla řešena ve spolupráci s firmou TS Plzeň a.s. a zabývá se problematikou svařování vysokotlakých potrubí používaných v hydraulických lisech.

2.1. Představení společnosti TS Plzeň a.s.

TS Plzeň a.s. je jednou z největších společností v oblasti těžkého strojírenství v České republice. Továrna započala svojí produkci již v roce 1859 a dodávala svoje strojní produkty téměř do všech kontinentů. Díky vysoké technické úrovni, kvalitě produktů a schopnosti poskytovat svým zákazníkům široký rozsah služeb se TS Plzeň řadí mezi špičku v oblasti těžkého strojírenství ve střední Evropě. Vysoce kvalifikovaný a zkušený tým inženýrů a obchodního personálu je schopen navrhovat a realizovat maximálně efektivní řešení na základě moderních technologií a výsledků výzkumu a vývoje, aby poskytl svým zákazníkům produkty s vysokým výkonem, produktivitou a požadovanými parametry návratnosti investic. [2]

TS Plzeň a.s. poskytuje svým zákazníkům širokou paletu služeb. Může se jednat jen o konzultace nebo počáteční studie projektu, přes vypracování technické dokumentace, až po samotnou výrobu, doručení, instalaci a zprovoznění dodávaných strojních celků. Důkazem vysoké odbornosti personálu může být množství zakázek, které TS Plzeň a.s. zpracovala pro mnoho zákazníků „na klíč“. Flexibilita a vůle maximálně uspokojit požadavky zákazníka jsou výrazným rysem firmy. Produkty firmy jsou exportovány do mnoha zemí světa. Významní zákazníci TS Plzeň nejsou situováni jen ve střední a východní Evropě, ale velká část zakázek přichází také z Blízkého východu a Asie. [2]

Společnost soustředí velkou pozornost na zaručení co nejvyšší kvality svých produktů. Od roku 1995 je držitelem certifikátu Quality System Certificate ISO 9001 standard. Název TS Plzeň a.s. nese společnost od roku 2007, kdy byla přejmenována z dřívějšího názvu ŠKODA TS a.s. [2]

Mezi nejvýznamnější produkty společnosti patří zejména lisy, válcovací stolice a zařízení pro zpracovávání cukrové třtiny. Výroba lisů má v TS Plzeň velkou tradici. První lis byl vyroben již v roce 1872 a od té doby bylo vyrobeno více než 1680 lisů pro různé odvětví průmyslu. Velkou část z nich tvoří kovací lisy pro zpracování ocelí, ať už pro volné nebo zápusťkové kování, dále vulkanizační lisy pro výrobu pneumatik nebo lisy pro tažení ocelí a slitin hliníku nebo mědi. Provedení lisů je dnes již nejčastěji hydraulické, avšak v dřívější produkci byly hojně zastoupeny i mechanické typy. Největší lisy z produkce TS Plzeň dosahují lisovacích sil až 200MN. Válcovací stolice z produkce společnosti mají taktéž velkou tradici a jsou provozovány v mnoha válcovnách v ČR i v zahraničí. Jedná se o dvou nebo čtyř stolice se šířkou pásů až 1250mm. Stolice jsou standardně dodávány s automatickým měřícím systémem tloušťky AGC (Automatic Gauge Control system). Zařízení na zpracování cukrové třtiny dodává TS Plzeň již od roku 1932 do mnoha zemí Asie, Afriky a Jižní Ameriky. Tyto stroje jsou schopny zpracovat až 20 tisíc tun třtiny za den a patří tak k největším na světě. Mimo výše jmenovaných produktů společnost nabízí modernizaci starých

strojů, jejich údržby popřípadě opravy. Dále je firma schopna zajišťovat kovoobrábění od soustružení, broušení až po CNC frézování. TS Plzeň se také zabývá svařováním a je schopna zajistit svařování svařenců až do hmotnosti 50 tun a rozměru 11 metrů délky nebo 2 metrů průměru metodami MIG, MAG, TIG, ruční svařování obalenou elektrodou, automatické svařování pod tavidlem, kyslík-acetylenovým plamenem nebo semi-automatickým svařováním pod tavidlem ESAB. Dále nabízí tepelné zpracování indukčním ohřevem. [2]

2.2. Řešená problematika

Jak již bylo uvedeno výše, produkce firmy TS Plzeň a.s. je z velké části tvořena hydraulickými lisami (Obr. 2-1) a to buď kovacími, vytlačovacími nebo speciálními. Nejvýznamnější skupinou jsou lisy kovací pro volné kování. Ty jsou vyráběny s kapacitou od 6,3MN do 200MN. Lisy pro volné kování řady CKV a CKW jsou určeny pro veškeré operace volného kování výkovků z ocelí a neželezných kovů (pěchování ingotů, děrování, volné kování různých polotovárů s kruhovým i vícehranným průřezem a kování kroužků a dutých válců na trnu). Veškeré pohyby lisů jsou snímány inkrementálními nebo absolutními čidly, jejichž údaje jsou přenášeny do řídicího počítače. Pomocí programového vybavení je možné řídit celý kovací proces automatizovaně bez zásahu operátora lisu. Tento postup zároveň umožňuje optimalizaci kování s minimalizací potřebných ohřevů v pecích a prakticky vylučuje výrobu chybných výrobků podkročením rozměru. [2] [3]

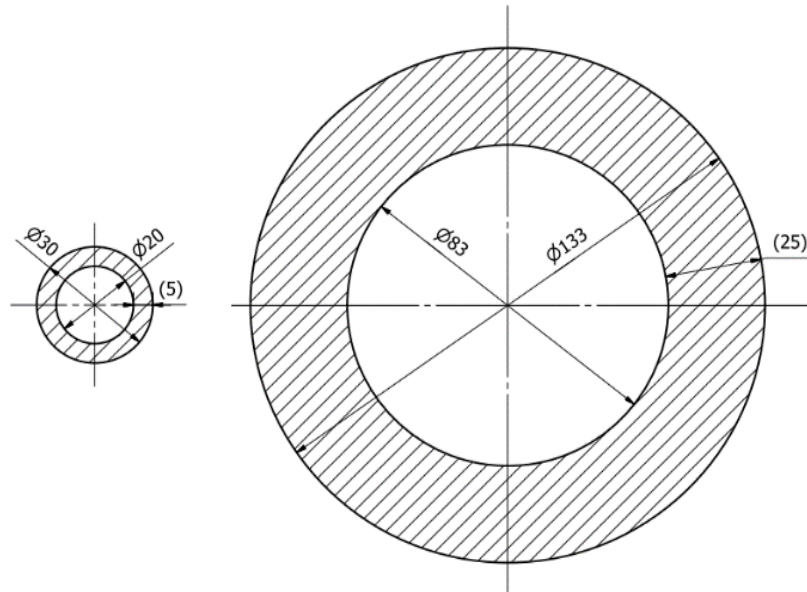


Obr. 2-1 – Kovací lis z produkce TS Plzeň a.s. [3]

Tyto lisy a celé hydraulické ústrojí pracují s vysokými tlaky. Vzhledem k tomu, že lis pracuje v určitém taktu výroby a při každém vykonává několik zdvihů, je zřejmé, že i tlak v celém ústrojí je proměnný. Tyto tlakové změny společně s prouděním tlakového média značně namáhají přenosovou tlakovou soustavu, na kterou jsou z těchto důvodů kladeny vysoké požadavky z hlediska bezpečnosti a životnosti.

Rozvod tlakového média je u hydraulických lisů řešeno soustavou silnostěnného potrubí, konkrétně trubkami o vnějších průměrech 133 a 30mm (Obr. 2-2). Vzhledem k tomu, že rozvod tlaku je tvarově dosti složitý a obsahuje mnoho ohybů, jsou trubky svařovány z jednotlivých dílců do jednoho celku. Svařované dílce (rovné trubky, kolena s různým úhlem ohybu, příruby) jsou sestehovány dohromady a následně svařeny v jeden svařenec.

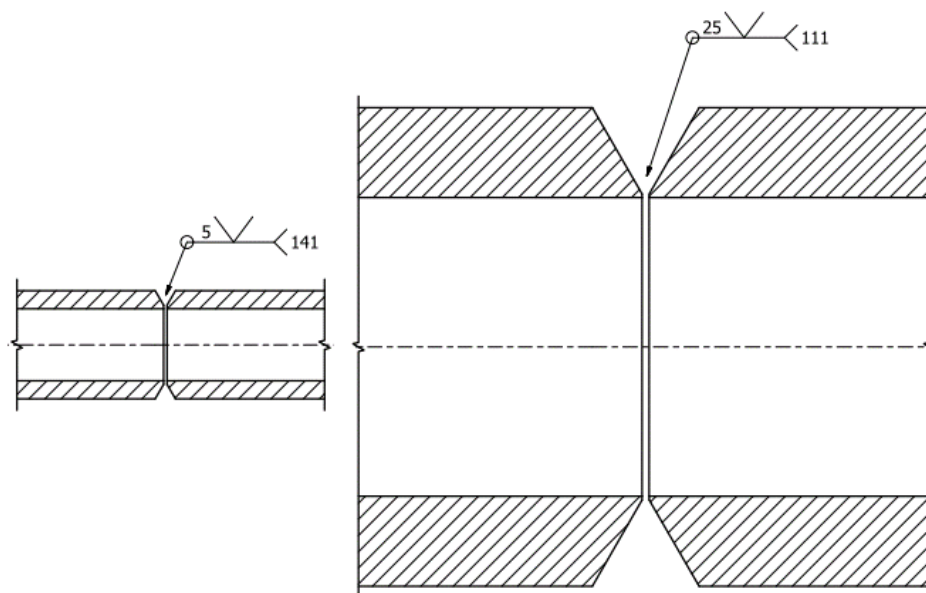
Tato práce se zabývá problematikou svařování obou typů trubek a jejím cílem je navrhnout optimální technologii svařování, která zaručí požadované mechanické vlastnosti svarového spoje a bude výhodná i z hlediska ekonomického hodnocení.



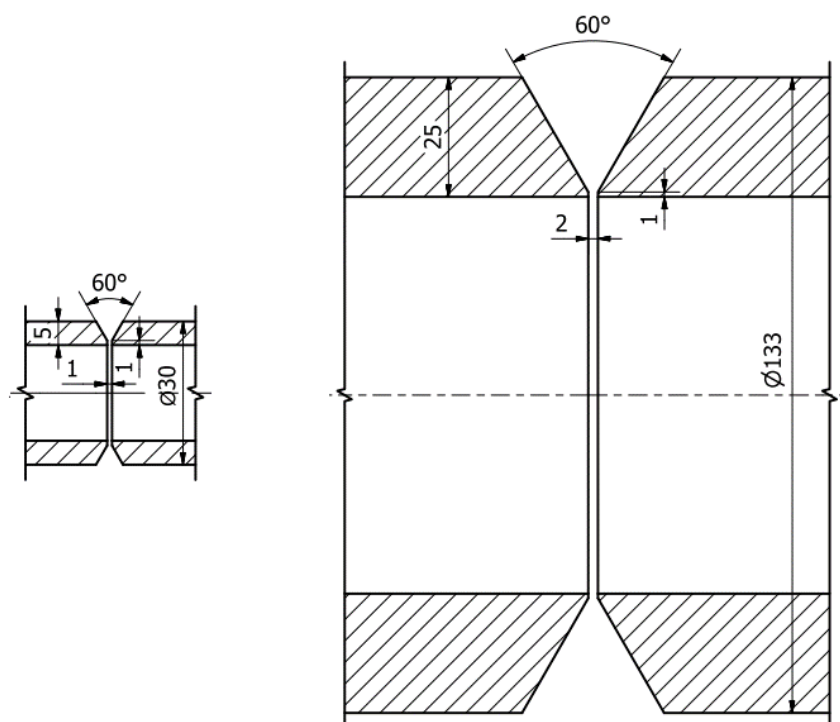
Obr. 2-2 – Rozměry svařovaného potrubí

2.2.1. Tvary a rozměry svarových spojů

V obou případech svařovaného potrubí se jedná o tupý jednostranný V svar (Obr. 2-3). Tvary a rozměry svarových ploch byly navrženy v souladu s normou ČSN EN ISO 9692-1 (Obr. 2-4).



Obr. 2-3 – Detail svarových spojů



Obr. 2-4 – Tvary a rozměry svarových ploch

2.2.2. Základní materiál

V obou případech je základním materiálem vysokotlakých trubek ocel S355J2H. Specifikaci materiálu zobrazuje Tab. 2-1. Chemické složení a hodnoty mechanických vlastností uvádí Tab. 2-2 a Tab. 2-3. Chemické složení a mechanické hodnoty ocelí byly čerpány z příslušných materiálových atestů.

S	355	J2	H
Konstrukční ocel	Minimální mez kluzu [MPa]	Minimální nárazová práce 27J při -20°C	Ocel pro duté profily

Tab. 2-1 – Specifikace základního materiálu

Ocel trubky Ø 30mm							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,16	0,27	1,29	0,021	0,012	0,10	0,13	0,19
Ocel trubky Ø 133mm							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu
0,12	0,23	1,44	0,012	0,004	0,07	0,12	0,18

Tab. 2-2 – Chemické složení základních materiálů

Ocel trubky Ø 133mm			
Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	K [J]
530	480	28	72
Ocel trubky Ø 30mm			
Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	K [J]
577	399	27	-

Tab. 2-3 – Hodnoty mechanických vlastností základních materiálů

3. Návrh optimální technologie svařování

Zvládnutí svařovacího procesu je závislé na znalostech celé řady vědních oborů, mezi něž patří například matematika, fyzika, chemie, fyzikální metalurgie, nauka o materiálu a mnoho dalších. To dává svařovanému výrobku či konstrukci interdisciplinární charakter. Svarové spoje je možno zhotovovat mnoha metodami svařování. Ne však každá metoda je použitelná pro všechny případy a tak je důležité na základě požadavků na svarový spoj vybrat metodu nebo metody, které tyto požadavky splňují. Dále je potřeba zvolit odpovídající zkoušky ke kontrole svarových spojů, aby byla zajištěna požadovaná kvalita. [1]

3.1. Definice svařování

V technické praxi se používají spoje rozebíratelné a nerozebíratelné. Nerozebíratelná spojení bez použití spojovacích prvků jsou zhotovitelná svařováním, pájením, lepením nebo nýtováním. Při svařování kovů nebo jejich slitin vzniká nerozebíratelný spoj pomocí soustředěného tepla nebo tlaku nebo případně použitím obojího. Podle použité metody svařování může nebo nemusí být použit přídavný materiál. Ten je stejného nebo podobného chemického složení jako základní materiál. Samotné spojení nastane vlivem působení meziatomových sil na teplem nebo tlakem aktivovaných svarových plochách, které jsou v oblasti svařování v roztaveném nebo plastickém stavu. Svařování je tedy možno definovat jako zvláštní výrobní proces nerozebíratelných spojů za použití tepla nebo tlaku (případně obojího) s použitím přídavného materiálu nebo bez něj. [4]

K vytvoření svarového spoje jsou ve stávajících reálných podmínkách použitelní 3 metody:

- Tavné svařování – do oblasti svarového spoje je přiváděno pouze teplo (nebo teplo a přídavný materiál) a svarový spoj vzniká přes roztavený svarový kov.
- Tlakové svařování – přivádí se jak teplo, tak tlak. Svarový spoj je realizován pomocí plastické deformace v místě styku obou spojovaných materiálů. Často může docházet vlivem dodaného tepla i k částečnému odtavení v místě spoje.
- Svařování tlakem za studena – přivádí se pouze tlak a ke spojení dílců dochází v tuhém stavu

Každému druhu svařování odpovídá specifický průběh teploty, tlaku a času během vytváření svarového spoje. Poslední dobou se však ukazuje, že teplo hraje velmi významnou roli, neboť i při svařování pouhým tlakem se podstatná část mechanické energie přemění na energii tepelnou. [4]

3.2. Rozdělení metod svařování

Běžně používané metody svařování je možno rozdělit do dvou základních kategorií. Jsou to metody tavného svařování a metody svařování s použitím tlaku. Přehled metod svařování a jejich číslování uvádí norma ČSN EN ISO 4063. Každá metoda má číselnou zkratku, která se používá pro zjednodušení ve svařovacích dokumentacích jako WPS (welding proces specification), WPQR (welding procedure qualification report) nebo výkresové dokumentace. [4]

Metody tavného svařování

- Obloukové svařování (1)
 - Obloukové svařování tavící se elektrodou (101)
 - Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou (111)
 - Gravitační obloukové svařování obalenou elektrodou (112)
 - Obloukové svařování plněnou elektrodou bez ochranného plynu (114)
 - Svařování pod tavidlem (12)
 - Obloukové svařování v ochranné atmosféře (13)
 - Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu – MIG (131)
 - Obloukové svařování tavící se elektrodou v aktivním plynu – MAG (135)
 - Obloukové svařování plněnou elektrodou v aktivním plynu (136)
 - Obloukové svařování plněnou elektrodou v inertním plynu (137)
 - Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu – WIG/TIG (141)
- Elektrostruskové svařování
- Svařování plazmové
- Plazmové MIG svařování
- Svařování magneticky ovládaným obloukem
- Svařování proudem elektronů
- Plamenové svařování
- Slévárenské svařování
- Svařování světelným zářením
- Laserové svařování
- Aluminotermické svařování
- Elektroplynové svařování
- Indukční svařování

Metody svařování tlakem

- Tlakové svařování za studena
- Odporové svařování
- Svařování indukční
- Svařování v ohni
- Třecí svařování
- Ultrazvukové svařování
- Svařování výbuchem, [5]

3.3. Elektrický oblouk

Elektrický oblouk používaný při svařování je vysokotlaký nízkonapěťový elektrický výboj, který je zapálen a hoří v prostředí ionizovaného plynu. Napětí musí být dostatečné pro ionizaci prostředí, ve kterém má oblouk hořet a zároveň hodnota protékajícího proudu musí být dostatečná pro udržení plazmy oblouku v ionizovaném stavu. Protékající proud je řádově v ampérech až tisících ampér. Oblouk je charakteristický malým anodovým úbytkem napětí a malým potenciálním rozdílem na elektrodách. Katodová skvrna má vysokou proudovou hustotu. Elektrický oblouk vyznačuje intenzivní světelné a UV záření. [4]

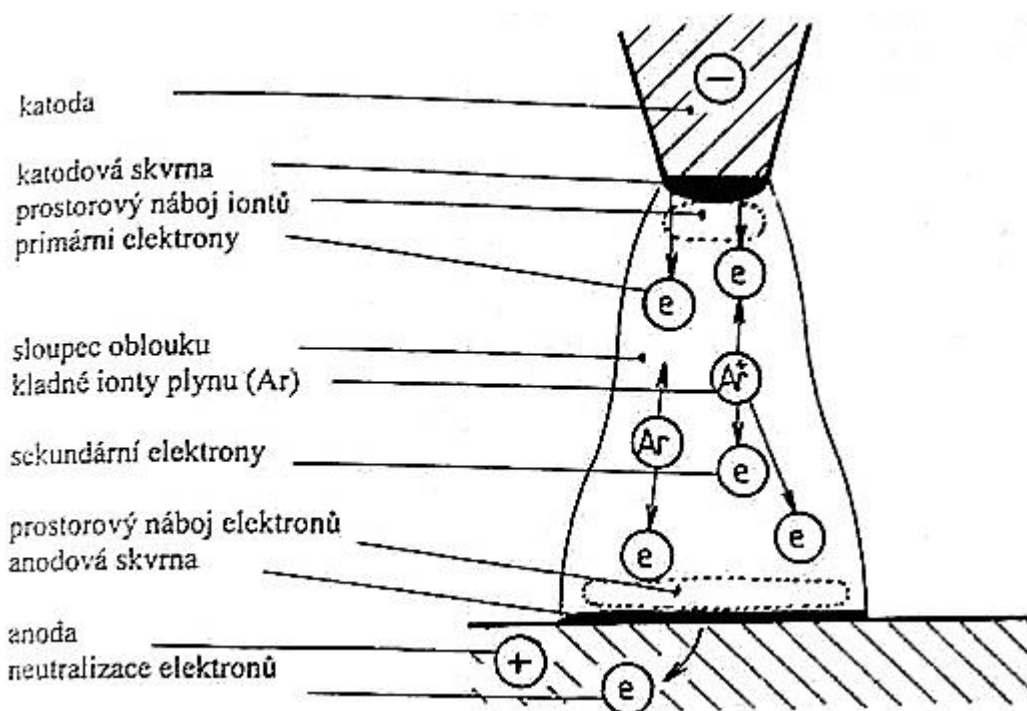
3.3.1. Zapálení elektrického oblouku

Zapalování oblouku probíhá při napětí zdroje naprázdno. Toto napětí je zpravidla vyšší než při ustáleném hoření oblouku a podstatně závisí na materiálu elektrod a ionizační schopnosti okolního prostředí. Obvyklá velikost zápalného napětí je 60 až 70V. Po ustálení oblouku je na něm pro běžné metody svařování obvykle napětí v rozmezí 10 až 50V a proud 10 až 2000A. Samotné zapálení oblouku je možno provést třemi způsoby:

- Zapálení krátkodobým dotykem elektrody a základního materiálu při nastaveném svařovacím proudu – termoemise primárních elektronů se zajistí prudkým zvýšením teploty kontaktního místa elektrody a základního materiálu. Toto místo se zahřeje elektrickým odporem při průtoku zkratového proudu. Primární elektrony ionizují okolní prostředí a tím se vytvoří vhodné podmínky pro vedení elektrického proudu v plynu. K rozvoji oblouku dochází po oddalování elektrody od základního materiálu. Tento druh zapalování oblouku je charakteristický pro ruční obloukové svařování, svařování pod tavidlem a MIG/MAG.
- Zapálení vysokonapěťovým vysokofrekvenčním ionizátorem – tím se zapálí elektrická jiskra na vzdálenost několika milimetrů, která způsobí ionizaci plynného prostředí výbojem. Tím je umožněno vedení elektrického proudu, disociace a ionizace okolního ochranného plynu a zapálení vlastního oblouku. Ionizace je umožněna jen díky katodové skvrně a termoemisi elektronů. Tato metoda zapálení je používána u metody WIG (TIG).
- Dotykové zapalování startovacím proudem – tento způsob zapalování je umožněn díky řízení a kontrole svařovacích parametrů. Používá se u metody WIG (TIG). Elektroda je v kontaktu se základním materiálem a protéká obvodem startovací proud, který obvykle nepřesahuje 10A. Tím se hrot elektrody zahřívá a po určité době se při současném oddalování elektrody a řízeném nárůstu proudu na svařovací hodnotu zapálí elektrický oblouk. Výhoda tohoto způsobu je v přesném umístění začátku svaru na svarovém úkosu. [4]

3.3.2. Části oblouku

Elektrický oblouk vznikající během svařovacích procesů se skládá z několika částí. Nejsnazší pro popis je stejnosměrný oblouk hořící mezi wolframovou elektrodou a základním materiálem v inertním prostředí argonu, neboť při konstantní vzdálenosti elektrody a základního materiálu hoří oblouk velmi stabilně bez napěťových a proudových změn (Obr. 3-1). Každý oblouk představuje v elektrickém obvodu určitý odpor, který je odvislý od parametrů výboje. [4]



Obr. 3-1 – Části elektrického oblouku [4]

Katodová skvrna je ostře ohraničená oblast, která díky termické emisi emituje primární elektrony důležité pro zapálení oblouku a ionizaci okolního prostředí. Elektrony získávají v oblasti katodového úbytku napětí vysokou kinetickou energii a jsou pak schopny při srážkách s neutrálními atomy zapříčinit jejich ionizaci na kladné ionty a sekundární elektrony. Skvrna je stabilní, v případě, že se mění teplota, proud nebo geometrie elektrody, dochází k jejímu stěhování po povrchu katody. Teplota katodové skvrny je závislá na průchozím proudu a pohybuje se obvykle kolem 2400-3000°C. Proudová hustota na skvrně dosahuje až 1000-1500A.mm². [4]

Sloupec oblouku je zářivě svítící oblast disociovaného a ionizovaného plynu ve formě plazmy mezi elektrodami, která dosahuje vysokých teplot. Maximální teplota závisí na řadě faktorů, především na počtu srážek částic v oblouku. Ten je dán intenzitou proudu, hodnotou napětí a prostředím, ve kterém oblouk hoří. Toto prostředí určuje stupeň disociace a ionizace v závislosti na teplotě. Elektrická vodivost plynu závisí na počtu kladných a záporných částic ve sloupci oblouku. Při běžných podmínkách je plyn pro elektrický proud nevodivý z důvodu rovnováhy elektrických nábojů jader a elektronů. Primárními atomy uvolňujícími se z katody a zvýšenou teplotou nebo ohřevem plynu elektrickou vysokonapěťovou jiskrou se rovnováha

poruší oddělením jednoho nebo více elektronů z orbitu atomu. Vhodné ionty vzniklé ochuzením atomů o elektrony jsou přitahovány ke katodě a záporné částice jako elektrony a záporné ionty jsou urychlovány k anodě. Ve sloupci oblouku vedou elektrický proud především elektrony z důvodu jejich vysoké rychlosti a pohyblivosti danou jejich nízkou hmotností. Překročí-li proud určitou kritickou hodnotu, začne veškerá plazma proudit od elektrody k základnímu materiálu bez ohledu na polaritu jednotlivých částic. Tento jev je spojen s intenzitou kruhového elektromagnetického pole, které je indukováno protékajícím proudem a působí na plazmu silou, která směřuje do základního materiálu. Rychlost proudění plazmatu vyvolaná touto silou ovlivňuje tepelné i mechanické vlastnosti oblouku. Maximální teploty oblouku jsou ve středu a k okrajům klesají. Nejvyšší teplota oblouku je těsně pod katodovou skvrnou a může dosáhnout až 16000°C. Při ručním svařování obalenou elektrodou se teplota oblouku pohybuje kolem 4200 a 6400°C, u metody WIG až 9000°C a u MIG/MAG, kde vysoká proudová hustota vytváří dobré podmínky pro ionizaci, až 15000°C. Změna napětí na sloupci oblouku je závislá na jeho délce a s větší délkou se zvyšuje. Průměrný úbytek napětí je přibližně 2V na milimetr délky oblouku. [4]

Anodová skvrna odvádí a neutralizuje dopadající záporné částice. Při dopadu těchto částic se jejich vysoká kinetická energie mění na tepelnou a z části i na elektromagnetické záření. Z toho důvodu má anodová skvrna vyšší teplotu, která dosahuje 2700 až 3600°C, což je ve většině případů teplota vyšší než bod varu daného kovu. Odpařené atomy pak vstupují do oblouku a ionizují se. Existují případy, kdy byla použita anoda chlazená vodou. V takovém případě teplota anodové skvrny nedosahuje takových teplot a atomy z anody pak nejsou v oblouku přítomny. [4]

Při střídavém proudu není oblouk stabilní jako u stejnosměrného proudu, ale při změně polarity oblouk zhasne a pak je vždy znovu zapalován. Tento děj se opakuje v závislosti na frekvenci sítě nebo nastavení zdroje. Katoda je zahřátá z předcházející půlperrody výboje a tak emituje elektrony ihned po začátku nové půlperrody. Díky tepelné setrvačnosti elektrod je zapálení oblouku následující půlperrody snadné. [4]

3.4. Zdroje proudu pro svařování elektrickým obloukem

V průběhu vývoje metod tavného svařování elektrickým obloukem se vyvíjely i zdroje elektrického proudu. Tyto zdroje je možné rozdělit následovně:

Podle způsobu přeměny energie

- Rotační zdroje - svařovací dynamo
- Zdroje netočivé, statické – svařovací transformátory, usměrňovače, měniče (invertory)

Podle druhu dodávaného proudu

- Zdroje stejnosměrného proudu – svařovací dynamo
- Zdroje usměrněného proudu – usměrňovače, měniče
- Zdroje střídavého proudu – transformátory

V dnešní době je již použití točivých svařovacích zdrojů velmi vzácné a používají se nejčastěji zdroje netočivé. Ty můžeme rozdělit takto:

Zdroje se síťovým transformátorem

- Zdroje střídavého proudu – transformátory
- Zdroje stejnosměrného proudu – usměrňovače (řízené a neřízené)

Zdroje bez síťového transformátoru

- svařovací měniče (invertory)

Svařovací invertory jsou momentálně nejprogresivnějšími svařovacími zdroji a jsou hojně používány u moderních svařovacích strojů. Vzhledem k tomu, že tyto zdroje jsou používány i společností TS Plzeň a.s., nebudou jiné svařovací zdroje v práci blíže popisovány. [4]

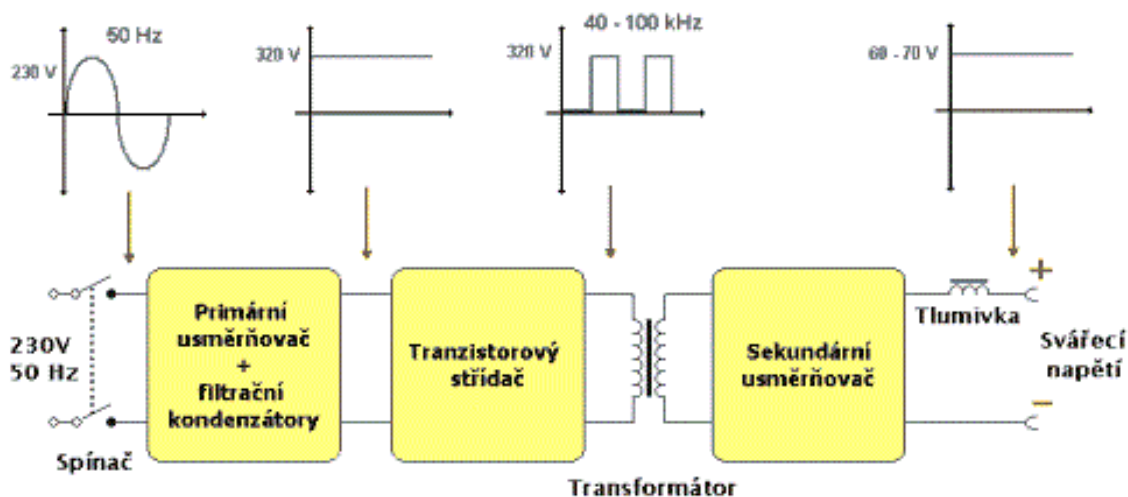
3.4.1. Invertory

Invertorové svařovací zdroje jsou primárně řízené zdroje s výkonovými tranzistory. Pracují na principu středofrekvenčních měničů (střídačů) o frekvencích 20 až 100kHz a v současné době jsou nejprogresivnější koncepcí svařovacích zdrojů. Základním rysem invertorových zdrojů je umístění transformátoru v energetickém řetězci až za spínacím tranzistorem. Důvodem tohoto uspořádání je závislost hmotnosti a objemu transformátoru na jeho pracovní frekvenci. Čím je jeho pracovní frekvence vyšší, tím menší je objem a potažmo i hmotnost transformátoru. Proto mají tyto zdroje nízkou hmotnost a velikost a přitom neklesá jejich výkonnost. Předností je také vysoká účinnost, která dosahuje až 90%. Aby bylo možno využít vysokou taktovací frekvenci, je nutno střídavé napětí nejprve usměrnit. Stejnosměrné napětí, které je pak k dispozici za primárním usměrňovačem, se pak prostřednictvím tranzistorového spínače přemění na vysokou frekvenci. Výstupní napětí se pak následně ještě usměrní (Obr. 3-2). Srdcem celého zařízení je řídicí jednotka, která reguluje vzájemnou součinnost funkčních bloků svařovacího zdroje s jednotkami podávání drátu a dodávky ochranného plynu, kontroluje správnou činnost zařízení, komunikuje s obsluhou prostřednictvím displeje pro nastavování a kontrolu parametrů. Zároveň funguje jako knihovna programů. U větších zařízení je řídicí systém svařovacího zdroje vybaven také výstupem pro periferní zařízení pořizující trvalý záznam průběžně sledovaných vybraných provozních parametrů (tiskárna, zapisovač atd.) nebo pro komunikaci s externím počítačem, prostřednictvím kterého lze programovat speciální průběhy jednotlivých parametrů v závislosti na reálném čase. [4]

Konstrukce invertorových svařovacích zdrojů dává předpoklady pro:

- Vysoký a stabilní svařovací výkon
- Optimální pro různě nastavitelné statické charakteristiky v režimech MIG, MAG, WIG a ruční svařování obalenou elektrodou
- Jednoduchou a nenáročnou obsluhu
- Univerzální použití

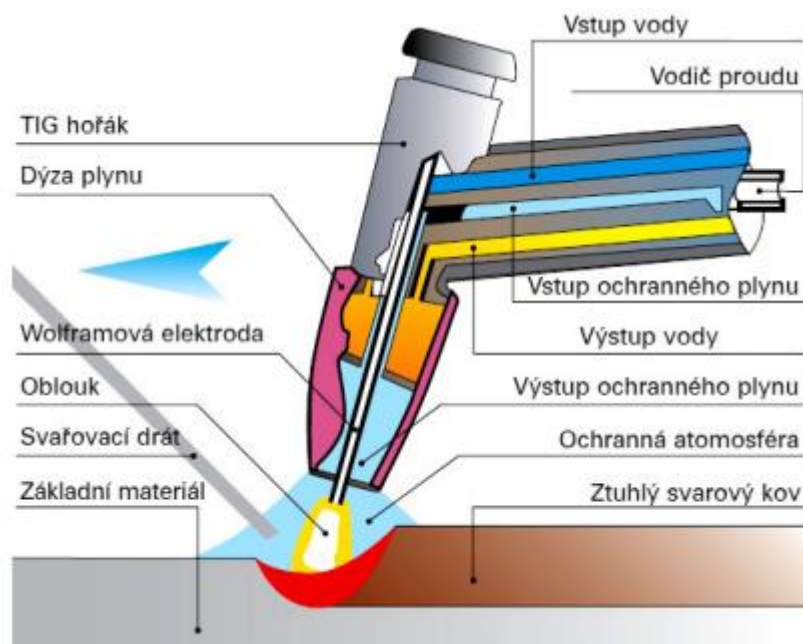
- Možnost výstupu pro počítačové zpracování dat při řízení jakosti
- Možnost snadné komunikace s automatizovanými a robotizovanými pracovišti
- Vysokou provozní spolehlivost
- Přiměřené pořizovací náklady a nízké provozní náklady
- Snadnou manipulaci se zdrojem díky nízké hmotnosti. [4]



Obr. 3-2 – Schéma invertorového měniče [6]

3.5. Metoda WIG (TIG)

Při svařování metodou 141 hoří oblouk mezi základním materiálem a netavicí se elektrodou. Svařování může probíhat bez přídavného materiálu. Častěji však je přídavný materiál použit. Přídavný materiál může být přidáván ručně nebo automaticky. Ochrana elektrody a tavné lázně je zajištěna inertním plynem, nejčastěji argonem, heliem nebo jejich směsí. Obecně lze svařování rozdělit dle druhu proudu na svařování střídavým proudem pro hliník, hořčík a jejich slitiny a svařování stejnosměrným proudem pro středně a vysoko legované oceli, měď, nikl, titan, zirkon, molybden a další. Metoda WIG se nepoužívá pro svařování uhlíkových ocelí hlavně z důvodu vysoké ceny metody. Také hrozí vznik pórů. Touto metodou je též možno tvořit heterogenní spoje jako ocel s mědí, bronzem nebo slitinami niklu. Také lze vytvářet návary např. při renovacích nástrojových ocelí a niklových a kobaltových tvrdokovů. Svařování wolframovou elektrodou se používá i u svařování kovů s vysokou afinitou ke kyslíku jako titan a zirkon. Schéma svařování metodou WIG zobrazuje Obr. 3-3. [7]



Obr. 3-3 – Schéma svařování metodou WIG [7]

Svařování WIG metodou má proti ostatním metodám tavného svařování tyto výhody [7]:

- Inertní plyn zabezpečuje efektivní ochranu svarové lázně a přehřáté oblasti základního materiálu před oxidací
- Inertní plyn zabráňuje propalu prvků a tím i vzniku strusky. Povrch svaru je pak čistý
- Příznivé formování svarové housenky na straně povrchu i kořenové části svaru
- Nevyžaduje použití tavidel
- Elektrický oblouk je vysoce stabilní v širokém rozsahu svařovacích proudů
- Vysoká operativnost při svařování v polohách
- Zabezpečuje svary vysoké celistvosti
- Jednoduchá obsluha a přesná regulace parametrů svařování
- Malá teplotně ovlivněná oblast svarů a minimální deformace
- Svarová lázeň je dobře viditelná a kontrolovatelná

3.5.1. Ochranné plyny

Ochrannými plyny se zabývá norma ČSN EN ISO 14175. Hlavní úlohou ochranných plynů je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování a tím chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí a kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku. Ten způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost a propal prvků. Ochranné plyny mají také významný vliv na typ přenosu kovu v oblouku, přenos tepelné energie do svaru, chování tavné lázně, hloubku závaru, rychlost svařování a další parametry svařování. Inertní plyny skupiny „I“ jako argon, helium nebo

jejich směsi chemicky nereagují se svarovou lázní a propal prvků ve svarovém kovu je minimální. Tyto plyny pak nemají vliv na výsledné chemické složení svarového kovu. Inertní nereagující plyny jsou při svařování metodou WIG použity vždy. [7] [8]

Argon (Ar) je jednoatomový plyn, bezbarvý, bez chuti a zápachu, který je inertní a nevytváří s žádným prvkem chemické sloučeniny. Výroby probíhá destilací zkapalněného vzduchu. Argon je ve vzduchu obsažen z 0,934%. Má malou tepelnou vodivost a relativně malý ionizační potenciál, takže se v něm oblouk dobře zapaluje. Běžná čistota prodáváného argonu je 99,995%, která je dostatečná pro svařování většiny materiálů. U materiálů s vysokou afinitou ke kyslíku jako je titan nebo zirkon je potřeba větší čistota a používá se pak argon 99,998% nebo 99,999%. [4]

Helium (He) je též jednoatomový inertní plyn bez barvy a zápachu. Jeho výroba probíhá separací některých druhů zemního plynu, kde se helium vyskytuje v procentuálním množství okolo 1%. He je velmi lehký plyn a ve vzduchu má snahu stoupat vzhůru, což snižuje efektivitu plynové ochrany. Vyžaduje tedy vyšší průtok plynu. Používaná čistota plynu dosahuje 99,996%. Helium má větší tepelnou vodivost než Ar a podstatně vyšší ionizační potenciál, takže se oblouk zapaluje hůře a je nestabilní při větší délce hoření. Díky vysoké tepelné vodivosti je přenos tepla v oblouku velmi vysoký, a proto se směsi s heliem používají pro svařování materiálů s vysokou tepelnou vodivostí u větších tloušťkách, především u hliníku, mědi a jejich slitin. Použitím helia ve směsi s argonem se zvýší hloubka závaru a rychlost svařování. [4]

Směsi argonu a helia tvoří samostatnou skupinu inertních plynů. Ve směsi jsou spojeny výhodné vlastnosti obou plynů. U metody WIG se nejčastěji používají tyto kombinace:

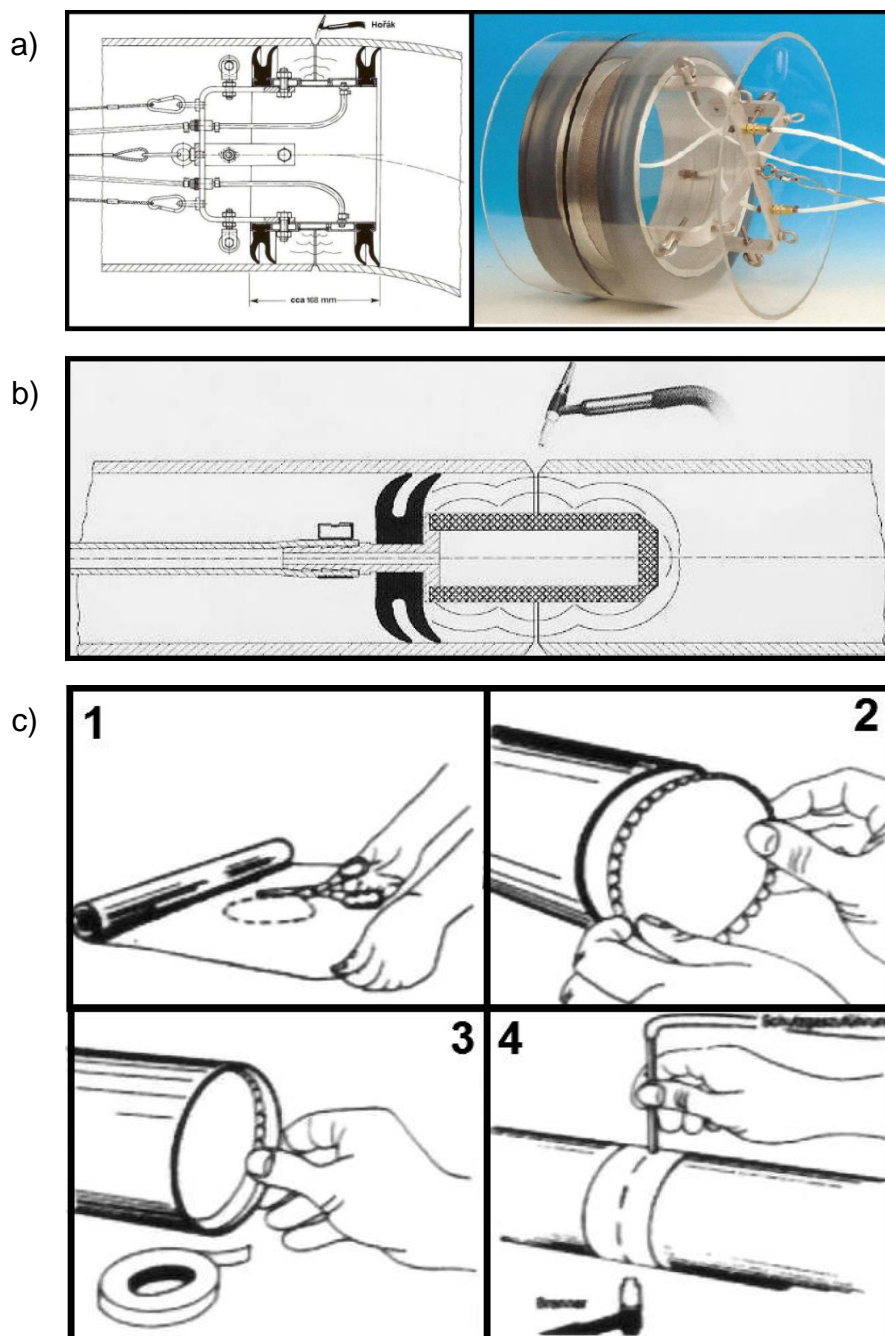
- 70% Ar + 30% He
- 50% Ar + 50% He
- 30% Ar + 70% He

Se stoupajícím obsahem He se zvyšuje tepelná vodivost směsi a tím je lepší přenos tepla v oblouku a roste jeho tepelný výkon. To se pozitivně projevuje na tvaru a rozměrech svaru. S vyšším obsahem He je možno zvyšovat rychlost svařování. [4]

3.5.2. Formovací plyny

Formovací plyny se používají proti oxidaci kořene svaru a vysokovyhřáté oblasti okolního základního materiálu. Používají se plyny inertní, redukční nebo nereagující se svařovaným materiálem. U feritických a martenzitických ocelí se z důvodu nebezpečnosti vzniku trhlin musí používat pouze plyny Ar nebo He, případně jejich směsi. U austenitických vysokolegovaných ocelí a niklových slitin je možné použít formovací plyn Ar s obsahem 2 až 10% vodíku nebo 5 až 20% dusíku, neboť zde nehrozí vznik vodíkových trhlin. Při svařování trubek nebo dutých těles, kdy se ochranný plyn z hořáku špatně dostává dovnitř a nechrání tak dostatečně kořen svaru, se formovacími plyny napouští vnitřní prostor a kořen svaru je pak chráněn i zevnitř. Používá se buď ochranný prstenec (Obr. 3-4 a), který utěsňuje prostor kolem kořene

svaru z obou stran nebo tzv. prst (Obr. 3-4 b), který utěsňuje prostor pouze z jedné strany a ochranný plyn je do prostoru kolem kořene rovnoměrně rozptylován pomocí difuzoru. Zvláštním případem pro svařování potrubí s obtížným přístupem pro instalaci výše zmíněných zařízení pro ochranu kořene je těsnění pomocí vodou rozpustného papíru (Obr. 3-4 c). Po svaření je možno tyto ucpávky rozpustit vodou nebo vodní párou a odstranit je tak z potrubního systému. [4] [9]

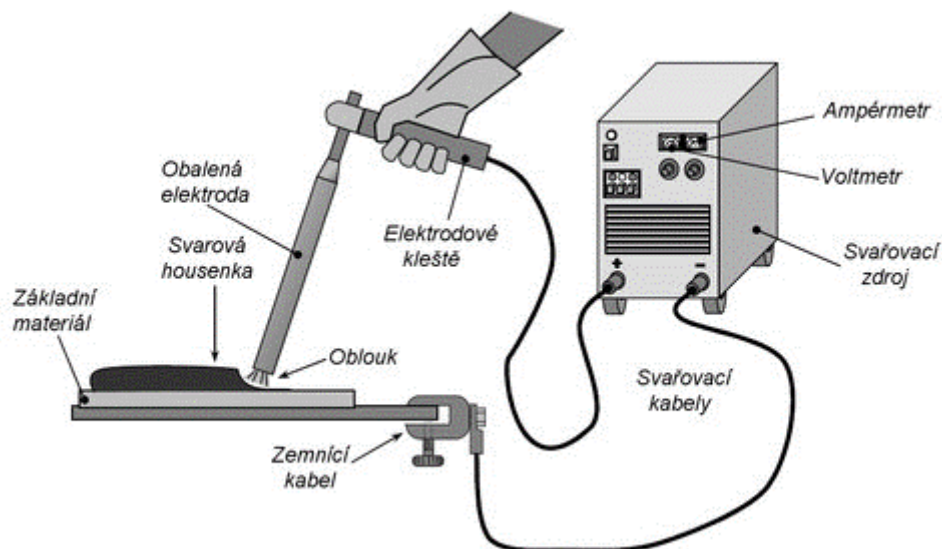


Obr. 3-4 – Způsoby ochrany kořene svarů [9]

3.6. Ruční svařování obalenou elektrodou

Při svařování elektrickým obloukem je zdrojem tepla elektrický oblouk hořící mezi elektrodou a základním materiálem. Elektroda je nejčastěji obalená. Elektrický oblouk využívaný pro svařování obalenou elektrodou lze charakterizovat jako elektrický výboj hořící za normální teploty a normálního tlaku. Metodou ručního svařování obalenou elektrodou (MMA – manual metal arc) lze svařovat téměř všechny

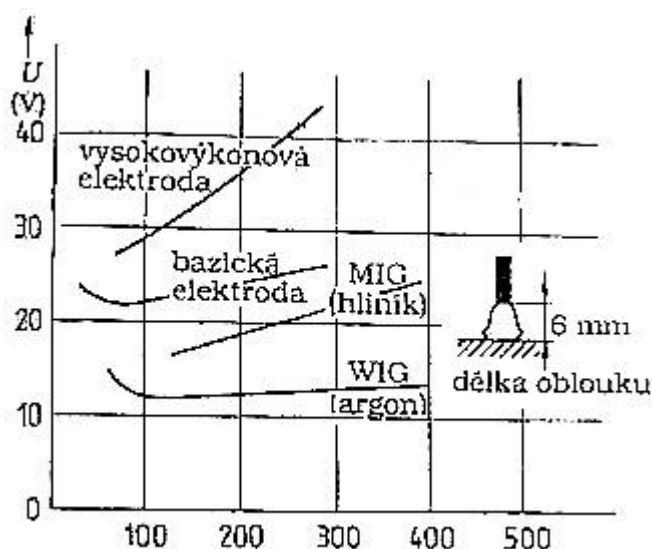
materiály a ve všech polohách. Svařovací proud 10 až 2000A a svařovací napětí se pohybuje v rozmezí 10 až 50V. Teplota elektrického oblouku se pohybuje kolem 5000°C. Schéma metody ukazuje Obr. 3-5. [4]



Obr. 3-5 – Schéma svařování obalenou elektrodou

3.6.1. Charakteristiky oblouku

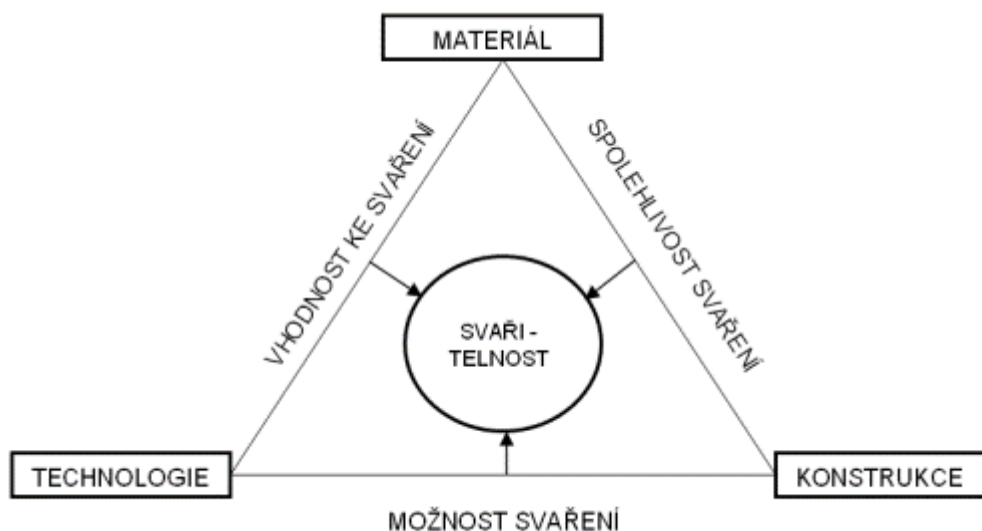
Významným pojmem v teorii elektrického oblouku jsou jeho charakteristiky. Statická charakteristika – neboli voltampérová charakteristika – udává závislost elektrického napětí na oblouku a svařovacího proudu v ustáleném stavu (stejná délka oblouku). Obr. 3-6 zobrazuje statické charakteristiky jednotlivých druhů elektrických oblouků. [4]



Obr. 3-6 – Statické charakteristiky oblouků jednotlivých metod svařování [4]

3.7. Svařitelnost materiálů

Svařitelnost je komplexní charakteristika, která vyjadřuje vhodnost kovu zhotovit svařence požadovaných vlastností při konstrukční spolehlivosti svarového spoje a při určitých technologických možnostech svařování. Pod pojmem svařitelnost rozumíme svařitelnost metalurgickou, konstrukční a technologickou (Obr. 3-7). [10]



Obr. 3-7 – Schéma komplexnosti svařitelnosti [10]

Svařitelnost je možné rozdělit na:

- Materiálovou
- Konstrukční
- Technologickou

Materiálová svařitelnost vyjadřuje vhodnost materiálu ke svařování. Popisuje změny struktury materiálu následkem tepelného zatížení během svařování v místě svaru a jeho nejbližším okolí v tepelně ovlivněné oblasti. Mezi materiálové charakteristiky patří zejména chemické složení materiálu a technologické zpracování dílců, které mají být svařeny. [10] [11]

Technologická svařitelnost popisuje vliv svařovací technologie na výsledné vlastnosti svarového spoje. Vlastnosti svarového spoje jsou ovlivněny těmito faktory:

- Metoda svařování
- Přídavný materiál
- Parametry svařování
- Sled kladení housenek [10] [11]

Konstrukční svařitelnost je vyjádřením uspořádání svařence a umístění svarů. Základní faktory ovlivňující konstrukční svařitelnost jsou:

- Tloušťka materiálu

- Tvar, velikost a uspořádání svarů
- Umístění svarů s ohledem na konstrukční vruby
- Pevnost svarového spoje
- Tvar svarových ploch [10] [11]

3.7.1. Vliv jednotlivých prvků na svařitelnost ocelí

Obsah jednotlivých prvků ovlivňuje mechanické vlastnosti, strukturu a také svařitelnost kovů. Během svařování dochází k lokálnímu natavení a tepelnému ovlivnění kovu. V těchto místech pak probíhají děje v souladu s příslušnými fázovými diagramy. V rámci Evropské unie se svařitelnost určuje podle základní normy ČSN EN 1011-1. [12] [11]

Uhlík – množství uhlíku a dalších doprovodných prvků zásadně ovlivňuje svařitelnost ocelí. Obecně je uváděna mezní hranice svařitelnosti nelegovaných uhlíkových ocelí 0,22 hmotnostních % uhlíku. Pro materiály obsahující mimo uhlíku i další legury byl sestaven vztah jehož výsledkem je takzvaný uhlíkový ekvivalent C_e .

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

Je-li $C_e \leq 0,45\%$ a zároveň platí, že $C \leq 0,2\%$ a svařovaná tloušťka $s \leq 25\text{mm}$, nejsou nutná pro svařování žádná další opatření. Není-li splněna některá z podmínek, je nutné použít opatření k zabezpečení kvality spoje a zamezilo se vzniku trhlin. Nejčastěji se tato problematika řeší předehřevem. [11] [13]

Křemík – v nelegovaných uhlíkových ocelích zvyšuje nepodstatně pevnost. Působí silně desoxidačně, zvyšuje magnetické vlastnosti kovu. Při nedostatku křemíku je ocel neuklidněná a svarová lázeň je pak pórovitá. [12]

Mangan – zvyšuje mez kluzu i pevnosti při zachování plasticity. Nelegované uhlíkové oceli obvykle obsahují až 0,9% manganu. Mangan působí též jako desoxidační činidlo a společně s křemíkem jsou hlavními přísadami uklidněných ocelí. Mangan na sebe váže síru a vytváří sloučeninu MnS, která má vyšší bod tavení než FeS a tak zabraňuje tvorbě segregací. [12]

Fosfor – Zvyšuje mez kluzu a pevnosti a zvyšuje odolnost vůči atmosférické korozi především společně s mědí. Plasticita oceli je fosforem snižována a způsobuje zkřehnutí za studena. Proto se jeho obsah omezuje na max. 0,03%. Zvyšuje segregaci v oblasti teplot 1534-1050°C. [12]

Síra – při svařování působí jako nečistota, protože vytváří nízkotavitelné sulfidy FeS, které segregují po hranicích zrn a snižují jejich soudržnost. Maximální hmotnostní podíl síry je max. 0,03%. [12]

Dusík – zvyšuje mez kluzu, pevnost, tvrdost. Snižuje plasticitu kovu. Hrozí nebezpečí vylučování nitridů na rozhraní svaru a základního materiálu, které může vést při nízkých teplotách k praskání. [12]

Vodík – vodík je v ocelích velmi nežádoucí příměs. Do svaru se dostává ze vzdušné vlhkosti nebo z nedokonale vysušených dílů či elektrod. Způsobuje vodíkovou křehkost, která se projevuje malými vločkovými trhlinkami. K jeho odstranění se používá protivločkové žíhání. [12]

Hliník – silně desoxiduje a denitriduje oceli. Oxidy a nitridy hliníku působí jako krystalizační zárodky při tuhnutí ocelí. Silně uklidněné oceli by měly mít minimálně 0,02% Al. [12]

Měď – dostává se do nelegovaných ocelí použitím šrotu s určitým podílem mědi. Do obsahu 0,26% je tento prvek neškodný. Vyšší procentuální obsah by v ocelích neměl nastávat. [12]

Chrom – karbidotvorný prvek, který se přidává zejména za účelem zvýšení pevnosti a korozivzdornosti [12]

Nikl – nejvýznamnější austenitotvorný prvek, který brání zhrubnutí zrna, zvyšuje prokalitelnost a elektrický odpor. [12]

3.8. Zkoušky a kontroly svarových spojů

Bezpečný a spolehlivý provoz strojních součástí, uzlů i celých zařízení je v úzké souvislosti s komplexem takzvaných užitných vlastností použitých materiálů a jejich svarových spojů. K ověření a deklaraci těchto vlastností, které představují garanci odolnosti vůči vnějším vlivům (zatížení, jeho charakter, okolní prostředí teplota atd.), podobně jako definici vlastního strukturního stavu (struktura, její stabilita, přítomnost defektů atd.), došlo v průběhu rozvoje průmyslové výroby ke standardizaci řady testů zajišťujících přesnost a reprodukovatelnost výsledků za daných podmínek zkoušení. Svarové spoje mohou být zkoušeny nebo kontrolovány několika způsoby. Tyto zkoušky je možné rozdělit na zkoušky destruktivní (kdy je zkušební kus zkouškou porušen a nelze jej nadále používat) a zkoušky nedestruktivní, kdy zůstane zkušební kus bez porušení. [12] [14]

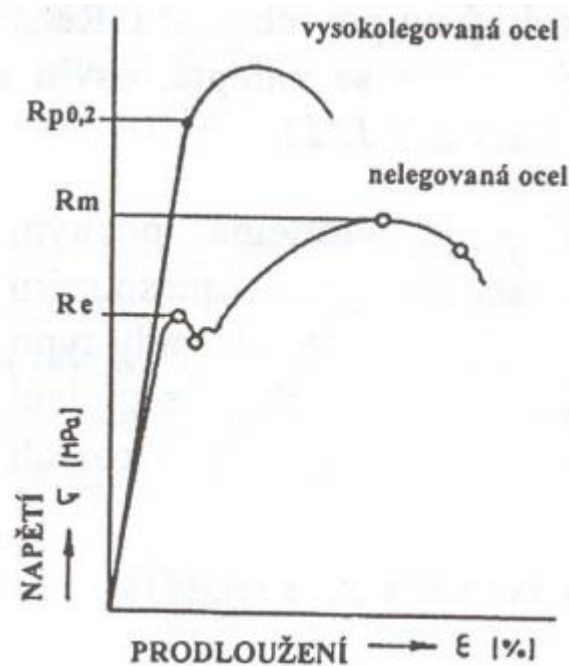
3.8.1. Destruktivní zkoušky

Mezi destruktivní zkoušky se řadí následující:

- Zkouška tahem,
- Zkouška vrubové houževnatosti (zkouška rázem v ohybu),
- Ohybová zkouška (zkouška lámavosti),
- Zkoušky tvrdosti,
- Makroskopická kontrola svaru,
- Zkouška rozlomením,
- Zkoušky únavové pevnosti,
- Speciální zkoušky. [12] [14] [15]

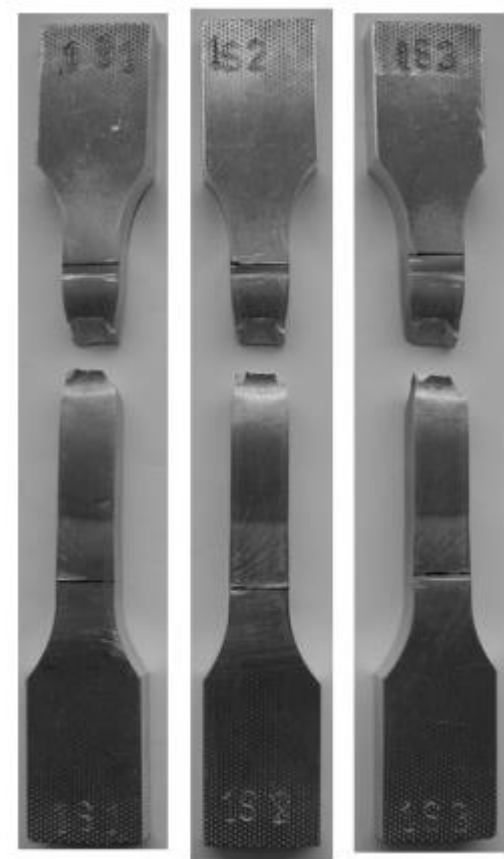
3.8.1.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem představuje základní zkoušku používanou k ověření pevnostních a plastických charakteristik. Její princip spočívá v použití normalizované tyče kruhového průřezu, v případě zkoušky plechu ploché tyče, která je opatřena hlavou pro uchycení ve zkušební trhacím stroji. Ve zkušební stroji dochází za definovaných podmínek (teplota, rychlost deformace) k natahování zkušební tyče až do okamžiku jejího porušení. Záznam zatížení versus prodloužení (odpovídá diagramu napětí - deformace) představuje tzv. klasický tahový diagram (Obr. 3-8). [12] [14] [15] [16]



Obr. 3-8 – Příklad klasického tahového diagramu tahové zkoušky [16]

Pro zkoušky svarových spojů se tahová zkouška nazývá příčnou zkouškou tahem. Podstata zkoušky je stejná jako u zkoušky tahem, avšak zkušební tyč je odebrána napříč svarovým spojem (Obr. 3-9). Tahovou zkouškou se zjišťuje mez kluzu R_e [MPa], mez pevnosti R_m [MPa], tažnost A [%] a kontrakce Z [%]. [15] [16]



Obr. 3-9 – Zkušební vzorky pro příčnou zkoušku tahem svarových spojů [16]

3.8.1.2 Zkouška rázem v ohybu

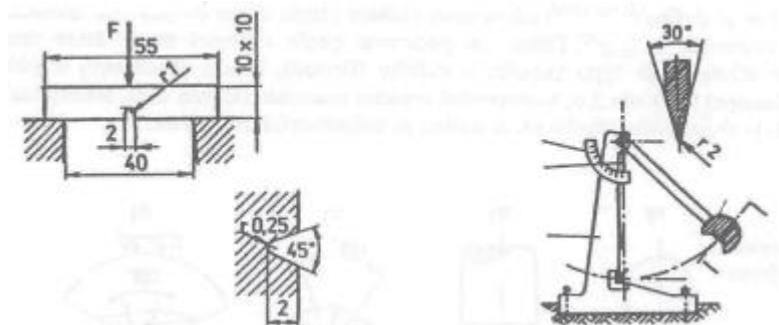
Zkouška rázem v ohybu, též nazývaná zkouška vrubové houževnatosti, představuje významné doplnění vlastností získaných tahovou zkouškou. Jedná se o zkoušku simulující schopnost testovaného materiálu odolávat křehkému porušení. Zkouška se provádí na normovaném tělísku o rozměrech $10 \times 10 \times 55$ mm, které má v příčném směru vyroben vrub modelující apriorní trhlinu v materiálu. Zkouška spočívá v přeražení zkušební tyče jedním rázem kyvadlového kladiva, přičemž je podepřena na obou koncích. U kořene vrubu je při vlastním rázovém zatížení vyvolána trojosá tahová napjatost představující nejméně příznivé napětové poměry. Standardně se používají tři typy definovaných rozměrů vrubů s následujícím značením hodnot vrubové houževnatosti:

KCU3	3mm – U – vrub,
KCU2	2mm – U – vrub,
KCV	2mm – V – vrub,

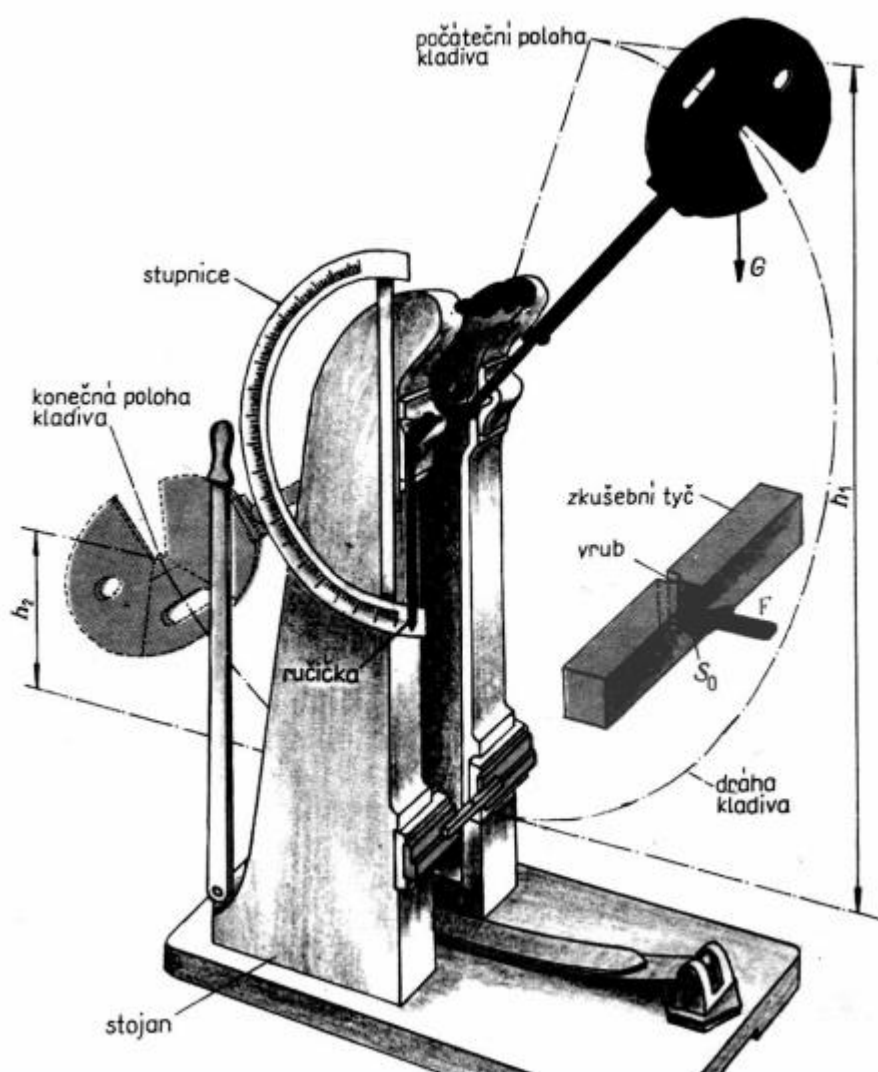
Kde číselný údaj představuje hloubku vrubu. [12] [15]

Pomocí rázové zkoušky (obr. 3-10) lze stanovit teplotu křehkosti (přechodovou teplotu) a vrubovou houževnatost. Standardně se používá vrub KCV 2mm. Zkouška se provádí na Charpyho kladivu (obr. 3-11). Podle výkyvu kladiva po přeražení vzorku

se stanovuje hodnota spotřebované práce, ze které lze spočítat vrubovou houževnatost. [14]



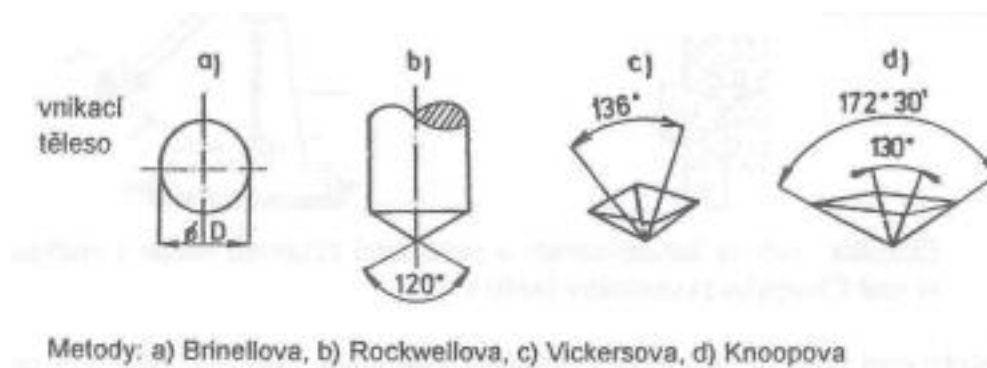
Obr. 3-10 – Schéma zkoušky rázem v ohybu [14]



Obr. 3-11 – Schématické znázornění Charpyho kladiva a průběhu zkoušky rázem v ohybu [16]

3.8.1.3 Zkoušky tvrdosti

Zkoušky tvrdosti patří k základním zkouškám mechanických vlastností. Jejich principem je registrace odporu materiálu vůči statickému nebo dynamickému vniku cizího tělesa – indentoru. Pro zkoušky svarových spojů jsou používány nejčastěji zkoušky statické. Tvrdost je definována jako odpor materiálu vůči vniku cizího tělesa do zkoušeného povrchu – v tomto případě svarového spoje. Tvrdost lze posuzovat podle velikosti stopy, která vznikla vtlačováním tělesa (Obr. 3-12) podle typu zkoušky – kuličky (Brinell), kužele nebo kuličky (Rockwell) nebo jehlanu (Vickers, Knoop), z dostatečně tvrdého materiálu (kalená ocel, slinutý karbid, diamant) do zkoušeného vzorku určitou silou za definovaných podmínek. Zkoušením tvrdosti svarů kovových materiálů se zabývá norma ČSN EN ISO 9015. [12] [14]



Obr. 3-12 – Identory jednotlivých metod měření tvrdosti [14]

Vickers HV – Do hladkého povrchu zkoušeného vzorku se vtlačuje diamantový čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem 136° silou F , čímž vznikne vtisk s úhlopříčkami. Podle normy ČSN EN 1043-1 je pro měření tvrdosti svarových spojů podle Viskerse HV10 a HV5. Povolená tvrdost ve svarovém spoji se pohybuje od 300 do 450 HV10 podle typu svarového spoje a jeho tepelného zpracování. Mikrotvrdost je měřena podle Hannemanna (HVM), rovněž na principu Vickersovy zkoušky s tím, že je jehlan umístěn přímo v optice mikroskopu. [14] [16]

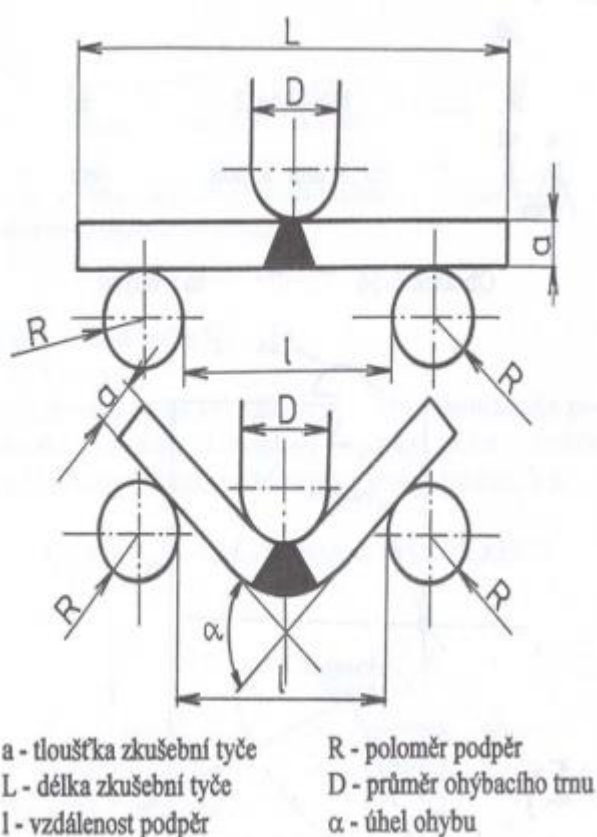
Brinell HB – Do zkoušeného materiálu se vtlačuje ocelová kulička silou T , po odlehčení se měří průměr vtisku. Kritériem tvrdosti je opticky určená plocha vtisku (ČSN ISO 6506). [14] [16]

Rockwell HRC; HRB – Používá se ve dvou variantách, a to pro materiály o vysoké tvrdosti s použitím diamantového kužele o vrcholovém úhlu 120° (HRC) nebo kalené kuličky o průměru 1/16 palce (HRB) v případě měkčích materiálů. V obou případech je kritériem tvrdosti hloubka průniku použitého indentoru (ČSN ISO 1024). [12] [14]

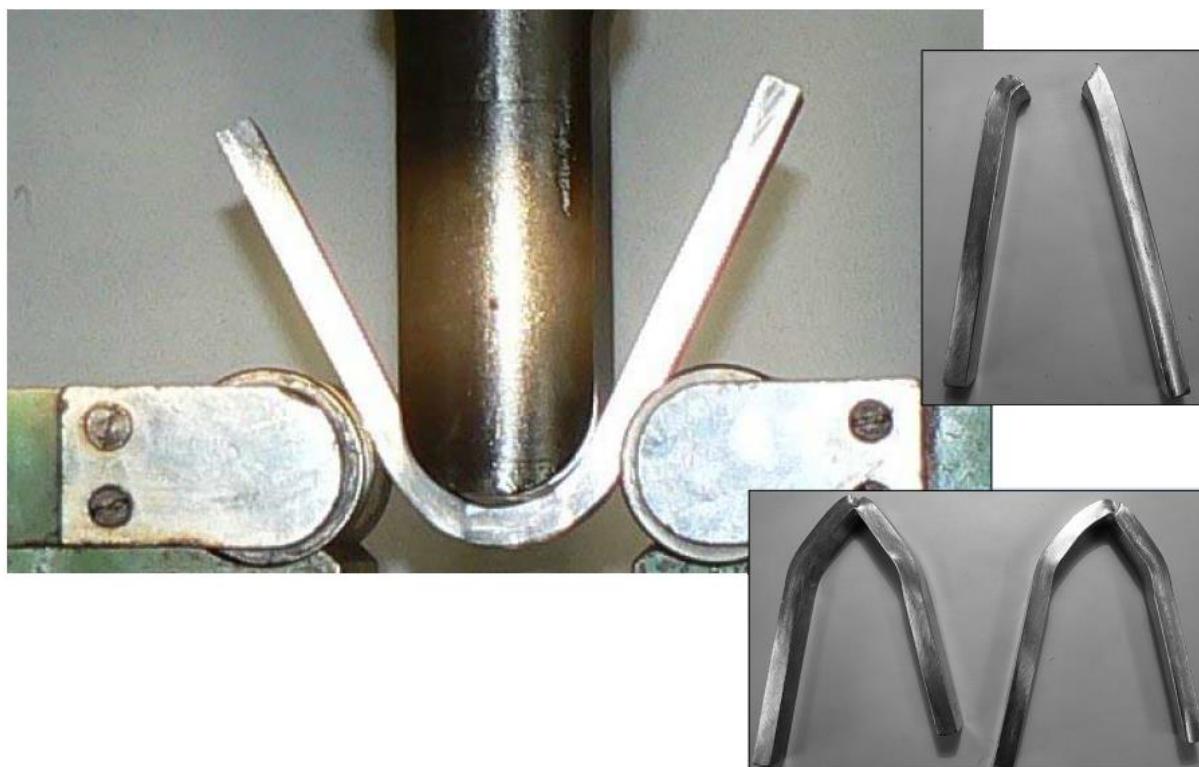
3.8.1.4 Zkouška lámavosti

Zkouška lámavosti nebo také ohybová zkouška je popsána normou ČSN EN ISO 5173. Používá se zejména pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů za studena. Jejím principem je ohnutí ploché tyče o tloušťce zkušební svaru t_{max} do 30mm okolo trnu do předepsaného úhlu ohybu (Obr. 3-13,

Obr. 3-14). Průměr trnu je předepsán podle tloušťky a pevnosti zkoušeného materiálu. Běžně používané průměry trnů jsou 2 až 4 t, kritériem odolnosti při zkoušce lámavosti je dosažení předepsaného úhlu ohybu bez vzniku trhlin, nebo vznik první trhliny na tažené straně tyče s registrací dosaženého úhlu. Zkoušejí se dvě tělesa zatěžováním se strany kořene a dvě tělesa se strany líce svaru. Za plně vyhovující je považováno dosažení úhlu 180° , tj. jejich rovnoběžnost při neporušení celistvosti materiálu, nebo vzniku trhlin. Je pochopitelné, že přísnost uvedené zkoušky bude u tupých svarových spojů silně závislá na orientaci a tvaru svarového spoje vzhledem k tažené straně (kořenová oblast, horní část svarového spoje atd.). Za nejméně příznivou je považována orientace tzv. „otevírání svaru“ podél kořenové vrstvy. [12] [14] [15] [16] [17]



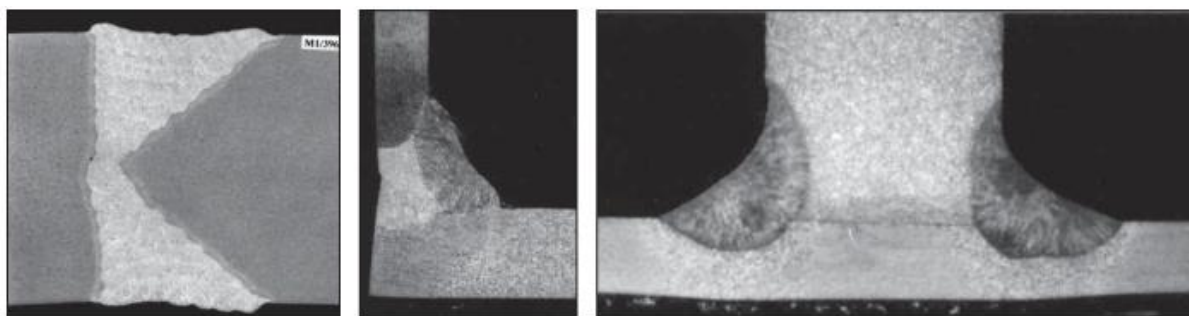
Obr. 3-13 – Schéma zkoušky lámavosti [16]



Obr. 3-14 – Snímek průběhu zkoušky lámavosti a vzorků po zkoušce. [16]

3.8.1.5 Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů

Účelem makroskopické kontroly je stanovení makroskopického charakteru svarového spoje, obvykle prohlídkou příčného řezu zkoušeného vzorku. Kontrola se obvykle provádí na vzorcích orientovaných příčně k ose svaru (příčný řez), které zahrnují svarový kov a tepelně ovlivněnou oblast v okolí svaru (Obr. 3-15). Účelem makroskopické zkoušky je stanovení stupně jakosti svarových spojů podle ČSN EN ISO 5817. [15] [18]



Obr. 3-15 – Příklady makrostruktury svarových spojů. [15]

Mikroskopická kontrola se provádí na naleptaných vzorcích pozorováním v mikroskopu. Zvětšení se obvykle pohybuje od 50x až do 1000x. Tímto způsobem lze pozorovat jednotlivá zrna materiálu, hranice, zrn, strukturní složky materiálu svaru a teplotně ovlivněné oblasti. Makroskopickou a mikroskopickou kontrolou svarů se zabývá norma ČSN EN ISO 17639. [16] [18]

3.8.2. Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky představují důležitý článek při zajišťování jakosti ve všech etapách výroby a provozní spolehlivosti. Význam nedestruktivní kontroly spočívá v zajištění kvality výrobku, jeho technické způsobilosti a funkční bezpečnosti. Kvalifikaci vad obecně se vyskytujících ve svarových spojích při tavném svařování uvádí norma ČSN ISO 6520-1 a dále pak norma ČSN EN ISO 5817, kde jsou uvedeny tolerované velikosti vad v souladu s předepsaným stupněm jakosti. Přípustnost vad ve svarech je obecně stanovena druhem, velikostí a četností vyskytujících se vad v závislosti na typu svaru a způsobu namáhání. Stanovuje ji konstruktér na základě předpokládaného provozního namáhání. Pracovník nedestruktivní kontroly potom pomocí příslušných kontrolních metod ověřuje, zda svar stanoveným kritériím vyhovuje. Pracovník provádějící nedestruktivní kontrolu musí mít příslušnou kvalifikaci (podle ČSN EN ISO 9712). [14]

Základní nedestruktivní metody používané pro kontrolu jakosti svarů dělíme podle toho, zda jsou identifikovány vady na povrchu nebo uvnitř materiálu. Ke zjišťování povrchových vad se používají metody:

- Vizuelní (VT),
- Kapilární (penetrační), (PT),
- Magnetická prášková,

Ke zjišťování vnitřních vad se používají zkoušky:

- Ultrazvukem,
- Prozařovací. [14]

3.8.1.6 Vizuelní kontrola (VT)

Vizuelní kontrola (VT – visual testing) slouží k posouzení kvality svaru, jakož i zručnosti svářeče. Povrchovou prohlídkou volným okem nebo pomocí lupy, případně dalších kontrolních pomůcek, zjistíme rozhodující povrchové a kořenové vady, jako jsou například neprovařený kořen svaru, vady v napojení, krápníky, zápaly, nadměrné převýšení nebo neúhledná a nerovnoměrná kresba svaru s nepravidelným povrchem. Kontrola prováděná pouhým okem nebo pomocí jednoduchých optických pomůcek (lupy se zvětšením 3 až 6x) se nazývá přímou, kontrola prováděná pomocí optických přístrojů (endoskopy) se nazývá nepřímou. Vizuelní kontrola se řídí normou ČSN EN ISO 17637. Vizuelní zkouška je jediná metoda, u které jsou hodnoceny přímo samotné vady, u všech ostatních zkoušek jsou posuzovány pouze indikace, které ukazují na výskyt možných vad. Závěry a výsledky této zkoušky jsou velmi důležité a mají vždy předcházet všem ostatním kontrolám. V případech dílčí pochybnosti může být vizuelní zkouška účelně doplněna magnetickou nebo kapilární zkouškou. [14] [15] [16]

3.8.1.7 Kapilární zkouška (PT)

Kapilární nebo také penetrační zkouška (PT – penetration testing) umožňuje s poměrně vysokou citlivostí zjišťovat povrchové vady, které však musí souviset (komunikovat) s povrchem. To znamená, že musí výt na povrchu otevřené, aby se do nich mohla vniknout detekční kapalina. Penetrační zkouška využívá kapilárních jevů, především smáčivost a vzlínavost. Podstatou penetračních metod je použití vhodné kapilárně aktivní kapaliny, která pronikne do nečelivostí a po nanesení vývojky se pomocí kapilárních jevů vady zviditelní na povrchu. Kapilární zkoušky se používají pro hodnocení trhlin, studených spojů, zápalů, pórů nebo při hodnocení těsnosti. Zkoušením svarů kapilární metodou se zabývá norma ČSN EN ISO 23277. Podle použitých detekčních prostředků rozeznáváme 3 druhy zkoušek:

- Metoda barevné indikace (Obr. 3-16) – přítomnost vady se projeví vznikem kontrastní barevné indikace. Hodnocení se provádí na denním světle,
- Metoda fluorescenční (Obr. 3-17) – vada se projeví světélkující indikací při ultrafialovém (tzv. černém) světle,
- Metoda dvouúčelová – použitý penetrant (indikační tekutina) obsahuje fluorescenční látku, které je zároveň barvivem, takže metoda může být jak barevná, tak i fluorescenční. [14] [16]



Barevná indikace
povrchové vady

Obr. 3-16 - Barevná indikace povrchové vady [16]



Fluorescenční indikace
povrchové vady

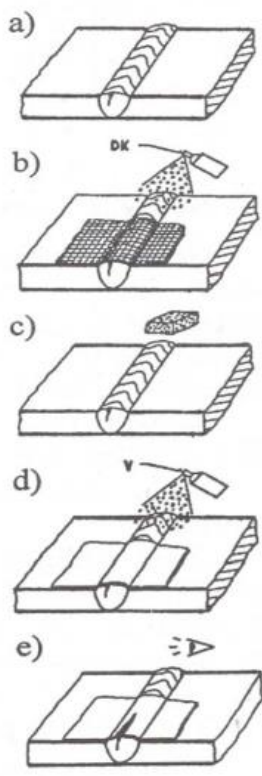
Obr. 3-17 – Fluorescenční indikace povrchové vady [16]

K provádění zkoušek se používají tyto penetrační prostředky:

- Penetranty – detekční kapaliny (barevné, fluorescenční, dvouúčelové),

- Vývojky – činidla sloužící k vyvolání indikace, Základem je bílý prášek (např. oxid zinečnatý) nejčastěji suspendovaný v těkavém rozpouštědle (acetón). Napomáhá jednak vzlínání detekční kapaliny z vady a zajišťuje lepší viditelnost vady,
- Odmašťovače a čističe – odmašťovače slouží k odstranění mastnoty z povrchu před nanášením penetrantu a dosažení dobré smáčivosti, čističe slouží k odstranění přebytečného penetrantu z povrchu. Používají se převážně organická rozpouštědla jako benzín a acetón. [14]

Samotný postup zkoušky je následující (Obr. 3-18):

<p>a) <u>Příprava povrchu</u> Mechanické očištění, odmaštění, osušení</p> <p>b) <u>Nanesení penetrantu</u> Nátěrem, nástřikem nebo ponorem Doba působení penetrantu minimálně 10 až 30 minut</p> <p>c) <u>Odstranění přebytku penetrantu</u> Oplach mírnou sprchou vody, otření vlhkou houbou Nesmí dojít k vymytí penetrantu z vady Nedostatečné odstranění penetrantu zase může způsobovat indikaci nepravých vad</p> <p>d) <u>Vyvolání indikace</u> Provádí se osušením a nanesením vývojky, buď suché (naprašováním) nebo mokré (natíráním, nástřikem)</p> <p>e) <u>Vyhodnocení indikace</u> Provádí se vizuálně ihned po nanesení vývojky. [16]</p>	 <p>Obr. 3-18 – Postup kapilární zkoušky [16]</p>
--	---

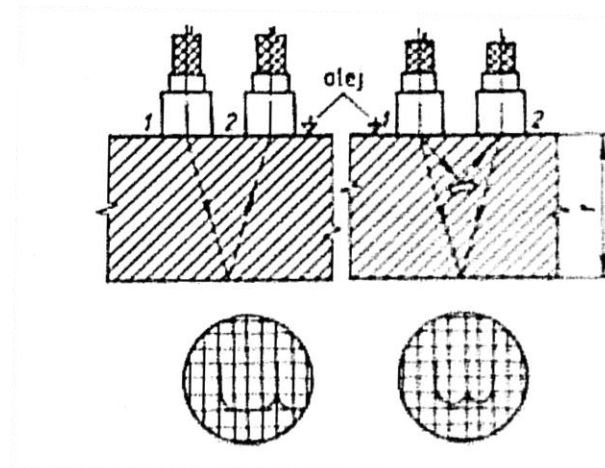
Obr. 3-19 – Postup zkoušení svarů kapilární metodou

3.8.1.8 Zkouška ultrazvukem

Zkouška ultrazvukem je velmi přesná metoda pro určování vnitřních vad ve svařencích. Zkoušení materiálů ultrazvukem je založeno na principu šíření akustického vlnění zkoušeným předmětem, jeho reakci na změny ve zkoušeném předmětu a následnou registraci. Máme-li ve zkoušeném díle vady, vznikají prostředí s rozdílnými

akustickými vlastnostmi a na jejich rozhraní pak dochází k interakci (odraz, částečné pohlcení) ultrazvukového vlnění. Tyto změny se následně zobrazují na obrazovce. Při zkoušce ultrazvukem používáme buď metodu průchodovou, kdy základem metody je měření hodnoty ultrazvukové energie, která projde zkušebním předmětem. Používají se dvě sondy umístěné souose na protilehlých površích, z nichž jedna pracuje jako vysílač a druhá jako přijímač. Vhodné pro zkoušení výrobků menších tloušťek s rovnoběžnými povrchy přístupnými z obou stran. Další možností je použití metody odrazové impulzové, která je nejrozšířenější. Princip metody spočívá ve vysílání krátkého ultrazvukového impulsu, který se odráží od všech rozhraní (vad i povrchů), vrací se zpět do sondy a časový průběh je zobrazován na obrazovce. Výhodou této metody je možnost vysílat a přijímat jednou sondou a lze tedy kontrolovat výrobky přístupné z jedné strany. Zkoušení svarů ultrazvukem, stupně přípustnosti a posuzování charakteru indikací upravují normy ČSN EN ISO 1760, ČSN EN ISO 11666 a ČSN EN ISO 23279. [14] [19]

Zdroje ultrazvukových impulsů jsou ultrazvukové zkušební sondy, jejichž základním prvkem je elektroakustický měnič. Tyto měniče mění elektrický signál na mechanický a nejčastěji se používají měniče piezoelektrické. Podle druhu vln, které sonda vysílá a přijímá, se dělí sondy na přímé a úhlové (Obr. 3-20). Jako indikátoru se používá obrazovka, na jejímž stínítku se zobrazují vysílané a přijímané impulzy. V okamžiku vysílání se na obrazovce zobrazí vysílací impuls neboli počáteční echo a koncové echo. Mezi nimi jsou pak případné echa signalizující vady. Vzdálenost mezi počátečním a koncovým echem je přímo úměrná tloušťce základního materiálu. Ultrazvukovou metodou lze poměrně dobře zjišťovat vnitřní prostorové vady a velmi dobře vady plošné, kolmé k ose ultrazvukového svazku. Ultrazvukem nemůžeme zjišťovat jednotlivé druhy vad a od sebe je rozlišovat (např. trhliny od studených spojů nebo neprůvarů). Vzhledem k charakteru metody je použitelná také k měření tloušťek nebo respektive k měření úbytků tloušťek například u potrubí namáhaného na erozi nebo korozi. [14]



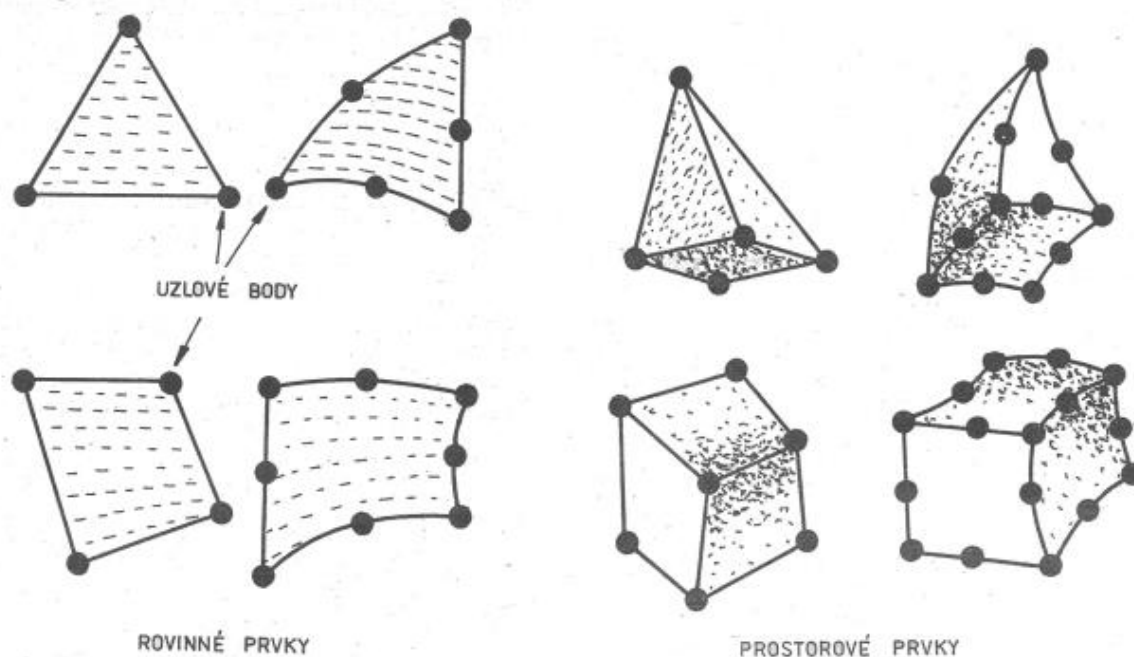
Obr. 3-20 – Schéma zkoušení úhlovými sondami a zobrazení echa vady (vpravo dole) [19]

4. Numerické simulace procesů svařování

Svařování je zvláštní výrobní proces, jehož výsledek nemůže být vždy ověřen zkoušením až po jeho ukončení. Jakost provedeného svaru musí být proto zajišťována během jeho výroby, tedy nikoliv jen kontrolami a zkouškami hotového výrobku, ale vhodným řízením svařovacího procesu a zejména jeho monitorováním vhodnými nástroji. V poslední době se velmi zrychlil vývoj simulačních programů na bázi metody konečných prvků pro analýzy technologických procesů, mezi něž patří i svařování. Tyto procesy lze s částečnou pomocí experimentů velmi efektivně a velice věrně numericky simulovat současnou výpočetní technikou, což může přinést značné časové i finanční úspory při vývoji svařovaných konstrukcí. [20] [21]

4.1. Metoda konečných prvků

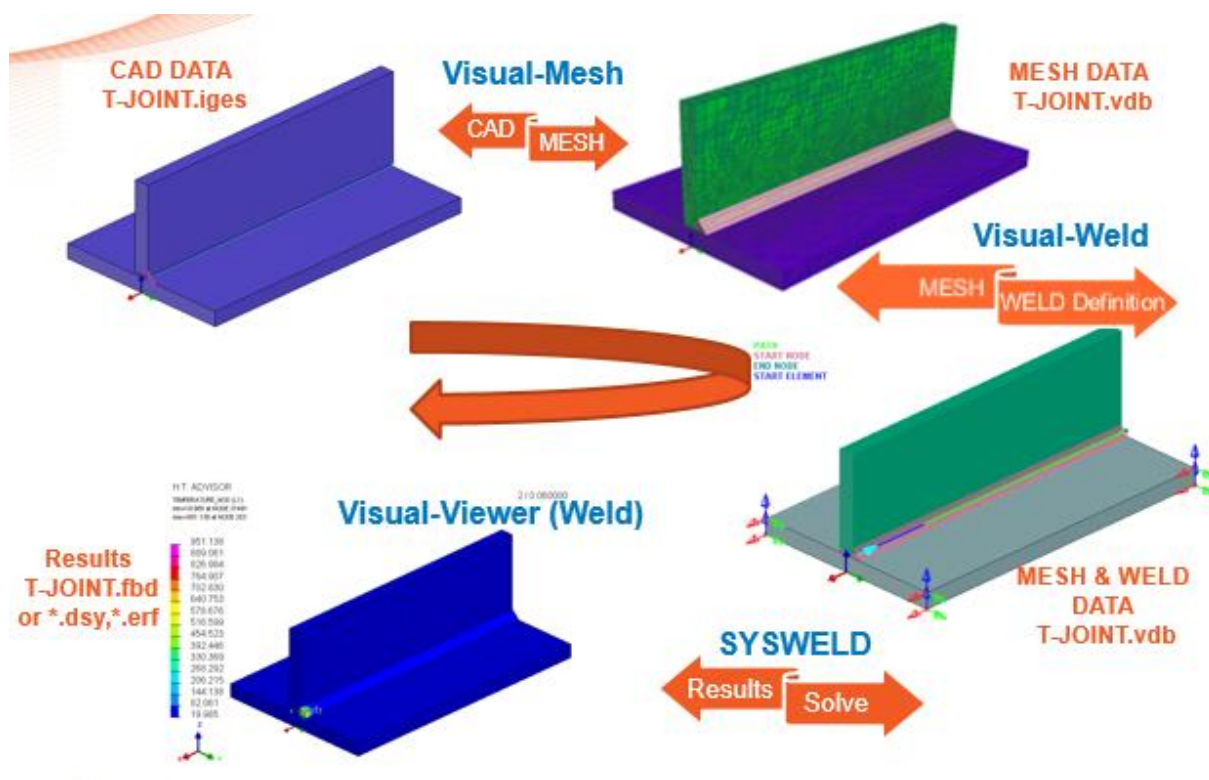
Při řešení numerických simulací svařovacích procesů je nejrozšířenější metodou metoda konečných prvků (ve zkratce MKP). Metoda konečných prvků se velmi dobře hodí k výpočtům zbytkových napětí a nestacionárních teplotních polí během svařovacích procesů. Výpočet svařovacího procesu je možno rozdělit do dvou kroků. V prvním kroku je determinována teplota a vývoj jednotlivých fází jako funkce času. V kroku druhém jsou pro mechanický výpočet použity výsledky z prvního kroku, čímž se získají výsledky deformací a napětí v materiálu. Principem MKP je rozdělení tělesa nebo soustavy těles na konečné množství jednoduchých elementů – prvků (Obr. 4-1). Pokud je počítána dvourozměrná úloha, dělení se provádí na trojúhelníky a čtyřúhelníky. U trojrozměrné úlohy se těleso dělí na čtyřstěny, krychle atd. Prvky jsou spojeny konečným počtem uzlů a každému prvku je přiřazena soustava aproximačních funkcí s konstantními parametry. Na společné hranici prvků musí být splněna spojitost funkcí. Nutnou podmínkou při dělení tělesa na jednotlivé prvky je, že spojitě těleso musí spojitelným tělesem i po dělení. Geometrické prvky se nesmí navzájem překrývat. Vychází se z jednoduchých prvků proto, aby se dosáhlo jednoduchého matematického popisu (polynomy nízkých stupňů) jednotlivých hran prvků. Při dělení je snaha, aby se vyskytující se typy prvků byly minimální a aby se prvky co nejvíce blížily pravoúhlým tělesům. Dodržením těchto zásad je podstatně snižuje výpočtová složitost simulace a tím i časová náročnost výpočtu. Každému z uzlových bodů jsou stanoveny materiálové a mechanické vlastnosti (a jejich změny v závislosti na teplotě). V každém uzlu je prováděn výpočet různých druhů hodnot (napětí, deformace, teplota, strukturální změny atd.). [22] [23] [24]



Obr. 4-1 – Prvky používané při výpočtu metodou konečných prvků v rovině a prostoru

4.2. Simulační program Visual-Environment

Visual-Environment je skupina programů od společnosti ESI GROUP, která v sobě obsahuje množství dílčích programů pro širokou paletu simulací v různých průmyslových odvětvích. Simulací svařovacích procesů se zabývají programy Visual-Mesh, Visual-Weld a Visual-Viewer. Tato trojice programů umožňuje svařovacímu inženýrovi vykonávat většinu činností spojených s návrhem, simulací a vyhodnocením svařovacího procesu. Programy jsou kompatibilní s běžnými CAD formáty a je tedy možné celý proces simulace provádět s jedním modelovým souborem bez nutnosti vytvářet pro simulaci vždy nový model. Program Visual-Mesh (který je v celém procesu návrhu simulace na začátku) však umožňuje v případech, kdy není CAD model k dispozici, efektivně vytvořit model vlastní přímo v programu. V programu Visual-Mesh se následně na modelu vytvoří síť (mesh), která rozdělí model na konečný počet prvků nutných pro výpočet metodou MKP. Následuje program Visual-Weld, pomocí kterého se definuje metoda a parametry svařování, okolní prostředí, předeřev, sled svařování jednotlivých svarových housenek a okrajové a počáteční podmínky. Následně je možno spustit samotnou simulaci. Výstupní data simulace zpracovává program Visual-Viewer, který umožňuje graficky znázornit požadované výsledky jako teplotní pole, zbytková napětí, deformace, tvrdost nebo strukturní složení. Celý proces návrhu, provedení a hodnocení simulací je znázorněn na obr. 4-2. [25]



Obr. 4-2 – Schéma postupu vypracování numerické simulace svařování pomocí programů Visual-Mesh, Visual-Weld a Visual-Viewer z programové skupiny Visual-Environment společnosti ESI GROUP [25]

5. Svaření a experimentální vyhodnocení svarových spojů

V rámci experimentálního programu diplomové práce byly svařeny zkušební spoje pod dohledem svařovacího technologa TS Plzeň a.s., na kterých byly následně vyhodnocovány požadované zkoušky pro vypracování WPQR (welding procedure quality report). Zkoušky musí provádět certifikovaná zkušebna, jinak by nebylo možné vypracovat konečnou WPS (welding procedure specification). Výsledky zkoušek jsou tedy převzaty z WPQR, některé byly pro potřeby diplomové práce vypracovány znovu nebo detailněji (jedná se o makrostrukturní a mikrostrukturní pozorování svarového spoje a o průběh tvrdosti).

5.1. Svaření zkušebních svarových spojů

Po konzultaci s technologem z TS Plzeň a příslušnými normami pro navrhování technologie svařování byl navržen předběžný postup svařování (pWPS – preliminary welding procedure specification), podle něhož byly svařeny zkušební kusy (Obr. 5-1). Trubka o průměru 30mm byla svařena technologií TIG (141), trubka s průměrem 133mm ručním svařováním obalenou elektrodou (111). Na zkušebních kusech byly následně provedeny příslušné zkoušky (WPQR) a na základě WPQR každého typu spoje byly vypracovány konečné WPS.



Obr. 5-1 – Zkušební kus (trubka průměr 30mm)

5.2. Použitá zařízení

Ke svaření zkušebních kusů byly použity svařovací zdroje KEMPPI PSS 3500 (141) a WTU 315.3 od výrobce MEZ Broumov (111). Svaření obou trubek ulehčilo použití univerzálních svařovacích přípravků – svařovacích podpěr u trubky $\varnothing 30\text{mm}$ a polohovadel u trubky $\varnothing 133\text{mm}$. Díky těmto přípravkům mohly být svary zhotoveny ve svařovací poloze PA (dle normy ČSN EN ISO 6947).

5.2.1. Svařovací zdroje

Pro svařování metodou TIG byl použit svařovací zdroj KEMPPI PSS 3500 s TIG jednotkou TU20 (Obr. 5-2). Parametry zařízení zobrazuje Tab. 5-1. Tab. 5-2 ukazuje parametry zdroje WTU 315.3 použitého pro svařování obalenou elektrodou.

PSS 3500		
Rozsah proudu	DC	10-350 A
	AC	15-330 A
Zatížitelnost	60%	350/34 A/V
	80%	330/33,2 A/V
	100%	270/31 A/V
Připojovací napětí		380-415 V třífázové 50-60 Hz
Kapacita připojení		18 kVA
Metody svařování		TIG, MIG/MAG, E
Typy zapojení		DC+, DC-, AC
TU 20		
Připojovací napětí		30 V 50-60 Hz
Kapacita připojení		35 VA
Zatížitelnost při 60%		300 A

Tab. 5-1 – Parametry svařovacího zdroje KEMPPI PSS 3500 a TIG jednotky TU 20

WTU 315.3		
Střídavý	při 100%	250 A
	při 60%	315 A
Stejnoseměrný	při 100%	250 A
	při 60%	315 A
Připojovací napětí		380V třífázové 50-60 Hz
Jištění		32 A

Tab. 5-2 – Parametry svařovacího zdroje WTU 315.3



Obr. 5-2 – Svařovací zdroje KEMPPi PSS 3500 (vlevo) a WTU 315.3 MEZ Broumov (vpravo)

5.2.2. Svařovací přípravky

Oba typy potrubí byly svařeny v poloze PA za pomoci svařovacích přípravků. Po ustavení a sestehování obou kusů byly zkušební kusy symetricky podepřeny podpěrami tak, že místo svaru bylo uprostřed mezi nimi. U trubky \varnothing 30mm byly ke svaření použity jednoduché univerzální svařovací podpěry (Obr. 5-3), po nichž byla trubka během svařování svářečem odvalována za současného vodorovného pohybu svařovacího hořáku ve směru odvalování. Tím byla zaručena svařovací poloha PA a zároveň nejjednodušší postup svařování. U větší trubky \varnothing 133 mm bylo potřeba z důvodu její poměrně vysoké hmotnosti a tím složitější manipulaci použít svařovacího polohovadla s vodorovnou osou otáčení (Obr. 5-4). Tento přípravek je přímo určen ke svařování rotačních těles. Skládá se ze dvou kotoučů, po kterých se rotační součást odvaluje. Přípravky je potřeba mít dva a umístit je rovnoběžně vedle sebe (tak, aby osy protilehlých kotoučů byly shodné) a součást podepřít. Jeden pár kotoučů je hnací a druhý hnaný. Otáčení je uskutečněno pomocí elektromotoru s možností regulace otáček přesně podle potřeb svařování. Pohyb tak koná svařovaný kus, zatímco svářeč drží hořák téměř na místě (nepočítaje rozkyv).



Obr. 5-3 – Univerzální svařovací podpěry



Obr. 5-4 – Svařovací polohovadlo pro svařování trubek

5.3. Přídavný materiál

Pro získání kvalitního svarového spoje je potřeba zvolit odpovídající přídavný materiál. Volba přídavného materiálu není však závislá jen na použitých základních materiálech, technologii svařování a požadavcích na svarový spoj, ale důležitou roli hraje též cena nebo dostupnost. Po konzultaci s technologem byly vybrány přídavné materiály od společnosti ESAB jak pro svařování obalenou elektrodou, tak i pro metodu TIG.

5.3.1. Přídavný materiál GI 133

Pro svařování menší trubky metodou TIG byl vybrán přídavný materiál ESAB GI 133. Tento materiál je vhodný pro svařování ocelí střední pevnosti a součástí pracujících do teploty 425°C. Použití v ochranném plynu Ar. Polarita zapojení DC(-). Chemické složení čistého svarového kovu a jeho mechanické vlastnosti zobrazují Tab. 5-3 a Tab. 5-4. [26]

C	Si	Mn
0,08%	0,6%	1,1%

Tab. 5-3 – Chemické složení přídavného materiálu ESAB GI 113 [26]

R _m	R _e	A5	K _v (+20°C)	K _v (-40°C)	K _v (-50°C)
500 MPa	430 MPa	30 %	160 J	100 J	80 J

Tab. 5-4 – Mechanické vlastnosti přídavného materiálu ESAB GI 113 [26]

5.3.2. Přídavný materiál OK 48.00

Pro větší trubku svařovanou metodou ručního svařování obalenou elektrodou byl vybrán přídavný materiál ESAB OK 48.00. Jedná se bazickou elektrodu všeobecného použití s nízkonavlhavým obalem pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, zejména se hodí pro svařování ocelí P235/S235 až P420/S420. Svarový kov je houževnatý a odolný proti praskavosti. Je použitelná pro všechny polohy svařování a dovoluje vysokou rychlost při svařování ve svislé poloze zdola nahoru. Polarita zapojení DC+/(–). Typické chemické složení čistého svarového kovu a jeho mechanické vlastnosti jsou sumarizovány v tabulkách Tab. 5-5 a Tab. 5-6. [26]

C	Si	Mn	P	S
0,08%	0,6%	1,1%	0,02%	0,015%

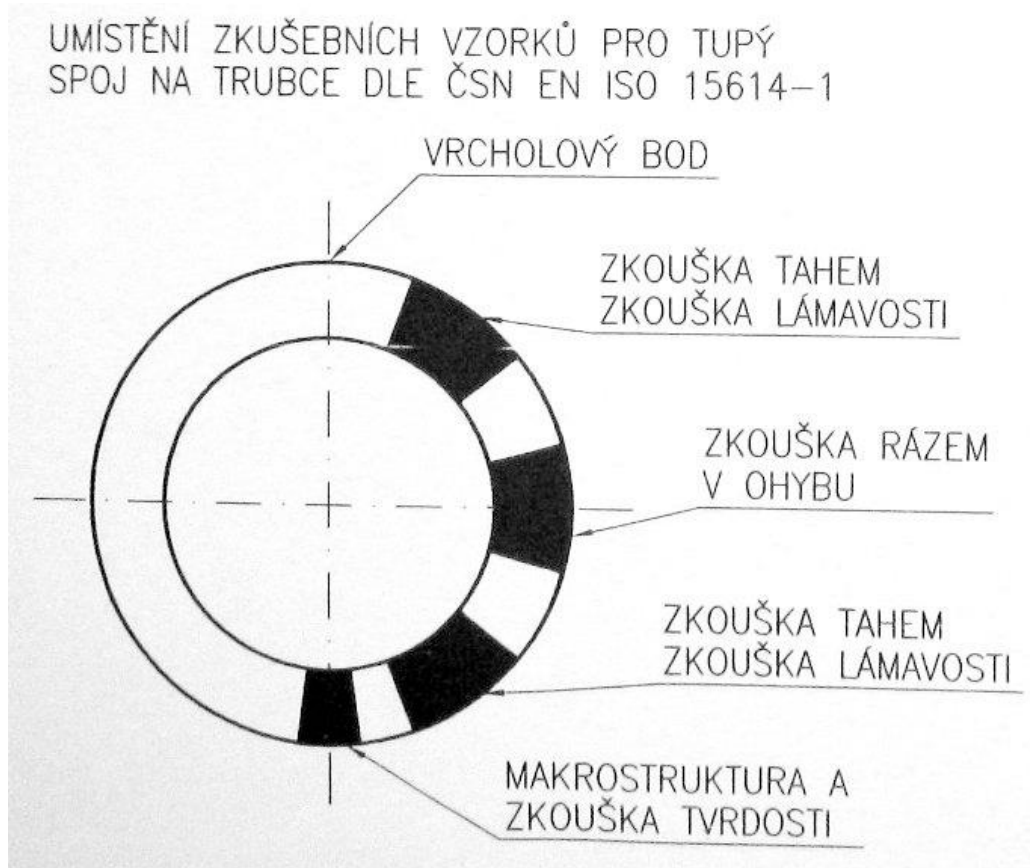
Tab. 5-5 – Chemické složení přídavného materiálu ESAB OK 48.00 [26]

R _m	R _e	A5	K _v (-20°C)	K _v (-40°C)
540 MPa	445 MPa	29 %	140 J	70 J

Tab. 5-6 – Mechanické vlastnosti přídavného materiálu ESAB OK 48.00 [26]

5.4. Vyhodnocení kontrolních svarových spojů

Tato kapitola předkládá výsledky zkoušek kontrolních svarových spojů. Jedná se o zkoušky tahem, lámavosti, tvrdosti, rázem v ohybu a zkoušky vizuální, kapilární a ultrazvukové. Na vzorcích z kontrolních svarových spojů byla navíc hodnocena makrostruktura, mikrostruktura a průběh tvrdosti napříč svarovým spojem. Schéma odběru vzorků z kontrolních svarových spojů znázorňuje Obr. 5-5.



Obr. 5-5 – Schéma odběru zkušebních vzorků

5.4.1. Výsledky zkoušky tahem

Zkouška tahem byla provedena pro oba typy potrubí. Zkušební vzorky pro trubku \varnothing 133mm byly odebrány dle příslušného schématu pro odběr vzorků (Obr. 5-5), trubka \varnothing 30mm byla zkoušena nerozřezána jako celek (Obr. 5-6). Výsledky zkoušky zobrazuje Tab. 5-7. U trubky \varnothing 30mm bylo dosaženo meze pevnosti 574 a 557 MPa. Lom nastal ve svarovém kovu. Na zkušebních vzorcích z trubky \varnothing 133mm byly naměřeny hodnoty meze pevnosti 535 a 538 MPa, lom nastal v obou případech v základním materiálu. Výsledky zkoušky jsou vyhovující dle ČSN EN ISO 4136.



Obr. 5-6 – Zkušební vzorek po přetržení zkouškou tahem (trubka \varnothing 30mm)

Trubka	Vzorek	R _m	Místo porušení
Ø 30mm	1	574 MPa	lom ve svarovém kovu
	2	557 MPa	lom ve svarovém kovu
Ø 133mm	1	535 MPa	lom v základním materiálu
	2	538 MPa	lom v základním materiálu

Tab. 5-7 – Výsledky zkoušky tahem

5.4.2. Výsledky zkoušky lámavosti

Zkouška lámavosti byla provedena dle normy ČSN EN ISO 5173. Zkušební vzorky získané rozřezáním kontrolních spojů byly podrobeny zkoušce lámavosti zatížením ze strany kořene nebo líce svaru (Obr. 5-7). Cílový úhel ohybu 180°. U trubky Ø 30mm byl použit Ø trnu 20mm, u trubky Ø 133mm Ø trnu 100mm. Výsledky zkoušky lámavosti zobrazuje Tab. 5-8. Všechny vzorky dosáhly požadovaného úhlu ohybu, aniž by se u nich vyskytly trhliny, jsou tedy vyhovující.



Obr. 5-7 – Vzorky po zkoušce lámavosti

Trubka	Strana zatížení	Vzorek	Úhel	Výsledek
Ø 30mm	líc	1	180°	bez vady
	líc	2	180°	bez vady
	kořen	3	180°	bez vady
	kořen	4	180°	bez vady
Ø 133mm	líc	1	180°	bez vady
	líc	2	180°	bez vady
	kořen	3	180°	bez vady
	kořen	4	180°	bez vady

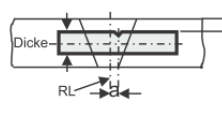
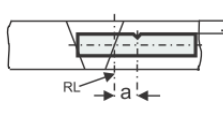
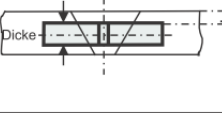
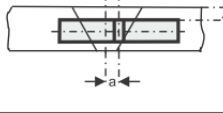
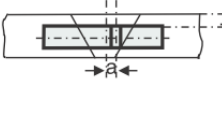
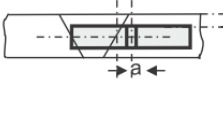
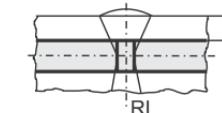
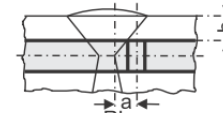
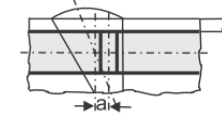
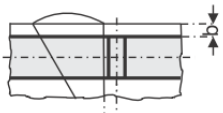
Tab. 5-8 – Výsledky zkoušky lámavosti

5.4.3. Výsledky zkoušky rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu byla požadována u trubky Ø 133mm a byla provedena v souladu s normou ČSN ISO 148-1 při teplotě -20°C. Pro přeražení vzorků bylo použito Charpyho kladivo s nárazovou energií 300J. Byly zkoušeny dva druhy vzorků – s vrubem umístěným ve svarovém kovu (označení VWT0/2) a s vrubem umístěným v teplotně ovlivněné oblasti (označení VHT2/2). Obě označení plynou z normy ČSN EN ISO 9016, jejich význam objasňuje Obr. 5-8. Výsledky zkoušky zobrazuje Tab. 5-9. Požadovaná minimální práce 27J byla až na jeden případ (VWT0/2 vzorek 2) splněna. Norma ČSN EN 10025-1 však povoluje, aby jedna hodnota ležela pod jmenovitou hodnotou, avšak nesmí být menší, než 70% této hodnoty. 70% z minimálně požadovaných 27J je 19J, hodnota 23J tedy vyhovuje stejně jako hodnoty ostatních vzorků.

Trubka	Poloha vrubu	Vzorek	Teplota	Nárazová práce
Ø 133mm	VWT0/2	1	-20°C	142 J
		2	-20°C	23 J
		3	-20°C	46 J
	VHT2/2	4	-20°C	218 J
		5	-20°C	223 J
		6	-20°C	204 J

Tab. 5-9 – Výsledky zkoušky rázem v ohybu

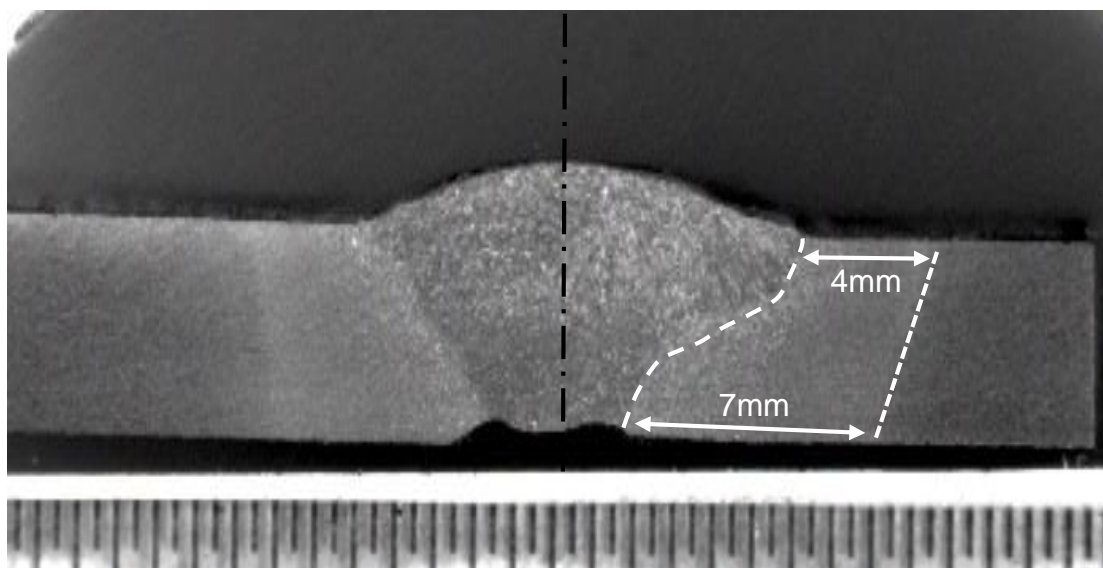
Designation	Weld centre	Designation	Fusion line/bonding zone
VWS a/b		VWS a/b (fusion weld)	
VWT 0/b		VHT 0/b	
VWT a/b		VHT a/b	
VWT 0/b		VHT a/b	
VWT a/b		VHT a/b	

V - "V" vrub
W - vrub umístěn ve svarovém kovu
H - vrub umístěn v TOO

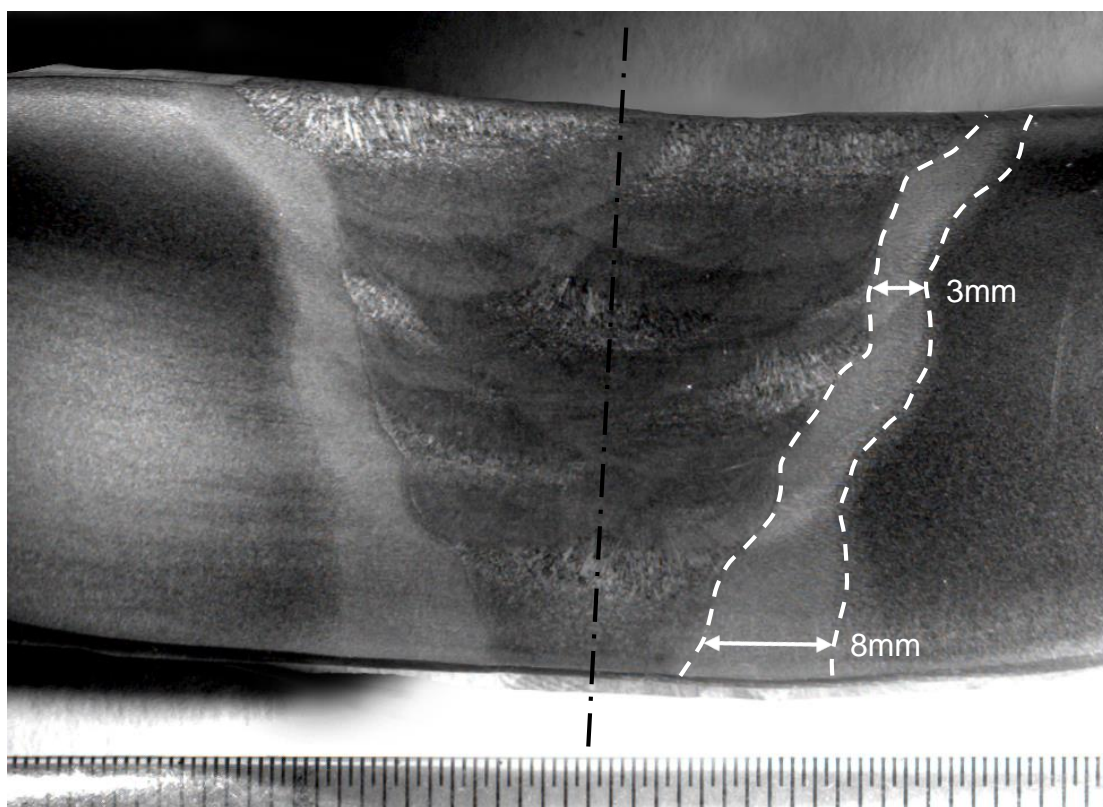
Obr. 5-8 – Označení místa odběru vzorků pro zkoušku rázem v ohybu dle normy ČSN EN ISO 9016.

5.4.4. Makrostruktura svarového spoje

Při zkoumání makrostruktury byla posuzována kvalita svarového spoje z hlediska výskytu vad, charakteru a velikosti TOO a celkového vzhledu spoje. V obou spojích je dobře viditelná skladba jednotlivých housenek a šířka tepelně ovlivněné oblasti (Obr. 5-9 a Obr. 5-10). Oba vzorky byly po vybroušení leptány v leptadle Nital (HNO_3 + etanol). Šířka tepelně ovlivněné oblasti u trubky $\varnothing 30\text{mm}$ je 4 až 7 mm a u trubky $\varnothing 133\text{mm}$ 3 až 8 mm. V obou svarech nebyly nalezeny žádné vady. Svarové spoje vyhovují stupni kvality „B“ dle normy ČSN EN ISO 5817, tedy nejvyššímu stupni kvality.



Obr. 5-9 – Makrostruktura svaru (trubka \varnothing 30mm). Zvětšení 12x, hlavní měřítko v mm



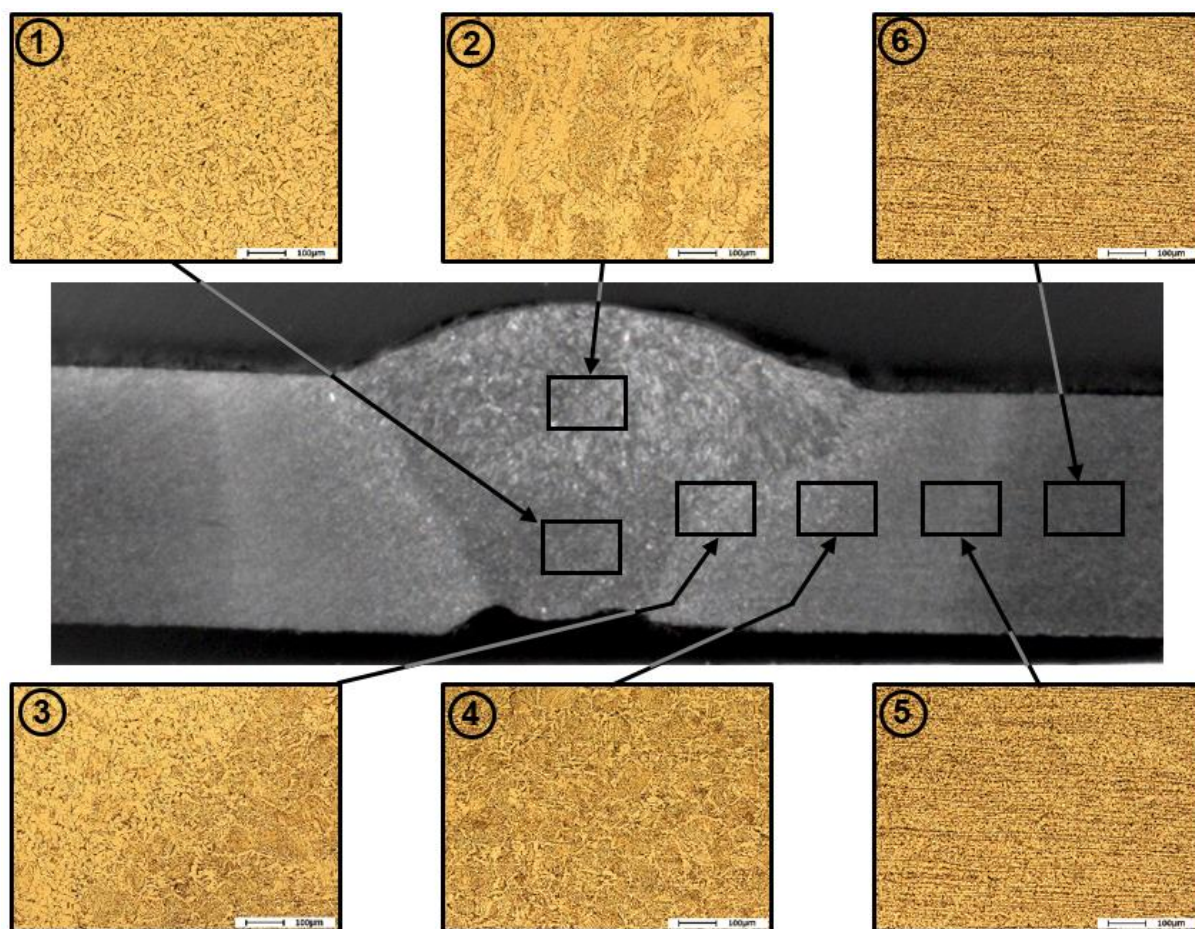
Obr. 5-10 – Makrostruktura svaru (trubka \varnothing 133mm). Zvětšení 7,2x, hlavní měřítko v mm

5.4.5. Mikrostruktura svarového spoje

U obou průměrů trubek byla hodnocena mikrostruktura svarových spojů pomocí světelného mikroskopu. Vybroušené a vyleštěné vzorky byly leptány Nitalem po dobu 5 sekund. Mikrostrukturní rozbor byl proveden v charakteristických místech svaru – svarový kov, přechod SK a TOO, TOO, přechod TOO do základního materiálu a základní materiál.

3.8.1.9 Trubka \varnothing 30mm

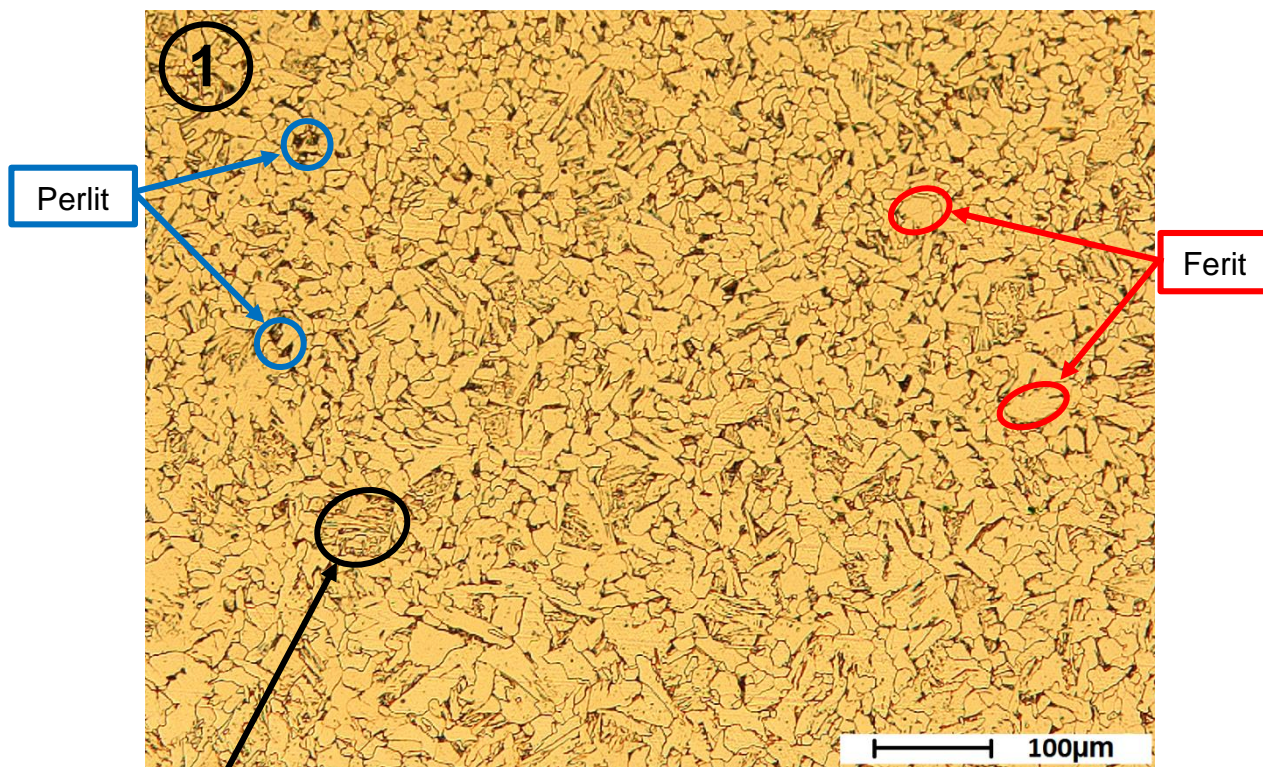
Rozložení pozorovaných oblastí na vzorku při hodnocení mikrostruktury uvádí Obr. 5-11.



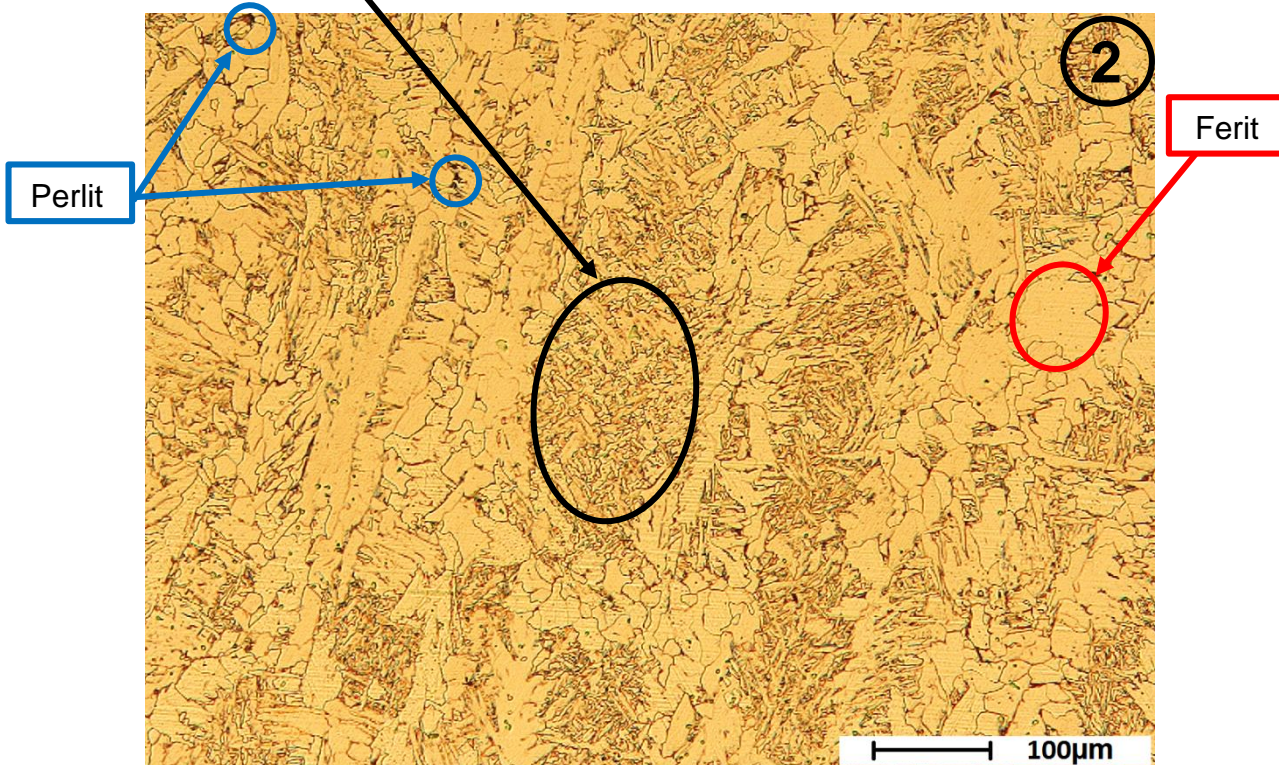
Obr. 5-11 - Rozložení míst pozorování mikrostruktury na vzorku (trubka \varnothing 30 mm)

Svarový kov

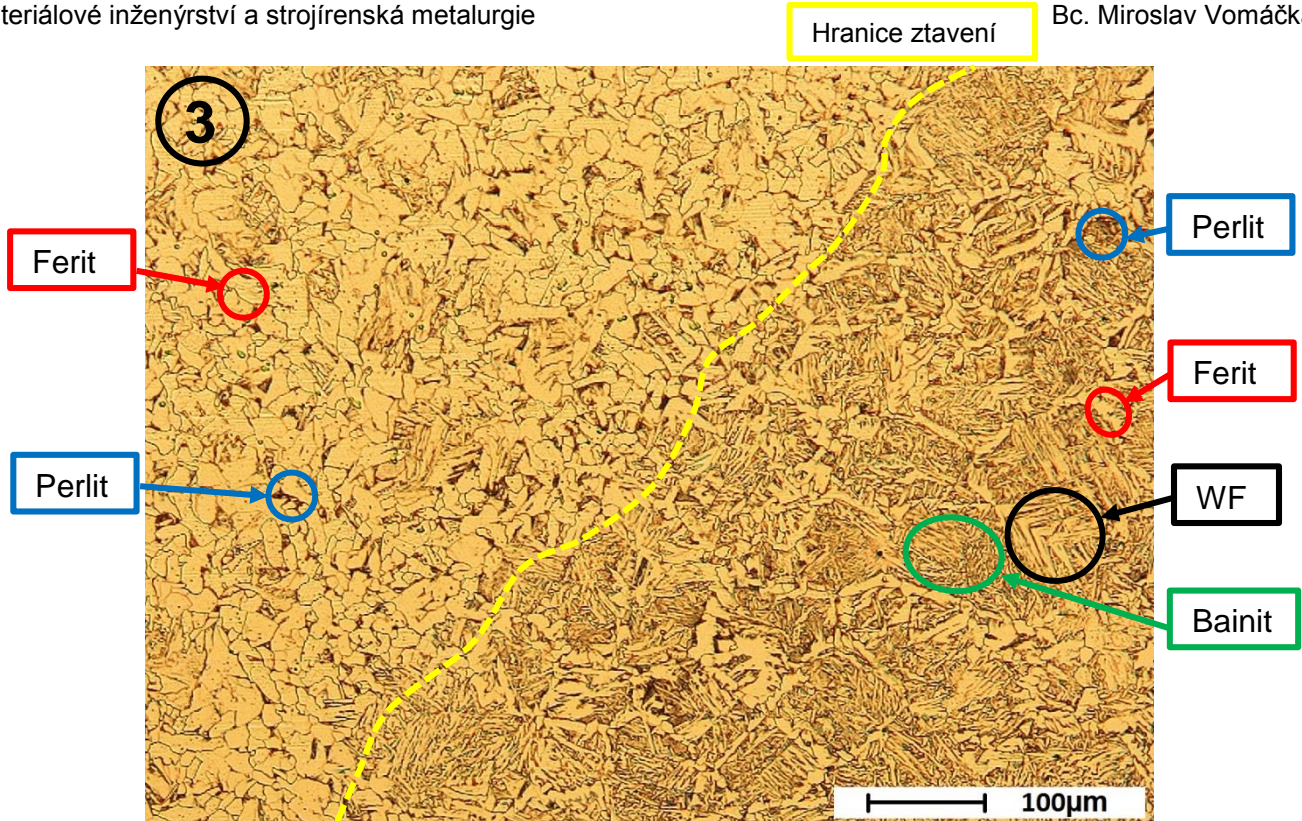
Majoritní fází vyskytující se v mikrostruktúře svarového kovu je ferit. Je zastoupen feritem masivním a Widmannstättenovým. Mimo feritu je ve struktuře přítomný malý podíl perlitu (Obr. 5-12, Obr. 5-13). Kořenová část svaru má v porovnání s lící částí jemnější strukturu s menším podílem Widmannstättenova feritu (WF), lící část je výrazně hrubozrnnější s větším podílem WF značící v daném místě větší přehřátí kovu a následné rychlejší ochlazování. V oblasti kolem hranice ztavení se ve svarovém kovu vyskytuje větší podíl perlitu (difúze uhlíku ze základního materiálu). Přejechod svarového kovu do TOO je charakterizován výrazným zvýšením podílu WF a objevuje se zde v malé míře i bainit (Obr. 5-14). Větší podíl perlitu v TOO je dán vyšším obsahem uhlíku v základním materiálu než ve SK.



Widmannstättenův ferit Obr. 5-12 – Mikrostruktura kořene svaru



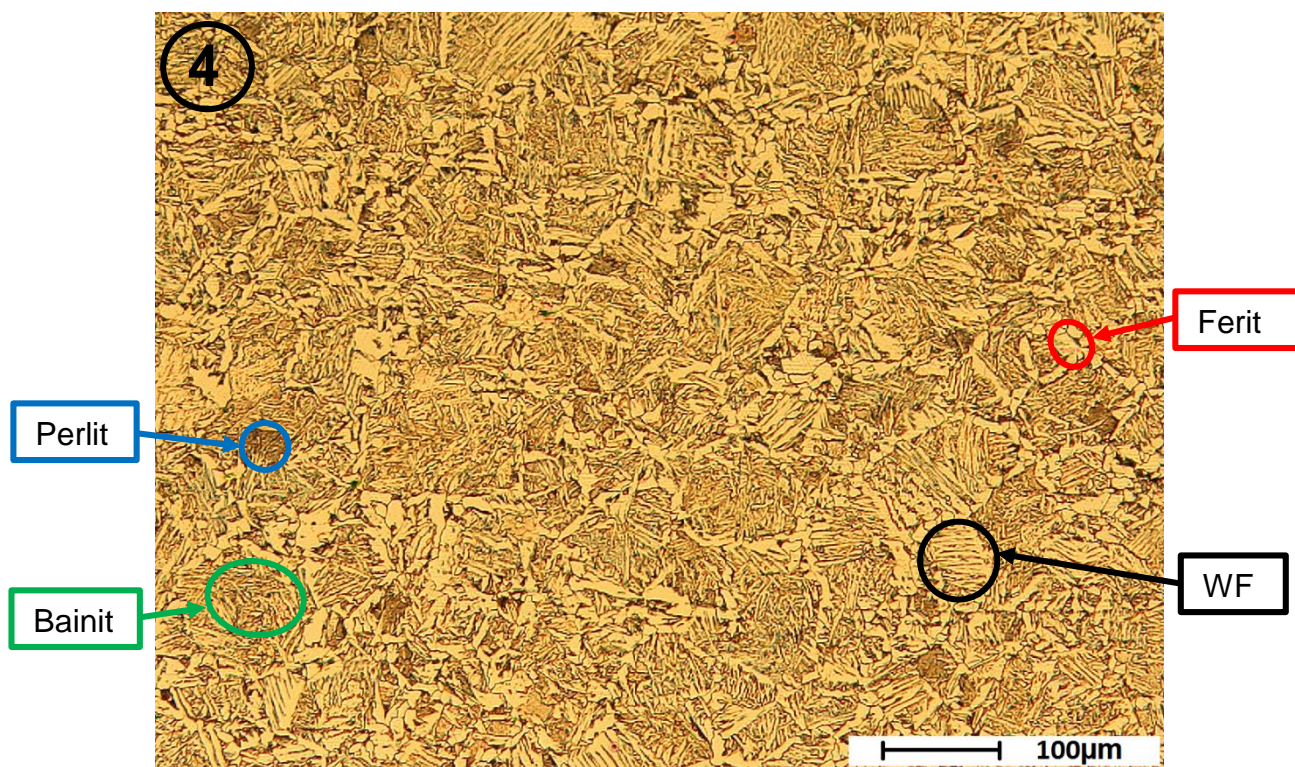
Obr. 5-13 – Mikrostruktura lící části svaru



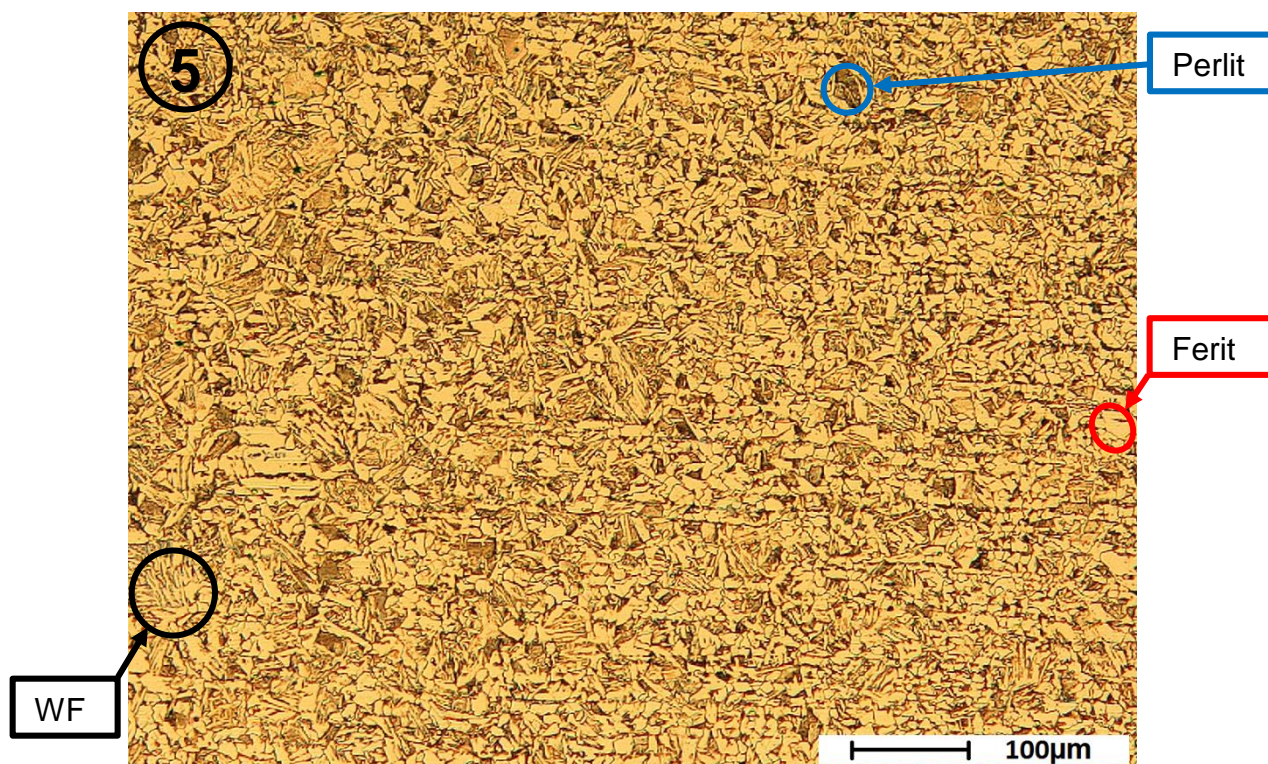
Obr. 5-14 – Mikrostruktura oblasti přechodu svarového kovu do TOO

Tepelně ovlivněná oblast

Struktura v tepelně ovlivněné oblasti je hrubozrnná a obsahuje značný podíl feritu Widmannstättenova a feritu alotriomorfního (po hranicích primárních zrn). Dále se v podobě malých ostrůvků objevuje i perlit (Obr. 5-15). Směrem do základního materiálu postupně klesá velikost zrna, ubývá WF, narůstá podíl feritu a perlitu (Obr. 5-16). Ze snímku je patrný pozvolný přechod do vyřádkované struktury základního materiálu.



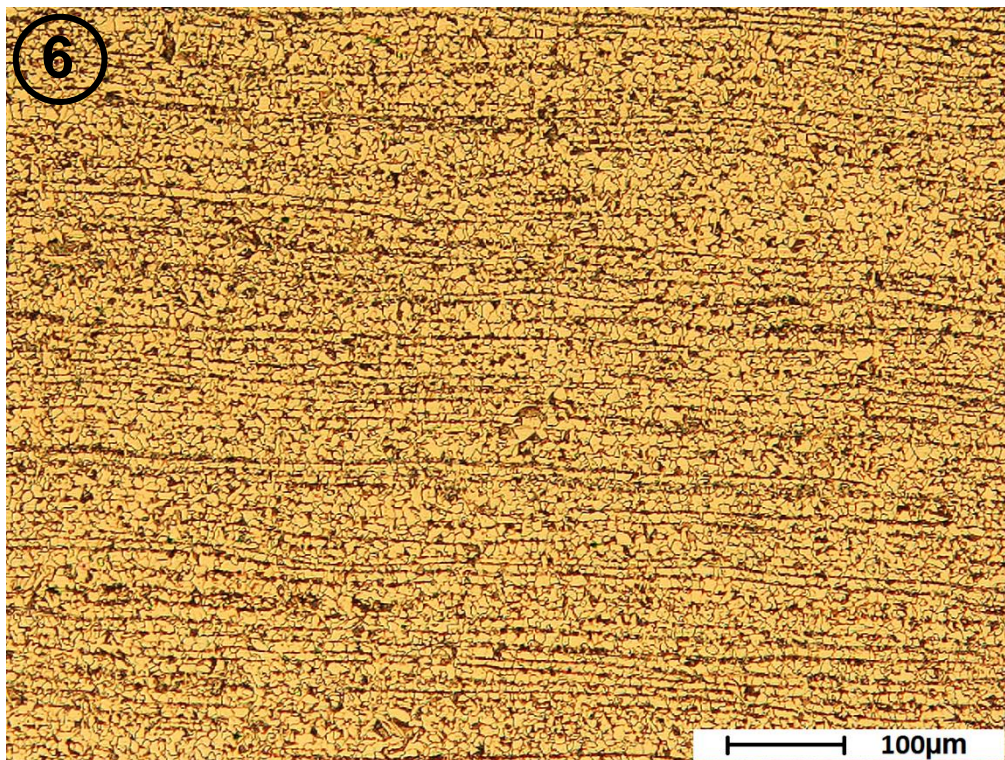
Obr. 5-15 – Mikrostruktura TOO



Obr. 5-16 – Oblast přechodu TOO do základního materiálu

Základní materiál

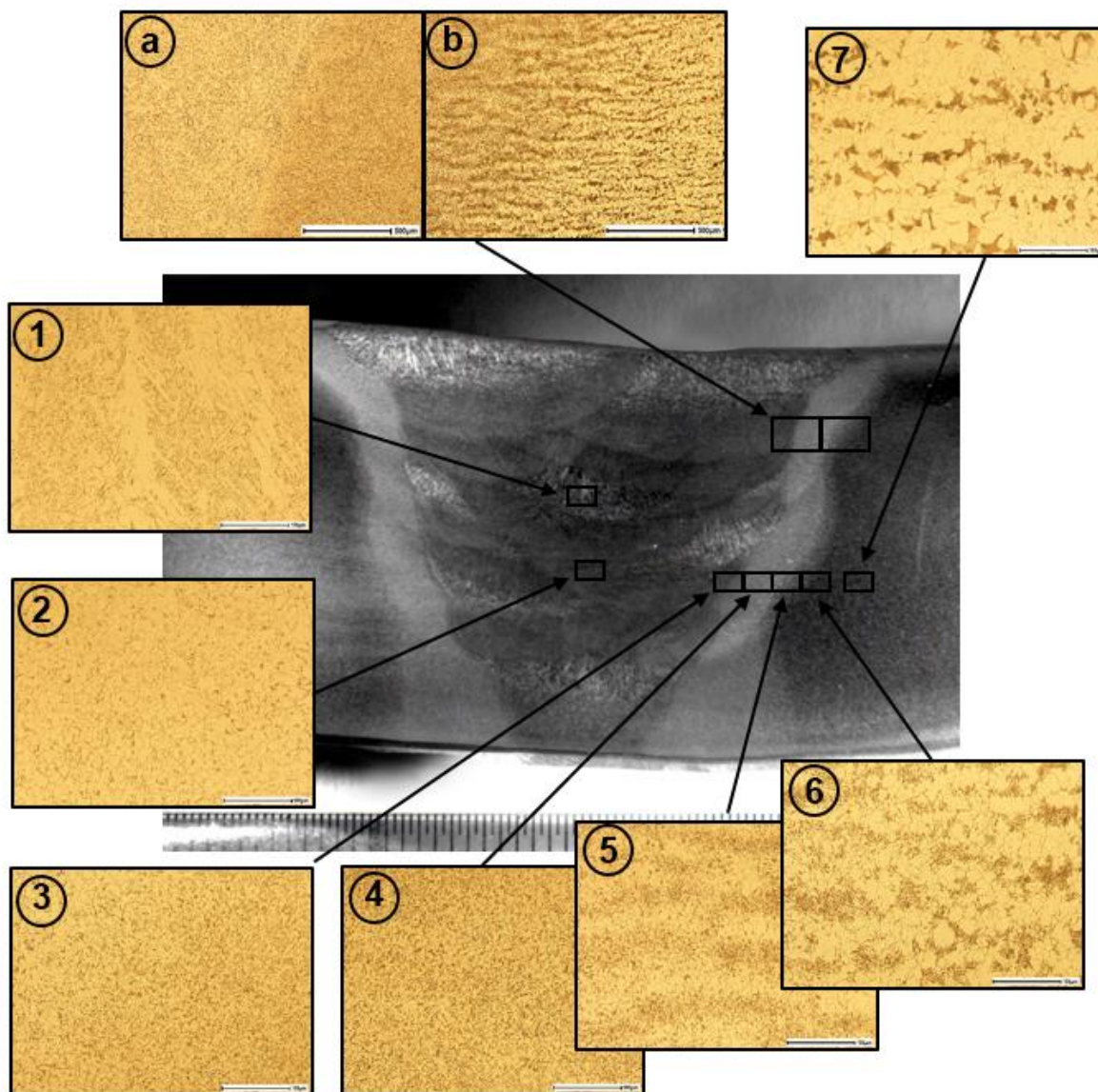
Mikrostruktura základního materiálu je feriticko-perlitická, typická pro válcované uhlíkové oceli (Obr. 5-17). Ve struktuře převládá ferit. Vyřádkování je způsobeno tvářením při výrobě bezešvých trubek. Ferit je ve struktuře světlý, perlit tmavý.



Obr. 5-17 – Struktura základního materiálu

3.8.1.10 Trubka Ø 133mm

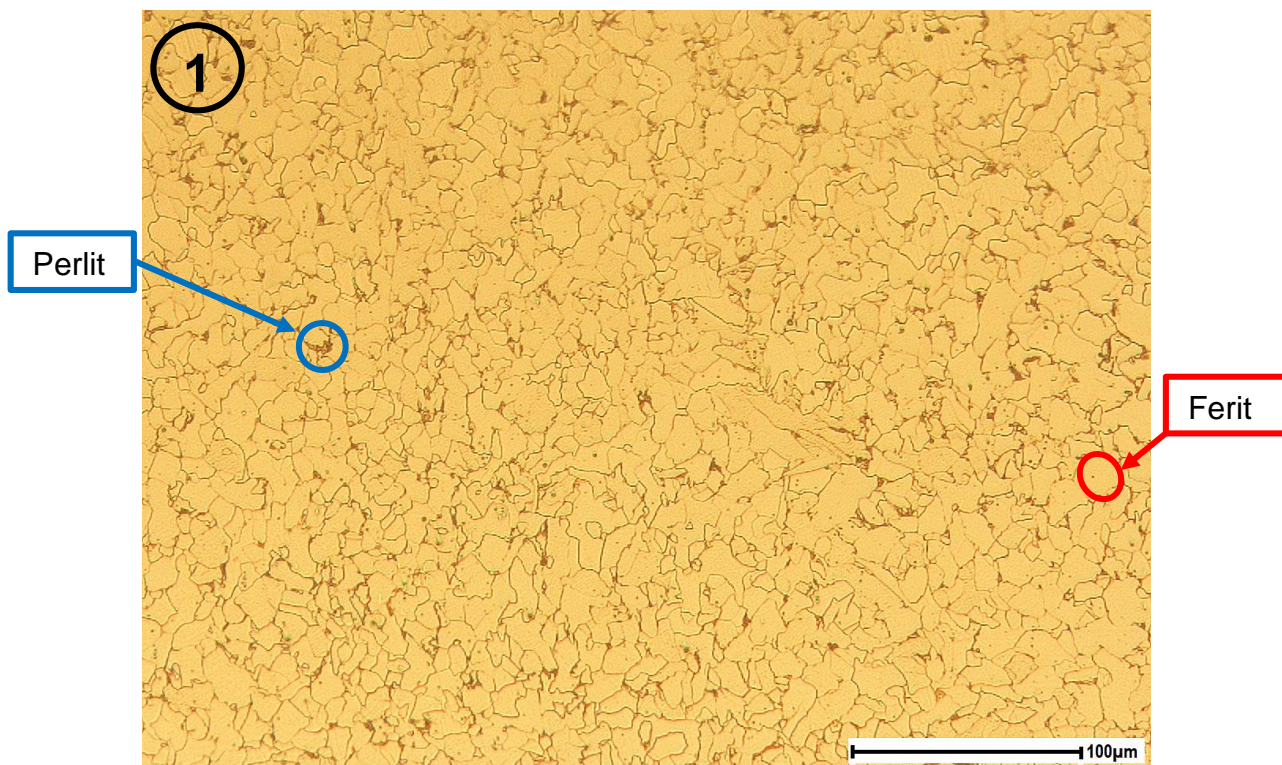
Místa pozorování mikrostruktury na vzorku uvádí Obr. 5-18. Pozorování bylo provedeno v oblasti svarového kovu, přechodu svarového kovu do TOO, TOO a její přechod do základního materiálu.



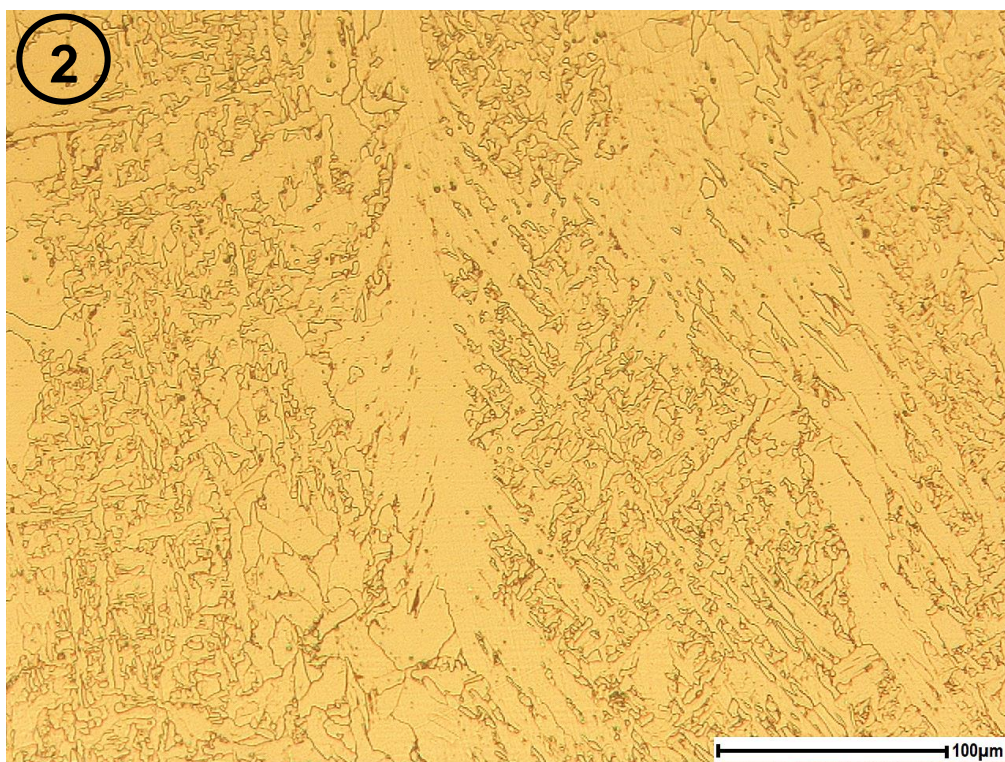
Obr. 5-18 – Rozložení pozorovaných míst na vzorku (trubka \varnothing 133mm)

Svarový kov

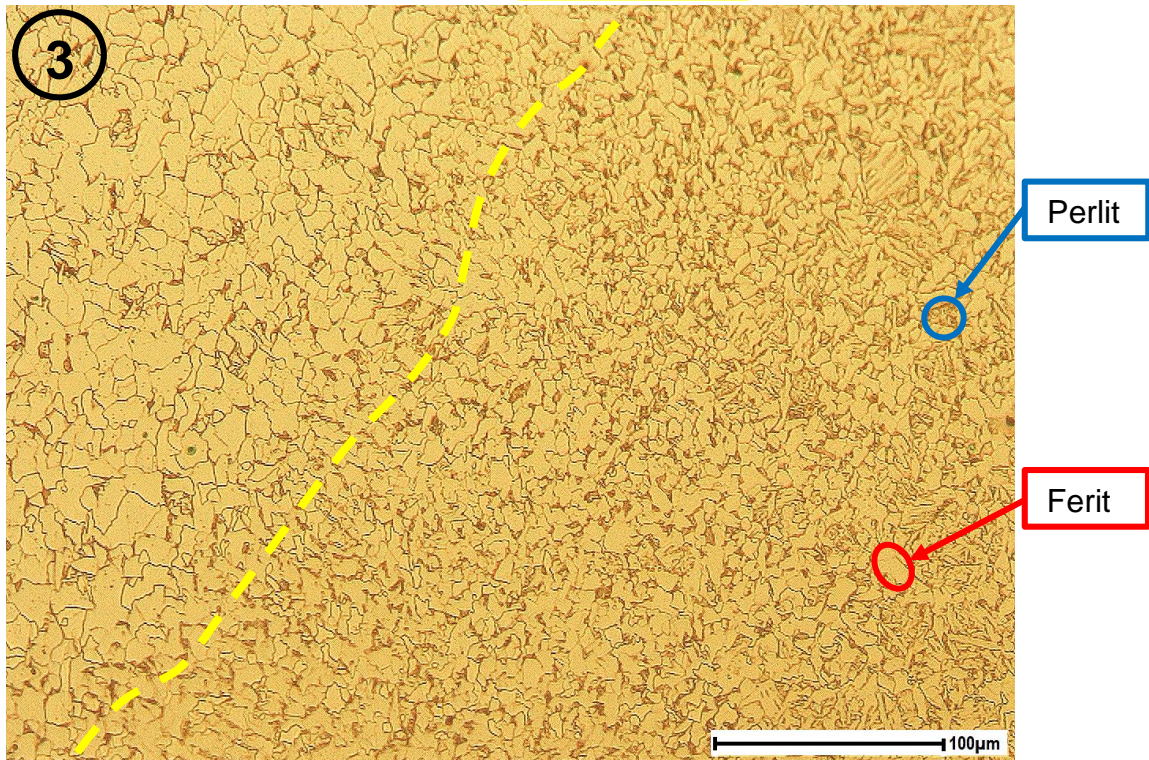
Struktura svarového kovu je feriticko-perlitická, s malým množstvím perlitu (Obr. 5-19). Ve svaru je možno nalézt místa s výrazně hrubší strukturou. Tyto místa se vyskytují v oblasti překryvu jednotlivých housenek a značí větší přehřátí materiálu nebo pomalejší odvod tepla (Obr. 5-20). Přechod svarového kovu do TOO je plynulý a nedochází k výraznějšímu hrubnutí struktury (Obr. 5-21).



Obr. 5-19 – Mikrostruktura svarového kovu (OK 48.00)



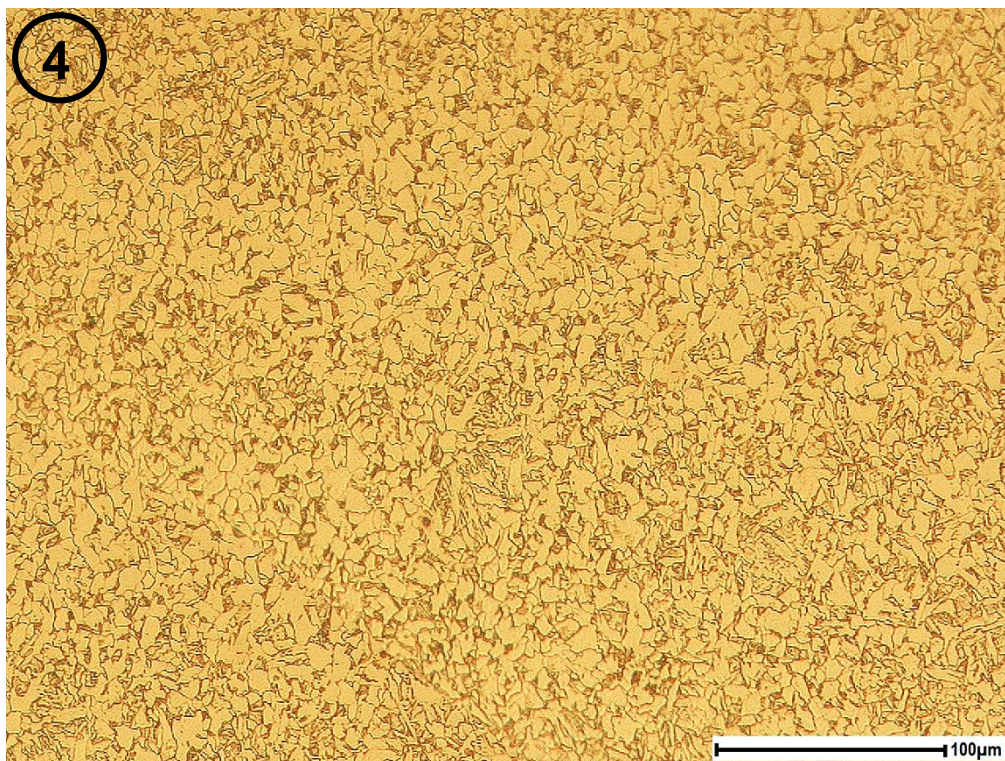
Obr. 5-20 – Zhrubnutí zrna svarového kovu v místech překryvu housenek (OK 48.00)



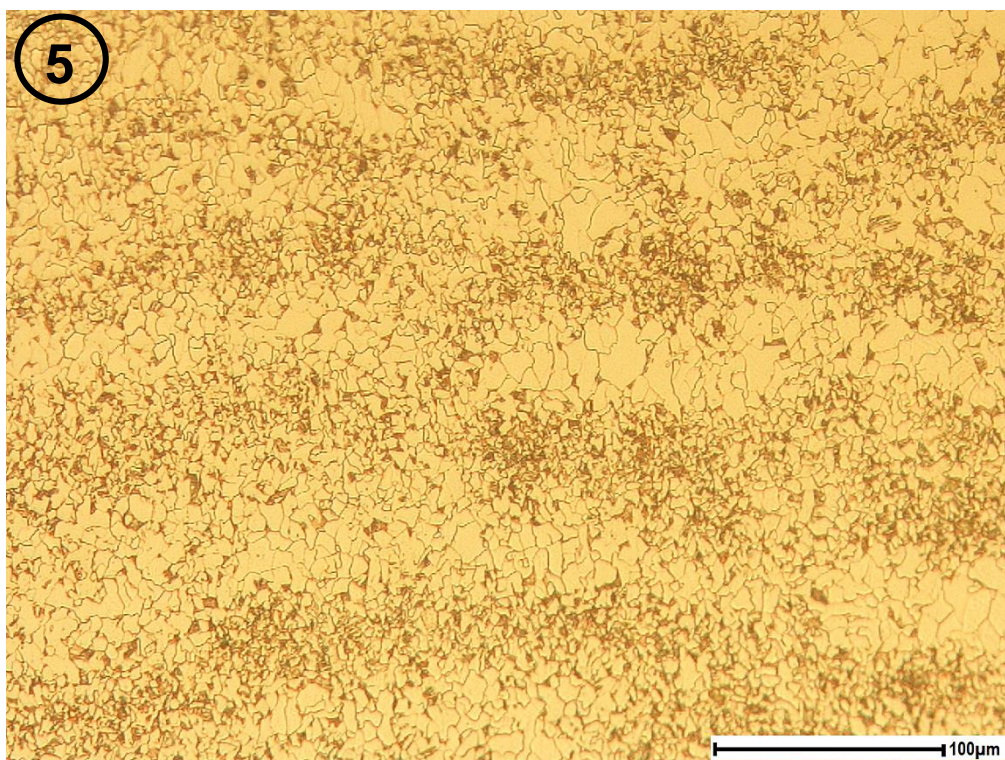
Obr. 5-21 – Přejchod svarového kovu do TOO (TOO vpravo)

Tepelně ovlivněná oblast

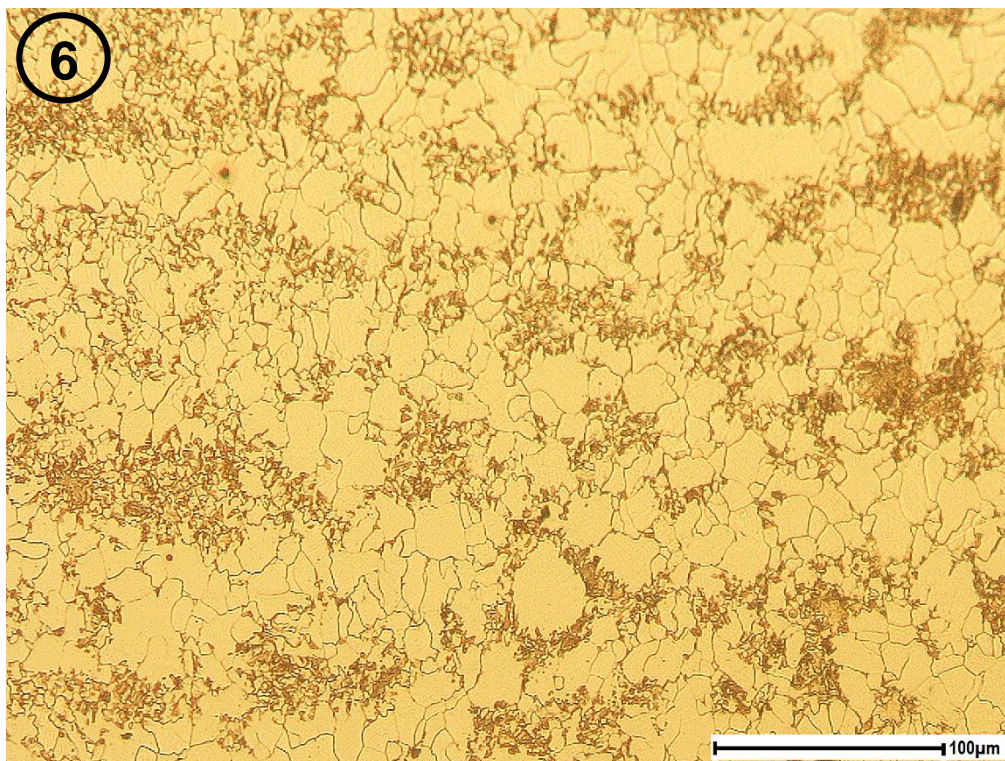
Tepelně ovlivněná oblast je jemnozrnná s pozvolným přechodem do základního materiálu. Mikrostruktura je feriticko-perlitická, s rovnoměrným rozložením fází (Obr. 5-22). Postupem k základnímu materiálu je rozložení struktury méně rovnoměrné, začíná se projevovat vliv původní vyřádkované struktury ZM. Ferit i perlit se seskupuje do pásů a struktura plynule přechází do struktury ZM (Obr. 5-23, Obr. 5-24). Celkový pohled na změny struktury od svarového kovu k základnímu materiálu ukazuje Obr. 5-25 v padesáti násobném zvětšení.



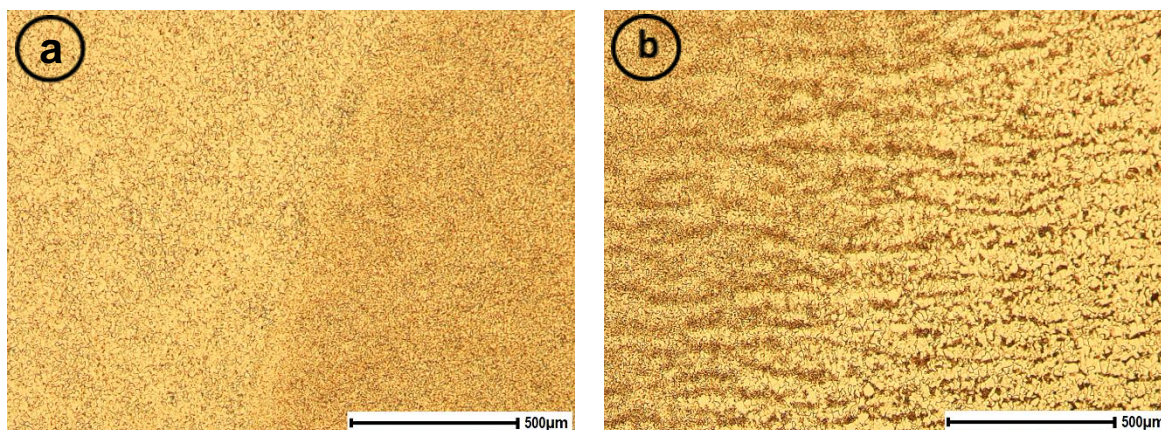
Obr. 5-22 – Mikrostruktura TOO



Obr. 5-23 – Mikrostruktura TOO se začínajícím přechodem do ZM



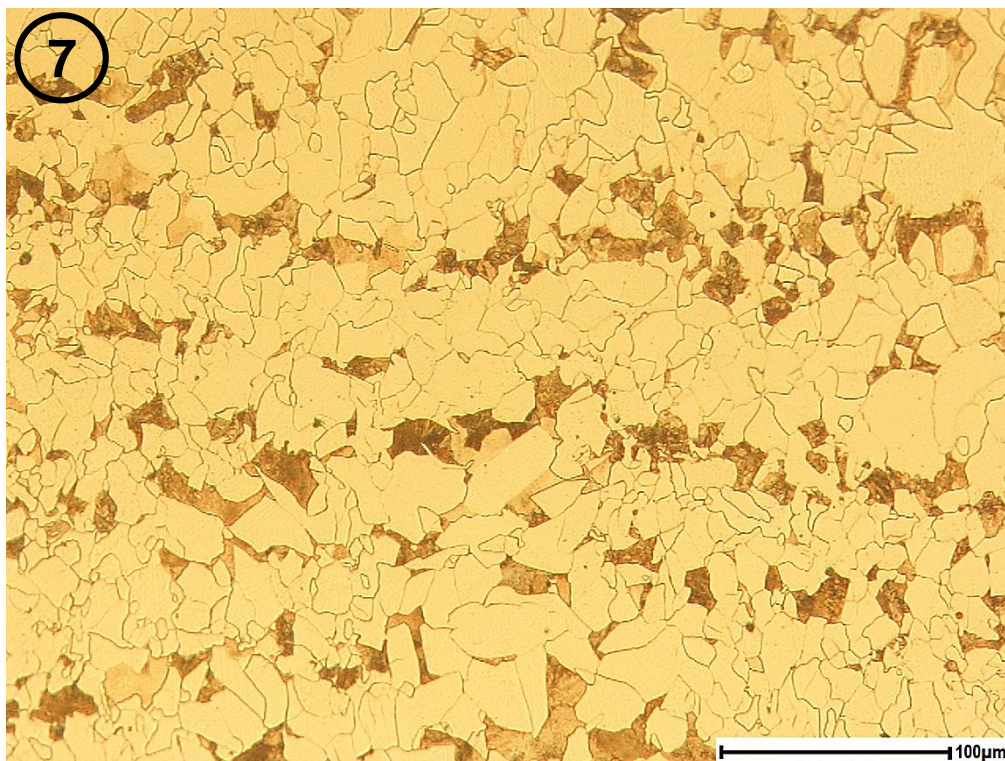
Obr. 5-24 – Přechod TOO do ZM



Obr. 5-25 – Celkový pohled na změny struktury ve svarovém spoji (svar vlevo)

Základní materiál

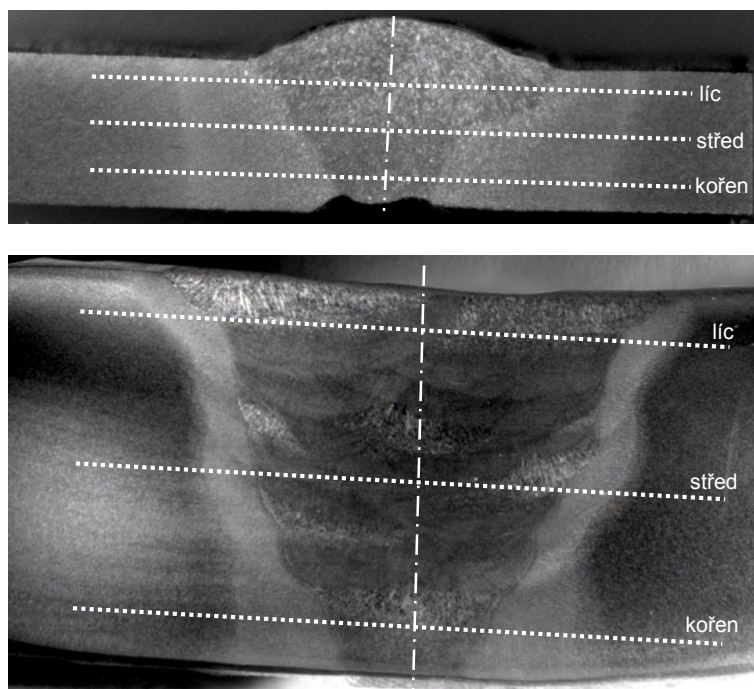
Stejně jako u trubky \varnothing 30mm je základní materiál válcovaný. Struktura je opět typická pro tyto materiály a obsahuje podíl feritu a perlitu. Válcování se na struktuře projevuje jejím vyřádkováním ve směru tváření (Obr. 5-26).



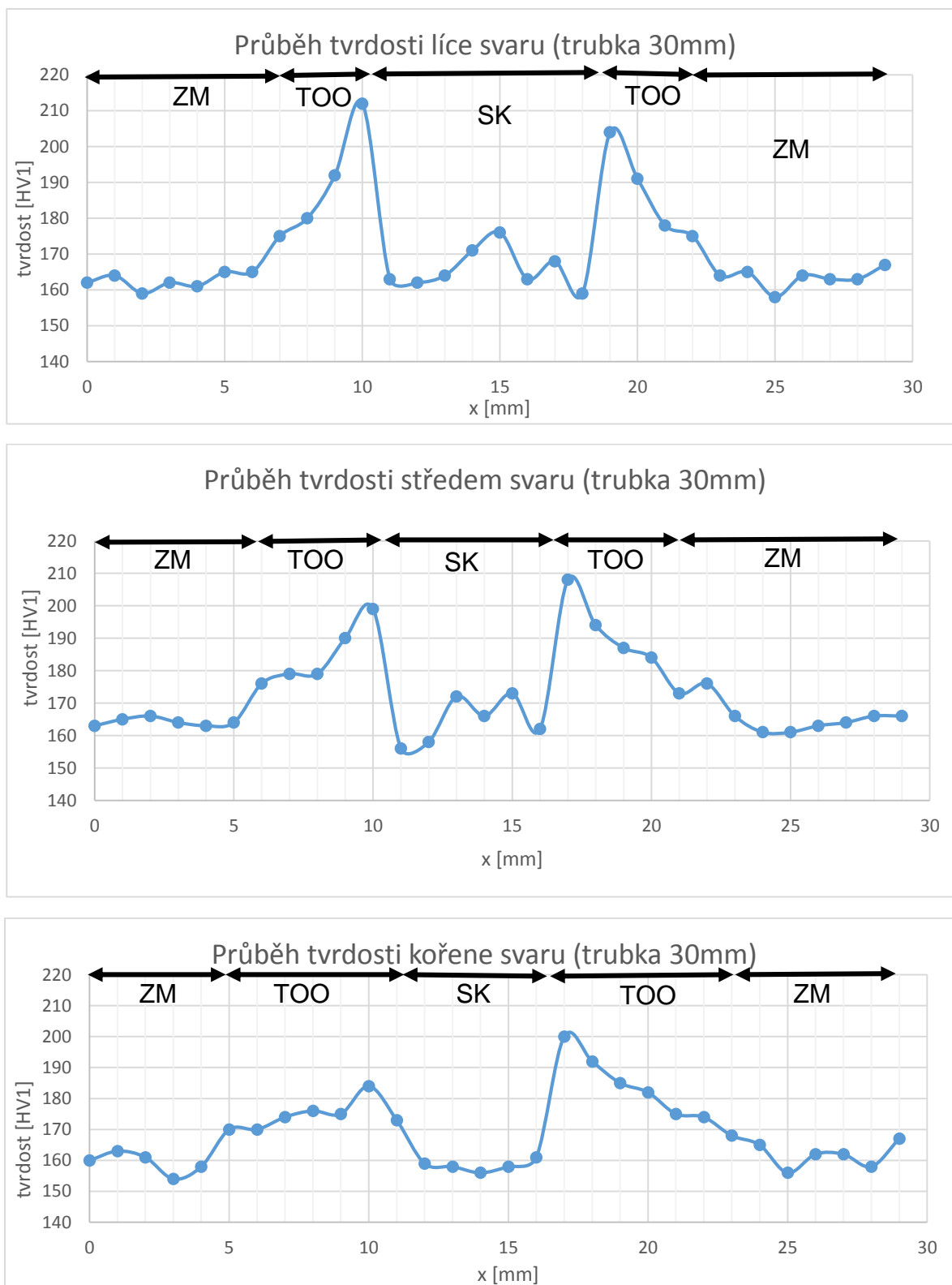
Obr. 5-26 – Mikrostruktura základního materiálu

5.4.6. Průběh tvrdosti

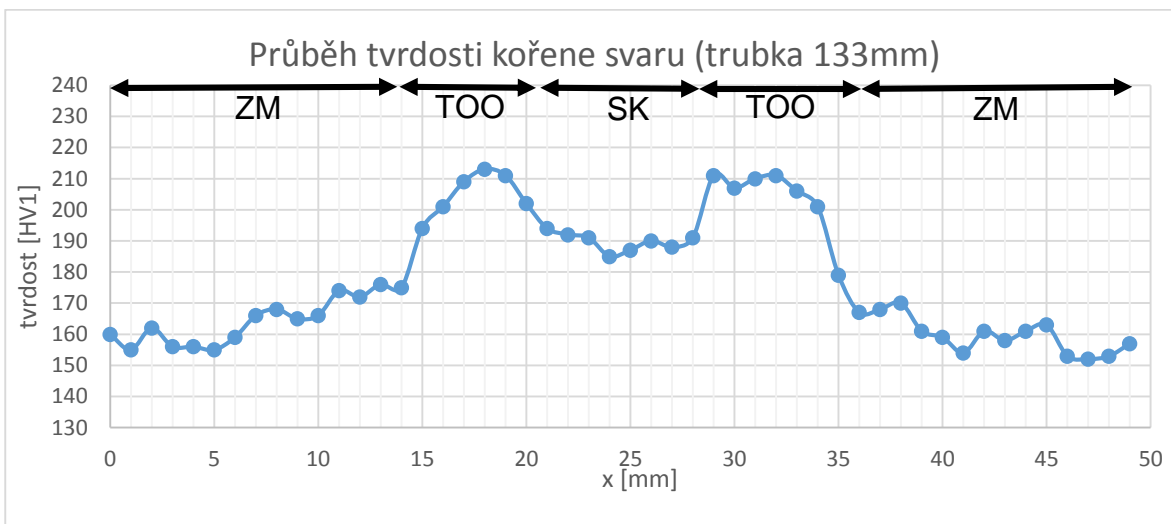
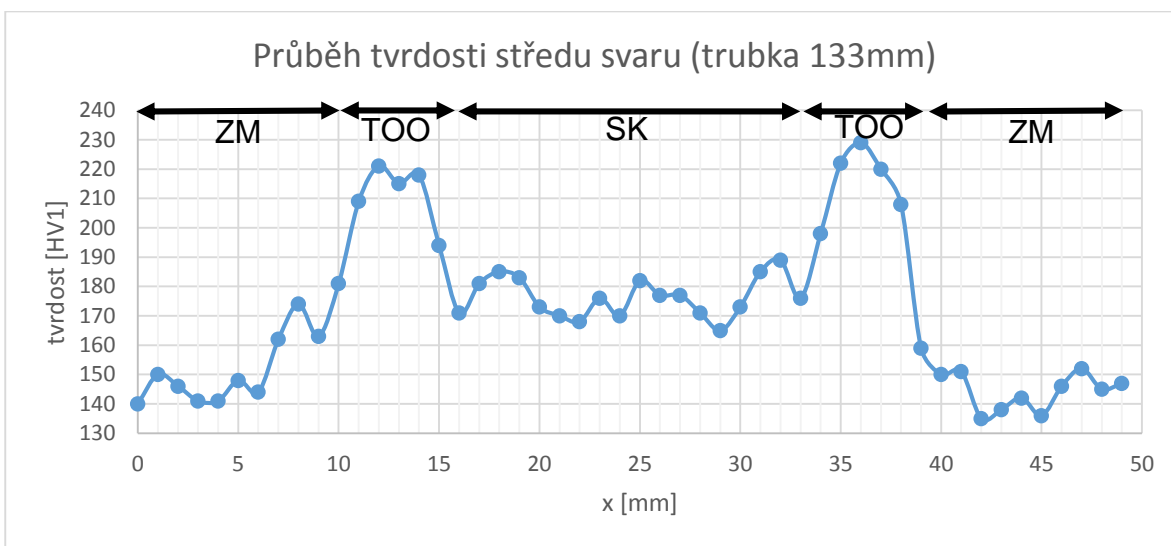
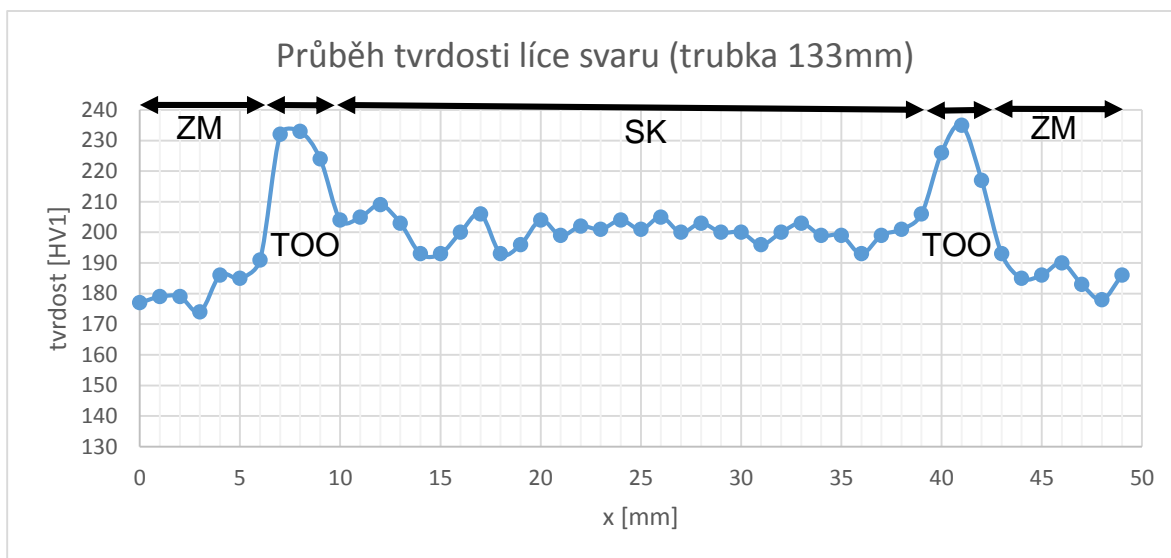
Průběh tvrdosti byl hodnocen u obou kontrolních kusů napříč svarovým spojem. Místa měření znázorňuje Obr. 5-27. Průběh tvrdosti byl měřen v lící, středové a kořenové části svaru. Vzdálenost jednotlivých vtisků je 1mm a zatížení 1000g. Průběhy tvrdostí zobrazují Obr. 5-28 a Obr. 5-29. Naměřené hodnoty sumarizuje Tab. 2-1. Na hranici ztavení a v TOO došlo ke zvýšení tvrdosti u obou svarových spojů vlivem strukturních změn. Naměřené hodnoty tvrdosti nepřesahují 212 HV1 u trubky Ø30mm a 235 HV1 u trubky Ø133mm. Z hlediska tvrdosti vyhovují oba svarové spoje dle ČSN EN ISO 9015.



Obr. 5-27 – Schematické znázornění pozic vtisků při měření tvrdosti



Obr. 5-28 – Průběhy tvrdosti napříč svarovým spojem trubky průměru 30mm



Obr. 5-29 – Průběhy tvrdosti napříč svarovým spojem trubky průměru 133mm

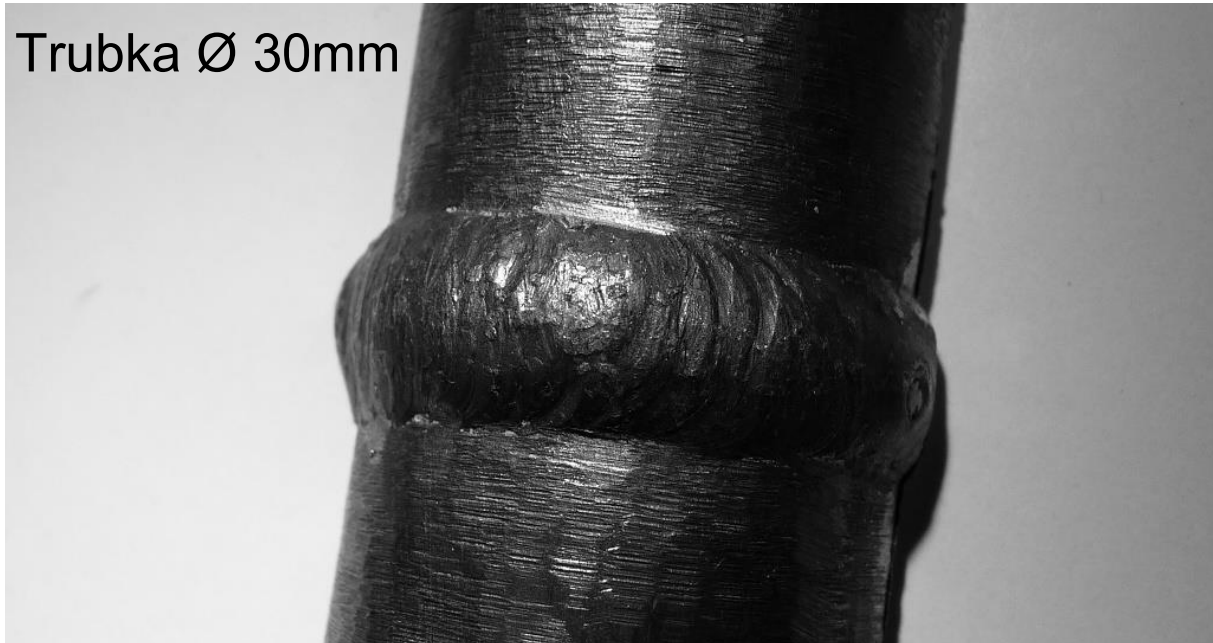
Trubka Ø 30mm				Trubka Ø 133mm			
x [mm]	líc [HV1]	střed [HV1]	kořen [HV1]	x [mm]	líc [HV1]	střed [HV1]	kořen [HV1]
0	162	163	160	0	177	140	160
1	164	163	163	1	179	150	155
2	159	163	161	2	179	146	162
3	162	165	154	3	174	141	156
4	161	166	158	4	186	141	156
5	165	164	170	5	185	148	155
6	165	163	170	6	191	144	159
7	175	169	174	7	232	162	166
8	180	176	176	8	233	174	168
9	192	179	175	9	224	163	165
10	212	179	184	10	204	181	166
11	163	190	173	11	205	209	174
12	162	199	159	12	209	221	172
13	164	156	158	13	203	225	176
14	171	158	156	14	193	215	175
15	176	172	158	15	193	194	194
16	163	166	161	16	200	171	201
17	168	173	200	17	206	181	209
18	159	162	192	18	193	185	213
19	204	208	185	19	196	183	211
20	191	194	182	20	204	173	202
21	178	187	175	21	199	170	194
22	175	184	174	22	202	168	192
23	164	173	168	23	201	176	191
24	165	166	165	24	204	170	185
25	158	161	156	25	201	182	187
26	164	161	162	26	205	177	190
27	163	163	162	27	200	177	188
28	163	164	158	28	203	171	191
29	167	162	167	29	200	165	211
				30	200	173	207
				31	196	185	210
				32	200	189	211
				33	203	176	206
				34	199	198	201
				35	199	222	179
				36	193	229	167
				37	199	220	168
				38	201	208	170
				39	206	159	161
				40	226	150	159
				41	235	151	154
				42	217	135	161
				43	193	138	158
				44	185	142	161
				45	186	136	163
				46	190	146	153
				47	183	152	152
				48	178	145	153
				49	186	147	157

Tab. 5-10 – Naměřené hodnoty tvrdostí

5.4.7. Vizuální kontrola

Vizuální kontrola obou svarových spojů byla provedena metodou přímou, tedy kontrolou pouhým okem případně lupou za dobrého osvětlení (Obr. 5-30). Kontrola proběhla dle normy ČSN EN ISO 17637, vyhodnocování bylo provedeno v souladu

s normou ČSN EN ISO 5817. Oba svarové spoje splňují požadavky na kvalitu stupně „B“ dle výše zmiňované normy.



Obr. 5-30 – Vzhled svarů při kontrole vizuální přímou metodou

5.4.8. Kapilární zkouška

Oba typy kontrolních svarových spojů byly v TS Plzeň a.s. důkladně prověřeny na přítomnost povrchových trhlin penetrační (kapilární) zkouškou. Kapilární zkouška byla provedena dle ČSN EN ISO 3452-1, vyhodnocování probíhalo v souladu s ČSN EN ISO 23277. Před zahájením zkoušky byl vždy povrch zkoušeného spoje důkladně očištěn a odmaštěn. Teplota zkušebních kusů byla 18°C. Způsob nanášení penetrantu i vývojky byl v obou případech nástřikem. Jako penetrant byl použit MR 311 (Obr. 5-31) s dobou penetrace 10 minut. Po nanesení penetrantu následovalo očištění přebytků prostředkem MR 79 (Obr. 5-31) a po uběhnutí 10 minut byla na povrch nanesena vývojka MR 70 (Obr. 5-31). První prohlídka proběhla ihned po nanesení

vývojky, druhá po 20 minutách. Po ukončení zkoušky byly zkoušené kusy očištěny od vývojky opět pomocí prostředku MR 79. Kontrola probíhala při osvětlení bílým světlem s intenzitou 520 luxů. Během zkoušky nebyly nalezeny žádné indikace vad. Oba zkoušené kontrolní svarové spoje tak vyhovují stupni kvality 2 dle ČSN EN ISO 23277.



Obr. 5-31 – Prostředky použité při penetrační zkoušce. Zleva: penetrant MR 311 (červená barva), vývojka MR 70, čisticí prostředek MR 79 [27]

5.4.9. Ultrazvuková zkouška

Zkouška ultrazvukem byla požadována pouze u větší trubky $\varnothing 133$ mm. Provedení zkoušky proběhlo v TS Plzeň a.s. pomocí moderního přenosného ultrazvukového přístroje USN 52 (Obr. 5-32). Zkoušení probíhalo metodou impulsní odrazovou s frekvencí 4 MHz s citlivostí 57 a 62 dB. Vazební prostředí zprostředkoval olej. Kontrolní svarový nevykazoval žádné vady a je tedy vyhovující dle normy ČSN EN ISO 11666 ve stupni kvality 2.



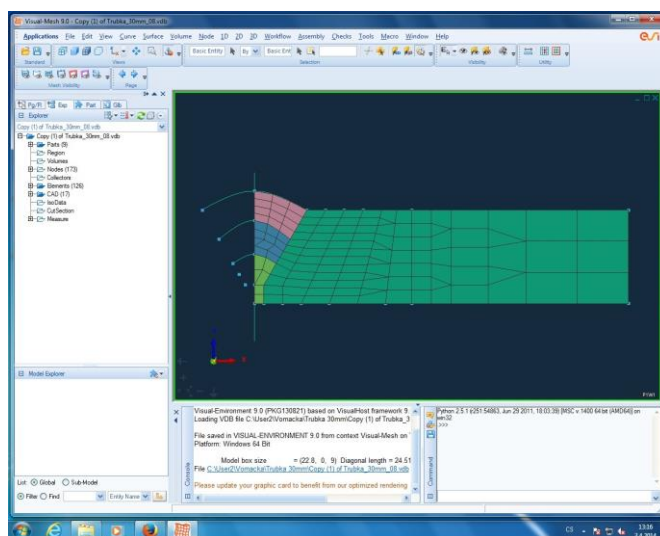
Obr. 5-32 – Ultrazvukový zkušební přístroj USN 52 [28]

6. Numerická simulace svařování

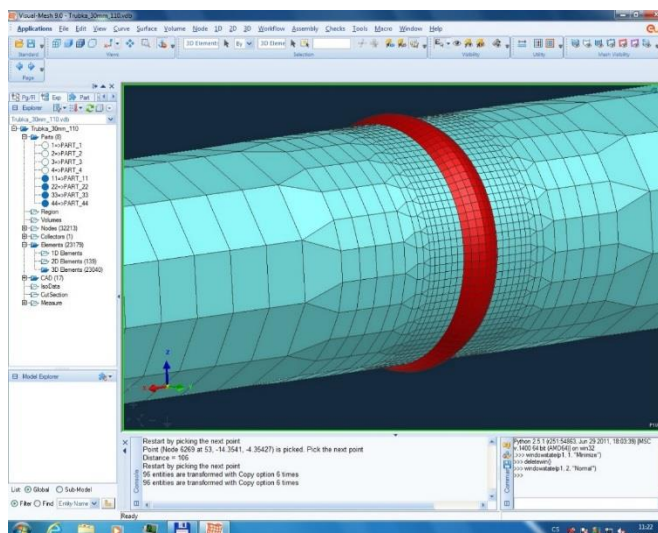
K vypracování numerické simulace byly použity následující programy z programového balíku Visual Environment 9.5 od společnosti ESI GROUP. Jednalo se o program Visual Mesh 9.5, Visual Weld 9.5 a Visual Viewer 9.5. Tyto programy jsou potřeba vytvoření základního modelu, nasíťování, zadání svařovacích parametrů a spočítání a vyhodnocení výsledků simulace. Simulace byla provedena pro jednodušší svařený kus, tedy trubku $\varnothing 30\text{mm}$ z důvodu nižší výpočtové náročnosti. Následující kapitoly stručně přiblíží pracovní postup při tvorbě simulací a následně prezentují i konkrétní výsledky.

6.1. Vytváření modelu

Proces numerické simulace začíná vytvářením modelu. Model se skládá ze svařovaných dílců a svaru rozděleného na jednotlivé svarové housenky. Ty charakterizují objem svarového kovu doplněného do úkosu při jednom průchodu hořáku (elektrody) a budou se během simulace postupně aktivovat. Díky symetrii svařence je možno model zhotovit rotací části průřezu a následně pomocí kopírování a zrcadlení získat konečný tvar. S ohledem na výpočtovou náročnost je potřeba správně volit hustotu a rozmístění prvků. Větší množství prvků sice zvyšuje přesnost výsledků, ale neúměrně prodlužuje dobu samotného výpočtu. Při optimálním rozložení prvků je možno dosáhnout velmi přesných výsledků za podstatně kratší čas. Při vytváření modelu byla vytvořená část průřezu (Obr. 6-1). Na průřezu je patrné postupné snižování počtu prvků ve stěně s rostoucí vzdáleností od svaru. Následnou rotací a dalšími nutnými úpravami (snižování počtu obvodových prvků ve směru od svaru) byl získán finální tvar modelu (Obr. 6-2).



Obr. 6-1 – Vytvoření 2D průřezu trubky a svarového kovu. Následnou rotací kolem osy potrubí se vytvoří prostorový model



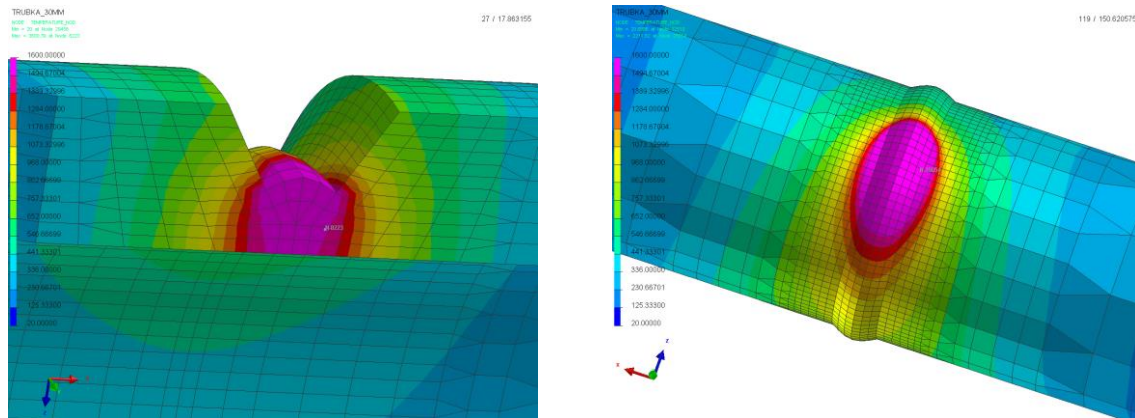
Obr. 6-2 – Výsledný model vytvořený rotací části průřezu a zrcadlením.

6.2. Zadání parametrů svařování

Pro zadání parametrů svařování byly použity průměrné parametry naměřené během svařování kontrolního kusu. Z doby svařování každé housenky byla spočítána průměrná rychlost svařování. Zadáním těchto hodnot do programu společně s definicí trajektorie svařování, uchycení a okolního prostředí je možné svařovací proces nasimulovat.

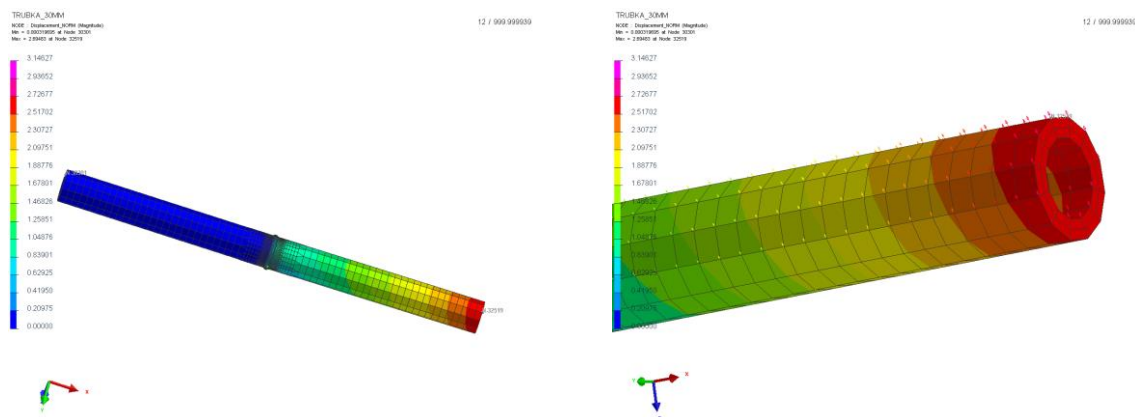
6.3. Výsledky numerické simulace

Pro práci s výsledky numerické simulace je uzpůsoben program Visual Viewer. V něm je možno zobrazovat výsledky v kterémkoli čase simulace. Je možno zobrazit nestacionární teplotní pole, napětí, deformace, gradienty jednotlivých veličin, predikci tvrdosti, procentuální složení fází a mnoho dalších. Vyhodnocování simulací je bohužel velmi náročná činnost, ať z pohledu zkušeností, tak i času, takže by v rámci této práce nebylo možné využít a detailně popsat všechny možnosti tohoto programu. Pro zjednodušení bylo pro ukázkou vybráno zobrazení teplotního pole a výpočet deformací svařence. Teplotní pole zobrazuje Obr. 6-3. Fialovou barvou je znázorněna svařová lázeň během svařování. Teplotní pole je nestacionární a je možné ho sledovat po celou dobu svařovacího procesu i po jeho ukončení. Díky tomu je umožněno sledovat též rychlost ochlazování a tím lokalizovat místa, kde je ochlazování nebezpečně rychlé a hrozil by vznik křehkých tvrdých fází případně trhlin.



Obr. 6-3 – Zobrazení rozložení teplot při svařování 1. (vlevo) a 3. housenky (vpravo). Trubka vlevo je zobrazena v řezu rovinou xz v axiálním směru


Obr. 6-4 znázorňuje deformace svařence. Deformace se počítají od nulového bodu, který leží na modře zbarveném konci svařence. Celková deformace spočítaná programem je 2,69 mm, což koresponduje s reálným měřením. Na kontrolním kusu byla naměřena deformace 2,5 mm. Výstupní hodnoty deformací jsou poměrně přesné a mohou vypomoci konstruktérům při konstrukci složitějších svařenců. Díky těmto výsledkům mohou být místa s největšími deformacemi nalezena ještě před samotným započítáním svařování a těmto deformacím následně předejít změnou konstrukce nebo technologií svařování. Zejména u velkých konstrukcí mohou simulace ušetřit mnoho prostředků.



Obr. 6-4 – Zobrazení deformací. Vpravo detail s vektory deformace jednotlivých bodů.

7. Vypracované WPS

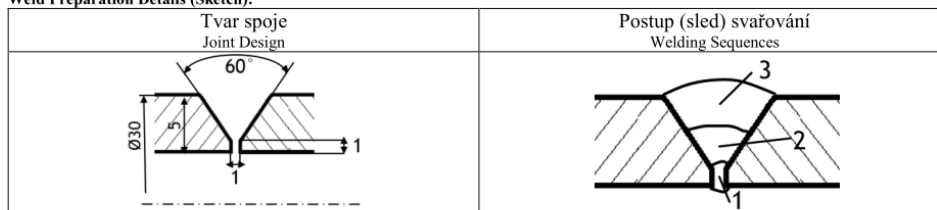
Na základě provedených zkoušek a jejich vyhodnocení (WPQR) byly vypracovány WPS pro oba spoje (Obr. 7-1 a Obr. 7-2). WPS obsahuje informace o základním materiálu, použité technologii, druhu svaru včetně nákresu svarových ploch a postupu kladení housenek, parametry svařování pro jednotlivé housenky, druh ochranného nebo formovacího plynu, přídavný materiál a použitá svařovací zařízení. WPS kvalifikuje firmu TS Plzeň a.s. ke zhotovování svarových spojů dle této specifikace a je zároveň zárukou kvality pro případné zákazníky.

	Specifikace svařovacího postupu		Číslo dokladu WPS: WPS Reference № : WPS_1
	WPS		Číslo dokladu WPQR: WPQR Reference № : WPQR_1
Místo: Location:		Plzeň	Zkušební orgán: Examiner:
			TS Plzeň a.s.

Postup svařování výrobce:
Manufacturer's Welding Procedure:

Způsob přípravy a čištění: Method of Preparation and Cleaning:	Řezání, strojní úkosování, odmaštění		
Výrobce: Manufacturer:	TS Plzeň a.s.	Specifikace zákl. mater.: Parent Material Specification:	S355J2H
Jméno svařeče: Welder's Name:	Bendík Jozef	Tloušťka součásti [mm]: Material Thickness [mm]:	5
Svařovací proces: Welding Process:	141 (TIG)	Vnější průměr [mm]: Outside Diameter [mm]:	30
Druh svaru: Joint Type:	V-svar (jednostranný)	Poloha svařování: Welding Position:	PA

Údaje k přípravě úkosu (výkres):
Weld Preparation Details (Sketch):



Podrobné údaje ke svařování:
Welding details:


Housenka Run	Proces Process	Prům. příd. mat. Size of Filler Mat.	Proud [A] Curr. [A]	Napětí [V] Volt [V]	Druh proudu polar. Type of Curr. - polar.	Posuv drátu Wire Feed Speed	Rychlost posuvu *) Travel Speed *)	Tepelný příkon *) Heat Input *)
1	141	1,6	70-100	12 - 14	DC - =	---	2,8	---
2	141	2	130-150	14 - 16	DC - =	---	3,3	---
3	141	2	130-160	14 - 16	DC - =	---	2,4	---

Přídavný mat. – značka, zařazení: Filler Metal Classif., Trade Name:	ESAB GI 113, EN 1668		
Zvláštní předpisy pro sušení: Any Special Backing or Drying:			
Plyn – tavidlo: Gas - Flux:		Průtok plynu: Gas, Flow Rate:	6-8 l/min
Ochranný plyn: Shielding:	Argon 4.6	Ochranný plyn: Shielding:	---
Ochrana kořene: Backing:	Formovací plyn NH10	Ochrana kořene: Backing:	---
W elektr./typ, průměr Tungsten Electr.-Type, Size	WT 20; 2,4	Další informace *): Other Information *):	---
Údaje o drážkování/ochraně kořenu: Details of Back gouging/Backing:	---	Rozkvy (max. š. housenky) Eg. Weaving (max. width of run)	10 mm
Teplota předehřevu: Preheat Temperature:	---°C	Oscilace/amplituda, frekvence, doba prodlevy: Oscill./Amplit., Freq., dwell time	---
Teplota interpassu: Interpass temperature:	---	Údaje o puls. svařování: Pulse welding date:	Pulsy dlouhé, 5-6sec.
Tepelné zpracování / vytvrzování: Post. Weld Head Heatment/ Ageing	---	Vzdálenost kontakt. dýzy: Stand off Distance:	5
Doba, teplota, postup: Time, Temperature, Method:	---	Svařovací zařízení: Welding Machine:	KEMPP, PS 3500/ FV 20/TU 20

*) pokud je požadováno, If Required

Výrobce: Manufacturer:	TS PLZEŇ a.s.	Zkušební orgán: Examiner:	Ing.KRAFT Jaroslav,EWE
Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	NOVÝ Zdeněk,EWT	Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Ing.KRAFT Jaroslav,EWE

Obr. 7-1 – WPS pro svařování trubky Ø30mm

	Specifikace svařovacího postupu	Číslo dokladu WPS: WPS Reference № : WPS_2
	WPS Manufacturer's Weldings Procedure Specification	Číslo dokladu WPQR: WPQR Reference № : WPQR_2

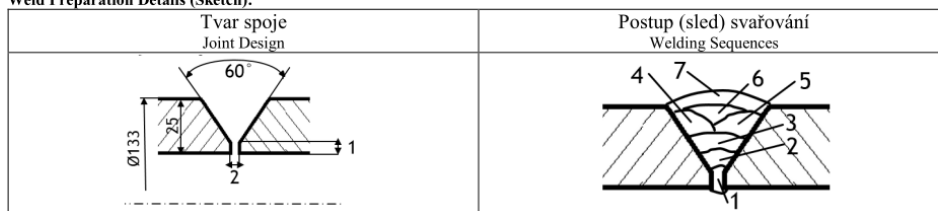
Místo: Location:	Plzeň	Zkušební orgán: Examiner:	TS Plzeň a.s.
---------------------	-------	------------------------------	---------------

Postup svařování výrobce:
Manufacturer's Welding Procedure:

Způsob přípravy a čištění: Method of Preparation and Cleaning:	Řezání, strojní úkosování, odmaštění		
Výrobce: Manufacturer:	TS Plzeň a.s.	Specifikace zákl. mater.: Parent Material Specification:	S 355J2H
Jméno svařeče: Welder's Name:	Bendík Jozef	Tloušťka součásti [mm]: Material Thickness [mm]:	25
Svařovací proces: Welding Process:	111 (MMA)	Vnější průměr [mm]: Outside Diameter [mm]:	133
Druh svaru: Joint Type:	V-svar (jednostranný)	Poloha svařování: Welding Position:	PA

Údaje k přípravě úkosu (výkres):

Weld Preparation Details (Sketch):



Podrobné údaje ke svařování:

Welding details:

Housenka Run	Proces Process	Prům. příd. mat. Size of Filler Mat.	Proud [A] Curr. [A]	Napětí [V] Volt [V]	Druh proudu polar. Type of Curr. - polar.	Posuv drátu Wire Feed Speed	Rychlost posuvu *) Travel Speed *)	Tepelný příkon *) Heat Input *)
1	111	2,5	70-90	23	DC + =	---	4	---
2-3	111	2,5	80-100	24	DC + =	---	4	---
4-5	111	3,2	120-140	25	DC + =	---	5	---
6-7	111	4	150-170	26	DC + =	---	6	--

Přídavný mat. – značka, zařazení: Filler Metal Classif., Trade Name:	ESAB OK 48.00, ČSN EN 499		
Zvláštní předpisy pro sušení: Any Special Backing or Drying:	Elektrody přesušit - 350 °C po dobu 2hod		
Plyn – tavíadlo: Gas - Flux:	---	Průtok plynu: Gas, Flow Rate:	---
Ochranný plyn: Shielding:	---	Ochranný plyn: Shielding:	---
Ochrana kořene: Backing:	---	Ochrana kořene: Backing:	---
W elektr./typ, průměr Tungsten Electr.-Type, Size	---	Další informace *): Other Information *):	---
Údaje o drážkování/ochraně kořenu: Details of Back gouging/Backing:	---	Rozkvy (max. š. housenky) Eg. Weaving (max. width of run)	30 mm
Teplota předehřevu: Preheat Temperature:	150-200 °C	Oscilace/amplituda, frekvence, doba prodlevy: Oscill./Amplit., Freq., dwell time	---
Teplota interpassu: Interpass temperature:	---	Údaje o puls. svařování: Pulse welding date:	---
Tepelné zpracování / vytvrzování: Post. Weld Head Heatment/ Ageiging	---	Vzdálenost kontakt. dýzy: Stand off Distance:	---
Doba, teplota, postup: Time, Temperature, Method:	---	Svařovací zařízení: Welding Machine:	WTU 315

*) pokud je požadováno, If Required

Výrobce: Manufacturer:	TS PLZEŇ a.s.	Zkušební orgán: Examiner:	Ing.KRAFT Jaroslav,EWE
Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	NOVÝ Zdeněk,EWT	Jméno, datum, podpis: Name, Date, Signature:	Ing.KRAFT Jaroslav,EWE.

Obr. 7-2 - WPS pro svařování trubky Ø133mm

8. Technicko-ekonomické hodnocení

Obě technologie svařování byly podrobeny technicko-ekonomickému hodnocení. Kalkulace byla provedena na základě údajů poskytnutých společností TS Plzeň a.s. a ceníků přídatných materiálů ESAB a ochranných plynů LINDE. Výpočet nákladů je možno rozdělit do tří kategorií:

- Mzdové a režijní náklady na svářeče (N_{mz})
- Náklady na přídatný materiál (N_{pm})
- Náklady na ochranné plyny (N_{op}) [29]

Mzdové a režijní náklady na svářeče:

$$N_{mz} = \frac{HS}{P_{tav} \cdot t_{využ}} [Kč/kg]$$

HS – hodinová sazba svářeče [Kč/kg]. Podle interního ceníku TS Plzeň je HS 650Kč/h

P_{tav} – výkon vytavení svarového kovu [kg/h]. Výkon vytavení je závislý na použité technologii svařování a na svařovacích parametrech. Pro svařování metodou TIG byla výpočtově stanovena hodnota 0,5 kg/h a 2,2 kg/h pro metodu 111.

$t_{využ}$ – časové využití fondu pracovní doby pro svařování. U ručního svařování se tento ukazatel pohybuje v rozmezí 25-30%. Pro výpočet je uvažována hodnota 25%. [29]

$$N_{mz\ 141} = \frac{650}{0,5 \cdot 0,25} = 5200\ Kč/kg$$

$$N_{mz\ 111} = \frac{650}{2,2 \cdot 0,25} = 1180\ Kč/kg$$

Náklady na přídatný materiál:

$$N_{pm} = \frac{C_{sv}}{V_{sv}} [Kč/kg]$$

C_{sv} – cena přídatného materiálu [Kč/kg]. Ceny přídatných materiálů byly zjištěny podle aktuálního ceníku ESAB. Kilogram přídatného materiálu pro svařování MMA (OK 48.00) se pohybuje kolem 100Kč/kg a pro metodu TIG (GI 113) kolem 160Kč/kg. Tyto hodnoty byly uvažovány pro výpočet.

V_{sv} – využití přídatného materiálu. Závisí na použité technologii a šikvosti svářeče. Pro výpočet je uvažována hodnota 90%. [26] [29]

$$N_{pm\ 141} = \frac{160}{0,9} = 178\ Kč/kg$$

$$N_{pm\ 111} = \frac{100}{0,9} = 112\ Kč/kg$$

Náklady na ochranné plyny (pouze TIG):

$$N_{op} = \frac{Q_{plyn} \cdot C_{plyn}}{P_{tav}} \text{ [Kč/kg]}$$

Q_{plyn} – průtočné množství ochranného plynu [l/h]. Při svařování byl průtok plynu 6-8l/min. Pro přepočítání na hodiny byla použita horní hranice tj. 60x8=480l/h

C_{plyn} – cena ochranného plynu [Kč/l]. Podle ceníku Linde Gas a.s. je cena za 50l lahev plynu Argon 4.6 3800Kč. Objemový zisk je 10,3m³ tj. 10300l. Cena jednoho litru je tedy 0,37Kč.

P_{tav} – výkon vytavení [kg/h] [29]

$$N_{op\ 141} = \frac{480 \cdot 0,37}{1} = 178 \text{ Kč/kg}$$

Celkové náklady:

$$CN_{141} = N_{mz\ 141} + N_{pm\ 141} + N_{op\ 141} = 5556 \text{ Kč/kg}$$

$$CN_{111} = N_{mz\ 111} + N_{pm\ 111} = 1292 \text{ Kč/kg}$$

Objem vytaveného kovu je možno spočítat buď ručně podle příslušných vzorců, nebo využít model pro numerickou simulaci, který s tímto objemem pracuje a dá se v programu snadno zobrazit:

$$V_{tav\ 141} = 1,52 \text{ cm}^3$$

$$V_{tav\ 111} = 168,25 \text{ cm}^3$$

Hmotnost svarového kovu:

$$m_{tav\ 141} = V_{tav\ 141} \cdot \rho_{ocel} = 0,0116 \text{ kg}$$

$$m_{tav\ 111} = V_{tav\ 111} \cdot \rho_{ocel} = 1,3124 \text{ kg}$$

Náklady na jeden svar:

$$C_{sv\ 141} = 0,0116 \cdot 5556 = 64 \text{ Kč}$$

$$C_{sv\ 111} = 1,3124 \cdot 1292 = 1695 \text{ Kč}$$

Z uvedené kalkulace je patrné, že použitá technologie zásadně ovlivňuje náklady na jednotkovou hmotnost vytaveného kovu a tím i náklady celého procesu svařování. Velmi významným parametrem, který se projeví na výsledné ceně, je časové využití svářečů. To ovšem závisí na opakovatelnosti výroby a lepšího využití by se dosáhlo jen u výroby sériové. Cenu za ochranné plyny je možné snížit centrálním rozvodem.

9. Závěr

Diplomová práce se zabývala svařováním vysokotlakého potrubí hydraulických lisů. Cílem bylo navrhnout technologii svařování pro 2 typy potrubí o průměrech 30mm a 133mm z materiálu S355J2H. Pro \varnothing 30mm byla použita svařovací technologie TIG, pro \varnothing 133mm ruční svařování obalenou elektrodou. Kvalita kontrolních svarových spojů byla ověřena mechanickými a technologickými zkouškami společně s pozorováním makro a mikrostruktury svarů.

Teoretická část práce nabízí obecný úvod do svařování s rozdělením jednotlivých metod svařování a s detailnějším popisem metod použitých pro řešení diplomové práce. Dále přibližuje jednotlivé zkoušky svarových spojů a jejich hodnocení. V závěru teoretické části je stručný úvod do numerických simulací svařovacích procesů.

Experimentální část popisuje použitá svařovací zařízení a přípravky pro svaření kontrolních spojů a obsahuje výsledky provedených zkoušek s detailním zaměřením na studium makrostruktury, mikrostruktury a průběhu tvrdosti napříč svarovými spoj. Makrostrukturní snímky poskytly celkový pohled na příčný výbrus svarového spoje a nebyly na nich pozorovány žádné vady. Mikrostrukturní pozorování bylo zaměřeno na studium změn mikrostruktury v okolí svarových spojů, a na identifikaci fázového složení. Kontrolní svarové spoje vyhovely všem provedeným zkouškám podle příslušných norem v nejvyšším stupni kvality a na základě těchto zkoušek byly vypracovány příslušné WPS, které kvalifikují navržené postupy svařování pro oba typy potrubí.

Numerická simulace navrženého procesu svařování byla provedena pro trubku \varnothing 30mm a byly hodnoceny deformace a teplotní pole během svařování. Výsledná vypočtená deformace svařené trubky se shodovala s reálně změřenou deformací po svaření kontrolního kusu. Numerická simulace může být vhodným pomocníkem při návrhu svařenců nebo při hledání optimálního svařovacího procesu. Numerické simulace mají velký potenciál do budoucna a s dalším vývojem výkonnějších počítačů jejich význam jen poroste.

Technicko-ekonomické hodnocení rozkládá náklady svařovacího procesu na dílčí části a kalkuluje náklady na jednotkovou hmotnost vytaveného svarového kovu. Podle aktuálních cen mezd, přídatného materiálu a ochranných plynů jsou pak spočítány náklady na výrobu obou svarových spojů.

Navržené technologie svařování splňují všechny požadavky a mohou být tedy zavedeny do výroby.

10. Reference

- [1] **Suchánek, J. a Kolařík, L.** Quo vadis, svařování? *MM Průmyslové spektrum*. 2014, 1,2.
- [2] **TS Plzeň a.s.** Podniková dokumentace TS Plzeň a.s.
- [3] **TS Plzeň a.s. [Online] 2013.** <http://www.tsplzen.cz/>.
- [4] **Ambrož, Oldřich, Kandus, Bohumil a Kubiček, Jaroslav.** *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava : Česká svářečská společnost ANB, 2011.
- [5] **ČSN EN ISO 4063.** *Svařování a příbuzné procesy - Přehled metod a jejich číslování*.
- [6] **Svářecí inventory.** *Svarinfo.cz*. [Online] [Citace: 6. 11 2013.] <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2006092101>.
- [7] **Minařík, V.** *Přehled metod svařování*. Ostrava : Zeross, 1998.
- [8] **ČSN EN ISO 14175.** *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*.
- [9] **ARC-H.** [Online] [Citace: 12. 3 2014.] <http://www.arc-h.cz/>.
- [10] **Kovařík, R. a Černý, F.** *Technologie svařování*. Plzeň : ZČU, 2000.
- [11] **Novák, Petr.** *Návrh optimální technologie svařování nápravnice*. Plzeň : ZČU, 2011.
- [12] **Foldyna, Václav a kol., a.** *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava : Zeross, 1999.
- [13] **ČSN EN 1011-1.** *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*.
- [14] **Barták, J., a další.** *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava : ZEROSS, 2002.
- [15] **Schwarz, D.** Hodnocení svarových spojů. *Svět svaru*. 2009, Sv. 2.
- [16] **Kolařík, L.** *Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, 2012.
- [17] **ČSN EN ISO 5173.** *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušky ohybem*.
- [18] **ČSN EN ISO 17639.** *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*.
- [19] **Kříž, R. a Vávra, P.** *Strojírenská příručka, svazek 8*. Praha : SCIENTIA, 1998.
- [20] **Holub, L. a Novosád, D.** *Monitorování svařovacího procesu, ověření teplot numerické simulace svařovacího procesu pomocí WIS (welding information system)*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2013.

- [21] **Slováček, M.** Numerické simulace svařování a tepelného zpracování. *MM Průmyslové spektrum*. 2008, 10.
- [22] **Duranton, P., a další.** 3D modelling of multipass welding of 316L stainless steel pipe. *ELSEVIER Journal of Materials Processing Technology*. 2004.
- [23] **Dohnal, I.** *Numerická simulace svařování lopatky a rotoru turbíny*. Brno : České vysoké učení v Brně, 2010.
- [24] **Durajová, V.** *Numerická simulace navařování rotoru turbíny*. Brno : České vysoké učení v Brně, 2010.
- [25] **ESI GROUP.** *Visual-Weld v7.5 Basic training*. : ESI GROUP, 2011.
- [26] **ESAB.** katalog ESAB. 2013.
- [27] [Online] [Citace: 12. 4 2014.] http://www.mr-chemie.de/en/products/penetrant_testing/red_dye/.
- [28] [Online] [Citace: 13. 4 2014.] <http://www.ttu.ee/faculty-of-mechanical-engineering/departament-of-materials-engineering/rd/equipment/>.
- [29] **Novák, S. a Mráček, J.** *Parametry, které ovlivňují náklady na svařování.*: První železářská společnost Kladno.