

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Technologie svařování tlustostěnných svarů s ohledem na detekci vad

Autor: **Adam STEHLÍK**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

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 BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Stehlík	Jméno Adam	
STUDIJNÍ OBOR	B2301Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Technologie svařování tlustostěnných svarů s ohledem na detekci vad		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2018
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	57	TEXTOVÁ ČÁST	57	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Tato práce se zabývá technologií tlustostěnných svařenců, resp. jejím porovnáním se svařenci běžných tloušťek. Rešeršní část pojednává o vhodnosti použití jednotlivých svařovacích metod, výskytu vad a detekce vad v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu. V experimentální části jsou pozorovány rozdíly ve struktuře tenkých a tlustých svarů. Dále je sledován vliv vad na mechanické vlastnosti svarových spojů. Pro pozorování vlivu vad je využito ultrazvukové zkoušky, zkoušky tahem a světelné mikroskopie.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	vady ve svarech, tlustostěnné svařence, NDT, ultrazvuková zkouška

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Stehlík	Name Adam	
FIELD OF STUDY	B2301 – Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST – KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Welding technology of thick-walled weldments associated with detection of flaws		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2018
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	57	TEXT PART	57	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this work is to examine the technology of thick-walled weldments. We mainly focus on the comparison between thick-walled welds and common thickness welds. The theoretic part of this work deals with suitability of application of different welding techniques, flaw occurrence and flaw detection depending on the thickness of the weld. In the experimental part we observed structure differences between thin and thick welds. In the next step we observed the influence of flaws on mechanic properties of weldments. For the observation of flaws we used ultrasonic testing, tensile test and light microscopy.
KEY WORDS	Flaws in welds, thick-walled welds, NDT, ultrasonic testing

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Petru Benešovi, Ph. D. a odbornému konzultantovi panu Ing. Jiřímu Hodačovi. Oběma děkuji za velikou trpělivost, strážlivý a optimistický přístup.

Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům CV Řež v Plzni za zcela zásadní pomoc v experimentálním programu.

Obsah

1	Úvod.....	4
2	Tavné svařování.....	4
2.1	Obloukové svařování.....	4
2.1.1	Ruční svařování obalenou elektrodou.....	5
2.1.2	Svařování v ochranných atmosférách MIG, MAG.....	5
2.1.3	TIG(WIG).....	5
2.1.4	Automatizované podtavidlové svařování.....	6
2.2	Plamenné svařování.....	6
2.3	Elektrostruskové svařování.....	6
2.4	Aluminotermické svařování.....	7
2.5	Elektronové svařování.....	7
2.6	Laserové svařování.....	8
2.7	Svařování plazmatem.....	9
3	Svařování za pomoci tlaku a tepla.....	10
3.1	Odporové svařování.....	10
3.2	Třecí svařování.....	10
3.3	Difuzní svařování.....	11
3.4	Ultrazvukové svařování.....	11
4	Srovnání technologických postupů pro tenkostěnné a tlustostěnné svařence.....	12
4.1	Spoje a svarové plochy (úkosy).....	12
4.2	Vnesené teplo.....	13
4.3	Vliv vnitřních napětí a deformace.....	14
4.4	Eliminace deformací a vnitřního pnutí.....	15
5	Vady ve svarech.....	17
5.1	Typy vad.....	17
5.1.1	Trhliny.....	18
5.1.2	Dutiny.....	20
5.1.3	Vměstky (inkluze).....	21
5.1.4	Vady odtavování a záváru.....	21
5.1.5	Vady tvaru.....	22
5.2	Výskyt vad v závislosti na tloušťce svaru.....	22
6	Defektoskopie svarů.....	23
7	Zkouška ultrazvukem.....	23
7.1	Zdroje ultrazvukových vln.....	24

7.2	Metody ultrazvukových měření	24
7.2.1	Průchodová metoda.....	24
7.2.2	Odrazová metoda	25
7.3	Detekce vad.....	25
7.4	Ultrazvuková zobrazení	26
7.5	Technika Phased Array	27
8	Úvod do experimentální části	29
9	Porovnání masivního a tenkého svaru	31
10	Výroba realistických vad	33
10.1	Neprůvar v úkosech	33
10.2	Neprůvar kořene.....	33
10.3	Struskový vměstek	33
10.4	Praskání při tuhnutí (solidification cracking).....	33
11	Nedestruktivní zkoušky.....	34
11.1	Vizuální zkouška.....	34
11.2	Ultrazvuková zkouška.....	36
12	Tahová zkouška	40
12.1	Zařízení pro tahovou zkoušku.....	40
12.2	Průběh a výsledky tahové zkoušky	40
12.3	Vyhodnocení lomových ploch	42
12.3.1	Vzorky s oxidickými vměstkami – Okuje.....	42
12.3.2	Vzorky s porezitou (snížená ochrana argonem).....	44
12.3.3	Vzorky se struskovými vměstkami	45
12.3.4	Vzorky bez vad	46
13	Metalografická pozorování	47
13.1	Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii	47
13.2	Vzorek č. 3 –TIG (dle WPS) – bez vad	48
13.3	Vzorek č. 5 – Plamen (dle WPS) - Okuje	49
13.4	Vzorek č. 7 – Obalovaná elektroda (dle WPS) - vměstky	50
13.5	Vzorek č. 12 – nesvařovaný materiál.....	52
13.6	Vzorek č. 11 – TIG (jiný příd. mat.).....	52
13.7	Vzorek č. 18 - Plamen (jiný příd. mat.).....	54
14	Diskuze výsledků.....	54
15	Závěr	57
	Citovaná literatura.....	58

Seznam použitých zkratk a jednotek

obr. – obrázek

tab. - tabulka

tzv. – tak zvaný

pozn. – poznámka

apod. – a podobně

tj. – to je

např. – například

atd. – a tak dále

NDT – non destructive testing

WPS - Welding Procedure Specification

TIG - Tungsten Inert Gas

EDM - Electrical Discharge Machining

TOO – teplotně ovlivněná oblast

Jednotky

MPa – megapascal

kN – kilinewtony

MHz – megahertz

°C – stupně celsia

mm – milimetry

μm – mikrometry

s – sekundy

min. - minuty

1 Úvod

V této práci je řešena problematika tlustostěnných svařenců se zaměřením na detekci vad. Práce se skládá ze dvou hlavních částí z teoretické a Praktické (experimentální).

V teoretické části této práce je pojednáno o svařovacích metodách a jejich vhodnosti použití v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu. Dále jsou v této práci popsány rozdíly mezi tlustostěnnými a tenkostěnnými svařenci. V následujícím oddíle jsou popsány vady vznikající vlivem svařování. Je zde popsán jejich tvar, místo výskytu, příčiny vzniku, popř. při jaké metodě nebo u jakého materiálu vady vznikají. Poslední oddíl rešerše se týká detekce vad pomocí NDT metod. Tato práce se konkrétně zabývá ultrazvukovým zkoušením materiálu.

Praktická část je rozdělena na dva experimenty. V prvním experimentu jsou sledovány rozdíly mezi tlustostěnnými a tenkostěnnými svařenci na dvou konkrétních vzorcích. Druhý experiment se zabývá vlivem různých vad na mechanické vlastnosti svarového spoje a jejich detekci pomocí NDT metod zkoušení svarů. Vzorky svařované různými svařovacími metodami jsou podrobeny vizuální zkoušce, ultrazvukové zkoušce a tahové zkoušce. S následně provedenou metalografií na světelném mikroskopu.

2 Tavné svařování

Jedná se o způsob svařování, při kterém dojde ke spojení svařovaných součástí místním roztavením přídavného a základního materiálu. V případě některých technik tavného svařování pouze základního materiálu (např. elektronové, laserové svařování). A to výhradně při přívodu tepla do svařovaných součástí.

2.1 Obloukové svařování

Je velmi rozšířená technologie svařování se spoustou modifikací. K natavení základního materiálu využívá tepelné energie elektrického svařovacího oblouku, který hoří mezi základním materiálem a elektrodou. Elektrický oblouk je výboj v plynech. Jeho výkon, geometrický tvar a teplotu je možné rozsáhle měnit podle technologických požadavků. [1, 2].

2.1.1 Ruční svařování obalenou elektrodou

Elektrodu tvoří jádro (drát) a obal. Obal se skládá ze směsi struskotvorných, plynotvorných, legujících prvků a na jádro elektrody bývá nejčastěji nalisován. Obal elektrody působí na svařování [2]:

- Fyzikálně – utváří tvar svarové lázně
- Metalurgicky – brání vstupu nežádoucích prvků z atmosféry
- Elektricky a ionizačně – zlepšuje stabilitu hoření a ionizaci v úkosech

Dle chemického složení obalu elektrody lze svařovat v různých polohách (bazické, rutilové), anebo pouze na rovině (kyselé). Tato technologie je vhodná pro svařování tenkostěnných svařenců (plechy, nosníky, jekly). Výhodou této technologie je mobilita. Proto se dá jednoduše použít i v exteriéru.

2.1.2 Svařování v ochranných atmosférách MIG, MAG

Tyto technologie se mohou vyskytovat v různých stupních mechanizace (poloautomaty, automaty, mechanizované i robotické modifikace). Patří k velmi rozšířeným způsobům svařování. Základním principem těchto technologií je svařování elektrodou za spolupůsobení ochranné atmosféry, která přispívá k lepšímu průběhu svařování a utváření svaru. Oblouk hoří mezi základním materiálem a elektrodou. Elektroda je v tomto případě holý drát. Obě metody jsou v podstatě stejné rozdíl je pouze v ochranném plynu [2].

- **MIG (Metal Inert Gas)** – V tomto případě ochranný plyn nijak nevstupuje do samotného procesu svařování, slouží pouze jako ochrana svarové lázně. Plyny využívané při této technologii Ar, He.
- **MAG (Metal ActiveGas)** – U tohoto způsobu svařování plyn chrání svarovou lázeň a zároveň přispívá k utváření svaru formování svarové housenky, čistotě a metalurgickým pochodům lázně. Jako aktivní ochranný plyn je nejčastěji využíván CO_2 .

2.1.3 TIG(WIG)

Jedná se o svařování v ochranných atmosférách za pomoci netavné elektrody. Svarová lázeň je v tomto případě chráněná inertními plyny. Elektrický oblouk hoří mezi

základním materiálem a wolframovou netavicí se elektrodou. Přídavný materiál je dodáván ze strany (ručně nebo automaticky) a to ve formě drátu, pásky, tyčinky [2].

Uvedené způsoby jsou vhodné pro svařování různých materiálů např.: konstrukčních ocelí, neželezných kovů (TIG, MIG), vysoce legovaných ocelí (TIG, MIG). V případě metody TIG je možné svařovat slitiny hliníku, hořčíku a titanu, které jsou jinak velmi těžce svařitelné, jelikož velmi rychle na povrchu oxidují. U této metody je zaručen dobře provařený kořen, proto se s oblibou využívá pro svařování tlakových nádob nebo v energetice. Touto metodou lze provádět svary běžných tloušťek i velice malé svary. Metody MIG a MAG jsou vysoce produktivní při výrobě do tl. 25 mm [2].

2.1.4 Automatizované podtavidlové svařování

Oblouk hoří mezi základní materiálem a přídavným materiálem (drát, páska) pod vrstvou tavidla. Přídavný materiál se společně s tavidlem natavuje. Tavidlo přechází ve strusku, která má nižší hmotnost než svarový kov, vyskytuje se proto na povrchu svarové lázně, kde pozvolna tuhne a utváří tím uzavřený prostor, který je vyplněný plyny sloužící jako ochrana svaru proti nepříznivým vlivům atmosféry. Tento způsob svařování je vysoce produktivní a zaručuje vysokou kvalitu svarového spoje. Při svařování masivních svařenců je vhodné využít metody úzkomezerového svařování. Kladem této metody je nízká spotřeba el. energie a snížení vnitřních napětí. Svařování je vhodné pro masivní svařence [2].

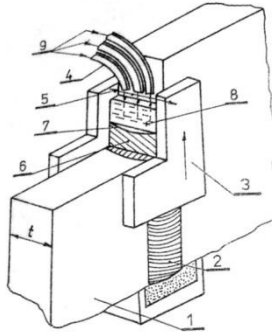
2.2 Plamenné svařování

Zdrojem tepla je plamen, který vzniká při hoření směsi kyslíku a hořlavého plynu nejčastěji acetylenu. Lze využít i jiných plynů např. Propan, Propan-Butan, MAPP (uměla plynná směs). Plamen natavuje přídavný a základní materiál do předem připravených svarových ploch. Přídavný materiál je holý drát podobného nebo stejného chemického složení jako základní materiál. Tento způsob je vhodný zejména pro svařování plechů do tloušťky 4 mm. Dále svařování drobných součástí z oceli, šedé litiny, mosazi či mědi. [3]

2.3 Elektrostruskové svařování

Tavné teplo vzniká průchodem el. proudu roztavenou struskou. Jedná se převážně o svařování ve vertikální poloze. Svar je formován pomocí měděných příložek chlazených

vodou. Výsledný svar se vyznačuje pórovitostí, a to v místech počátku a konce svařování. Tyto části je nutno odstranit. Výhodou je ta skutečnost, že není třeba nijak upravovat svarové plochy. Tato technologie je spíše vhodná pro svařování velikých svařenců. Nevhodná pro svařování svařenců malé tloušťky [2].



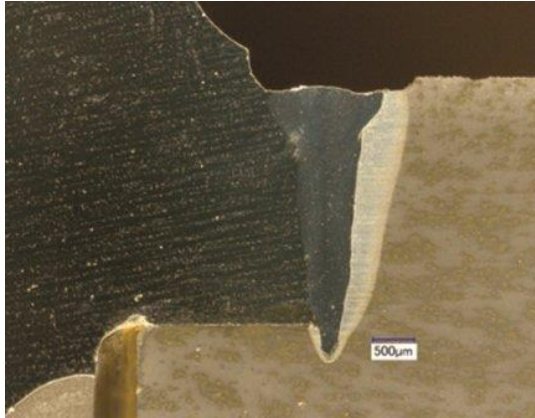
Obr. 1 Popis technologie elektrostruskového svařování: 1) základní materiál 2) svarový kov 3) měděné příložky 4) svařovací hubice 5) pohyb hubic 6) svarová lázeň 7) povrch svarové lázně 8) roztavená struska 9) přídavný materiál [2]

2.4 Aluminotermické svařování

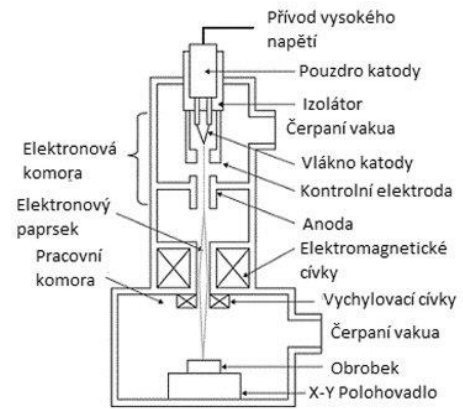
Využívá se směsi oxidů železa či jiného kovu a krupicového práškového hliníku. Tato směs (aluminotermická směs) se lokálně zahřeje na teplotu cca 1000 °C, tím dojde k jejímu zapálení. Dochází k exotermické reakci oxidů železa a hliníku, tím vzniká tekutý přehřátý kov a struska. Tento způsob svařování se využívá ke svařování kolejnic nebo v opravárenství. Našel též využití ve stavebnictví, a to ve svařování betonových výztuží či stavbách dilatačních mostů. Tato technologie je spíše vhodná pro svařování svařenců větších tlouštěk [4].

2.5 Elektronové svařování

Jedná se o proces, který využívá přeměnu kinetické energie elektronů na energii tepelnou při neelastické interakci elektronového paprsku s kovem ve velice úzké zóně (0,3 - 2,0 mm). Téměř veškerá kinetická energie se přemění na teplo, které nataví oba materiály, jež po ztuhnutí utvoří svarový spoj bez působení tlaku. Svarový spoj je velmi úzký a má též i velmi úzké pásmo tepelně ovlivněné oblasti. Při dopadu primárního svazku elektronů nevzniká pouze teplo. Vznikají též sekundární elektrony, které je možné využít k zobrazení procesu. Také vzniká RTG záření, jehož je možné využít ke zjištění chemického složení svaru. Touto metodou lze provádět svařování homogenních a heterogenní spojů, ale též je možné spojovat kovové a nekovové materiály, provádět povrchové zpracování či legování povrchu materiálů [2,5].



Obr. 2 Heterogenní spoj uhlíkové oceli a niklové slitiny [5]



Obr. 3 Zařízení pro svařování elektronovým paprskem [5]

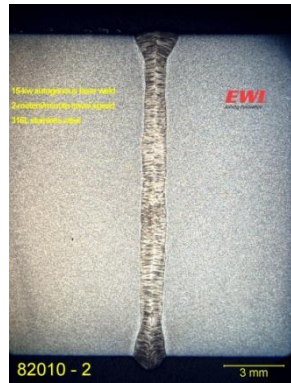
2.6 Laserové svařování

Teplo potřebné k natavení vzniká při absorpci světelného záření v základním materiálu, přičemž dochází k přeměně světelné energie na tepelnou energii. Svařování nebo dělení se provádí tzv. principem protavování. Výhodou této svařovací technologie je vysoká koncentrace tepelné energie a mále množství vneseného tepla. Tloušťka laserového paprsku dosahuje jen několika setin milimetrů. [2]

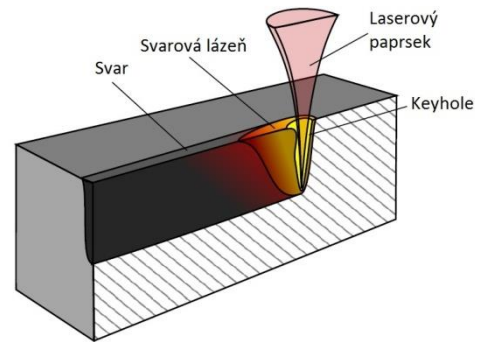
Rozdělení laserů podle typu aktivního prostředí, tedy prostředí, ve kterém dochází k vyzařování fotonů:

- **Pevnolátkové:** - aktivní prostředí tvoří pevné krystalické nebo amorfnní látky (YAG laser)
- **Plynové:** - aktivním prostředím je plyn nebo směs plynů (Helium-neonový, dusíkový, CO₂)
- **Kapalinové**

Svařování laserem je vhodné pro svařování velmi tenkých svařenců (fólií), ale též i silných svařenců. Lze též svařovat materiál s vysokou tepelnou a chemickou odolností a různé materiály se speciálními fyzikálními vlastnostmi. Laserem lze též velmi dobře tepelně dělit materiál, a to opět jak velmi tenký, tak i silný. [2]



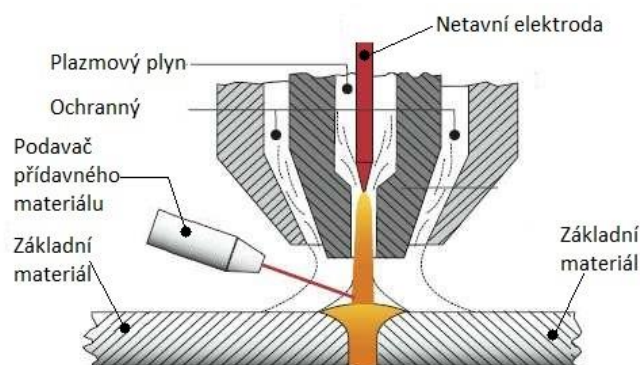
Obr. 4 Svar provedený laserem [6]



Obr. 5 Způsob svařování odtavováním [7]

2.7 Svařování plazmatem

Tato metoda vznikla vývojem metody TIG. Zdrojem tepla je paprsek plazmy, který vystupuje pod vysokou rychlostí z plazmové trysky. Plazma vzniká disociací molekul plazmového plynu. Tato metoda využívá dynamického účinku plazmy a koncentrace tepla, to způsobuje zúžení oblouku a vzniku velmi vysoké koncentrace energie za vysoké pracovní teploty. Plazmové svařování lze rozdělit na tři skupiny mikroplazmové, středněplazmové a svařování klíčovou dírkou. Pomocí mikroplazmového svařování lze svařovat fólie o tloušťce 0,06 – 1 mm. Při svařování klíčovou dírkou není potřeba u základního materiálu do tloušťky 8 mm vytvářet úkosy. Jelikož svařování plazmou zaručuje vysokou kvalitu svarového spoje, využívá se např. v těchto odvětvích: výroba měřicích přístrojů, membrány manometrů, spirální katetry, injekční jehly, lékařské nástroje, vlnovce, filtry, oprava forem, oprava litinových odlitků [3].

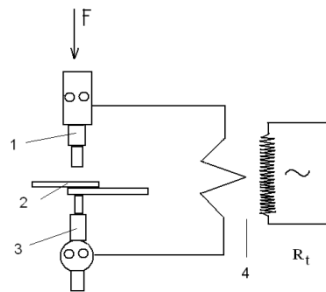


Obr. 6 Plazmová tryska [3]

3 Svařování za pomoci tlaku a tepla

3.1 Odporové svařování

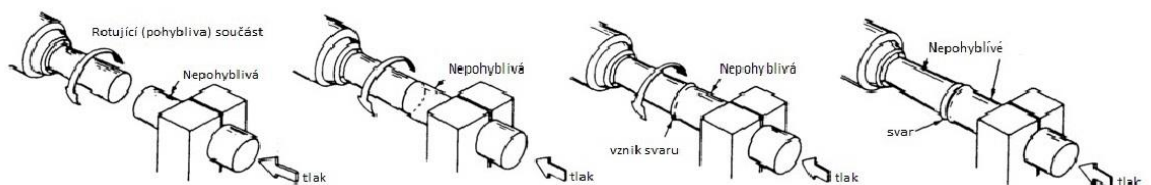
Teplo potřebné ke svaření vzniká průchodem elektrického proudu svařovanými součástmi. Materiál se nataví v místě dotyku. A dojde ke spojení za spolu působení tlaku a el. proudu. Není zde třeba přídavného materiálu, spoj tvoří pouze základní materiál. Odporové svařování je vhodné pro nízkouhlíkové oceli, austenitické oceli, niklové slitiny nebo kombinace materiálů. Tato technologie je vysoce produktivní v sériové výrobě, naopak pro kusovou není příliš vhodná [2].



Obr. 7 Schéma odporového svařování 1) pohyblivá tlaková elektroda 2) svařované díly 3) pevná elektroda 4) zdroj proudu [2]

3.2 Třecí svařování

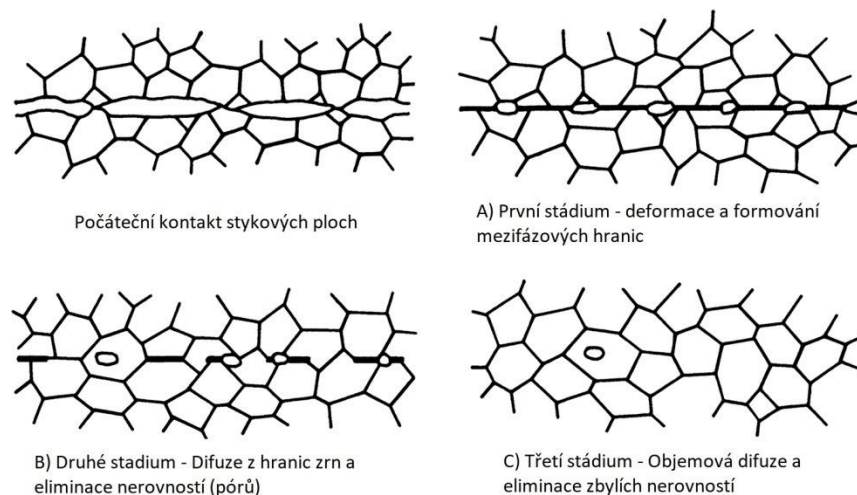
Teplo potřebné ke svaření vzniká třením svařovaných součástí. Tření vzniká vzájemným pohybem svařovaných dílů, kde jeden koná pohyb, přičemž druhý je pevně upnut a zároveň přitlačován k pohyblivému. Není zde třeba přídavného materiálu. Svar provedený touto technologií je velmi celistvý a má vlastnosti základního materiálu. Je zde též velmi malá tepelně ovlivněná oblast. Toto svařování je vhodné pro svařování obtížně svařitelných materiálů. [2]



Obr. 8 Průběh třecího svařování [8]

3.3 Difuzní svařování

Jedná se o proces spojování materiálu za tuhého stavu, spoj vzniká působením tlaku na stykové plochy spoje při zvýšené teplotě. Součásti jsou v těsném kontaktu za kontrolovaného tlaku a v určeném čase ohřívány po danou dobu. Což při místní plastické deformaci a těsnému přiblížení povrchů umožní difuzi atomů mezi spojovanými součástmi. Vzniklý spoj je vysoce pevný. Proces difuzního svařování lze popsat ve třech stádiích viz. obr. 9. Při této technologii není třeba přídavného materiálu. Lze vzájemně spojovat tenkostěnné a tlustostěnné svařence stejného či rozdílného chemického složení. Nevzniká zde licí struktura, výronky nebo okuje, což vylučuje ztráty materiálu. Hmotnost svařovaných součástí se tím nezvětšuje a není třeba nikterak dále svary mechanicky upravovat. Součásti se nedeformují a vlastnosti materiálů v oblasti spoje se nemění. [9]



Obr. 9 Proces difuzního svařování [9]

3.4 Ultrazvukové svařování

Současným působením mechanických kmitů vyvolaných ultrazvukem a působením tlaku. Třením, způsobeným mechanickými kmity, vzniká teplo, které však není dostatečně velké, aby natavilo spojované díly, ale podpoří difuzi atomů. Umožňuje svařování mnoho kovů jejich slitin a kombinací. Je též vhodné pro svařování plastů. Je to vysoce produktivní způsob svařování. Velikou výhodou je ta skutečnost, že není třeba nijak upravovat svařované plochy (čistit, obrábět). [2]

4 Srovnání technologických postupů pro tenkostěnné a tlustostěnné svařence

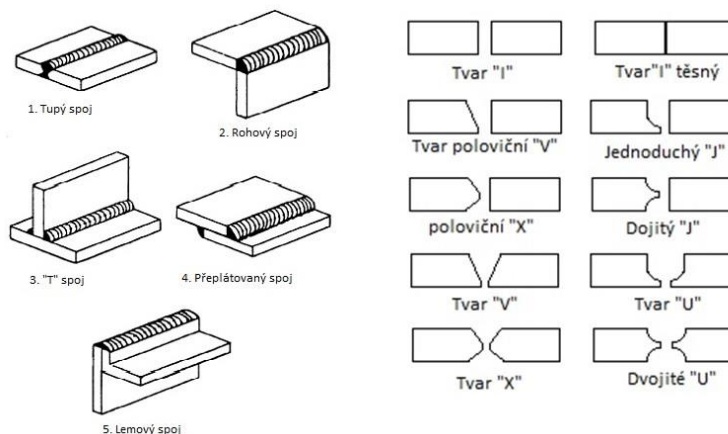
Pro lepší přehlednost porovnávání jednotlivých rozdílů mezi svařenci bude zavedeno následující rozdělení:

- Svařence malých tlouštěk: cca do 15 mm
- Svařence velkých tlouštěk (dále pouze VS): cca od 15 do 40 mm
- Masivní svařence (dále pouze MS): cca 40 mm a více

Mezi první viditelné rozdíly lze zařadit rozměry svařence a jejich hmotnost. Z toho vyplývá, že rozdílná bude též manipulace s nimi. V případě tenkostěnného svařence s malými rozměry a též menší hmotností není manipulace nijak náročná na speciální vybavení, svářeč s ním může snadno manipulovat. Problém nastává u svařování rozměrnějších tenkostěnných svařenců např. plechů, které je nutno podepřít, jelikož se prohýbají vlastní vahou. Při svařování VS a MS je zapotřebí speciálních přípravků a manipulační techniky (např. jeřáb).

4.1 Spoje a svarové plochy (úkosy)

V podstatě jsou možné 4 druhy spojů v závislosti na poloze svařovaných dílů: tupý, rohový, přeplátovaný, "T". V technické praxi se častěji hovoří přímo o svarových spojkách a to: Tupý (s tvary svařovaných ploch I, U, V, W či polovičních U, V, W), koutový, bodový, děrový, lemový [2].



Obr. 10Vlevo svarové spoje vpravo tvary svarových ploch [10]

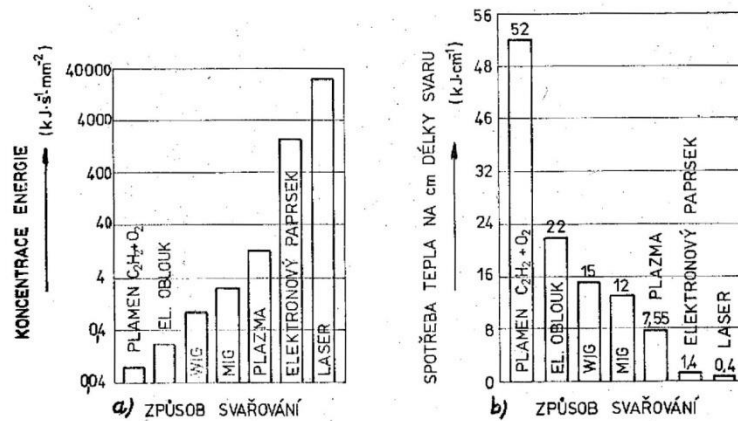
Dalším rozdílem mezi svařenci malých tlouštěk, VS a MS je množství svarového kovu, tudíž množství přídavného materiálu a popř. počet kladených housenek a tomu také odpovídá úprava úkosů. Je zřejmé, že u MS a VS bude počet housenek a objem

svarového kovu větší než u svařenců malých tloušťek. Co se týče úpravy úkosů (např. tupého spoje při svařování obalovanou elektrodou) u malé tloušťky postačí pro správné provaření pouze jednostranný „V“ spoj, kdežto u VS pro správné provaření a lepší přístup ke kořeni bude třeba upravit úkosy do tvaru „X“ nebo jednostranného „U“ spoje. A u MS by takový to spoj znamenal velikou spotřebu přídavného materiálu (elektrod) vysoké náklady na úpravu úkosů, které by musely být hodně rozevřené. Je též veliký rozdíl, jakou technologií je VS nebo MS svařovaný porovnáme-li svařování obalovanou elektrodou a automatické podtavidlové svařování do úzké mezery. Jak je již z názvu patrné u podtavidlového svařování budou úkosy pod menším úhlem (strmější), než u svařování obalovanou elektrodou, kde budou více rozevřené. A to z důvodu přístupu ke kořeni a správného provaření nejen kořene ale i svarových ploch.

Jsou zde též výjimky např. svařování elektronovým paprskem. U této technologie totiž není třeba žádného přídavného materiálu a je velmi vhodná pro svařování MS.

4.2 Vnesené teplo

Jedním z dalších rozdílů mezi VS, MS a svařenci malých tloušťek bude množství vneseného tepla. Pomocí vneseného tepla se natavuje malý objem kovu a vlivem tepelné vodivosti se ohřívá i okolí základního materiálu. Jelikož u svařování MS je objem svarového kovu podstatně větší než u tenkých svařenců, bude tedy potřeba větší množství tepla pro natavení. Čím mají svařované díly větší tloušťku a hmotnost, tím lépe vedou teplo a pomaleji se ohřívají na potřebnou teplotu tavení. Toto vše ovšem nezávisí pouze na geometrických rozměrech základního materiálu, ale též na jeho chemickém složení, fyzikálních vlastnostech a zároveň také na použité svařovací technologii. Množství vneseného tepla v závislosti na zvolené technologii je ovlivňováno zejména koncentrací tepelné energie a ta je velmi rozdílná u jednotlivých technologií viz. obr. 11.[11, 12]



Obr. 11 Množství tepla a jeho koncentrace u různých svařovacích technologií [11]

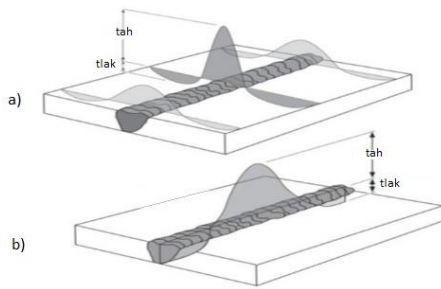
Z tohoto lze vyvodit další rozdíl, a to rozdíl v odvodu tepla. Zatímco u svařenců malých tlouštěk bude teplo odváděno dvěma směry, tak u VS a MS je odváděno třemi směry, tedy teplo se bude šířit i ve směru tloušťky materiálu. [11]

4.3 Vliv vnitřních napětí a deformace

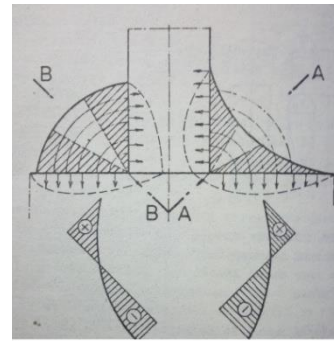
Pnutí a deformace jsou vždy doprovodným jevem procesu svařování. Jejich vznik má v podstatě dvě příčiny:

- **Existence teplotních gradientů (rozložení teplot při svařování)** – Způsobují nerovnoměrnou dilataci jednotlivých oblastí svarového spoje
- **Tuhost svařované konstrukce** – Ta výrazně ovlivňuje jejich velikost

Deformace a napětí spolu velmi úzce souvisí, oba jevy vznikají v důsledku účinku svařovacího procesu. Ve svaru a v jeho blízkém okolí je jejich vzájemná závislost následující, čím jsou deformace větší, tím je menší napětí. Oproti tomu v dalších vzdálenějších oblastech, čím jsou deformace větší, tím je i napětí větší. Oba tyto účinky jsou závislé na spoustě dalších činitelů, proto je velmi těžké přesně určit jejich velikost. Ta je ovlivněna konstrukčním uspořádáním svařence, jeho tuhostí, tvarem, velikostí, umístěním svarů, zvolenou technologií, množstvím a koncentrací vneseného tepla [11].

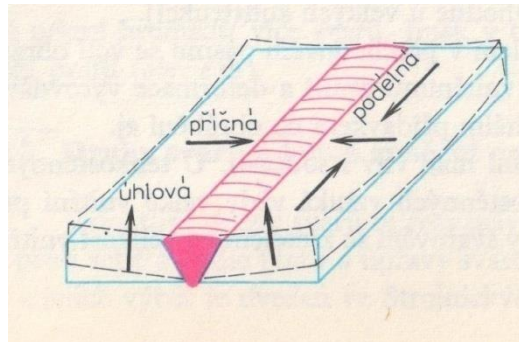


Obr. 12 Rozložení vnitřního pnutí v tupém spoji a) Průběh v podélném směru (působení podél délky svaru) b) průběh v příčné směru (působení kolmo k délce svaru) [13]



Obr. 13 Průběh vnitřních napětí v koutových svarech [11]

Rozlišujeme tři druhy deformací, které vznikají při svařování a to příčné, podélné a úhlové (Obr. 14).



Obr. 14 Druhy deformací (smrštění) [15]

Deformace a smrštění nelze zanedbávat. Deformace mohou narušit celkovou geometrii svařence a vnitřní pnutí může být iniciátorem vad typu trhliny. Tyto důsledky se nejlíp ukazují na rozdílu chápání pnutí a deformací u běžných svařenců a MS. Zatím co u běžných svařenců, tedy svařenců s malou tloušťkou svařovaného materiálu je třeba se obávat spíše deformací. U MS jsou větším problémem vnitřní napětí. Je nutno k těmto problémům přistupovat obezřetně, jelikož opatření proti deformacím a pnutím jsou většinou protichůdná. Lze se proto před volbou postupu svařování rozhodnout, pro eliminaci napětí nebo deformace, a to s ohledem na charakter a požadované vlastnosti svařované součásti (konstrukce) [14].

4.4 Eliminace deformací a vnitřního pnutí

Deformace vzniklé vlivem svařování, lze po procesu odstranit mechanickým rovnáním, a to za tepla nebo za studena, pomocí kladiva či lisu. Mechanické rovnání za studena je vhodné používat u malých a méně tvarově složitých svařenců, jelikož deformace se

odstraňují úderem kladiva, anebo tlakem lisu na vhodném místě svařence, a tím se vnáší pnutí do materiálu. Tato pnutí by u rozměrnějších svařenců vedla ke vzniku trhlin, kdežto při mechanickém rovnání za tepla se pomocí teploty podaří větší část vnitřních pnutí zrelaxovat, je tedy vhodnější pro rozměrnější svařence [11].

Mechanická rovnání bývají často velmi nákladná, proto lze deformacím předcházet i během procesu zvolením vhodného postupu při svařování, např. při svařování velkých a tvarově složitých konstrukcí nejdříve svařit menší celky (podskupiny) poté sestavit, sestehovat a svařit jako celek. Také dodržovat tato pravidla: svařovat ze středu ke krajům, svary provádět střídavě, aby došlo k co nejrovnoměrnějšímu rozložení tepla. U svařování tlustých plechů (VS) je vhodné pro snižování napětí a deformací navrhovat tvary úkosů „X“, oboustranné U a svařovat do úzké mezery. U svařování těchto svarů se nesmí úplně zavařit jedna strana. Nejprve se provede svar do jedné třetiny z jedné strany, poté do dvou třetin z druhé strany, pak se svar na první straně dokončí s následujícím ukončením svaru druhého [11].

Při řešení vnitřních pnutí (např. u hůře svařitelných materiálů náchylných na zakalení) se svařenec upne do přípravku nebo předepne tak, že napětí vzniklá předepnutím vyruší napětí vzniklá procesem svařování. Malé deformace, které při svařování těchto materiálů vzniknou, se mohou vykompenzovat technologickým přídavkem na opracování. Při odstraňování vnitřních pnutí, je vhodné použít předehřev před procesem, či po procesu provést žihání ke snížení vnitřních pnutí. Předehřev je velmi důležitý zvláště u MS a VS, kde by bez předehřevu mohlo vlivem vnitřních napětí dojít porušení (k trhlinám) [11].

5 Vady ve svarech

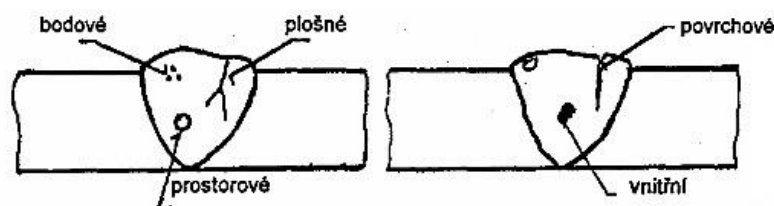
Vady ve svarech představují koncentrátoři napětí, které nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy. Za daných podmínek se mohou stát iniciátory křehkého lomu. Vadou ve svaru se všeobecně míní jakákoliv odchylka od technických norem, technických podmínek nebo smluvního vzorku. Vady mohou být patrné při prohlídce svaru, pouhým okem nebo zjistitelné pomocí jednoduchých pomůcek, nebo jsou vady skryté uvnitř materiálu. Tyto skryté vady se zjišťují pomocí NDT metod, nebo laboratorními testy. Dle ustanovení daných předpisů, jsou vady přípustné, nepřípustné, opravitelné a neopravitelné [16].

- **Přípustné vady** – Normy, technické podmínky či smluvní vzorek je dovolují. Není potřeba je odstraňovat
- **Nepřípustné vady** – Neodpovídají předepsaným hodnotám. Mohou být opravitelné či neopravitelné

Za finální svar může být prohlášen jen svar s takovými typy vad, které neohrozí při provozním zatížení bezpečnost svařence [16].

5.1 Typy vad

Problémy, které nastávají během všech svařovacích procesů, se převážně týkají necelistvostí svaru – vad. Vady ve svařových spojích se rozdělují podle tvaru a podle polohy a místa výskytu. Vady podle tvaru se dále rozdělují do tří skupin bodové, plošné a objemové. Do první skupiny lze zařadit vady typu mikropóry či sférické vměstky (silikáty). Mezi plošné vady se řadí vady typu trhlin, neprůvarů a studených spojů. Mezi objemové vady se řadí především vady typu plynových dutin (póry), vměstků, staženin, ale také vady tvarů jako např. zápaly, vruby, nedodržení rozměrů (hubený kořen, převýšený či propadlý svar). Dle polohy se vady dělí na vnitřní (plynové dutiny, vměstky, staženiny) a povrchové (trhliny, neprovařený kořen, póry) [16].



Obr. 15 Typy vad [16]

Obecnou klasifikaci vad, které se mohou vyskytovat ve svarech specifikuje norma ČSN ISO 6520 viz. Tab. 1 [16, 17].

Skupina	Název vady	Označení ISO 6520
1	Trhliny	100
	Mikrotrhlina	1001
	Podélná trhlina	101
	Příčná trhlina	102
	Radiální trhlina	103
	Kráterová trhlina	104
	Rozvětvené trhliny	106
2	Dutiny	200
	Plynová dutina	201
	Bublina	2011
	Shluk dutin	2013
	Řádka dutin	2014
	Pór	2015
	Červíkovitá dutina	2016
	Staženina	202
	Mezidendritická staženina	2021
3	Vměstky	300
	Struskový vměstek	301
	Tavidlový vměstek	302
	Oxidický vměstek	303
	Kovový vměstek	304
4	Vady odtavování a závaru	400
	Studený spoj	401
	Neprovařený kořen	402
5	Vady tvaru	500
	Zápal	5011
	Propadlý kořen	5012
	Krápník	5041
6	Různé vady	600
	Dotek elektrodou	601
	Rozstřík	602

Tab. 1 Kvalifikace vad dle ČSN ISO 6520 [16, 17]

5.1.1 Trhliny

Trhliny, tak jak je uvádí norma, mohou vznikat jako trhliny za horka, za studena nebo lamelární trhliny.

Trhliny za horka (hot cracking): Vznikají během tuhnutí předtím, než se vnesené teplo zcela rozptýlí do materiálu. Jedná se převážně o mezikrystalické trhliny. Tyto trhliny jsou zapříčiněny přítomností nízkotavitelných nečistot (S, P, B, Se), které jsou přítomny v základním materiálu. Tyto nečistoty zůstávají v tekuté formě, po ztuhnutí svarového kovu na hranicích zrn. Napětí vznikající při tuhnutí působí na tento tenký

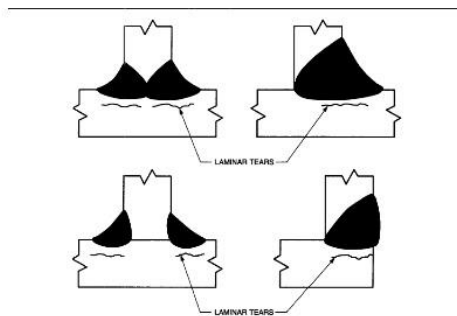
nekovový film, který je velmi křehký, což vede ke vzniku trhlin. Náchylnější na vznik tohoto druhu trhlin je svarový kov s dlouhou dobou tuhnutí, taktéž hrubozrnný materiál (např. austenitické oceli). Tento typ trhlin se může vyskytovat ve svarovém kovu, na rozhraní mezi svarovým kovem a materiálem, který nebyl roztaven a v TOO [18, 19].

Trhliny za studena (cold cracking): Tento druh trhliny vzniká po ztuhnutí svarového kovu při nízkých teplotách (300 °C). Ve skutečnosti trhliny za studena mohou vznikat hodiny až dny poté co svarový kov ztuhnul. Jedná se převážně o trhliny transkrystalického charakteru. Mezi příčiny vzniku patří [18]:

- Vytvrzování TOO
- Působení zbytkových napětí ve svaru
- Přítomnost vodíku ve svaru

Kráterová trhlinka: Tento typ trhlin bývá způsoben objemovým smršťováním svarového kovu během tuhnutí. Ke vzniku dochází často při náhlém ukončení procesu obloukového svařování, a to za těchto podmínek: kráter a jeho okolí se ochlazuje rychleji než zbytek svarové housenky, kráter tuhne ze všech stran směrem ke středu. Vzniká tak napětí, které je dostatečně veliké, aby vedlo k praskání. Pokud základní materiál obsahuje prvky náchylné na segregaci (C, S) pravděpodobnost vzniku kráterových trhlin je vyšší [18].

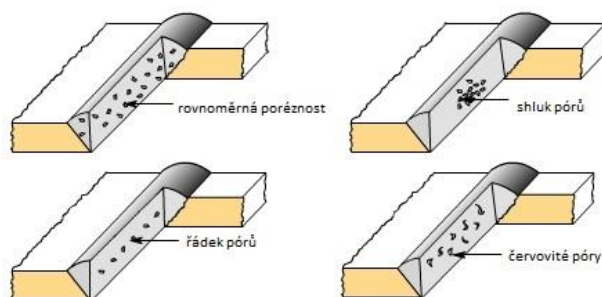
Lamelární trhliny (Lamellar tearing): Jsou zapříčiněny přítomností nečistot (S, P) v základním materiálu. Nejčastěji je tomu tak u tenkých plechů, kde jsou nečistoty vlivem válcování v řádcích rovnoběžných s povrchem plechu. K trhlinkám potom dochází při svařování plechů vlivem spolupůsobení nečistot a tahového napětí kolmo na plech. Lamelární trhlinky se šíří od mikrotrhlinek vzniklých za horka. Trhlinky mají svůj specifický tvar a vznikají nejčastěji na konci TOO nebo v základním materiálu [18].



Obr. 16 Lamelární trhlinky – výskyt [20]

5.1.2 Dutiny

Póry: Vznikají ve svarové lázni vlivem H, O, N. Zdrojem těchto plynů bývá ochranná atmosféra, přídavný materiál a základní materiál s jejich nečistotami. Do svaru jsou absorbovány během procesu svařování. V oblasti oblouku jsou sloučeniny typu oxidy, sulfidy, nitridy disociovány a dané prvky jsou rozpuštěny v materiálu v atomární podobě. Kyslík se do svarové lázně dostává z nečistot ochranné atmosféry (pára, vzduch) či disociací oxidů. Odstranění je prováděno tzv. dezoxidací tj. z přídavného materiálu se přidávají legury (Mn, Si), které mají vyšší afinitu ke kyslíku než k železu. Vytvoří oxidy a ty pak přecházejí do strusky. Přítomnost dusíku je ovlivněna chemickým složením základního materiálu, přídavného materiálu a ochranné atmosféry. U feritických ocelí nastává pórovitost už při malém obsahu dusíku i v případě dostatečného množství dezoxidačních prvků. Dusík se vylučuje v podobě nitridů, které přecházejí v precipitáty (tuhou fází). U chromniklových austenitických ocelí je dusík vázán účinněji do nitridů a odstupuje tak úplně od reakce do plynné formy [21].



Obr. 17 Tvar a rozmístění pórů ve svarovém kovu [22].

Shluk pórů se většinou vyskytuje v místech počátku konce svařovacího procesu. Červovité póry jsou zapříčiněny hrubou povrchovou kontaminací základního materiálu. Jedná se o dutinky uzavřené mezi dendrity tuhajícího svaru. Samostatné póry jsou většinou omezené velikosti a minimální vzdáleností mezi sebou. Díky svému

kulovitému tvaru nepředstavují takovou hrozbu v provozu jako ostrohranné vady. O přípustnosti pórů pojednává norma EN ISO 5817. Dutiny snižují únavovou únosnost svarového spoje, též také těsnost a korozní odolnost [21].

5.1.3 Vměstky (inkluze)

Jedná se o cizí tuhá tělesa ve svarovém kovu.

Struskový vměstek: Tato vada vzniká převážně při obloukovém svařování obalovanou elektrodou, nebo při podtavidlovém svařování. Jedná se o zbytky tavidla nebo strusky z obalu elektrody lapené ve svarovém kovu. Vznik této vady může být zapříčiněn špatným přesazením housenek, kdy mezi housenkami vznikne mezera, kde se struska zachytí. Dalším iniciátorem může být špatný povrch svarové housenky [23].

Kovový vměstek: Jedná se o cizí kov absorbovaný do svarové lázně během svařování. Vzniká převážně při svařování metodou TIG. Dochází k němu např. při dotyku wolframové netavící se elektrody s roztaveným svarovým kovem, kdy se do svarové lázně absorbuje wolfram [23].

Oxidický vměstek: Oxidy se do svarového kovu dostávají nejčastěji ze špatně očištěných svarových ploch základního materiálu, z nečistot jako je rez nebo okuje. Často také vznikají při svařování hliníkových a hořčíkových slitin. U těchto slitin dochází k pasivaci tzn., že na povrchu materiálu se vytvoří tenounká vrstvička oxidů s vysokým bodem tání [16, 23].

5.1.4 Vady odtavování a závaru

Neprůvar: Jedná se o nedostatečné natavení a špatné spojení svarových ploch se svarovým kovem. Nejčastěji se tato vada vyskytuje u ručního obloukového svařování. Neprůvary mohou vznikat na stykových plochách i v kořeni svaru. Jejich výskyt je podmíněn nedodržením potřebného očištění nebo parametrů svařování [16, 17].

- Vysoká rychlost svařování
- Špatně připravené svarové úkosy
- Předběhnutí svarové lázně
- Malá intenzita svařovacího proudu.
- Velký průměr elektrody (přídavného materiálu)
- Velmi malá mezera v kořeni svaru

Studený spoj: Tento druh vady bývá zapříčiněn špatným tavným spojením svarové housenky se základním materiálem. Mezi příčiny vzniku patří [16, 17]:

- Malá intenzita svařovacího proudu
- Velký průměr elektrody (přídavného materiálu)
- Nečistoty na svařových plochách či v přídavném materiálu

5.1.5 Vady tvaru

Zápaly: Jedná se o ostrá natavená rozhraní mezi základním materiálem a svarovou housenkou. Nejčastěji se vyskytují u koutových svarů. Mezi příčiny jejich vzniku patří: nesprávný sklon hořáku, elektrody, nadměrná intenzita svařovacího proudu [16, 17].

Přesazený materiál: Chybně slícovaný svarový spoj, špatné zajištění, stehování [17].

Nadměrné převýšení kořene: Mezi příčiny vzniku patří velká kořenová mezera, malé otupení, nízká postupová rychlost, příliš velká intenzita svařovacího proudu [17].

Proláklý svar: U jednovrstvého svaru nastává při velmi široké mezeře u kořenu. V případě vícevrstvého svaru vlivem špatně rozložených vrstev, při velké postupové rychlosti svařování, použití příliš velkého průměru příd. materiálu nebo velmi široká svarová lázeň krycí vrstvy [17].

5.2 Výskyt vad v závislosti na tloušťce svaru

Různé typy vad se vyskytují v závislosti na použité metodě svařování, přídavného materiálu, základního materiálu atd., ale také v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu.

V případě vad typu trhliny se trhliny vznikající za horka vyskytují zejména u svarů s dlouhou dobou chladnutí, což odpovídá spíše na tlustostěnné svařence. Naproti tomu lamelární trhlinky se vyskytují spíše u tenkostěnných svařenců a to zejména při svařování tenkých válcovaných plechů. Obecně lze tvrdit, že vady typu trhliny jsou spíše vady vyskytující se v tlustostěnných svařencích, viz. kap. 4.3.

V případě struskových a tavidlových vměstků je výskyt pravděpodobnější u svarových spojů, kde je větší počet svarových housenek, takže u svařenců s větší tloušťkou. Naproti tomu kovové vměstky mohou vzniknout i u tenkých svařenců, např. dotykem

wolframové netavné elektrody při svařování metodou TIG, která je vhodná pro svařování tenkostěnných svařenců.

Vady typu neprůvar mohou vznikat jak u tenkostěnných, tak u tlustostěnných svařenců. Zde záleží na formě a místě výskytu. V případě tenkých svarů se bude jednat o spojitý neprůvar v místech kořene svaru nebo na stykových plochách. Naproti tomu u tlustých svarů se může jednat o nespojitý neprůvar, který může být situován i v centrální ose svaru, tedy uprostřed svarového kovu, což bývá nejčastěji u tlustých svarů s úkosy ve tvaru „X“.

6 Defektoskopie svarů

Jakékoliv vady ve svarovém kovu či v základním materiálu jsou nežádoucí, neboť mohou narušovat funkci daného objektu (součásti, dílu). Je proto důležitá jejich detekce. Výskyt vad lze výrazně omezit již při výrobě, a to správným dodržáním technologických postupů. Vady se dají zjišťovat destruktivně a nedestruktivně. V případě že byl objekt (součást, konstrukce) porušen anebo za daných okolností je dovoleno jeho porušení je možné zjišťovat vady destruktivně, např. pomocí mikroskopických analýz apod. V případě, že součást nemá být nijak porušena, zjišťují se vady nedestruktivně. Zde je uveden výčet některých možných NDT technik:

- Vizuální metody
- Ultrazvukové zkoušení
- Prozařování
- Metoda magnetických toků
- Metoda vířivých proudů
- Kapilární metody
- Magnetické a elektromagnetické strukturoskopické metody
- Metoda akustické emise

Pro tuto práci bylo použito nedestruktivní zkoušení za pomoci ultrazvuku.

7 Zkouška ultrazvukem

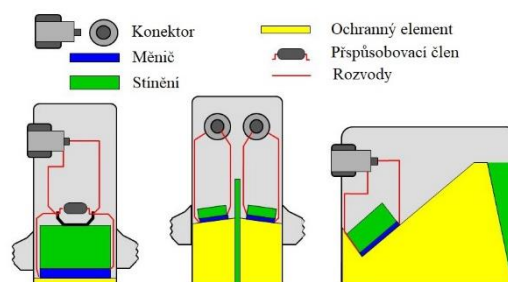
Ultrazvuk představuje zvukové vlny o frekvenci nad mezí slyšitelnosti u lidí (20kHz) šířící se elastickým prostředím. Toto vlnění představuje mechanické kmitání částic prostředí okolo své rovnovážné polohy. Mezi částicemi působí soudržné síly,

prostřednictvím kterých se tento pohyb postupně přenáší na všechny okolní částice. Takto popsané vlnění se šíří zkoumaným materiálem s malými ztrátami v tomto materiálu. Zkoušení ultrazvukem je zaměřeno především na detekci plošných vad typu trhlin, neprůvarů, studených spojů, větších objemových vad nebo kontrola tloušťky materiálu. Při dopadu vlny na rozhraní dvou prostředí se část vlny odrazí a část pokračuje pod jiným úhlem dál do druhého prostředí. Základním principem veškerých ultrazvukových měření je měření ultrazvukové energie, která projde materiálem nebo se naopak vrátí zpět po odrazu od nějakého rozhraní [24].

7.1 Zdroje ultrazvukových vln

Jako zdroje ultrazvukových vln se využívá destiček z piezoelektrických krystalů, tzv. piezoelektrických měničů. Měníče jsou umístěny v ultrazvukových sondách. Sonda je spojena s povrchem zkoušeného objektu za pomoci vazebního média. Jako vazebního media se využívá voda, olej, vazelína, glycerin apod. Vazebné medium zajišťuje přechod ultrazvukového svazku do zkoušeného materiálu. Sonda je posouvána po povrchu zkoušeného objektu. Typy ultrazvukových sond [25]:

- **Čelní sonda:** - Vysílá zvukové paprsky kolmo k povrchu
- **Úhlová sonda:** - Vysílá zvukové paprsky pod úhlem
- **Dvojitá sonda:** - Obsahuje dva měniče, jeden na vysílání a druhý pro příjem signálu



Obr. 18 Ultrazvukové sondy – Zleva přímá, dvojitá a úhlová sonda [26]

7.2 Metody ultrazvukových měření

7.2.1 Průchodová metoda

Funguje na principu zeslabení ultrazvuku při průchodu přes vadu. Tato metoda využívá dvou sond. Jedna slouží jako vysílač a druhá jako přijímač signálu. Využití této metody

se limituje pouze na výrobky s vhodnými protilehlými povrchy. Na každém z povrchů je umístěna jedna sonda. Výhodou je kratší dráha ultrazvuku a menší útlum ultrazvukového signálu. Nevýhodou je ta skutečnost, že pokud se chyba nachází daleko od přijímače a má menší průřez než průřez ultrazvukového svazku, může se stát, že se vada nedetekuje [24].

7.2.2 Odrazová metoda

Tato metoda je založená na zjišťování odrazu ech způsobených vadami v materiálu. Není tomu tak vždy, ale na příjem i na vysílání se používá jeden měnič. Na měření stačí jeden přístupný povrch. Z doby průchodu signálu se zjišťuje vzdálenost vady a z velikosti amplitudy zjišťujeme velikost vady. Nevýhodou této metody je, že signál musí vykonat dvojnásobnou dráhu na rozdíl od přechodové metody [24].

7.3 Detekce vad

Zvukové vlny vycházejí ze sondy, utváří svazek paprsků, tzv. ultrazvukový kužel, který zabírá pouze určitou část testovaného objektu. Účinnou část tohoto paprsku můžeme zhruba rozdělit na dvě části: konvergentní (fokusovanou) tzv. blízké pole a divergentní (rozbíhavou) tzv. vzdálené pole [25].

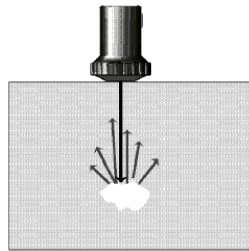


Obr. 19 Blízké a vzdálené pole [26]

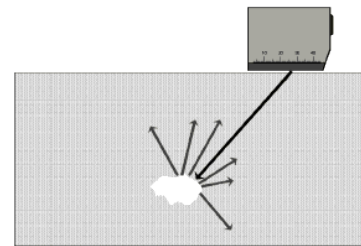
Při zjišťování vad (necelistvostí) jsou podstatné jejich vlastnosti, jako je velikost, tvar, povrch, poloha a orientace. Přesné rozměry vady se zjišťují velmi obtížně. Můžeme předpokládat, že velká echa jsou od velkých vad. Opačně toto tvrzení neplatí. Malá echa nemusí být vždy od malých vad, ale mohou být od větších vad. Způsobuje to tvar a orientace vady vůči dopadajícímu paprsku. Vada je považována za velkou, pokud zakrývá celý příčný průřez zvukového paprsku. Naopak za malou vadu je považována taková, jejíž velikost nezabírá celý příčný průřez paprsku. Tato skutečnost je závislá na vzdálenosti od zkoušeného povrchu. Ve vzdáleném poli se paprsek rozšiřuje, a proto se může vada jevit jako malá, byť bude ve skutečnosti veliká. Naopak tomu bude v blízkém poli, kde je paprsek fokusovaný. Zde se může malá vada zdát jako veliká,

jelikož zabírá celý příčný průřez paprsku. Velké plošné vady se chovají jako nekonečně velké odrazové plochy. Jejich tvar lze zjistit mapováním okrajů vady a to tak, že posouváme sondu po povrchu testovaného objektu a sledujeme velikost ech. Pokud jsou tato echa menší, znamená to, že se odrazí zpátky pouze menší část zvukového paprsku. Takto můžeme zmapovat okraje vady a zjistit její přibližný tvar [24, 25].

Dalším z faktorů je tvar vady. Tvar vady má vliv na rozptýlení paprsku. Vady s hladkým povrchem (póry, bublinky) způsobují to, že se vlny odrazí pod velkým prostorovým úhlem. Echa těchto vad jsou malá, a to i při prozvučování z různých směrů. Může za to jejich oblý tvar. Též drsnost povrchu vady má vliv na měření zkoušeného objektu. Mikronerovnosti povrchu mohou pomoci k lepší detekci, či identifikaci vad. Tyto nerovnosti způsobují to, že malá část odraženého paprsku se vrací zpět do sondy, i když není vada dobře orientovaná (např. šikmý dopad paprsku na rovinou vadu nebo naopak přímý dopad paprsku na šikmou vadu.) [24,25].



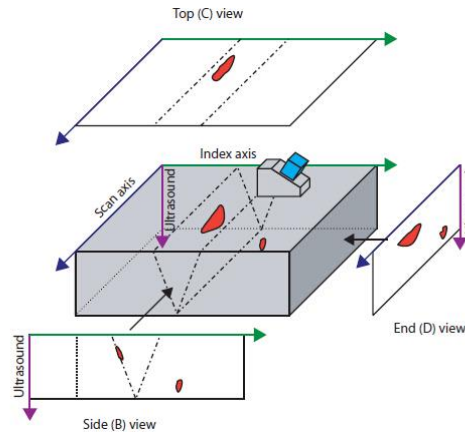
Obr. 20 Odraz při dopadu paprsku na členitou objemovou vadu – přímá sonda [25]



Obr. 21 Odraz při dopadu paprsku na členitou objemovou vadu – úhlová sonda [25]

7.4 Ultrazvuková zobrazení

Ultrazvuková zobrazení (scany) se dají srovnat s 2-D zobrazováním na technických výkresech (Obr. 22). Mezi základní zobrazení patří: A-scan, B-scan, C-scan, D-scan, S-scan nebo polární zobrazení [27].



Obr. 22 Ultrazvuková zobrazení [28]

A-Scan:Jedná se o zobrazení pomocí signálu radio-frekvence. Vodorovná osa představuje čas, který absolvuje ultrazvukový svazek po odrazu od rozhraní. Svislá osa představuje velikost signálu přijatého po odrazu [18].

B-Scan:Jde o zobrazení, kde vodorovná osa představuje pozici obrazu. Svislá osa představuje čas, který absolvuje ultrazvukový svazek po odrazu od rozhraní. V podstatě se jedná o příčný průřez zkoumaného tělesa [27].

C-Scan: Jedná se o plošné zobrazení zkoumaného tělesa [27].

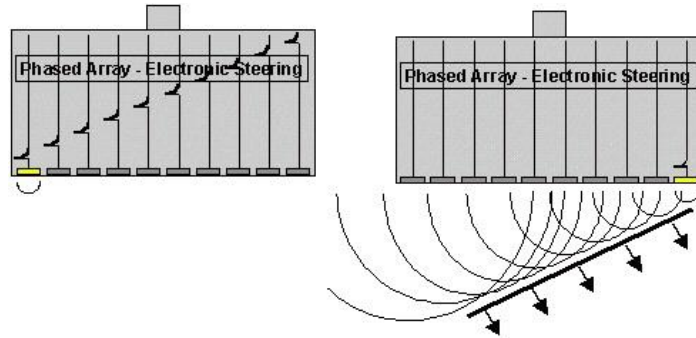
D-Scan: Zobrazení rozložení vad v podélném průřezu materiálu. Tedy v ploše, která je pootočená o 90° od B-scanu [27].

S-Scan:Ultrazvukový svazek je rozmetán v materiálu prostřednictvím různých úhlů naměřené údaje jsou zobrazeny jako obraz B-scan, který zobrazuje úhlovou výseč pokrytou paprskem [27].

7.5 Technika Phased Array

Phased array je technika, která se běžně používá k detekci vad v polotovarech (odlitky, výkovky) nebo ve svarech. Základem této techniky je sonda se soustavou 1-D prvků (měničů). Přičemž Každý z měničů má svůj vlastní přijímač i vysílač ultrazvuku. Všechny prvky jsou propojeny a řízeny pomocí počítače. Každý z prvků je ovládán nezávisle na ostatních prvcích. Vhodným časováním nebo fázováním jednotlivých prvků např. priváděním pulzů postupně na jednotlivé prvky v řadě. Lze docílit, že paprsek bude vysílán do materiálu pod určitým úhlem (Obr.23). Což umožňuje skenovat celou oblast zájmu bez posouvání či otáčení sondy. Tato skutečnost je výhodou ve srovnání

s konvenčními sondami s jedním měničem. Další výhodou je zobrazení pomocí sektorového scanu (S-scan) např. u svarových spojů. PA Sondy poskytují vějířovité série úhlů svazku z jednoho vyzařovacího bodu. Ty mohou pokrývat část nebo celý svar v závislosti na velikosti sondy, geometrii spoje a tloušťce průřezu. Což zajišťuje dobrou zjistitelnost různě orientovaných vad (studené spoje, trhliny).



Obr. 23 Vlna vysílaná pod úhlem [29]

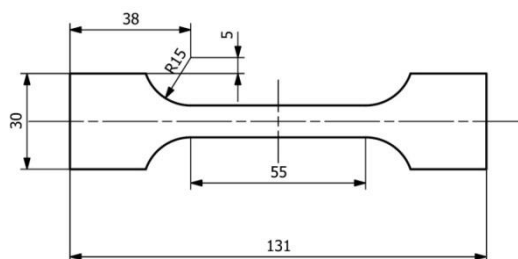
8 Úvod do experimentální části

V první části experimentu je provedeno porovnání morfologietenkého a masivního svarového spoje na dvou vzorcích. Na plechu o tloušťce 2 mm z materiálu S235 JRG 1 svařeného pomocí metody TIG a masivním svaru z materiálu AISI 304l (ČSN 17 249), tedy austenitické chrom-niklové oceli s nízkým obsahem uhlíku o tloušťce 78 mm svařovaného obalovanou elektrodou.

V druhé části experimentu jsou sledovány vady ve svarech, resp. jejich vznik, zjistitelnost pomocí NDT zkoušek a jejich vliv na mechanické vlastnosti spoje. Experiment se skládá z vizuální zkoušky, ultrazvukové zkoušky, tahové zkoušky a hodnocení metalografického výbrusu. U vzorků byla zkoumána zjistitelnost vad ultrazvukem, jejich hrubý odhad zastoupení v průřezu. Velikost, popř. tvar. U tahové zkoušky byl sledován vliv vad na mechanické vlastnosti svaru a následně porovnán s již dříve provedeným ultrazvukovým měřením. A jako poslední byla provedena metalografie, která poskytne podrobnější informace o typu vad a stavu svarového spoje.

Vzorky byly svařeny pěti různými technologiemi, a to plamenem podle WPS¹, TIG dle WPS, obalovanou elektrodou dle WPS, metodou TIG s jiným přídavným materiálem a plamenem s jiným přídavným materiálem, než uvádí WPS. Dále byly vzorky upraveny do tvaru zkušebních těles.

Před provedením experimentu bylo nutné vyrovnat deformace vzniklé svařováním pomocí brusky. Poté byly do finálního tvaru zkušebního tělesa (obr.24) obrobena pomocí vodního paprsku. Těchto 18 vzorků bylo rozděleno do šesti skupin (tab. 2).



Obr. 24 Tvar a rozměry zkušebního tělesa

¹WPS (Welding Procedure Specification) jedná se o návod, jak postupovat při svařování pro dosažení kvalitního svarového spoje bez vad. Tento postup specifikuje povolené svařovací technologie a způsoby přípravy, pro konkrétní svary a konkrétní rozsah tloušťek materiálů.

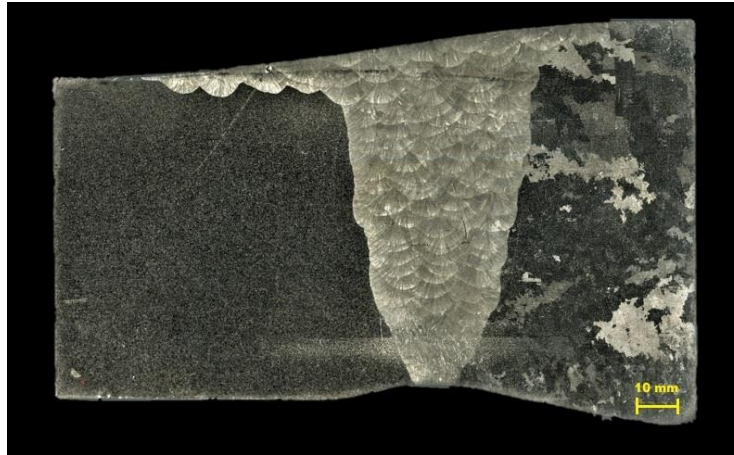
Základní materiál vzorků je ocel S235 JRG 1 (11 373). Jedná se o běžnou konstrukční ocel vhodnou ke svařování. Ve skupinách 2, 3, 4 a 6 byly záměrně vnesené vady, které jsou typické pro způsoby svařování, kterými byly tyto vzorky svařeny viz. Tab. 2. Tato práce též obsahuje kapitolu o výrobě těchto realitě se blížících vad.

Skupina	Číslo vzorku	Metoda svařování	Typ vady
1	1	TIG (dle WPS)	Bez vad
	2		
	3		
2	4	Plamenové svařování (dle WPS)	Oxidické vměstky – okuje
	5		
	6		
3	7	Obalovaná elektroda (dle WPS)	Struskové vměstky
	8		
	9		
4	10	TIG (přídavný materiál stejný jako základní)	Bublinky
	11		
	14		
5	12	Nesvařovaný materiál – etalon	Bez vad
	13		
6	15	Plamenové svařování (přídavný materiál stejný jako základní)	Oxidické vměstky – okuje
	16		
	17		
	18		

Tab. 2 Přehled vzorků

9 Porovnání masivního a tenkého svaru

Pro účely této práce byly vybrány dva vzorky na porovnání. Prvním vzorkem je masivní svar s austenitické chrom-niklové oceli AISI 304I (ČSN 17 249) o tloušťce 78 mm, svařovaný obalovanou elektrodou. Jedná se o svar mezi válcovaným potrubím a přírubou ve formě odlitku. Obě části lze snadno rozlišit na obr. 25.



Obr. 25 Masivní svar z oceli AISI 304I (ČSN 17 249) – Vpravo hrubozrnná struktura odlitku (příruby), vlevo jemnozrnná struktura tvářeného potrubí.

Druhým vzorkem je svar provedený na plechu o tloušťce 2 mm z materiálu S235 JRG pomocí metody TIG (obr. 26).



Obr. 26 Svar S235 JRG – TIG při zvětšení 25x

Jako první rozdíl lze uvést způsob pozorování jednotlivých vzorků. Vzorek, resp. těleso s masivním svarem bylo mechanicky zbrušeno a vyleštěno a naleptáno na makro výbrus. Struktura je po takovéto úpravě u tak velikého svarového spoje pozorovatelná pouhým okem, kdežto u tenkého svaru bylo nutné vzorek upravit pro pozorování na světelném mikroskopu. Vzorek byl v tomto případě zataven do fixační hmoty, mechanicky broušen a leštěn. Dále byl chemicky leptán pro pozorování pod mikroskopem pomocí 3% Nitalu.

Dalším rozdílem mezi těmito vzorky je počet svarových housenek. V případě tenkostěnného svaru se jedná pouze o jednu svarovou housenku, která musí zároveň plnit funkci kořenové, výplňové a krycí housenky. V případě masivního svaru jde o desítky housenek, které jsou jasně patrné na obr. 25. Na obr. 26 je patrný neprůvar v místě kořene svaru. Z tvaru neprůvaru lze odvodit, že zde u tenkostěnného svaru nebyly upravovány svarové plochy do speciálních tvarů. Jedná se o tupý spoj tvaru „I“. U masivního svaru je patrné, že se jedná o tupý spoj s úkosy tvaru „V“. V případě masivního svaru byla úprava úkosů nutná ze dvou důvodů:

- pro docílení správného provaření,
- pro lepší přístup ke kořeni svaru při svařování.

Při pohledu na jednotlivé housenky u masivního svařence (obr. 25) je patrné, že růst zrn ve struktuře svarového kovu každé housenkypočíná od zdroje tepla (elektrického oblouku – elektrody) ve směru odvodu tepla do materiálu v kruhové výseči o cca 120°. Růst zrn je patrný pouhým okem. Při bližším pozorování je možné rozlišit jednotlivá zrna svarové housenky. Jedná se o protáhlá zrna hrubšího charakteru. U tenkého svaru nelze zaznamenat směr růstu zrn ve struktuře svarového kovu. Je zde patrné pouze zhrubnutí zrn oproti základnímu materiálu a přechod mezi jednotlivými oblastmi viz. obr. 26. Obě tyto skutečnosti byly způsobeny pravděpodobně dobou chladnutí svaru a převládajícím směrem odvodu tepla. Tenký svar chladnul podstatně kratší dobu než masivní. A teplo vnesené do materiálu snáze unikalo do okolí díky malé tloušťce. Takže teplo se v materiálu šířilo v podstatě pouze plošně. Toto vysvětluje zhrubnutí zrn bez jejich patrné orientace. Naopak u masivního svaru se teplo šířilo i ve směru tloušťky materiálu a dovolilo výše pospaný růst zrn. Jejich velikost pak byla dána dobou chladnutí svarového spoje. Tato skutečnost nám odpovídá na další rozdíl, a to je množství vneseného tepla do svaru. Dá se předpokládat, že v případě masivního svaru bylo nutné základní materiál před samotným procesem zahřát. A to kvůli zlepšení tepelné vodivosti, usnadnění natavení materiálu, zamezení vzniku trhlin za horka a zamezení vzniku velkého vnitřního pnutí.

U masivního svaru, není patrná žádná TOO na rozdíl od tenkého svaru. Je pouze patrný ostrý přechod mezi svarovým kovem a základním materiálem. TOO se pravděpodobně nachází mimo oblast vzorku.

10 Výroba realistických vad

Jak bylo uvedeno v úvodu u ve všech skupinách (vyjma skupiny 1 a 5) byly úmyslně vnesené vady do svarového kovu. Zde je uvedeno několik postupů, které jsou zcela běžné pro výrobu těchto „realistických“ vad. Takto vytvořené vady se vkládají do zkušebních těles.

10.1 Neprůvar v úkosech

Vytváří se dvěma způsoby. Mezi svar a svarovou plochu se vloží nekovová destička, která se pak při NDT chová jako neprůvar svarových ploch. Jako druhý způsob se využívá tzv. „TIG přemostění“. To se provádí ručním svařováním metodou TIG, kdy se na úkosu provede závar, u kterého nedojde ke spojení svarového kovu se základním materiálem. Po vychladnutí se pokračuje ve svařovacím procesu danou metodou, která byla pro tento svar zvolena [31].

10.2 Neprůvar kořene

Tento defekt lze vytvořit pomocí EDM (Electrical Discharge Machining) tedy elektrojiskrového obrábění v místě kořene svaru. Tento způsob vytváření neprůvaru kořene však není úplně přesnou interpretací reálného defektu, jelikož vyjiskřený vrub je velmi široký. Defektu více se blízcímu reálnému neprůvaru kořene lze dosáhnout za pomoci svařovací techniky TIG a to tak, že se docílí dokonalého spojení přídatného a základního materiálu v místě kořene pouze na jedné straně, tedy pouze na jedné ze dvou svařovaných součástí. Dále se pak pokračuje ve svařování bez provaření druhé strany kořene [31].

10.3 Struskový vměstek

Tato vada se získává například nedostatečným přesazením housenek u ručního svařování, vznikne tak mezera, kde uvízne struska, nebo vytvořením svarové housenky s nedokonalým povrchem, kde struska snadno uvízne [31].

10.4 Praskání při tuhnutí (solidification cracking)

Vznik tohoto praskání může být vyvolán špatným provedením tvaru či velikosti svarové housenky. Praskliny se vyskytují nejčastěji jako přímočaré praskliny probíhající

centrální osu svarové housenky. Této vady lze dosáhnout zvolením vhodného přídavného materiálu. Bylo zjištěno, že některé prvky zvyšují riziko vzniku těchto trhlin, např. S, P. Složky s nízkou teplotou tání nejsou přijímány tuhneucími dendrity, což má za následek tvorbu tenké vrstvičky liquidu mezi nimi, přetrvávající na nízké teplotě. Tato vrstvička poté nevydrží napětí při tuhnutí hlavní svarové lázně. Této vady také lze docílit špatným tvarem housenky. Vhodný poměr hloubky a šířky k zabránění této vady je 0,5:1. Například v případě velmi široké svarové lázně dojde k praskání. V opačném případě, kdy bude větší hloubka, než šířka dochází též k praskání, ale k příčnému [31, 32, 33].

Vady ve vzorcích ze skupiny č. 4 svařovaných metodou TIG bylo bublinek (porezity) docíleno sníženou ochrannou svarové lázně inertním plynem, v tomto případě argonem.

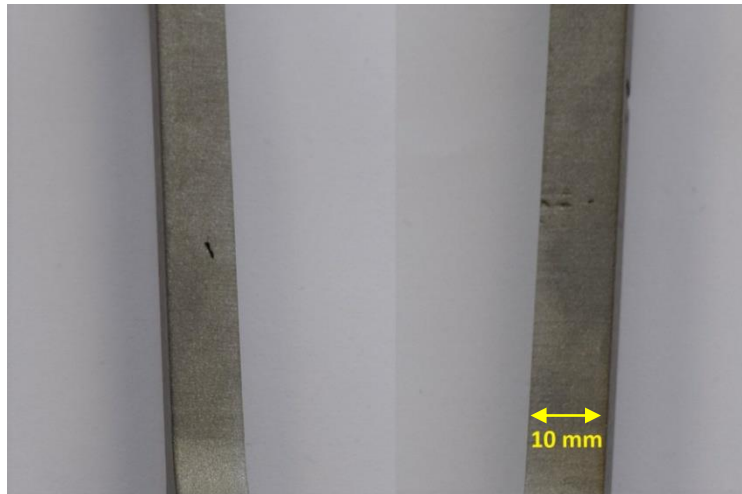
11 Nedestruktivní zkoušky

11.1 Vizualní zkouška

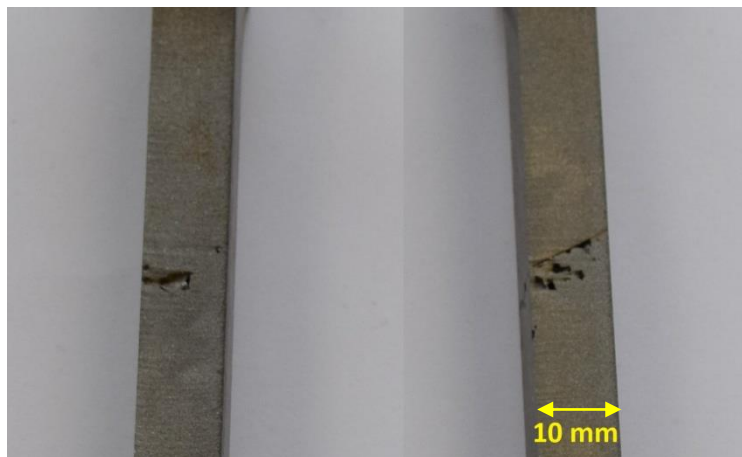
Po úpravě svařenců do tvaru zkušebních těles byla provedena vizualní zkouška. Nejednalo se o standardní NDT metodu kontroly rozměrů a tvaru svaru, ale pouze o kontrolu povrchu, zdali vnesené nečistosti ve svaru po úpravě nevystupují na povrch. Jelikož takto by bylo možné předpokládat vliv těchto vad na průběh následujících zkoušek. Kontrola byla prováděna na dobře osvětleném místě.

Vady vystupující na povrch byly zaznamenány u vzorků č. 6, 7, 10, 14, 17, 18. V případě vzorku č. 6 se jednalo o jednu vadu z boku zkušebního tělesa situovanou v místě svarového kovu viz. obr. 27. U vzorku č. 7 se jednalo o skupinku drobných vad z boku zkušebního tělesa taktéž v místě svarového kovu (obr. 27). U vzorků č. 10 a 14, již byl výskyt vad markantnější. U obou vzorků byly vady opět v místech svarového kovu. Na vzorku 10 byly viditelné vady na obou bocích zkušebního tělesa. U vzorku 14 byly viditelné povrchové vady ze všech stran. Bylo též vidět, že zde došlo k neprůvaru na úkosu z jedné strany obr.28. Na vzorcích 17, 18 byly viditelné vady na obou bocích zkušebního tělesa. Na vzorku 17 se jednalo o skupinku vad podél hrany tělesa na jednom boku viz. obr. 29. Kdežto na druhém boku šlo opět vidět částečný neprůvar na úkosu. V případě vzorku 18 byla na jednom boku opět skupinka drobných vad (obr. 29) blízko u sebe. Na druhém boku byla jedna větší vada. Všechny ostatní vzorky byly bez

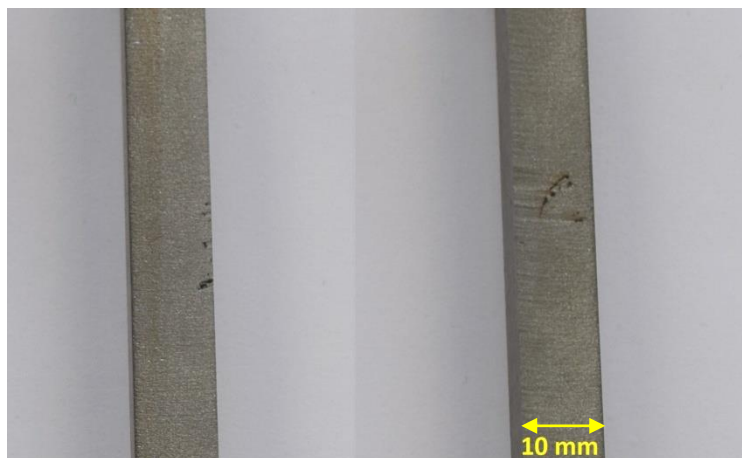
viditelných povrchových vad. Pro nafocení vzorků byl použit fotoaparát Nikon D5300 s objektivem AF-S Nikkor 18-140.



Obr. 27 Vlevo vzorek č. 6 Plamen (WPS) – okuje, vpravo vzorek č. 7 Obalovaná elektroda (WPS) – zapečená struska



Obr. 28 Vlevo vzorek č. 10 vpravo vzorek č. 14 TIG (jiný příd. mat.) – bublinky, neprůvar úkosu



Obr. 29 Vlevo vzorek č. 17 vpravo vzorek č. 18 Plamen (jiný příd. mat.) - okuje

11.2 Ultrazvuková zkouška

Ultrazvuková zkouška byla prováděna technikou Phasedarray pomocí zařízení Zetec Dynaray 128/128PR. Jedná se o sofistikované ultrazvukové zařízení se 128 aktivními kanály, kdyje možné současně využít 128 kanálů jako vysílače i přijímače, anebo 128 jako vysílače a ostatních 128 jako přijímače. Pro zobrazení a práci s výsledky zařízení využívá software Ultravision 3 [34].

Parametry zařízení [35]:

Ultrazvukové techniky:	PE, PA a TOFD
Počet Phased array kanálů:	128/128 PR Počet
UT kanálů:	16 Rozlišení PA signálu: 16-bit
Možnost práce při teplotě:	0° až 45 °C
Šířka pásma:	0,20 – 25 MHz (-6 dB)

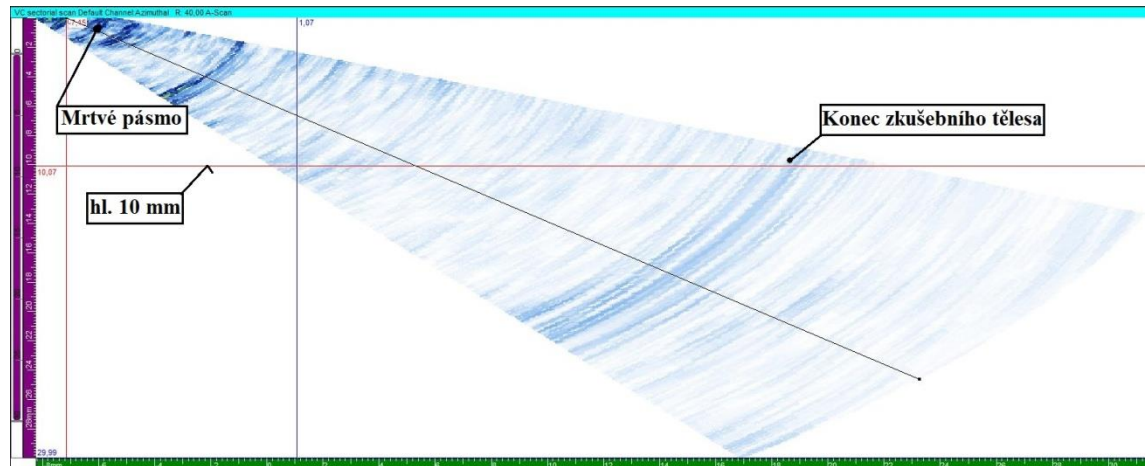
Vlastnosti přístroje: Sektorový sken, Dynamická hloubková fokusace, záznam dat

Vlastnosti softwaru: 3 D model zkoušeného kusu, raytracing, analýza naměřených dat

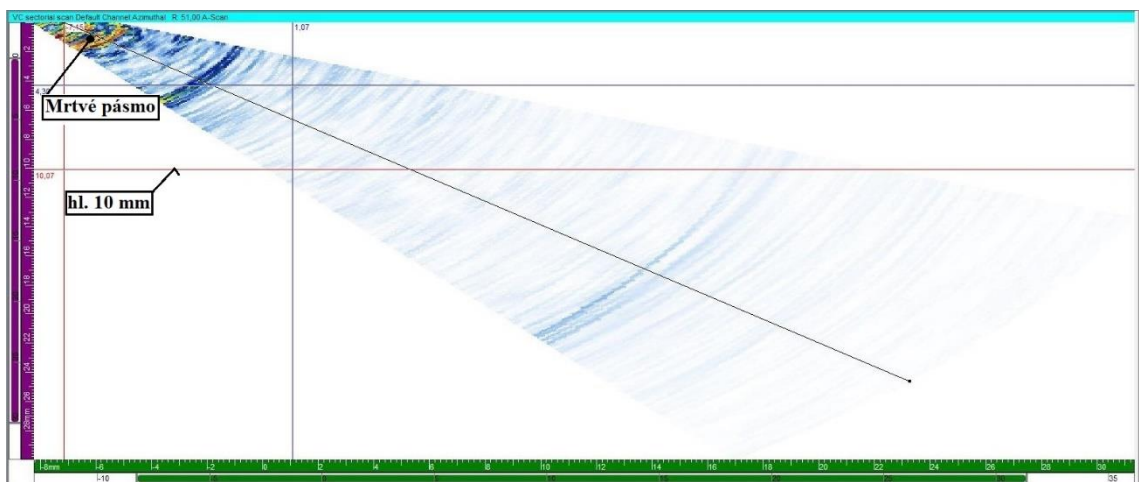
Bylo využito úhlové sondy (60°) o frekvenci 5 MHz, která byla v kontaktu s tělesem za pomoci vazelíny.

Cílem experimentálního programu bylo odhalit necelistvosti uvnitř materiálu, pokusit se stanovit jejich hrubý odhad procentuálního zastoupení v průřezu, popř. velikost a počet. Pro zobrazení vad bylo využito převážně S – Scanu.

Při zkoušení vzorků ze skupiny 1 (svařovaných metodou TIG dle WPS) nebyly nalezeny žádné vnitřní vady (obr.30). Tato skutečnost potvrzuje vizuální zkoušku, která byla též bez nálezu. Mezi další vzorky bez nálezu je možné zařadit vzorky ze skupiny 5 (obr. 31). Zde se jednalo pouze o základní materiál bez svaru.



Obr. 30 Snímek s-scanu vzorku č. 3 TIG dle WPS z ultrazukového měření.



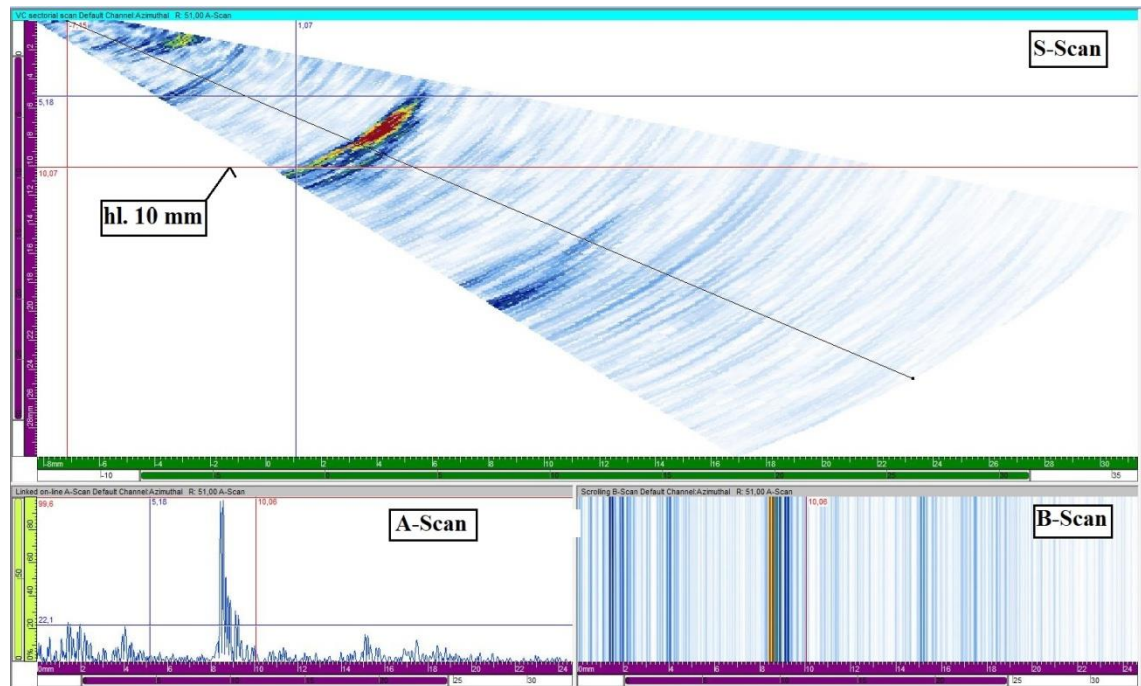
Obr. 31 Snímek s-scanu vzorku č. 12 nesvařovaný materiál z ultrazukového měření.

Při testování ostatních vzorků, již bylo možné zaznamenat výskyt vad uvnitř zkušebního tělesa. Vzorky, ve kterých byla potvrzena přítomnost vad, jsou uvedeny v tab. 3. Tato tabulka také obsahuje informace o vadách, které byly zjištěny tímto měřením.

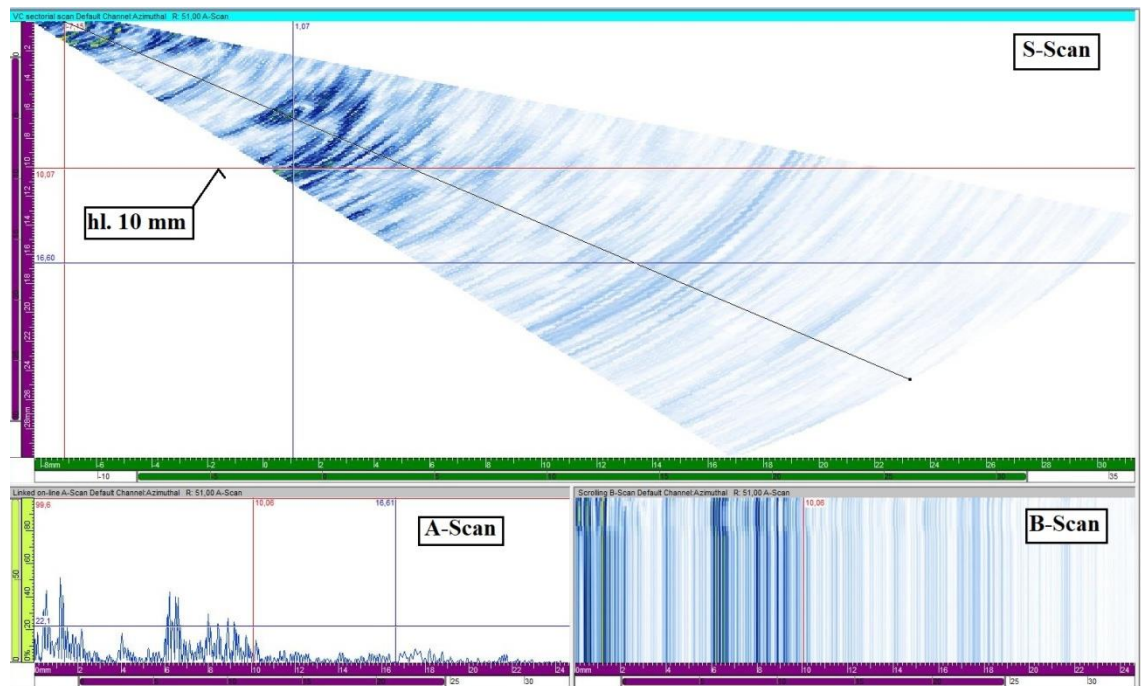
Sk.	Způsob svař./ vada	Č. vz.	Charakter vady	Hrubý odhad zastoupení vad ve svarovém kovu [%]	Hloubka výskytu vady [mm]
2	Plamen (WPS)/okuje	4	2 větší vady	50	5 – 7,5
		5	1 větší vada	25	7 – 10
		6	Více menších vad	75	3 – 10
3	Obalovaná el./ struska	7	Více menších vad	75	3 - 10
		8	Cca 3-4 malé vady	25	7 - 10
		9	1 větší vada	25	7 - 10
4	TIG (jiný příd. mat.)/póry	10	Shluk menších vad	75	3 - 10
		11	1 větší + 1 menší vada	75	5 - 10
		14	Neprůvar + porezita	75 a více	2 - 10
6	Plamen (jiný příd. mat.)/ okuje	15	1 větší vada	25	3 – 10
		16	Shluk menších vad	25	7 – 10
		17	1 větší vada	50	5 – 10
		18	2 větší vady	50	0 – 5

Tab. 3 Výsledky ultrazvukového měření.

Lze si povšimnout, že v případě vzorků s okujemi tedy vzorky svařované plamenem (skupina č. 2 a 6) se převážně jedná o jednu či dvě větší vady (obr. 32), kdežto v případě porezity a vměstků se jedná převážně o shluky drobnějších vad (obr. 33).



Obr. 32 Snímek z ultrazukového měření vzorku č. 17 – Na snímku je možné si všimnout, že vada protíná risku, která vymezuje tloušťku materiálu, což nám potvrzuje vizuální zkoušku – vada vystupuje na povrch tělesa.



Obr. 33 Snímek z ultrazukového měření vzorku č. 7 – Shluk malých vad ve svarovém kovu.

12 Tahová zkouška

Po ultrazvukové zkoušce byla provedena zkouška tahem na všech vzorcích za pokojové teploty. Zde byly pozorovány mechanické vlastnosti všech vzorků.

12.1 Zařízení pro tahovou zkoušku

Pro provedení tahové zkoušky bylo využito zařízení Zwick Roel Z250 optiXtens. Pomocí tohoto zařízení lze provádět statické zkoušky (tah, tlak, ohyb), mechanické zkoušky plechů, trubek či svarů. Součástí tohoto zařízení je optický extenzometr, který je možné využít při zkouškách tahem, tlakem, tečením a také při cyklických testech. [36]

Parametry zařízení:

Rychlost zkoušení:	0.0001– 600 mm/min.
Max. Síla (F_N):	250 kN
Rozsah měření síly:	až 165 % z F_N
Min. Tloušťka vzorku:	0.1 mm

12.2 Průběh a výsledky tahové zkoušky

Zkušební těleso bylo upraveno do potřebného tvaru dle čelistí zkušebního zařízení (viz kap. 8, obr. 24). Pracovní délka zkušebního tělesa byla 55 mm, průřez byl čtvercový 10x10 mm. Před provedení samotné zkoušky byl vzorek nejprve předeprnut na napětí 30 MPa. Rychlost zkoušení byla 0.003 s^{-1} . Výsledky tahové zkoušky obsahuje Tab. 4. Vzhledem k nízkému počtu v každé skupině vzorků je nutné brát naměřené hodnoty pouze jako orientační.

Sk.	Způsob svař./ vada	Č. vz.	Mez pevnosti R _m [MPa]	Prodloužení [%]	Pozn.
1	TIG (WPS)/bez vad	1	477	25	
		2	488	25	
		3	492	25	
2	Plamen (WPS)/okuje	4	301	2	×
		5	357	5	×
		6	282	2	×
3	Obalovaná el./ vměstky	7	479	27	
		8	479	27	
		9	491	23	
4	TIG (jiný příd. mat.)/póry	10	283	5	×
		11	401	5	×
		14	157	1	×
5	Etalon/bez vad	12	471	34	
		13	475	32	
6	Plamen (jiný příd. mat.)/ okuje	15	265	1	×
		16	408	12	×
		17	356	14	×
		18	389	11	×

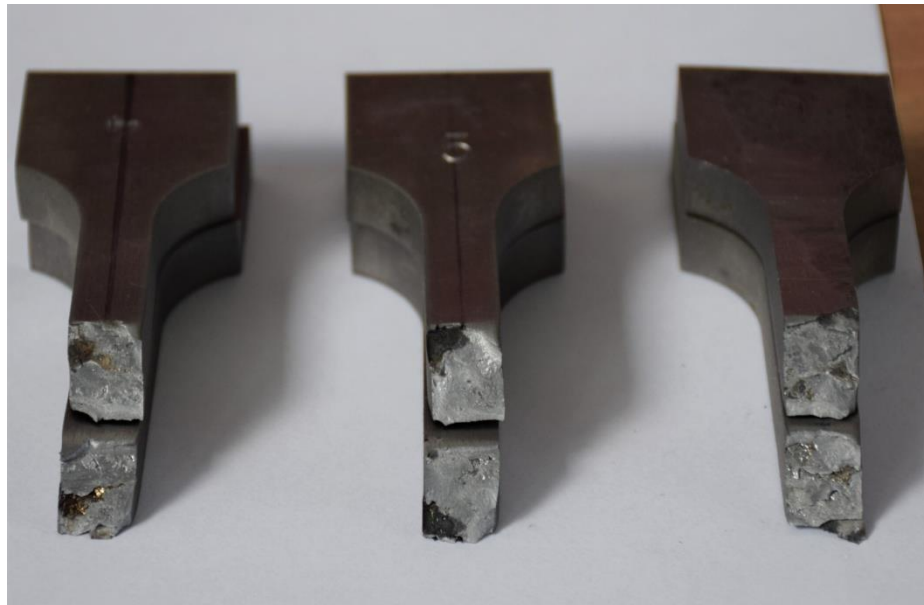
Tab. 4 Hodnoty naměřené při tahové zkoušce (pozn. × přetrženo v místě svarového spoje)

Dle tabulkových hodnot by mez pevnosti oceli S235 JRG měla náležet intervalu 360 ÷ 510 MPa. [37] Hodnoty naměřené na vzorcích č. 12 a 13 (nesvařovaný mat.) spadají do tohoto intervalu a za předpokladu, že svarový spoj by se v ideálním případě měl blížit vlastnostem základního materiálu, lze do tohoto intervalu zahrnout i ostatní svařované vzorky, mimo vzorků č. 4, 6, 10, 14, 15. Dalším zajímavým faktorem je místo přetržení vzorku. Dalo se předpokládat, že vzorky s vadami ve svarovém kovu se přetrhnou v místě výskytu vad. Tato skutečnost byla potvrzena ve většině případů až na vzorky svařované obalovanou elektrodou, ve kterých byly vady v podobě vměstků. Při ultrazvukovém měření se tyto vady jevily jako drobné částičky rozprostřené ve svarovém kovu. V případě vzorku č. 7 byly při vizuální kontrole (kap. 11.1, Obr. 28) nalezeny vady vystupující na povrch. Zde je nutné zohlednit tvar, popř. orientaci vady. Více k tomuto problému viz kap. 12.3.

12.3 Vyhodnocení lomových ploch

V této kapitole jsou sledovány lomové plochy a vady na lomových plochách přetržených zkušebních těles. Sledovanými faktory byly též tvar, orientace, velikost a místo výskytu vad. Byly zde potvrzeny některé výsledky z vizuální a ultrazvukové zkoušky. Pro snazší vyhodnocení lomů byly vzorky rozděleny do skupin podle typu vad. Pro nafocení lomových ploch byl použit fotoaparát Nikon D5300 s objektivem AF-S Nikkor 18-140.

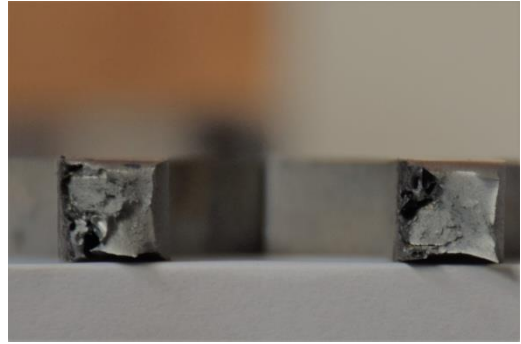
12.3.1 Vzorky s oxidickým mřížkem – Okuje



Obr. 34 Zleva vzorky 4, 5, 6 – Křehké lomy probíhající podél úkosu svaru. U vzorků 4 a 5 jsou patrné samostatné velké vady, které zapříčinili nedokonalé spojení zákl. materiálu se svarovým kovem. U vzorku 6 více menších vad rozložených po celém lomu.



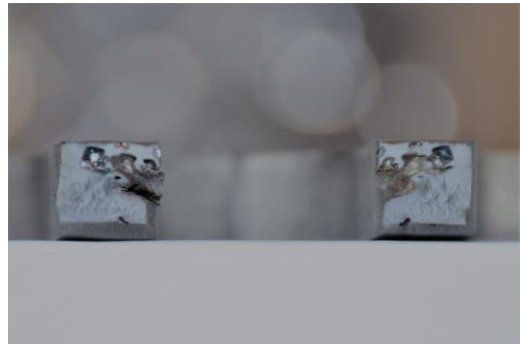
Obr. 35 Vzorek 15 - Na lomové ploše je patrný zub od dolomení. Dále jsou zde patrné drobné částičky okují. Lom probíhá ve svarovém kovu pod cca 15° úhlem. Jedná se o křehký lom.



Obr. 36 Vzorek 16 - Zde je patrné, že vady byly podlouhlého tvaru a byly orientovány ve směru osy namáhání. K lomu došlo ve svarovém kovu. Jedná se o kombinovaný lom.



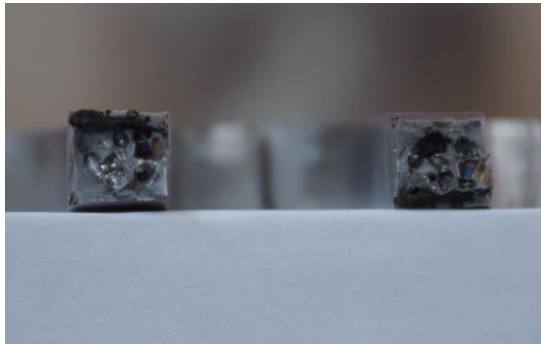
Obr. 37 Vzorek 17 - Na lomu je možné zaznamenat jednu větší vadu napříč svarovým kovem kolmou k povrchu zkušebního tělesa v místě kořene svaru. V místě vady došlo ke křehkému lomu zbytek lomu je tvárný.



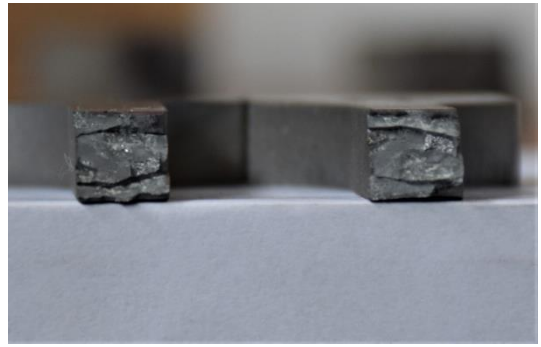
Obr. 38 Vzorek 18 - Na lomu je možné vidět skupinku 3÷4 vad navzájem propojených, v jejichž okolí proběhl křehký lom zbytek lomu je tvárný. Je zde patrná okuje vystupující na povrch, jenž byla zaznamenána při vizuální zkoušce.

Na vzorcích 4, 5, 6 (Plamen-WPS) není patrné žádné prodloužení či zúžení průřezu. Všechny lomy proběhly na úkosech iniciované vadami. U ostatních vzorku svařovaných plamenem s jiným přídatným materiálem je již patrné prodloužení i zúžení průřezu. Lom je vždy iniciovaný od vad, kde došlo ke křehkému porušení, zbytek lomu je tvárný. Na lomech těchto šesti zkušebních těles jsou vidět zbytky vad (okují) mající složitý ostrohranný tvar a jsou křehké a drobné.

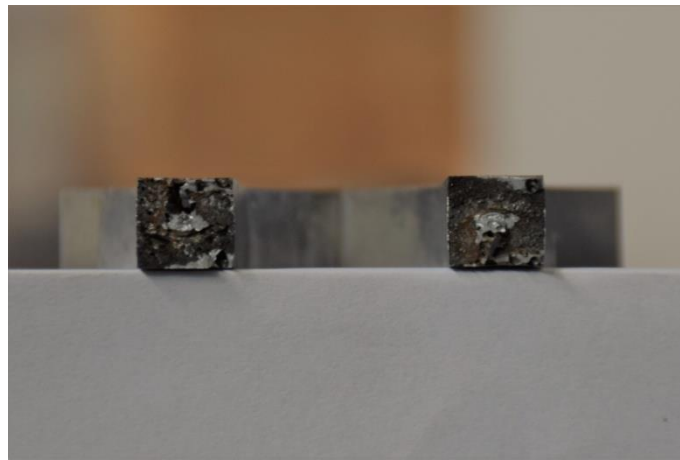
12.3.2 Vzorky s porezitou (snížená ochrana argonem)



Obr. 39- Vzorek 10 – Zde je patrný shluk pórů, který zapříčinil křehký lom. Obvod lomové plochy je tvořený tvárným lomem.



Obr. 40 Vzorek 11 – křehký lom podél úkosu.



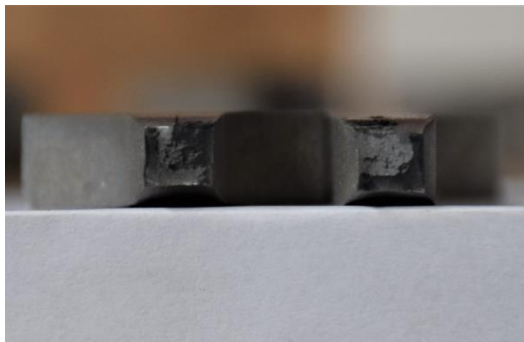
Obr. 41 Vorek 14 – Jedná se o křehký lom podél úkosu. Vlivem porezity nedošlo ke spojení zákl. materiálu a příd. materiálu.

U vzorku 10 došlo k lomu v místě shluku pórů. Póry vystupovaly na povrch zkušebního tělesa, což prokázala už vizuální zkouška. Vzorky 11 a 14 byly přetrženy v místech úkosů. Na lomové ploše vzorku 11 jsou patrné zbytky cizích fází absorbovaných ve svarovém kovu. U vzorku 14 došlo k nedokonalému spojení zákl. a příd. materiálu v místě úkosu. To bylo pravděpodobně způsobeno přítomností a množstvím pórů v těchto místech.

12.3.3 Vzorky se struskovými vměstkami



Obr. 42 Zleva vzorky 7, 8, 9 –Vzorky 8 a 9 byly přetrženy v základním materiálu. Je u nich patrný kombinovaný lom, který je typický pro tuto ocel při jednoosém namáhání v tahu. U vzorku 7 počal lom od vrubu, který byl zaznamenán při vizuální zkoušce.



Obr. 43 Vzorek 7 - lom



Obr. 44 Vzorek 7 – Během tahové zkoušky se počaly na povrchu vzorku v místě svaru objevovat drobné vady. Také se zde začal tvořit druhý krček na opačné straně.

U vzorků 7, 8 a 9 došlo k lomu mimo svarový spoj, který obsahoval vady, jejichž výskyt potvrdila ultrazvuková zkouška. Vady se zde nikterak neprojeví. U vzorku 7 Některé vady vystoupily na povrch tělesa v místě svaru. Jedná se o shluk vměstků různých velikostí. Převládají jemné vměstky oblých tvarů. Na těchto vzorcích bylo patrné prodloužení a zúžení průřezu v místě lomu.

12.3.4 Vzorky bez vad



Obr. 45 Zleva vzorky 1, 2, 3 – Vzorky 1 a 2 přetrženy v základním materiálu. Vzorek tři rozhraní svarový kov TOO. Na vzorcích je patrný kombinovaný lom.



Obr. 46 – Zleva vzorky 12, 13 –Nesvařovaný materiál – kombinovaný lom.

Vzorky 1, 2, 3 byly přetrženy mimo svarový spoj. Je zde patrné prodloužení i zúžení průřezu u všech vzorků. Na vzorcích byl zaznamenán přetvárný lom. Na vzorcích 12, 13 byl patrný přetvárný lom. Tvar a lomy jsou srovnatelné se vzorky 1, 2, 3.

13 Metalografická pozorování

Na vybraných vzorcích byla proveden metalografický výbrus pozorovaný na světelném mikroskopu. Z každé skupiny byl vybrán jeden vzorek, na kterém byla metalografie provedena.

- Skupina 1 – Vzorek č. 3
- Skupina 2 – Vzorek č. 5
- Skupina 3 – Vzorek č. 7
- Skupina 4 – Vzorek č. 11
- Skupina 5 – Vzorek č. 12
- Skupina 6 – Vzorek č. 18

Tento poslední krok byl prováděn pro doplnění informací o struktuře materiálu, který byl svařován různými technologiemi a též pro doplnění informací o charakteru a rozmístění vad.

13.1 Příprava vzorků pro světelnou mikroskopii

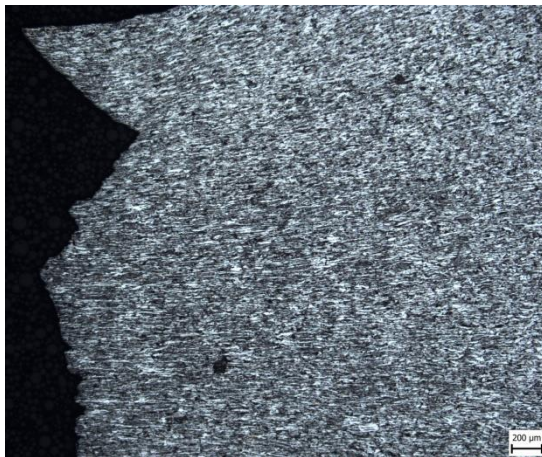
Pro účely světelné mikroskopie byly využity části přetržených zkušebních těles. Vzorky pro metalografii byly vyříznuty pomocí vodního paprsku podélně cca v polovině tloušťky zkušebních těles. Pro posouzení celého svarového spoje bylo nutné ponechat vzorky v jejich délce po přetržení. Vzorky bylo nutné zalít do fixační hmoty. U vzorků 5, 11, 18 jejich délka dovozovala zalití za tepla pomocí přístroje Cito Press od firmy Struers. Tento přístroj umožňuje zalít vzorky do puku o průměru 40 mm. Vzorky 3, 7, 12 byly zality do fixační hmoty za studena do prstence z plastové trubky o průměru 75 mm. Pro zalití za studena byla použita fixační hmota Varidur 200.

Vzorky 11, 5, 18 byly broušeny na automatické brusce Vector Beta od firmy Beuheler. Bylo využito brusných kotoučů o drsnosti 240, 400, 800, 1200. Následně byly mechanicky vyleštěny na plátnech pomocí diamantové pastys částicemi o velikosti 3 μ m a 1 μ m. Vzorky 3, 7, 12 byly broušeny a leštěny ručně. Bylo využito brusných kotoučů o drsnosti 80, 150, 240, 400, 800, 1200, 2500 a leštící pasty s částicemi o velikosti 3 μ m a 1 μ m. Vzorky byly chemicky leptány v 3 % Nitalu po dobu 5÷8 s.

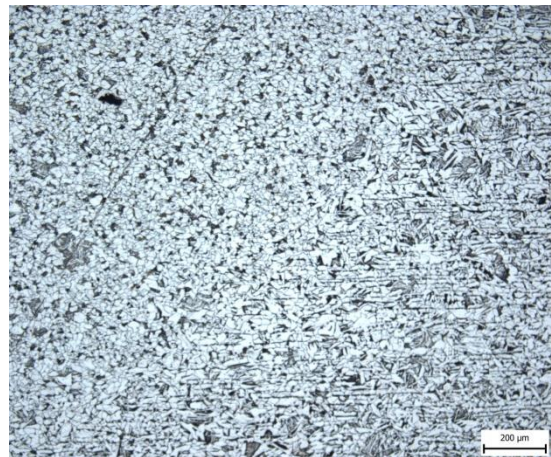


Obr. 47 Vzorky připravené pro světelnou mikroskopii

13.2 Vzorek č. 3 –TIG (dle WPS) – bez vad



Obr. 48 Vzorek č.3 – Lom 50x



Obr. 49 Vzorek č. 3 – Rozhraní svarový kov TOO
100x

Na Obr. 48 je vidět přechod mezi tvárnou a křehkou částí smíšeného lomu. Také je patrná deformace (prodloužení) zrn v okolí lomu. Obr. 49 ukazuje plynulý přechod svarového kovu a TOO. Z obrázků je patrné, že se jedná o feriticko-perlitickou strukturu.

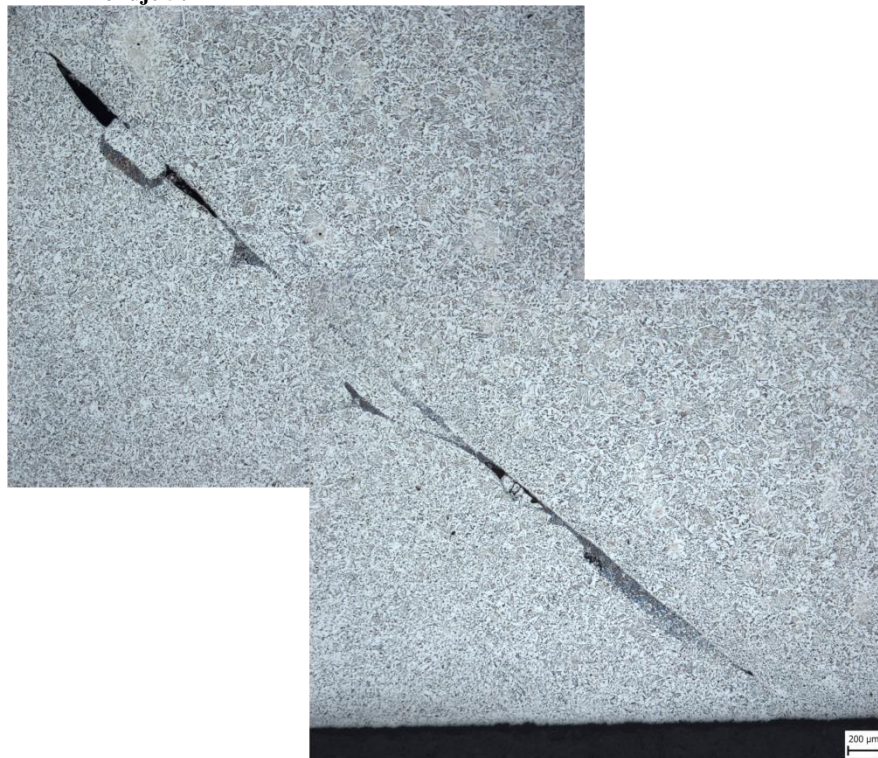
13.3 Vzorek č. 5 – Plamen (dle WPS) - Okuje



Obr. 50 Vzorek č. 5 – Lom odštěpení v místě výskytu okuje 50x



Obr. 51 Vzorek č. 5 – Lom 100x



Obr. 52 Vzorek č. 5 – Neprůvar svarového úkosu – okuje

Na obr.50 a 51 jsou snímky lomu v různých místech při různém zvětšení. Ze snímků je patrné že k lomu došlo v místě úkosů, a to vlivem vad. Na obr. 50 je patrné odštěpení svarového kovu vlivem okuje. Místo je vyplněno fixační hmotou okuje se pravděpodobně uvolnila při tahové zkoušce. Je zde opět patrná deformace (prodloužení) zrn v místě lomu. Jelikož se jednalo o křehký lom (viz kap. 12.3.1) je zde deformace menší než u ostatních vzorků s kombinovaným lomem. Na Obr. 51 byl zaznamenán

neprůvar, který byl zapříčiněn oxidickými vměstky (okujemi). Tyto vady jsou zde patrné, je možné si povšimnout v horní části obr. 52 okuje zachycené na rozhraní.

13.4 Vzorek č. 7 – Obalovaná elektroda (dle WPS) - vměstky



Obr. 53 Vzorek č. 7 – Lom 50x



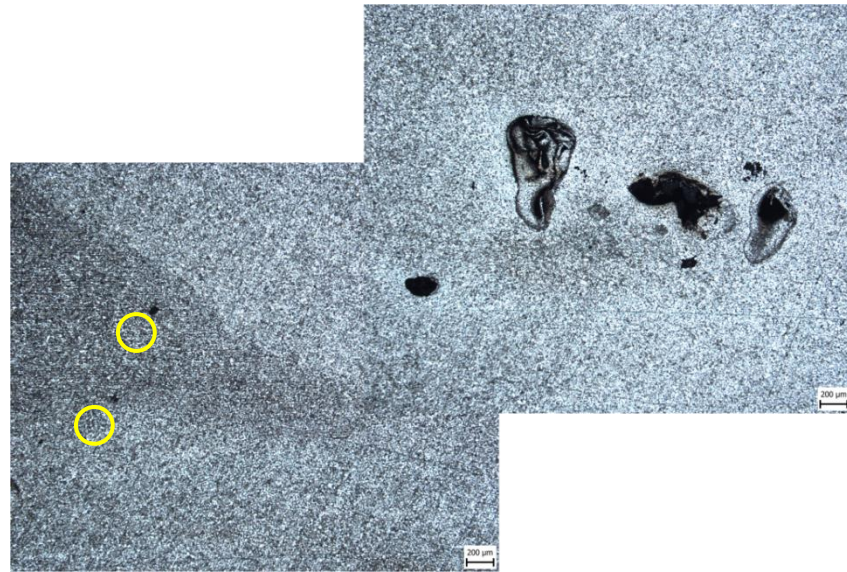
Obr. 54 Vzorek č. 7 - Rozhraní svarový kov TOO
50x



Obr. 55 Vzorek č. 7 – Strukový vměstek v místě
kořene 50x



Obr. 56 Vzorek č. 7 – Svarová housenka 50x



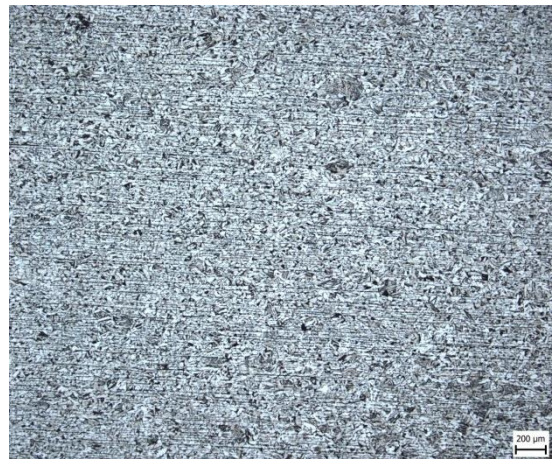
Obr. 57 Vzorek č. 7 – Skupina vměstků ve svarovém kovu 50x

Na obr. 53 je patrný přechod mezi tvárnou a křehkou částí přetvárného lomu. Také je patrná deformace zrn v místě lomu. Na obr. 54 je vidět plynulý přechod mezi svarovým kovem a TOO. Na obr. 55 a 56 jsou viditelné svarové housenky a růst svarového kovu. Konkrétně na obr. 55 je možné si povšimnout vměstku zachyceného mezi housenkami. Na obr. 57 je zachycena skupina vměstků. Jedná se spíše o dutiny po vměstcích, které byly pravděpodobně odstraněny při broušení. Vměstky jsou různých velikostí. Jak je patrné na obr. 57 menší vměstky jsou povětšinou oblého kruhového tvaru, kdežto větší vměstky složitějších tvarů, stále však s oblými hranami.

13.5 Vzorek č. 12 – nesvařovaný materiál



Obr. 58 Vzorek č. 12 – Lom 50x



Obr. 59 Vzorek č. 12 – Materiál 50x

Na obr. 58 je možné si povšimnout prodloužení zrn v místě lomu. Na obr. 59 je nesvařovaný materiál. Dále je patrná vyřádkovaná struktura, jedná se totiž o válcovaný materiál.

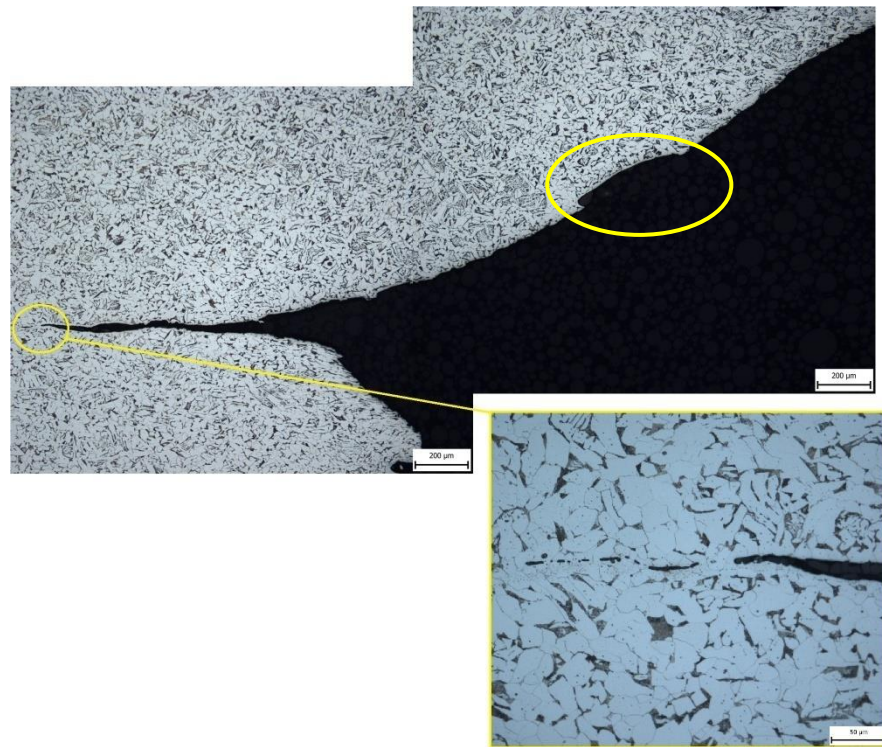
13.6 Vzorek č. 11 – TIG (jiný příd. mat.)



Obr. 60 Vzorek č. 11 – Vada ve svarovém kovu 50x



Obr. 61 Vzorek č. 11 – Vada na rozhraní svarový kov TOO, vada ve svarovém kovu. 50x



Obr. 62 Vzorek č. 11 – Část lomu 100x, detailní snímek vad (žlutý rámeček) 200x

Na všech obrázcích jsou viditelné vady. Na obr. 60 se jedná o vadu situovanou ve svarovém kovu. V případě obr. 61 se vada nachází na rozhraní svarového kovu a TOO. Je zde také přítomna mnohem větší vada situovaná ve svarovém kovu. Na obr. 62 je složený snímek lomu. Zde jsou patrné hned dvě větší vady. Jedna vada je situovaná na lomové ploše (obr. 62 - žlutá elipsa). Druhá vada zasahuje hlouběji do svarového kovu. Na konci této vady je při větším zvětšení patrná řádka malých vad, která pokračuje dále do svarového kovu. Jedná se o oxidické vměstky (okuje), které vznikly ve svarovém kovu vlivem snížené ochrany argonem a okujením přídavného materiálu, jež byl u tohoto vzorku stejný jako základní materiál. Je zde též patrná deformace (prodloužení) zrn na lomové ploše. Tato deformace však není patrná mezi výše zmíněnými vadami (obr. 62). Mezi těmito vadami je patrná členitost povrchu bez viditelné deformace. Z toho lze usoudit, že mezi těmito vadami byla řádka vad, která zapříčinila křehký lom.

13.7 Vzorek č. 18 - Plamen (jiný příd. mat.)



Obr. 63 Vzorek č. 18 – Lom 50x

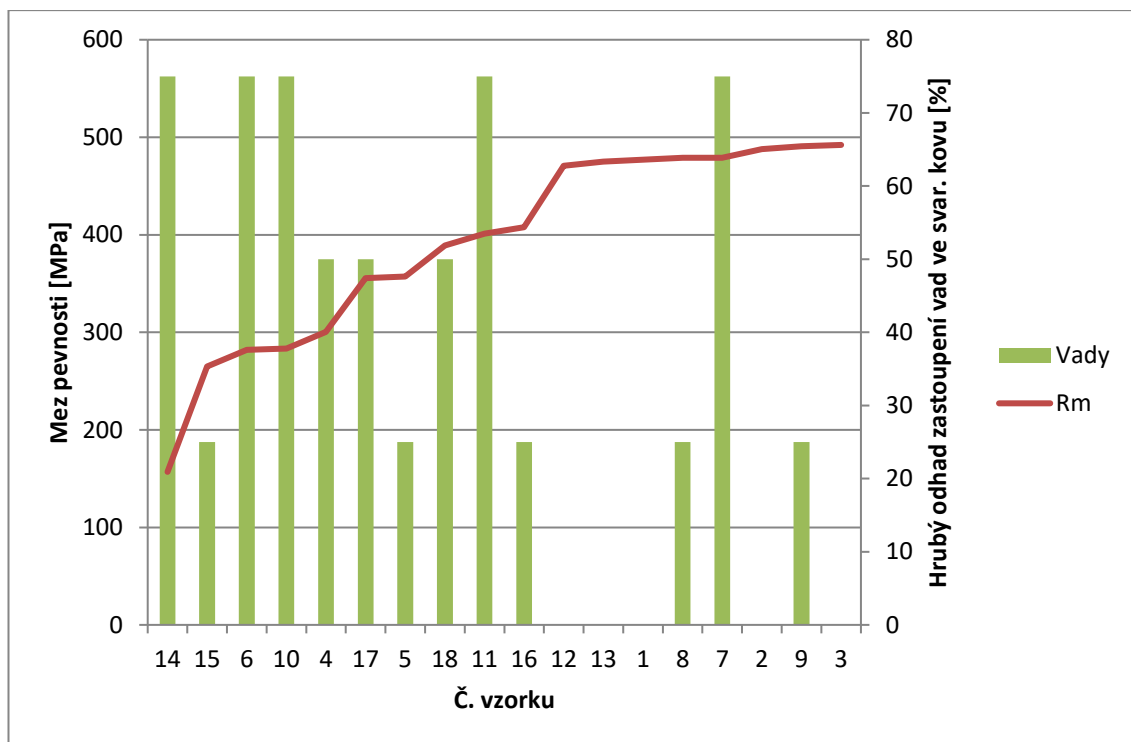


Obr. 64 Vzorek č. 8 – Rozhraní svarový kov TOO
50x

Na lomu jsou patrná místa, kde byly situovány vady (obr. 63). V těchto místech není patrná plastická deformace. Mimo místa výskytu vad je vidět prodloužení zrn. Na obr. 64 vidět rozhraní mezi svarovým kovem a TOO.

14 Diskuze výsledků

Pro snazší vyrozumění vlivu vad na mechanické vlastnosti byly výsledky z ultrazvukového měření a tahové zkoušky vneseny do grafů, ve kterých se porovnává procentuální zastoupení vady ve svarovém kovu (zjištěno při UT viz kap.11.2, Tab. 3) k mezi pevnosti R_m (Graf 1) a prodloužení (Graf 2). Hodnoty R_m a prodloužení jsou seřazeny od nejnižší k nejvyšší.



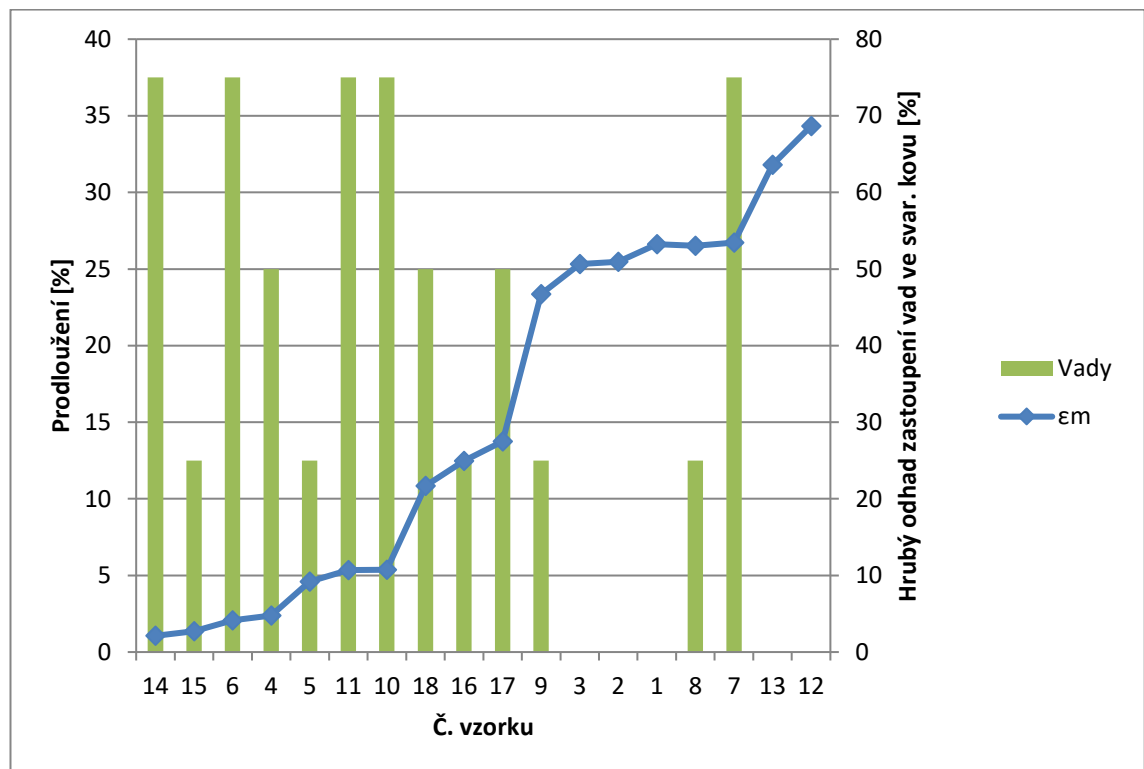
Graf. 1 Mez pevnosti R_m vztážená k hrubému odhadu zastoupení vady ve svarovém kovu [%], který byl zjištěn při ultrazvukovém měření.

Sk.	Č. vz.	Způsob svař./ vada
1	1, 2, 3	TIG (WPS)/ bez vad
2	4, 5, 6	Plamen (WPS)/okuje
3	7, 8, 9	Obalovaná el./ vměstky
4	10, 11, 14	TIG (jiný příd. mat.)/póry, okuje, neprůvar
5	12, 13	Etalon/bez vad
6	15, 16, 17, 18	Plamen (jiný příd. mat.)/ okuje

Tab. 5 Přehled vzorků pro porovnání

Z Grafu 1 je patrné, že vzorky s nižší mezí pevností (tj. oproti vzorkům č. 12 a 13) byly všechny přetrženy ve svarovém kovu v místě výskytu vad. Jedná se převážně o vzorky s okujemi. Lze tedy konstatovat, že v tomto případě vady ovlivnily únosnost materiálů. U vzorků 15 a 16 svařených plamenem, kde je přídavný materiál stejný jako základní materiál, je též stejné množství a typ vad, přesto vzorek 16 má vyšší R_m . Toto bylo způsobeno tvarem a orientací vad. V případě vzorku 15 se jednalo o jednu větší plochou vadu ve svarovém kovu pod úhlem cca 15° k centrální ose svaru. U vzorku 16 se naproti tomu jednalo o shluk podlouhlých menších vad orientovaných ve směru osy namáhání tahové zkoušky. Vzorky 7 a 11 oba svařované el. obloukem, ale pokaždé jinou technikou a s jiným příd. mat., dosahují vysoké pevnosti, přesto, že vykazují vysoké procento vad ve svarovém kovu. Toto bylo způsobeno tvarem, rozmístěním a typem

vad. Vzorek č. 7 obsahoval struskové vměstky. Jednalo se převážně o malé vady oblých tvarů tvořící shluky ve svarovém kovu. Ve vzorku č. 11 byly ve svarovém kovu oxidické vměstky (okuje). Jednalo se o vměstky různých velikostí (na mikro i makro úrovni) podlouhlého tvaru. Vměstky menších rozměrů tvořily řádky, kdežto větší vady byly povětšinou samostatně se vyskytující ve svarovém kovu. Vzorky 1, 2, 3 svařované bez vad dokazují, že svar byl proveden správně a materiál si zachoval adekvátní mechanické vlastnosti. Ze snímků světelné mikroskopie bylo prokázáno dobré spojení přídatného a zákl. materiálu.



Graf. 2 Prodloužení vtažené k hrubému odhadu zastoupení vady ve svarovém kovu [%], který byl zjištěn při ultrazvukovém měření.

Nejvyššího prodloužení dosáhly nesvařované vzorky. Lze tedy konstatovat, že svary ovlivnily tažnost materiálu. V grafu 2 je možné zaznamenat, že téměř všechny vzorky obsahující vady (mimo vzorků 7 a 8) mají prodloužení menší než 25 %. Z toho lze usoudit, že dalším faktorem ovlivňující tažnost jsou vady ve svarovém kovu. Tato skutečnost byla potvrzena z vyhodnocení lomových ploch. U vzorků přetržených ve svarovém spoji (viz kapitola 11. 2, Tab. 4) bylo možné zaznamenat, že v místech vad došlo ke křehkému lomu.

15 Závěr

V rámci tohoto experimentu byly nejprve pozorovány rozdíly mezi tenkými a tlustostěnnými svařenci. Rozdíly byly pozorovány na vzorcích dvou svarů masivního (tl. 78 mm) a tenkého svaru (tl. 2 mm). Sledování bylo prováděno v rámci metalografie. Mezi hlavní rozdíly mezi těmito vzorky lze zařadit objem svarového kovu, počet svarových housenek, velikost TOO, velikost a směr růstu zrn.

Dále byl pozorován vliv vad na mechanické vlastnosti svarového spoje a jejich detekce pomocí NDT metod. Veškeré zkoušky byly prováděny na 18 zkušebních vzorcích svařovaných různými metodami. Pomocí ultrazvukové zkoušky se podařilo zjistit: hrubý odhad zastoupení vad ve svar. kovu (v %), místo výskytu (převážně svarový kov), přibližnou velikost a přibližný počet vad. Pomocí tahové zkoušky se poté zjišťovaly mechanické vlastnosti svarových spojů v závislosti na vadách. Pomocí metalografie byly doplněny potřebné informace o charakteru a umístění vad. Měřením se dospělo k těmto výsledkům:

- Hlavními faktory vad, které ovlivňují mechanické vlastnosti svar. spojů jsou typ vady, tvar, velikost, místo výskytu a orientace
- Velikost a tvar závisí převážně na typu vady, V případě struskových vměstků se jednalo o drobné vady oblých tvarů tvořících shluky. Kdežto oxidické vměstky (okuje) byly větších rozměrů a složitých ostrohranných tvarů.
- Vzorky obsahující struskové vměstky ve svarovém kovu dosáhly dobrých mechanických vlastností i přes výskyt vad. Což bylo patrně způsobeno oblým tvarem a malou velikostí těchto vad
- Vzorky svařované stejnou metodou, obsahující stejné množství a typ vad ve svarovém kovu. Měli velmi rozdílné pevnostní vlastnosti. Což bylo způsobeno orientací vad ve svarovém kovu.

Na základě provedených měření a výsledků lze konstatovat, že vady snižují pevnost spoje, ale podle jejich „parametrů“ se výrazně liší míra snížení této pevnosti.

Citovaná literatura

- [1] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*: celostátní vysokoškolská učebnice pro strojní fakulty vysokých škol technických. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [2] KOVAŘÍK, Rudolf a František ČERNÝ. *Technologie svařování*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-697-5.
- [3] *Schinkmann.cz* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz>
- [4] KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1984
- [5] Elektronové svařování: perspektivní metoda pro speciální materiály. *Mmspektrum.com*[online]. 2016 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/elektronove-svarovani-perspektivni-metoda-pro-specialni-materialy.html>
- [6] LASER WELDING. *Ionix.fi* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.ionix.fi/en/technologies/laser-processing/laser-welding/>
- [7] Laser welding thick sections. *Ewi.org* [online]. 2010 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://ewi.org/laser-welding-thick-sections/>
- [8] Linear Friction Welding. *Dthrotarydrilling.com* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://dthrotarydrilling.com/News/14-September-2010/spin_weld.html
- [9] Difúzní svařování. *Mmspektrum.com* [online]. 2012 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/difuzni-svarovani.html>
- [10] WELD JOINTS. *Tpub.com* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.tpub.com/steelworker1/16.htm>
- [11] KUNCIPÁL, Josef. *Speciální technologie - Svařování*. I. Plzeň: Ediční středisko VŠSE v Plzni, 1988.
- [12] AUTORŮ), (kolektiv. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 8085771632.
- [13] Residual Stress Measurement. *Slideshare.net* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/mangal021me/group16-ppt-49399706>
- [14] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980.
- [15] *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1811>

- [16] BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Cws-anb.cz* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
- [17] Typy vad svarových spojů. *Svarox.cz* [online]. 4. 5. 2016 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://svarox.cz/category/o-svarovani/>
- [18] RAJ, Baldev, C.V. SUBRAMANIAN a T. JAYAKUMAR. *Non-destructive testing of welds*. Materials Park, Ohio: Distributed in North America by ASM International, c2000. ISBN 08-717-0678-4.
- [19] NĚMEC, Josef. Svařování korozivzdorných a žárovevých ocelí. Druhé vydání. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51 Praha1, 1975.
- [20] *Encyclopedia of Terms* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://www.weldcor.ca/encyclopedia>
- [21] Pórovitost svarů. *Mmspektrum.com* [online]. 2016 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/porovitost-svaru-oceli-svarovanych-metodou-mig-mag.html>
- [22] Welding Defects. *Nptel.ac.in* [online]. [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/112107144/welding/lecture13.htm>
- [23] Solid Inclusions that impair Weld characteristics. *Weldpedia.com* [online]. 2014 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: <https://www.weldpedia.com/2014/08/solid-inclusions-that-impair-weld-characteristics.html>
- [24] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [25] Nondestructive Material Testing with Ultrasonics. *Ndt.net* [online]. 2000 [cit. 2016-11-27]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke1.htm#3> (<http://www.ndt.net/article/v05n09/berke/berke1.htm#3>)
- [26] Krautkramer NDT Ultrasonic Systems. *Slideplayer.com* [online]. 2015 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <http://slideplayer.com/slide/1566325/>
- [27] Advances in phased array ultrasonic technology applications. Waltham, MA: Olympus NDT, c2007. ISBN 0-9735933-4-2.
- [28] *Ndt.net* [online]. [cit. 2018-04-17]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/forum/thread.php?admin=&forenID=0&msgID=61080&rootID=61069>
- [29] Ultrasonic Testing Using Phased Arrays. *Ndt.net* [online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn151/idn151.htm>

- [30] Ultrazvuková technika zkoušení phased array. *Ptsndt.com*[online]. [cit. 2018-04-19]. Dostupné z: <https://www.ptsndt.com/cs/pts-josef-solnar-ndt-skoleni-vzdelavani/ut-ndt-zkouseni-ultrazvukem/ut-zkouseni-phased-array>
- [31] Manufacturing of welded joints with realistic defects. *TWI-global.com* [online]. 2011 [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/manufacturing-of-welded-joints-with-realistic-defects/>
- [32] Defects - solidification cracking. *Twi-global.com* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/defects-solidification-cracking-044/>
- [33] What is hot cracking (solidification cracking)?: Frequently Asked Questions. *Twi-global.com* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/material-faqs/faq-what-is-hot-cracking-solidification-cracking/>
- [34] DYNARAY & DYNARAY LITE. *Zetec.com* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.zetec.com/products/ultrasound/instrumentation/dynaray-dynaray-lite/>
- [35] *Cvrez.cz* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: http://download.cvrez.cz/ndt_plzen/Karta_zarizeni_PAUT_CZ.pdf
- [36] *Zwick.com* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <https://www.zwick.com/en/extensometers/laserxtens-hp>
- [37] S235JR STEEL GRADE, MECHANICAL PROPERTIES, CHEMICAL COMPOSITION, GRADE EQUIVALENT. *B2bmetal.eu* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/141/>