



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

APLIKACE SVAŘOVÁNÍ ELEKTRONOVÝM SVAZKEM PRO REKONSTRUKCI VZORKŮ PRO MECHANICKÉ ZKOUŠKY Z MALÝCH OBJEMŮ MATERIÁLU

RECONSTRUCTION OF MECHANICAL TESTING SAMPLES FROM SMALL VOLUMES OF
MATERIALS USING ELECTRON BEAM WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JANA ROUBALOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. VÍT JAN, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jana Roubalová

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

obor: **Materiálové inženýrství (3911T011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aplikace svařování elektronovým svazkem pro rekonstrukci vzorků pro mechanické zkoušky z malých objemů materiálu

v anglickém jazyce:

Reconstruction of mechanical testing samples from small volumes of materials using electron beam welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ověřte praktickou upotřebitelnost rekonstrukce vzorků pro zkoušku rázem v ohybu z malých objemů materiálů. Proveďte kontrolní metalografickou analýzu třech modelových materiálových kombinací z hlediska mechanických vlastností svaru a ovlivnění vlastností zkoušeného materiálu. Rekonstruované vzorky podrobte testům zkouškou rázem v ohybu a srovnajte s výsledky z masivních monolitických vzorků.

Cíle diplomové práce:

Ověření použitelnosti metody výroby vzorků pro zkoušky rázem v ohybu z malých objemů materiálu rekonstrukcí svařováním elektronovým paprskem.

Seznam odborné literatury:

1. Fremunt, P., Podrábský, T. Konstrukční oceli. Brno: Cerm, 1996. 267 s.
2. Pluhař, J., Puškár, A., Koutský, J., Macek, K., Beneš, V. Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu. Praha: SNTL, 1987. 298 s.
3. Koutský, J., Slitinové oceli pro energetické strojírenství
4. Meetham: Materials for High Temperature Engineering Applications, Springer; 2000 edition
5. Schulz: Electron beam welding, Woodhead Publishing; 1 edition (1994)

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vít Jan, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/2016.

V Brně, dne 6.2.2015

L.S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na aplikaci vzorků s vnitřním insertem pro Charpyho nárazovou zkoušku. Daný insert je svařen k přídavným materiálům, doplňujících délku normovaného vzorku, elektronovým paprskem za předem zvolených svařovacích parametrů. Parametry na svařování byly zjištěny z provedených experimentů na homogenních svarech. Vzniklý heterogenní svar je podroben hodnocení mikrostruktury, chemického složení a mikrotvrdosti.

Jako experimentální materiály byly použity austenitická ocel 17 240 a feritická ocel 17 153 používané na vysokoteplotní aplikace.

Klíčová slova

Homogenní svar, heterogenní svar, vysokoteplotní materiály, elektronové svařování, Charpyho zkouška rázem v ohybu, vzorek s vnitřním insertem

Abstrakt

This thesis is focused on application samples with the inner insert used for Charpy impact test. This insert is welded to additional material by electron beam with pre-selected welded parameters. These parameters were chosen from data of performed experiments on homogenous welds. Resulting heterogenous weld was performed of evaluation of the microstructure, chemical composition and microhardness.

Experimental materials were used austenitic steel 17 240 and ferritic steel 17 153 used on high-temperature applications.

Key words

Homogenous weld, heterogenous weld, high temperature materials, electron beam welding, Charpy impact test, sample with inner insert

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Aplikace svařování elektronovým svazkem pro rekonstrukci vzorků pro mechanické zkoušky z malých objemů materiálu* vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny a řádně citovány v seznamu použité literatury této práce.

V Brně dne 8. 10. 2015

.....
Jana Roubalová

Poděkování

Na tomto místě bych chtěla poděkovat především vedoucímu práce doc. Ing. Vítu Janovi, Ph.D. za vedení diplomové práce a také za velkou podporu při jejím zpracování. Další poděkování patří mé rodině a přátelům za neustálé povzbuzování při studiu.

Bibliografická citace

ROUBALOVÁ, J. *Aplikace svařování elektronovým svazkem pro rekonstrukci vzorků pro mechanické zkoušky z malých objemů materiálu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 63 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Vít Jan, Ph.D..

Obsah

1.	Úvod	3
2.	Aplikace svařování v energetickém průmyslu	4
2.1.	Vysokoteplotní materiály na energetické aplikace	5
2.2.	Charakteristika feritických a austenitických ocelí na vysokoteplotní aplikace	6
2.2.1.	Feritické oceli	6
2.2.2.	Austenitické oceli	8
3.	Svařování žárupevných ocelí	9
3.1.	Homogenní svar	9
3.2.	Heterogenní svar	10
3.3.	Redistribuce intersticiálních a substitučních prvků	11
4.	Zkouška rázem v ohybu	13
4.1.	Provedení zkoušky rázem v pohybu	13
4.2.	Typy zkušebního tělesa	13
4.2.1.	Průběh zkoušky	14
4.3.	Aplikace heterogenního svařování na vzorky pro Charpyho zkoušku	17
5.	Svařování elektronovým paprskem	19
5.1.	Hlavní části zařízení pro sváření elektronovým paprskem	19
5.2.	Svar provedený elektronovým svazkem	21
5.3.	Konkrétní řešená aplikace vzorku s vnitřním insertem	22
6.	Experimentální část	24
6.1.	Experimentální materiál	24
6.1.1.	Ocel 17 240	24
6.1.2.	Ocel 17 153	25
6.2.	Provedené experimenty	26
6.2.1.	Nastavení vhodných parametrů pro svařování na elektronovém paprsku	26
6.2.2.	Výroba vzorků na zkoušku rázem v ohybu	26
6.2.3.	Vychylování elektronového svazku při svařování	27
6.2.4.	Příprava vzorků pro metalografickou analýzu	28
6.2.5.	Měření mikrotvrdomosti	28
6.2.6.	Měření lokálního chemického složení metodou EDS	29
7.	Výsledky experimentů	30
7.1.	Homogenní svary na austenitické oceli 17 240	30
7.1.1.	Hodnocení mikrostruktury	31
7.1.2.	Hodnocení mikrotvrdomosti	33
7.1.3.	Shrnutí poznání homogenního austenitického svaru	34
7.2.	Homogenní svary na feritické oceli 17 153	34
7.2.1.	Hodnocení mikrostruktury	35
7.2.2.	Vývoj mikrotvrdomosti	38

7.2.3.	Shrnutí poznání homogenního feritického svaru.....	39
7.3.	Porovnání parametrů austenitického a feritického svaru.....	39
7.3.1.	Porovnání svařovacích parametrů homogenních svarů.....	40
7.4.	Heterogenní svarový spoj ocelí 17 240 a 17 153	41
7.4.1.	Heterogenní svar ocelí 17 240 a 17 153 bez vychýlení.....	42
7.4.2.	Heterogenní svary s vychýlením elektronového paprsku do oceli 17 153 ...	43
7.4.3.	Heterogenní svar s vychýleným elektronovým paprskem do oceli 17 240..	45
7.4.4.	Hodnocení mikrotvrdosti	47
7.4.5.	Hodnocení chemického složení heterogenních svarů.....	49
7.4.6.	Shrnutí poznání chemického složení heterogenních svarů.....	54
7.4.7.	Rozměrové parametry heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240	54
7.5.	Návrh velikosti insertu pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu	55
8.	Závěr.....	58
9.	Citace.....	59
10.	Seznam použitých zkratk	62
11.	Přílohy	63

1. Úvod

Svařování v energetickém průmyslu nastoupilo s rostoucím počtem oprav jaderných reaktorů. Problematika oprav a jejich realizace vyžadují složitá konstrukční řešení za nutných použití svarů. Vzniklé svary jsou většinou heterogenní, tedy složené ze dvou, nebo více, rozdílných materiálů. Problematice heterogenních svarů při opravách jsou věnovány četné články.

Při testování heterogenních svarů na zkoušku rázem v ohybu dochází k problému umístění zkušebního tělesa. Válcový tvar reaktoru není dostatečně prostorný na umístění normovaného vzorku na zkoušku rázem v ohybu a také finanční náročnost těchto vzorků je velmi limitující. V některých případech je nutné odebírat vzorek ve směru kolmém na povrch válcového tvaru. Zde není tloušťka pláště dostatečná pro vyrobení normovaného vzorku.

Tato práce prezentuje použití malého vzorku materiálu, insertu, svařeného z obou stran elektronovým paprskem k přídavnému materiálu podobných vlastností, ale finančně dostupnějšího. Takto vzniklý vzorek by měl svým rozměrem a provedeným heterogenním svarem vykazovat stejné hodnoty výsledků jako standardizovaný vzorek pro zkoušku rázem v ohybu.

2. Aplikace svařování v energetickém průmyslu

Nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie jsou v současné době atomové elektrárny spolu s tepelnými elektrárnami. Vzhledem k omezeným zásobám uhlí se trend tepelných elektráren zachová v horizontu několika desetiletí. Z procentuálního hlediska představují atomové elektrárny v Evropě nejvýznamnější zdroj, následují tepelné elektrárny (30 %), plyn (18 %), ropa (6 %) a obnovitelné zdroje poskytují přibližně 14 % energie. V České republice jsou v provozu dvě atomové elektrárny a to Dukovany se čtyřmi výrobními bloky a Temelín se dvěma výrobními bloky [1, 2].

V energetickém průmyslu se používá na výrobu atomových reaktorů žárupevných materiálů, které odolávají teplotám páry až 600 °C. Důležitým parametrem páry je také tlak, který se pohybuje v řádech desítek MPa. Standardní parametry páry jsou (540 °C/18 MPa). Se zvýšením parametrů páry na (610 °C/30 MPa) lze dosáhnout tepelné účinnosti o 8 % vyšší při snížení oxidu uhličitého o 20 %. Žárupevné materiály pracující v těchto podmínkách musí být odolné proti creepu za vysokých teplot, oxidaci v prostředí vodní páry, korozi a dalších. Vhodně používané materiály jsou CrNi(Mo) austenitické oceli, jejichž použití je ale limitováno nízkou tepelnou vodivostí a zároveň velkou tepelnou roztažností, což způsobuje nebezpečí únavového poškození materiálu [1, 2].

Zavedení heterogenních svarů žárupevných ocelí se používá s rostoucí frekvencí na konstrukce nové, a nebo při plánovaných rekonstrukcích a opravách stávajících konstrukcí v chemickém i energetickém průmyslu. Velká část svarů je zhotovena ze žárupevných ocelí a výsledný svar se skládá z feriticko – austenitické struktury. Svary jsou ovlivněny strukturální nestabilitou v průběhu svařovacích operací s tepelným zpracováním a také v následujících operacích. Důležitou roli hraje rozložení uhlíku a sekvence změn ve struktuře. Dochází k tvorbě zóny ochuzené na uhlík a zóny obohacené na uhlík v druhém kovu, nejčastěji ve vícelegované oceli s vyšším obsahem chromu. Výsledný svar vykazuje rozdílné mechanické vlastnosti, korozní odolnost, mikrostrukturu a je náchylný na svarové vady, které mohou být způsobeny při svařovacím procesu. Může docházet ke vzniku zbytkového napětí při spojování materiálů různých struktur, které už nelze odstranit dalším tepelným zpracováním. Tyto činitele způsobují chemickou, strukturální a mechanickou nestejnorodost svarových spojení. Proto se kontrola heterogenních svarů provádí, a to jak nedestruktivně přímo na svaru nebo destruktivně na zkušebních vzorcích. Destruktivní zkoušení má velkou roli pro zjišťování tranzitního chování přímo v místě provedení svaru za testování zkoušky rázem v ohybu. Dále se provádí creepové zkoušky pro následné hodnocení rozložení uhlíku, hodnocení mikrostruktury a mnoho dalších [1].

Obecně jsou místa svaru velmi náchylná k přítomnosti trhlin. Svar, který má defekt v podobě trhliny, anebo je svar nedokonale provedený, je náchylný na porušení. Zavedením mechanických zkoušek prováděných za různých teplot se docílí komplexního poznání chování daného materiálu. Proto se pro žárupevné materiály volí zkouška rázem v ohybu a zkouška creepu při dlouhých výdržích na dané teplotě.

Testování svarů pomocí zkoušky rázem v ohybu na svařovaných konstrukcích je kvůli válcovým rozměrům problematické. Je potřeba zkoušet svar v různých místech, jak celou soustavu, tak přechod mezi spojovaným materiálem a svarovým kovem. Standardizovaný vzorek rozměrů 10×10×55 mm je s touto šířkou a délkou na válcových součástech většinou nemožné umístit. Používá se vzorků s menšími rozměry nebo vzorků s vnitřním insertem, doplněným navařeným kovem na potřebnou délku vzorku z obou stran insertu. Vzorky s vnitřním insertem jsou zatím na experimentální úrovni zkoušení.

2.1. Vysokoteplotní materiály na energetické aplikace

S požadavky na bezpečnost a spolehlivost materiálů použitých na aplikace v energetickém průmyslu se stále vyvíjejí a zkoušejí nové materiály. Důraz se klade na využití stále větších teplot a tlaků. Při zpracování vysokotavitelných kovů se uplatňují poznatky z oboru fyziky kovů, zejména jde o creep, plastickou deformaci při přechodu z křehkého do tvárného stavu, rekrytalizaci, precipitační a disperzní vytvrzování, korozi, oxidaci, povrchové vlastnosti a odolnost proti radiaci. Všechny mechanické vlastnosti a většina fyzikálně – chemických vlastností jsou v přímé závislosti na mikrostruktuře [3, 4].

Vývoj materiálů odolávající vyšším teplotám je následkem vzrůstajícího počtu parních turbín pracujících za teploty kolem 550 °C a vyšší. Další aplikace vysokoteplotních materiálů byly vylepšeny odolností proti oxidaci, která je často zajištěna vysokým množstvím chromu. Díky tomuto prvku se v korozně náročných aplikacích uplatňují feritické nebo austenitické oceli, ale také martenzitické oceli odolné proti creepu. Přestože tyto oceli mají výborné mechanické i strukturní vlastnosti je nutné provádět zkoušky tečení materiálu a přizpůsobovat pracovní podmínky jejich výsledkům [5].

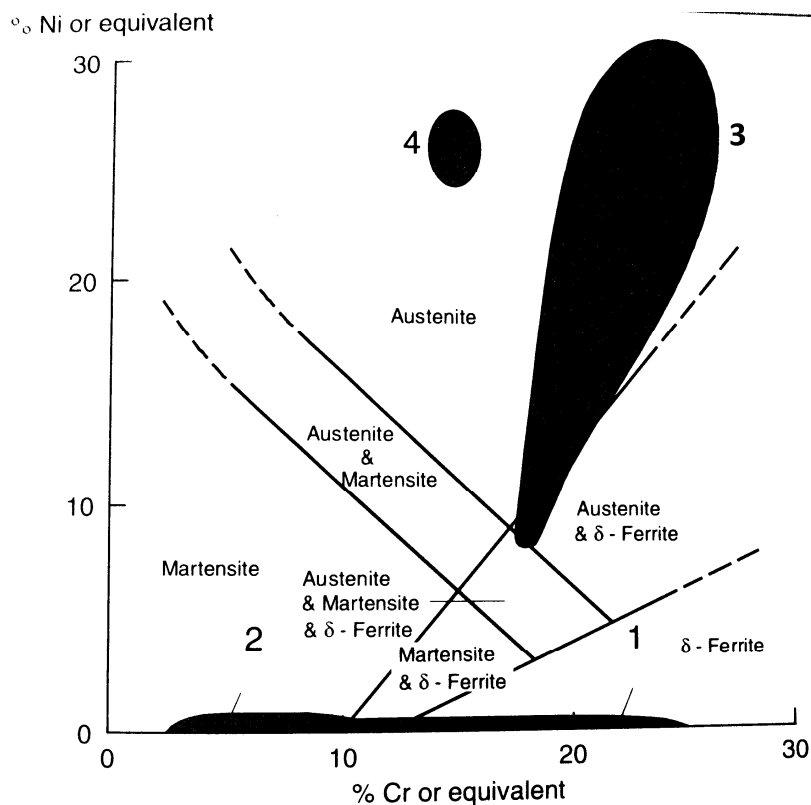
Rozdělení vysokoteplotních ocelí do 4 hlavních skupin podle dané struktury je zobrazeno na *obr. 1* v Schaefflerově diagramu. Tento diagram pomocí chromového a niklového ekvivalentu ukazuje fázové složení ocelí odpovídající jejímu chemickému složení. Mnohem detailněji a přesněji se pro určení vlivu chemického složení na fázové složení ocelí v současné době používají počítačové simulace termodynamicky rovnovážných stavů např. software Thermocalc [5].

Schaefflerův diagram zahrnuje do výpočtů ekvivalentů legujících prvky: chrom, molybden, wolfram, křemík, vanad, niob, nikl, mangan, titan, bor a další. Všechny legující prvky mají vliv na výslednou strukturu a také mají speciální vliv na některé oblasti na chování materiálu. Nejdůležitějším legujícím prvkem je chrom, který zlepšuje odolnost vůči oxidaci, ale negativně ovlivňuje rozměrovou stabilitu na chrom bohatých karbidů $M_{23}C_6$ [5].

Výpočty ekvivalentů pro práci s Schaefflerovým diagramem [1]

$$Ni_{eq} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn + 25 \% N$$

$$Cr_{eq} = \% Cr + 2 \% Si + \% 1,5 Mo + 0,75 \% W + 5 \% V + 1,75 \% Nb + 1,5 \% Ti$$



Obr. 1 Schaefferův diagram zobrazující ocele na vysokoteplotní aplikace
 1 – Feritické korozivzdorné materiály, 2 – martenzitické oceli odolné creepu,
 3 – austenitické korozivzdorné oceli, 4 – vysokopevnostní austenitické oceli
 (martensite – martenzit, austenite – austenit, ferrite – ferit, □ – ferrite – □ – ferit,
 equivalent – ekvivalent)[5]

2.2. Charakteristika feritických a austenitických ocelí na vysokoteplotní aplikace

2.2.1. Feritické oceli

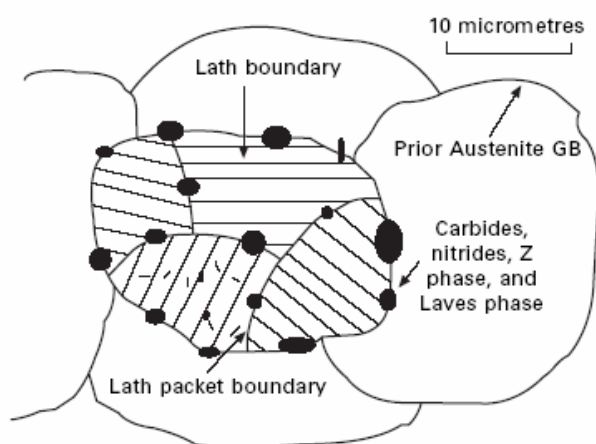
Pro vysokoteplotní aplikace byly vyvinuty feritické oceli odolávající korozi a oxidaci za vysokých teplot v rozmezí 550 – 700 °C. Tyto oceli jsou charakteristické svým malým obsahem uhlíku (0,02 – 0,1 hm %) a velkým obsahem chromu (5 – 30 hm %), protože chrom je hlavním prvkem, který stabilizuje ferit. Se vzrůstajícím obsahem chromu se teplotní odolnost výrazně zvyšuje. Dalšími důležitými legujícími prvky ve feritických ocelích jsou Si, Al a malé procento prvků vzácných zemin, které snižují možnost tvorby oxidických částic během teplotního namáhání [5, 6].

Chemické složení vybraných vysokoteplotních ocelí je uvedeno v tab. 1.

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Al	Nb	W	N	B	Ti	Y
E911	0.12	0.35	0.19	0.007	0.003	9.10	0.22	1.00	0.23	0.006	0.069	0.98	0.07			
P92	0.11	0.35	0.19	0.008	0.003	8.96	0.06	0.47	0.20		0.07	1.84	0.05	0.001		
IN718	0.04	0.06	0.40			18.2	Bal	3.00		0.50	5.20			0.004		
MA957						14.0		0.3							1.0	0.25
Eurofer	0.11	0.42	0.06			8.9			0.2			1.1				0.3
1.4914	0.11	0.35	0.45			11.3	0.7	0.5	0.3		0.25		0.029	0.007		
20/25	0.049					20.0	25.0				0.52					
PE 16	0.08	0.05				17.1	42.5	3.1		1.3					1.2	
304LN	0.027	1.46	0.72	0.012	0.012	18.8	10.5	0.06					0.177	0.002		
316LN	0.021	0.44	0.28	0.012	0.019	17.7	12.1	2.2					0.25	0.003		

Tab. 1: Chemické složení vysokoteplotních ocelí [7]

Zástupcem feritických ocelí je slitina P92 (chemické složení viz tab. 1), která má na hranicích zrn precipitáty typu $M_{23}C_6$ s nejvyšším výskytem Cr, ale i Mo, Fe a W karbidů, viz obrázek obr. 2. Tyto precipitáty zajišťují lepší odolnost proti creepu, protože blokují hranice zrn při teplotním namáhání. Precipitáty jsou stabilizovány při vystavení oceli na vysoké teplotě a zaručují stabilní strukturu oceli. Studium precipitátů bylo provedeno s použitím elektronového mikroskopu na tepelně zpracovaných slitinách s rozdílnými teplotními režimy (750 - 760 °C/2 hod) s následným stárnutím (550 - 700 °C/1 rok). Výsledky ukazují, že precipitáty na hranicích zrn nukleují ke konci tepelného režimu a stabilní velikost precipitátů je zaznamenána po 10 000 h na 650 °C, po této době dochází ke hrubnutí a dochází ke ztrátě creepové odolnosti s nástupem čtvrtého stádium creepu [7].



Obr. 2 Schematické zobrazení feritické oceli při tuhnutí austenitického zrna na feritickou strukturu (Lath boundary – laťková hranice, lath packet boundary – celková laťková hranice, prior austenite GB – primární austenitická hranice zrna, carbides – karbidy, nitrides – nitridy, Z phase – fáze Z, Laves phase – Lavesovy fáze) [7]

U feritických ocelí může nastat možnost zkřehnutí a to zejména u ocelí s vyšším obsahem chromu (> 25 hm %). Důvodem je absence fázové přeměny. Fázová přeměna by zlepšila velikost feritického zrna, které může výrazně zhrubnout po vysokoteplotním zpracování nebo po svařování. To by vyvolalo zvýšení tranzitní teploty při vzniku intersticiálních sloučenin [5].

Svařování feritických ocelí

Feritické oceli jsou velmi dobře svařitelné. Svařitelnost bývá ovlivněna svařovacími parametry s důrazem na minimální vnesení tepla do součásti, aby se zabránilo nadměrnému růstu zrna v tepelně ovlivněné oblasti. Při svařování elektrodou se dbá na použití vysušených elektrod. Elektrody, které obsahují vodík nebo dusík, mohou při nedokonalém vysušení způsobit plynatost ve svaru [8].

2.2.2. Austenitické oceli

Austenitické oceli jsou používány na korozivzdorné a napětově odolné aplikace. Tyto oceli obsahují maximálně 0,12 hm% C. Na rozdíl od feritických ocelí jsou odolnější proti korozi, ale při namáhání mají větší sklon ke korozně napětovému praskání a bodové korozi (pittingu) ve vodních roztocích. Hlavní rozdíl od feritických ocelí je ten, že ve struktuře nenastává martenzitická transformace. Dalším rozdílem je typ krystalové mřížky, který je FCC. Tato mřížka je hustěji zaplněna atomy než mřížka BCC, kterou mají feritické oceli. Vyšší zaplněnost má za následek sníženou difuzní rychlost a teplotní vodivost, při vyšším koeficientu teplotní roztažnosti. S vyšší rozpustností uhlíku v austenitu je očekáván vznik většího množství precipitačních karbidů. Růst těchto karbidů je ale limitován rychlostí jejich zhrubnutí. S přihlédnutím na nízkou rychlost difuzivity se u austenitických ocelí používá precipitační zpevnění a tyto oceli obvykle odolávají vyšším teplotám 800 – 1300 °C, vyšším než typické feritické oceli [5, 7].

Svařování austenitických ocelí

Austenitické oceli jsou obecně velmi dobře svařitelné. Výsledný svar obvykle obsahuje několik procent delta feritu. V případě svařování stabilizovaných nebo plně austenitických ocelí je potřeba, aby se zabránilo vzniku trhlin za tepla, které jsou závislé na teplem příkonu použitým při svařování. Při porovnání s feritickými oceli mají austenitické o 50 % vyšší tepelnou roztažnost, to znamená, že deformace a smrštění výrobku může být způsobeno i svařováním. U vysoce legovaných austenitických ocelí je odolnost proti pittingu snížena důsledkem mikrosegregace, primárně způsobené molybdenem. Další legující prvky většinou vedou k odolnosti proti korozi (Cr, Ni, Mo) [8].

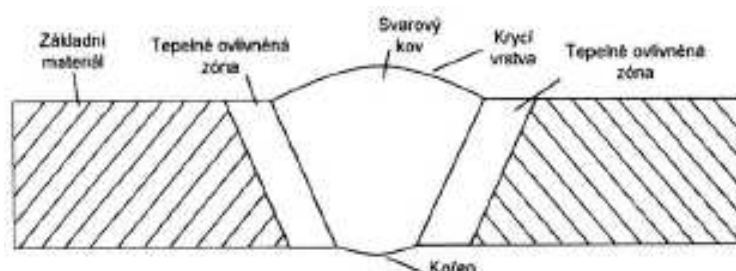
3. Svařování žárupevných ocelí

Při vývoji nových modifikovaných ocelí 9 – 12 % Cr je nutný i vývoj vhodných přídatných materiálů, optimalizace technologie svařování a hodnocení vlastností svarových spojů. Při návrhu konstrukce svarových komponent žárupevných materiálů v energetickém zařízení je třeba vzít v úvahu creepové pevnosti ve svarových spojích. Žárupevnost svarových spojů je experimentálně studována s využitím vzorků, jejichž délka zahrnuje základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Poté se porovnává žárupevnost základního materiálu a svarového spoje [1].

Vývoj přídatných materiálů pro svařování žárupevných ocelí s 9 – 12% Cr za použití technologií ROS, TIG a SAW byl zaměřen na dosažení vysokých hodnot meze pevnosti při creepu a zároveň vyhovující úrovně vrubové houževnatosti svarového kovu po vyžhání svarového spoje. Obsažené legující prvky, které výrazně zlepšují žáropevné vlastnosti většinou, snižují hodnotu vrubové houževnatosti svarového kovu (požadovaná hodnota KV=41 J pro 20 °C) a proto používané přídatné materiály mají vyšší obsah niklu (max. 1 hm %) než základní materiál [1].

3.1. Homogenní svar

Svařením dvou materiálů dojde ke vzniku nerozebíratelného spoje vzájemným ztavením obou materiálů. Náčrt homogenního svaru je na *obr. 3*. Natavenou část spoje označujeme jako svarový kov (SK) a naopak část, která byla ovlivněna vneseným teplem, se označuje jako tepelně ovlivněná oblast (TOO), ta se nachází pod částečně natavenou zónou. Tepelně ovlivněná oblast nejčastěji bývá kritickým místem pro vznik trhliny nebo jiného poškození způsobeného metalurgickými změnami při teplotním cyklu svařování. Materiál, který nebyl při svařování ovlivněn, se označuje jako základní materiál. [9, 10].



Obr. 3: Náčrt homogenního svaru [11]

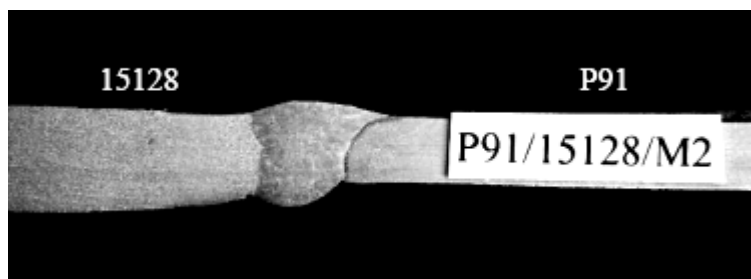
Porušení homogenních svarových kovů vlivem creepu je závislé na aplikovaném napětí. Při vyšším napětí u creepové zkoušky může dojít k porušení v libovolné oblasti svarového spoje, zatímco při nízkém napětí se materiál porušuje interkrystalicky v TOO [1].

Jelikož TOO představuje kritickou oblast homogenních svarových spojů, lze očekávat příznivý vliv technologií, které tuto šířku umožňují minimalizovat. Při použití elektronového svazku (EB) také dochází k porušení svarových spojů v interkryticky žíhaném pásmu TOO. Tento problém bylo možné do značné míry eliminovat úplným tepelným zpracováním svarových spojů, ale bylo zjištěno, že normalizace a popouštění má za následek významný pokles creepové pevnosti svarových kovů, poněvadž při vývoji přídatných materiálů se předpokládalo pouze žíhání po svaření [1].

V současné době existují experimentální nástroje k simulaci svařovacích tepelných cyklů a umožňují získat relativně velký objem materiálu s mikrostrukturou odpovídající různým oblastem TOO. Do simulace nejsou zatím zahrnuty lokální gradienty v mikrostruktuře a zbytkové napětí existující v reálných svarech. I přes to mohou simulace získat experimentální údaje o rozdílech žárupevnosti jednotlivých oblastí TOO [1].

3.2. Heterogenní svar

Nejčastěji používaným spojem v energetickém průmyslu je ocel P91 s dalšími nízkolegovanými žárovečnými oceli, například *obr. 4* – heterogenní svar P91 s ocelí 15 128. Chemické složení těchto dvou ocelí je uvedeno v *tab. 2*. U těchto svarů se věnuje velká pozornost zejména řešení svařitelnosti, mechanizaci svařování a ověření jejich žárovečných vlastností. Důležitou podmínkou je, aby žárovečnost heterogenních svarových spojů dosahovala žárovečnosti homogenních svarových spojů nízkolegovaných ocelí. Důležitý je také možný přehřev před samotným svařováním z důvodu zabránění vzniku křehkých fází ve svarovém kovu [1, 12].



Obr. 4: Heterogenní svar oceli 15 128 a P91 [12]

	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
P91	0,08-0,12	0,20-0,50	0,30-0,60	≤0,020	≤0,010	≤0,040	8,00-9,50
15128	0,10-0,18	0,15-0,40	0,45-0,70	≤0,040	≤0,040	-	0,50-0,75
	Cu	Mo	N	Nb	Ni	V	-
P91	≤0,030	0,85-1,05	0,03-0,07	0,06-0,10	≤0,40	0,18-0,25	-
15128	-	0,40-0,60	-	-	-	0,22-0,35	-

Tab. 2: Chemické složení oceli P91 a 15 128 [12]

Strukturní stabilita heterogenních spojů je ovlivněna chemickou heterogenitou spojů. V průběhu creepové expozice ve svaru dochází k difuzi intersticiálních atomů z méně legované oceli do více legované přes hranici ztavení. Těmito procesy jsou ovlivněny mechanické, žárupevné a korozní vlastnosti spojů [1].

3.3. Redistribuce intersticiálních a substitučních prvků

Provedením svaru dochází k difuzi intersticiálních a substitučních prvků z jednoho materiálu do druhého. V této přechodové oblasti se hodnotí mikrostruktura a vznik nových strukturních složek, anomálie chemického složení a jiné. Vzhledem k závažnosti difuzivité uhlíku byly sestrojeny difuzní křivky uhlíku v ternárních systémech. Při porovnání difuzní rychlosti chromu, kobaltu, niklu nebo mědi s uhlíkem zjistíme, že jsou rychlosti legujících prvků narozdíl od uhlíku zanedbatelné. Proto je rozložení uhlíku pozorováno a je mu věnována velká pozornost. Difuzí intersticiálních prvků se začali vědci zabývat už v roce 1942 [12].

Mikrostrukturní stabilita kombinovaných svarů je závislá na chemické heterogenitě spojů. Při podrobení svarů creepovým zkouškám dochází k difuzi intersticiálních atomů z méně legované oceli do více legované přes hranici ztavení. Je to zapříčiněno vznikem nauhličeného pásma na straně více legovaného materiálu a naopak vznikem oduhlíčené zóny v méně legovaném materiálu. Tyto poté ovlivňují jak mechanické tak žárupevné vlastnosti heterogenních svarových spojů. Tomuto jevu se říká up – hill difuze, neboli obrácená difuze [12].

Kritérium pro kvantitativní rozdělení je předpokládáno podle teorie kvazistacionární difuze. Je odvozeno na základě vzájemného působení prvků s rozdílnou pohyblivostí v mřížce základního kovu. Když je počáteční termodynamická rovnováha systému porušena, například na rozhraní mezi svarovým kovem a základním kovem. Z kovové mřížky se uvolňují intersticiální i a substituční j legující prvky. Nová rovnováha je založena na přednostní difuzi z mřížky kovu atomů intersticiálních prvků. Směr difuze intersticiálních prvků je řízen pomocí přírodní termodynamické interakce mezi intersticiálními a substitučními prvky. Když substituční element snižuje termodynamickou aktivitu prvku intersticiálního, tak je intersticiální prvek přitahován do takové mřížky. To platí i pro opačný případ, tedy že prvek, který zvyšuje aktivitu intersticiálních atomů způsobuje jejich migraci do oblastí s menší koncentrací takového substitučního prvku [13].

Z tohoto se dá vypočítat relativní rychlost difuze obou prvků, intersticiálních a substitučních, výrazem [13] :

$$V_{ij} = \frac{D_i}{D_j} \cdot \frac{N_i}{N_j}$$

Kde D_i , D_j jsou difuzní koeficienty intersticiálních a substitučních prvků

N_i , N_j jsou atomové zlomky stejných prvků dané velikosti kovové mřížky

Podmínky pro použití tohoto výrazu: $D_i \gg D_j$ a $N_i \approx N_j$, relativní rychlost difuze je

$V_{ij} \gg 1$

4. Zkouška rázem v ohybu

Podstatou zkoušky je přeražení zkušební tělesa s vrubem jedním rázem kyvadlového stroje za daných podmínek. Po přeražení zkušební tělesa se určuje energie absorbovaná při rázové zkoušce [14, 15].

K určení hranice mezi křehkým a tvárným lomem se začaly provádět zkoušky za různé teploty na daném normalizovaném tělese s připraveným vrubem. Výsledkem zkoušení je tranzitní křivka a přechodová teplota T_t , která tuto hranici ukazuje [15, 16].

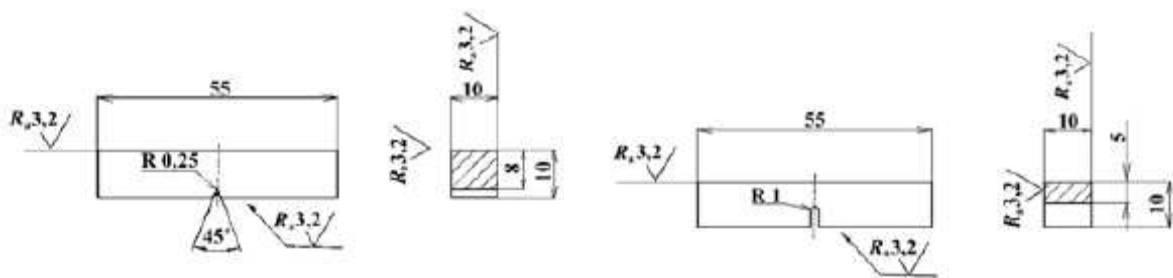
4.1. Provedení zkoušky rázem v pohybu

Zkouška se provádí podle normovaného postupu a to buď podle české normy ČSN ISO 148-1 nebo evropské normy ČSN EN ISO 9016. Následující postup bude popsán podle normy ČSN ISO 148-1 [16].

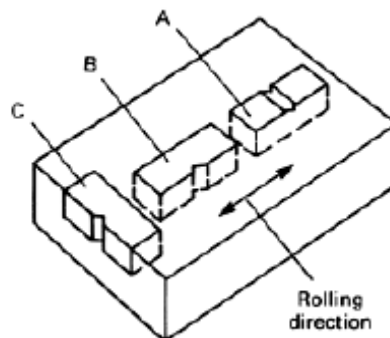
4.2. Typy zkušební tělesa

Při normalizovaném postupu zkoušky jsou používány tělesa rozměru délky 55 mm a čtvercovým průřezem 10 mm s vrubem ve středu délky. Vyrobený vrub může být tvaru V nebo U viz. *obr. 5*. Vrub tvaru V musí mít úhel 45° , hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm. Vrub tvaru U je vyroben s hloubkou 5 mm a poloměrem kořene 1 mm. Povrch připravených vzorků splňuje $R_a = 5 \mu\text{m}$ nebo lepší s výjimkou konců tělesa. Pokud není možné vyrobít zkušební těleso s V nebo U - vrubem se standardními rozměry může se použít jedno z náhradních zkušebních těles o délce 7,5 mm, 5 mm nebo 2,5 mm.

Ve výsledném protokolu o provedení zkoušky by mělo být také uvedeno, jak byl vzorek orientován k základnímu materiálu, rovnoběžně nebo kolmo ke směru válcování, a jakým směrem v porovnání se základním materiálem byl zhotoven vrub, viz *obr. 6*. Při hodnocení vzorků stejného materiálu by měly být všechny vzorky odebrány se stejnými podmínkami, protože různé směry odebrání vzorků mohou ukazovat rozdílné hodnoty výsledků.



Obr. 5: Zkušební tělesa: vlevo provedení V - vrubu a vpravo provedení U – vrubu [17]

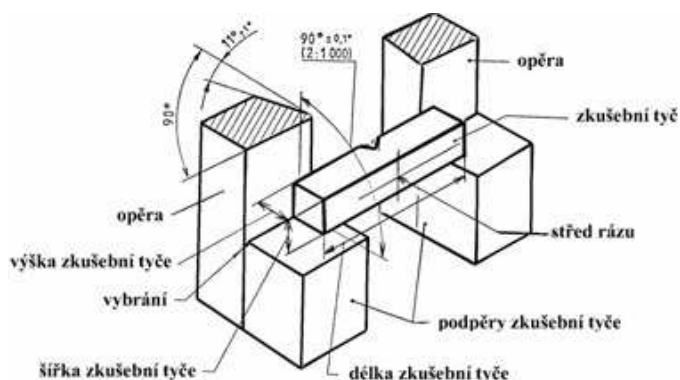


Obr. 6: Možnosti odebrání vzorků k poloze směru válcování, každý vzorek může vykazovat rozdílné hodnoty výsledků (rolling direction — směr válcování) [14]

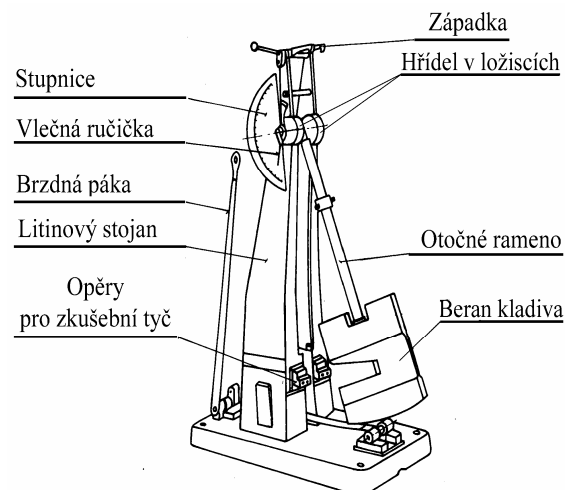
4.2.1. Průběh zkoušky

Zkušební těleso je vloženo proti opěrám zkušebního stroje a vystředěno s maximální odchylkou vrubu do 0,5 mm od středové roviny opěr (obr. 7). Po vložení je zkušební těleso udeřeno břitem kladiva v rovině souměrnosti, přitom břit kladiva má poloměr 2 nebo 8 mm, Obr. 8. Po přeražení vzorku se na stupnici odečítá výsledná absorbovaná energie (energie potřebná k přeražení zkušebního tělesa) a přeražené těleso se dále použije k hodnocení vzhledu a mechanismu lomu k hodnocení příčného rozšíření a hodnocení teplotní závislosti absorbované energie a přechodové teploty.

Průběh zkoušky probíhá při teplotě $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$, pokud je specifikovaná teplota jiná, musí být zkušební těleso temperováno při dané teplotě s přesností $\pm 2 ^\circ\text{C}$.



Obr. 7: Umístění zkušebního tělesa, podpor a opěr na zkušebním rázovém kyvadlovém stroji [17]



Obr. 8: Schéma Charpyho kyvadlového stroje [17]

Po provedení zkoušky mohou také nastat varianty nestandardního porušení uvedené v následujícím textu:

- 1) překročení kapacity stroje, tj. když hodnota absorbované energie překročí 80% počáteční potenciální energie K_p . Když nastane tato situace musí být absorbovaná energie označena jako přibližná.
- 2) nastane neúplný lom, ve zkušebním vzorku se uvádí rázová energie k vyhodnocení průměrné hodnoty spolu s výsledky kompletně přeražených těles.
- 3) zaklínění zkušebního tělesa, výsledky jsou ignorovány a zkušební stroj je zkontrolován.
- 4) pokud je na lomu viditelné označení vzorku není výsledek zkoušky reprezentativní a skutečnost je uvedena ve zkušebním protokolu.

Výsledky zkoušky

Do výsledného protokolu se zapisuje hodnota absorbované energie ve tvaru např. KV 150, kde je výsledná energie k přeražení zkušebního vzorku vyjádřena v Joulech. Zapisuje se také typ a rozměr zkušební tyče včetně tvaru vrubu, identifikace zkušební tyče (druh, tavba,...), směr a poloha odebrání vzorku, nominální energie kladiva a zkušební teplota.

Získání tranzitních křivek

Z naměřených hodnot nárazové práce potřebné k přeražení testovaného tělesa se v závislosti teplota – nárazová práce sestruje graf tzv. přechodových křivek. Tento graf vymezuje oblast, kde se při porušení zkoušeného vzorku vyskytuje tvárný nebo křehký lom. Tato křivka tedy vyjadřuje jak moc je materiál za dané hodnoty houževnatý. Důležité je určit tranzitní teplotu T_T , při které se mění charakter lomu. Materiál začíná křehnout se snižováním teploty, a proto je kladen důraz na hodnoty nárazové práce při nízkých (minusových) teplotách.

V porovnání základní mřížky materiálu se výrazně liší tvar tranzitní křivky pro BCC a FCC materiál. Pro FCC mřížku se tvar křivky výrazně nemění, zatímco u materiálů s BCC mřížkou (nizkouhlíkové oceli) je tranzitní chování výrazné.

Určování tranzitní teploty T_T

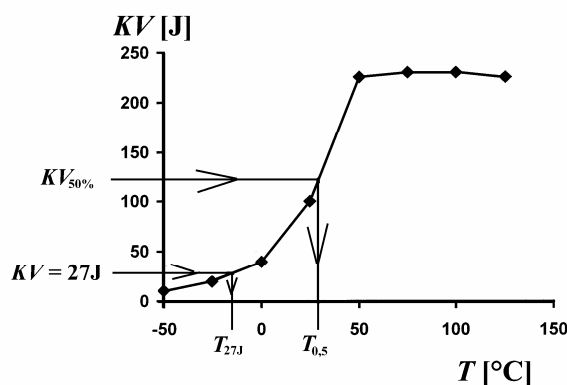
Určení tranzitní teploty pomocí velikosti nárazové práce

Při použití kritéria velikosti nárazové práce 27J se při vynesení nárazové práce 27 J do získaného grafu odečte hledaná tranzitní teplota (T_{27J}).

Další možností získání tranzitní teploty je nutné zjistit průměrnou hodnotu nárazové práce $KV_{0,5}$.

Vztah pro výpočet průměrné nárazové práce:
$$KV_{50\%} = \frac{KV_{\min} + KV_{\max}}{2},$$

kde KV_{\min} a KV_{\max} jsou minimální a maximální hodnota nárazové práce. Po následném odečtení teploty, viz obr. 9, získáme tranzitní teplotu $T_{0,5}$.

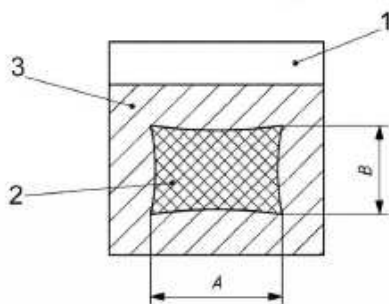


Obr. 9: Získávání tranzitních teplot z tranzitní křivky pomocí $KV_{50\%}$ a $KV = 27J$ [17]

Určení tranzitního chování pomocí vzhladu lomové plochy

Metoda je založená na vyhodnocování lomové plochy přeraženého vzorku, kdy se měří plocha tvárného lomu P_L [%] krystalicky porušené oblasti S_{KL} . Při naměření 50% tvárného lomu je zjištěna tranzitní teplota a s vyšším procentem se tedy materiál porušuje tvárně.

Schéma pro zjištění množství tvárného porušení je uvedeno na obr. 10 a následný výpočet plochy tvárného porušení je:



$$S_{KL} = A \cdot B$$

$$P_{KL} = \frac{S_{KL}}{S_0} \cdot 100$$

$$P_L = 100 - P_{KL}$$

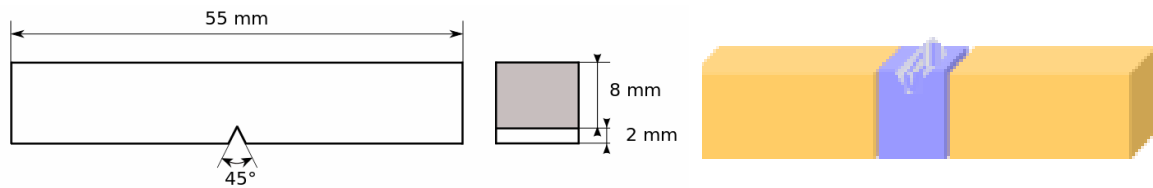
Obr. 10: Přeražený vzorek s vyznačenou štěpnou plochou, 1 – vrub, 2 – štěpná plocha, 3 – tvárná plocha [16]

4.3. Aplikace heterogenního svařování na vzorky pro Charpyho zkoušku

Heterogenní svařování se v energetickém průmyslu začalo uplatňovat po provedených kontrolách a zjištění vzniklé vady na konkrétní součásti. Z hlediska ekonomického se začalo využívat feriticko – austenitických spojů, které jsou si svými mechanickými a žárupevnými vlastnostmi blízké [12, 18].

V mnoha aplikacích bylo potřeba testovat zatěžování materiálů dynamickým rázem přestože není k dispozici dostatečný objem materiálu pro zhotovení normovaného vzorku. Může se jednat o obrobky, odlitky, kde tloušťka stěny nedovolí vyrobit vzorek. Důvodem je také zvolený směr namáhání, který je nutno vyšetřit a vzorek vyžaduje umístit do testovaného kusu tak, že v dané orientaci není dostatek materiálu. Dalším je odebrání vzorku z funkčního kusu a lze odebrat jen omezené množství materiálu. Typickým příkladem jsou pak svary tvarově složitých součástí, kdy namáhaná místa neumožňují vyrobit vzorek pro nárazovou zkoušku jen jednoduchým obrobením z masivu [19].

Již v úvodu byla naznačena problematika výroby vzorků pro zkoušku rázem v ohybu. Nejčastěji se používá laserové nebo elektronové svařování k provedení úzkých svarů s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí. V takových případech je možné vyrobit vzorek pro nárazovou zkoušku tak, že z testovaného materiálu je vyrobena pouze část s vrubem a standardní velikosti se dosáhne přivařením dalšího materiálu z obou stran. Takto vzniklá konstrukce vzorku s vnitřním insertem (zkoušeným materiálem) je opatřena dvěma heterogenními svary. Porovnání standardního vzorku a vzorku s vnitřním insertem je na obr. 11a a obr. 11b [19, 20].



a) Charpyho vzorek standartních rozměrů [17]

b) Vzorek na Charpyho zkoušku s použitím vnitřního insertu [21]

Obr. 11: Konstrukce Charpyho vzorků

Metoda s použitím insertů je v současné době velmi často experimentálně používána. Výsledky a reprodukce výsledků jsou publikovány a v závislosti na použitém druhu svařování se hodnotí přechodová oblast zkoušeného materiálu (insertu) a přídavného materiálu. Další důležitou částí hodnocení těchto vzorků je mikrostruktura, mikrotvrdost přechodové oblasti a vznik místa porušení vzorku. Vzorek, který je touto metodou vyroben, by se měl začít porušovat v mechanicky připraveném vrubu a nikoliv v místě provedení svaru. Kvalita svarů je závislá také na typu svařovaných materiálů, měli by se volit materiály s podobným chemickým složením k zabránění vzniku křehkých fází ve svarovém kovu. Vrub by měl být ve vhodné vzdálenosti od svarů, aby při rozlomení vzorku nedošlo k zasažení svarů vzniklou plastickou zónou od prasklého vrubu. Ze studovaných vědeckých článků se pro svařování insertu a přídavného materiálu volí častěji metoda elektronovým paprskem, čímž vzniká velmi malá tepelně ovlivněná oblast a kvalitní svar. Výsledky tohoto provedení vzorku jsou srovnatelné s výsledky provedenými na standardních vzorcích, ale finanční náročnost při výrobě vzorků je narozdíl od standardních těles vysoká [19, 21, 22].

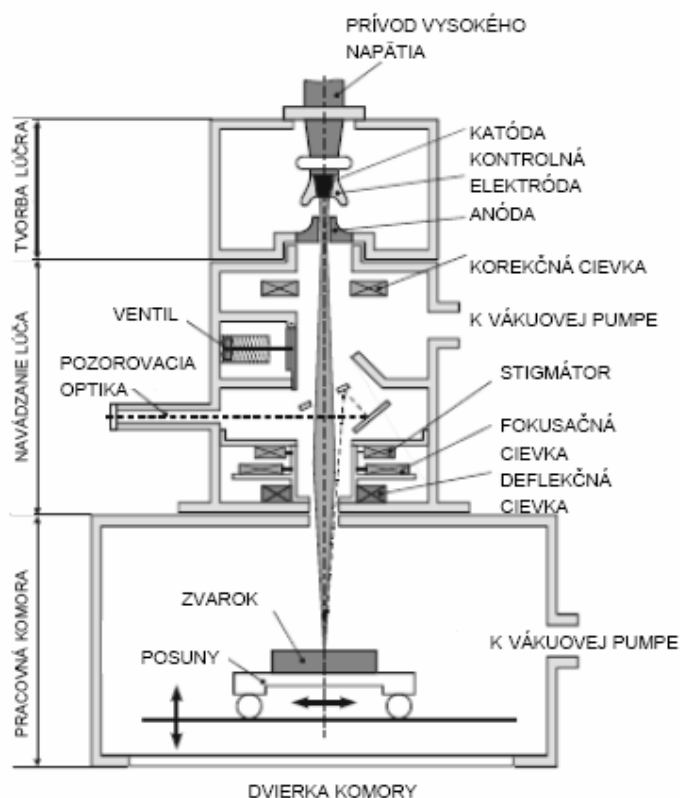
5. Svařování elektronovým paprskem

Elektronové svařování se začalo uplatňovat s aplikací elektronových mikroskopů v polovině 20. století. Společnou částí elektronového paprsku a elektronového mikroskopu je elektronové dělo a částečně i elektronová optika [9].

Použití elektronového svařování se soustřeďuje na velmi přesné spoje a to zejména v jaderné energetice, leteckém a raketovém průmyslu. Dosahuje se kvalitních svarů i na velkých tloušťkách a úzkých svarů, které výrazně neovlivňují vlastnosti materiálu. Elektronové svařování je spojeno s použitím vysokého vakua ve zdrojové části - elektronovém děle, v pracovní komoře je použito nižší vakuum [9, 23].

5.1. Hlavní části zařízení pro sváření elektronovým paprskem

Proces svařování elektronovým paprskem je znázorněn na *obr. 12*. Na tomto obrázku jsou vyznačeny 3 hlavní oblasti a to: prostor na tvorbu elektronového paprsku, navázání paprsku a pracovní komora.



Obr. 12: Schéma průchodu elektronového paprsku při svařování v elektronové děle [9]

Při svařování elektronovým paprskem dochází k spojení dvou materiálů působením tepla, které vzniká důsledkem neelastické interakce elektronového paprsku s kovem. To

znamená, že téměř celá energie paprsku se přemění na teplo, kterým jsou oba materiály spojeny bez ohledu na složku tlaku. Dalším vznikajícím produktem při svařování mimo tepla jsou sekundární elektrony, charakteristické rentgenovo záření a zpětně rozptýlené elektrony. Tyto se mohou použít na zobrazení procesu, zjištění chemického složení v místě svaru nebo na topografii [9, 24].

Základní částí na tvorbu elektronového záření je elektronové dělo. Skládá se z emitoru elektronů (wolframového nebo tantalového vlákna ve tvaru V), které je zahřáto na teplotu kolem 2700 °C. Kolem vlákna je umístěn Wehneltův válec, který má asi o 300 V nižší hodnotu napětí, než je na katodě a vytváří vhodný akumulátor termálně emitovaných elektronů. Po přivedení kladného vysokého napětí na anodu se elektrony vytáhnou z katodové oblasti a urychlí se na požadovanou energii. Systém anoda – katoda tvoří první elektrostatickou čočku, která emitované paprsky emituje. Výpočet energie elektronového paprsku se vypočítá podle zákona zachování energie. Součet energií (jak potenciální a kinetické) na Wehneltově válci a místě anody musí být stejný [9, 26].

S použitím de Broglieovy rovnice $\lambda = \frac{h}{mv}$,

kde h – Planckova konstanta, m – hmotnost elektronu a v – rychlost elektronu,

a rovnosti energií $e \cdot U = \frac{1}{2}mv^2$, kde U – urychlovací napětí [V],

dostaneme výraz $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU}} = \frac{1,2261}{\sqrt{V}}$ (nm),

kde V – urychlovací napětí [V] [9].

Ze získaného vyplývá, že čím je vlnová délka záření nižší, tím je energie a penetrační schopnost vyšší. Získaná fokusovaná stopa paprsku se pomocí elektromagnetického kondenzoru přenáší na větší vzdálenost k povrchu svaru. Při potřebě svazek defokusovat je v optickém a řídicím prostoru umístěna deflektorová čočka. Zařazené jsou také čočky na skenování povrchu svaru nebo na oscilování paprsku, aby svar získal širší šev. Při oscilování paprsku lze získat obraz povrchu svaru získáním emitovaných sekundárních elektronů. Pro přímé pozorování procesu je umístěn okulár [9, 26].

Pracovní komora s umístěným svazkem má různé rozměry. Nejčastěji je sestavena podle požadavků na velikost svazků, které se budou realizovat. Pomocí posuvného univerzálního stolku se dá svazek umístit do požadované polohy. Stolek se nastavuje ve všech třech osových souřadnicích a většinou je doplněn i rotací stolku [9, 26].

Systém na získání a udržování vakua je zajištěn vakuovými vývěvami, základní vývěvou je rotační, která čerpá difuzní nebo turbo vývěvu. Komora elektronového děla může být čerpána až na vysoké vakuum řádu 10^{-5} torrů (1 torr je 133,33 Pa). Častěji se však používá střední vakuum řádu 10^{-2} torrů [9, 26].

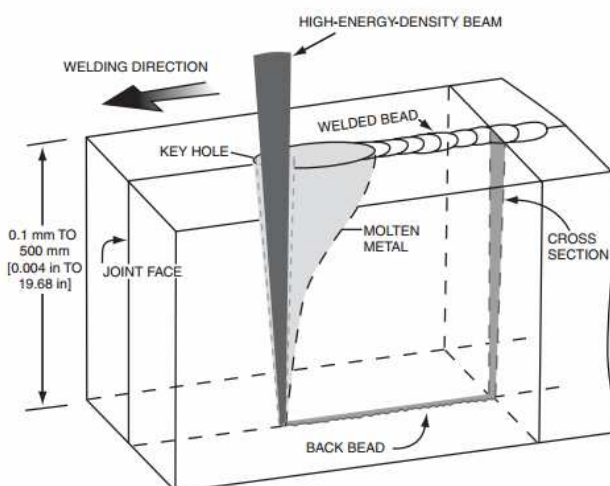
Důležité parametry při určování vlastností elektronového paprsku jsou, viz tab. 3:

Proud ve svazku	[mA]	Základní parametr, seřízení senzorikou
Urychlovací napětí	[kV]	Vyšší urychlovací napětí zvyšuje hloubku penetrace
Fokusační proud	[mA]	Napětí použité na zaostření
Rychlost svařování	[mm/s]	
Frekvence	[Hz]	Frekvence elektronového svazku
Vnesená energie	[kW]	Energie při provedení svařování
Svařovací výkon		
Zaostření		Do 10 mm se zaostřuje na povrch, poté do 1/3 tloušťky
Rychlost posuvu		Vyšší rychlosti posuvu vedou ke svarovým vadám a zhrubnutí svarové housenky

Tab. 3: Parametry pro nastavení elektronového paprsku [23]

5.2. Svar provedený elektronovým svazkem

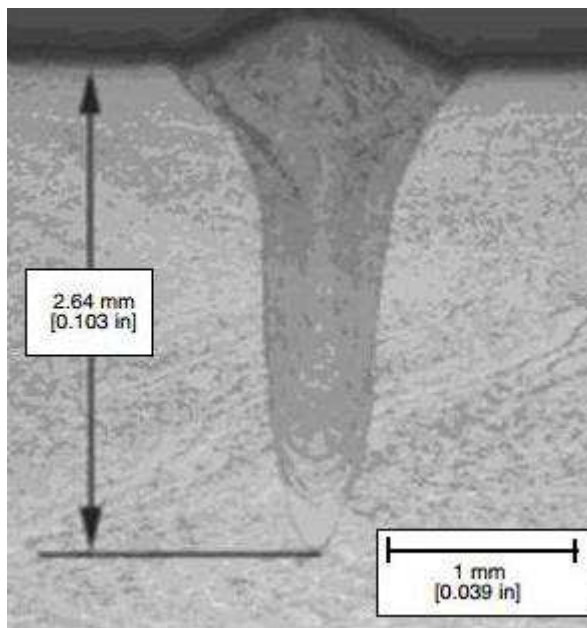
Náčrt svaru provedeného elektronovým paprskem, který byl proveden metodou key hole, je zobrazen na obr. 13. Podstatou vzniku svaru je odpařování části materiálu, na který naráží vysoká hustota energie zaostřeného elektronového paprsku. Na obrázku je znázorněn vznik svaru v ustáleném stavu mezi tlakem tohoto rozšiřování páry a povrchovým napětím roztaveného materiálu obklopující key hole. Paprsek prochází přes základní kov, poté se materiál taví při náběžné hraně key hole, obléhá keyhole a tuhne v odtokové hraně. Metoda key hole poskytuje vysokou hustotu elektronového paprsku s výbornou schopností vytvářet hluboké a úzké svary s velmi malou tepelně ovlivněnou oblastí [27, 28].



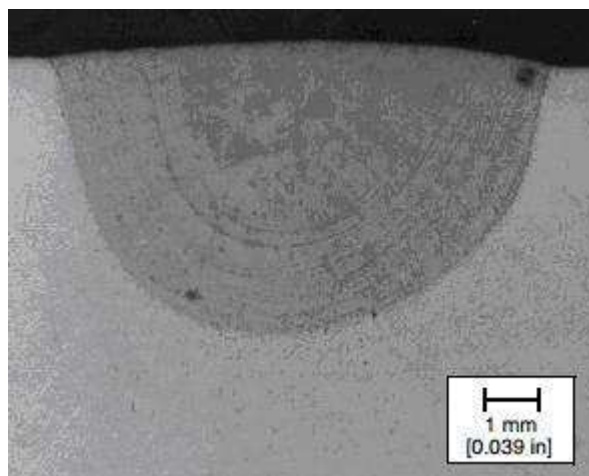
Obr. 13: Svar provedený metodou key hole

(welding direction–směr svařování, high energy density–vysoká hustota energie, keyhole–otvor, welded bead–svařenec, joint face–svařovaná stěna, molten metal–roztavený kov, cross section–průřez, back bead–kořen svaru) [28]

Při porovnání svarů provedených elektronovým paprskem, *obr. 14*, a svaru provedeným metodou TIG, *obr. 15* je na první pohled vidět velké rozdíly. Svar provedený EB je úzký a hluboký s velmi úzkou tepelně ovlivněnou oblastí zatímco svar provedený metodou TIG je široký s širší tepelně ovlivněnou oblastí. Svar EB je sice velmi kvalitní, ale s ohledem na finanční náročnost nelze aplikovat ve všech běžných případech svařování [28].



Obr. 14: Svar provedený EB [28]

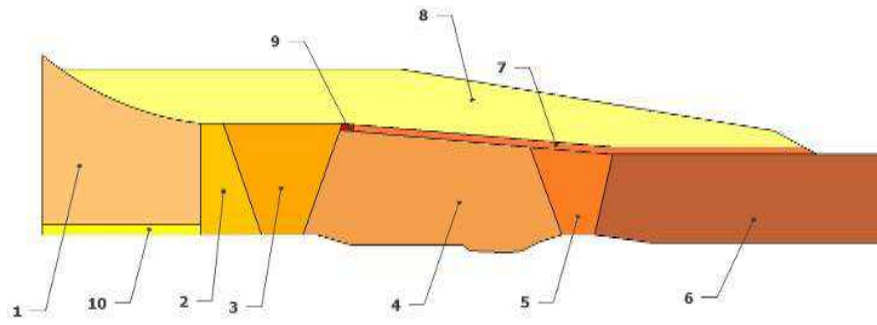


Obr. 15: Svar provedený metodou TIG [28]

5.3. Konkrétní řešená aplikace vzorku s vnitřním insertem

O opravě trubek pro tlakové vodní systémy jaderné elektrárny také píše závěrečná zpráva, která pojednává o aplikované technologii opravy metodikou Weld Overlay (*obr. 16*). Při opravě byl navařen krycí návar slitiny 52M (*obr. 16*, materiál č.8) na složitou sestavu svarů. Potřeba výroby vzorků na zkoušku rázem v ohybu k hodnocení nárazové práce na krycím materiálu M52 byla ztížena válcovým povrchem dodané trubky. Požadavky na zkoušení daného materiálu návaru byly odebrat vzorek na zkoušku rázem v ohybu kolmo na osu trubky. To bylo z důvodu nedostatku materiálu neaplikovatelné a jediným řešením bylo možnost použít vzorek s vložkou testovaného materiálu (insertem) [29].

Vzorek na zkoušku rázem v ohybu s vnitřním insertem zatím není normovaný, ale pro aplikace na materiály pracující za vysoké teploty, nebo pro materiály používané na atomové reaktory, by vedl k velké úspoře zkoušeného materiálu, a díky tomu k finančně dostupnějším vzorkům. V některých případech je tvar součásti, z níž by se měl vzorek připravovat, velkou překážkou. Příkladem jsou součásti válcového tvaru, do kterých se vzorek pro zkoušku rázem v ohybu obtížně umísťuje nebo umístění vzorku není z rozměrových důvodů možný.



Obr. 16: Oprava svařenců trubek pro tlakové vodní systémy jaderné elektrárny [29]

6. Experimentální část

6.1. Experimentální materiál

Experiment probíhal za použití ocelí 17 240 a 17 153, které byly svařovány elektronovým paprskem za postupně měněných podmínek dle navržených parametrů. Tyto materiály byly voleny s ohledem na jejich snadnou dostupnost jako modelové pro austenitický a feritický návar. Vlastnosti použitých ocelí jsou uvedeny dále v textu.

6.1.1. Ocel 17 240

Charakteristika oceli

Jedná se o korozivzdornou austenitickou ocel, která se používá na ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby, upevňovací části pro práci za snížené nebo zvýšené teploty, vývalky, výkovky z korozivzdorných ocelí nebo na lékařské nástroje. Vyrábí se z ní také přístroje do potravinářského průmyslu.

Mezi její kladné vlastnosti patří velmi dobrá svařitelnost všemi obvyklými způsoby, lešitelnost, odolnost proti opotřebení, hlubokotažnost a naopak špatně odolává mezikrystalové korozi.

Chemické složení je uvedeno v *tab. 4*.

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
Obsah [hm. %]	min	-	-	-	-	-	17,0	8,00	-
	max	0,07	1,00	2,00	0,045	0,015	19,5	10,5	0,11

Tab. 4: Chemické složení oceli 17 240 [Příloha 1]

Mez kluzu $R_{p0,2}$ oceli 17 240 je dle normy min 190 MPa, mez pevnost R_m se pohybuje v rozmezí 500 - 700 MPa. Tvrdost materiálu je dána 215 HB a z vlastních měření mikrotvrdosti na několika místech v materiálu zkouškou tvrdosti podle Vickerse bylo naměřeno 348 HV0,1.

Při aplikaci této oceli na tlakové nádoby, které pracují za vysokých teplot (550-650 °C), se hodnoty meze kluzu snižují. Hodnoty meze kluzu při zvýšené teplotě jsou dané normou v *tab. 5*.

Teplota [°C]	150	200	250	300	350	400	450	500	550
$R_{p0,2}$ [MPa]	140	127	118	110	104	98	95	92	90

Tab. 5: Hodnoty meze kluzu při zvýšené teplotě [Příloha 2]

Ocel byla dodána po válcování za studena a mikrostruktura základního stavu materiálu je zobrazena na *obr. 17*. V mikrostruktuře jsou viditelná deformační dvojčata vzniklá tvářením za studena.



Obr. 17: Mikrostruktura oceli 17 240, základní materiál

6.1.2. Ocel 17 153

Charakteristika oceli

Jako druhý experimentální materiál byla použita feritická ocel, která je také vhodná na výrobky namáhané vysokou teplotou. Je odolná proti malým mechanickým zatížením a creepu. Zpracování oceli je obvykle tvářením za tepla i za studena.

Ocel je velice odolná proti oxidaci za zvýšených teplot, ale v oblasti 600-950 °C dochází ke vzniku sigma fáze nebo karbidického křehnutí. Při použití za těchto teplot se musí dbát na riziko vzniku uvedených fází a kontrolovat výslednou mikrostrukturu.

Používá se na výrobky vodících plechů, přehříváky parních kotlů nebo jiné aplikace výrobků pro vysoké teploty do teploty 1150 °C.

Chemické složení oceli uvedené je uvedeno v *tab. 6*.

Prvek		C	Si	Mn	P	S	Cr	Al
Obsah [hm. %]	min	0,7	-	-	-	-	23,00	1,20
	max	1,40	1,00	1,00	0,04	0,015	26,00	1,70

Tab. 6: Chemické složení oceli 17 153 [Příloha 2]

Mez kluzu oceli $R_{p0,2}$ oceli 17 153 je min 280 MPa a mez pevnosti R_m se pohybuje v rozmezí 520-720 MPa. Mez pevnosti v tahu při tečení je také pro daný materiál snižující se s teplotou, jak tomu bylo u oceli 17 240 pro mez kluzu. Hodnoty meze pevnosti v tahu při tečení jsou uvedené v materiálovém listu [Příloha 2].

Tvrдость materiálu je uvedena 223 HB a z vlastních naměřených hodnot podle tvrdosti Vickers je 170 HV0,1.

Mikrostruktura základního materiálu je uvedena na *obr. 18*. Jedná se o feritickou strukturu s protáhlými zrny ve směru tváření s karbidy chromu.



Obr. 18: Mikrostruktura základního stavu oceli 17 153

6.2. Provedené experimenty

Hlavním cílem diplomové práce bylo vyrobit vzorky pro zkoušku rázem v ohybu s vnitřním insertem. Pro výrobu těchto vzorků s heterogenními svary bylo nezbytné nejprve na zařízení elektronového paprsku provést sadu experimentů.

Následovala výroba vlastních vzorků pro zkoušku rázem v ohybu z insertů vyrobených z reálného návaru austenitické a bainitické ocele.

Vyrobené vzorky na rázovou zkoušku byly poté přeraženy na kyvadlovém stroji v laboratoři mechanických zkoušek na Ústavu materiálových věd a inženýrství.

6.2.1. Nastavení vhodných parametrů pro svařování na elektronovém paprsku

Pro zjištění vhodných parametrů při nastavení elektronového paprsku byly provedeny homogenní svary na ocelích 17 240 a 17 153. Po zjištění vhodných parametrů, zvláště hodnoty proudu ve svazku, urychlovacího napětí a parametru SURF, byly provedeny heterogenní svary na ocelích 17 240 a 17 153. Na těchto vzorcích byla hodnocena mikrostruktura společně s hodnocením chemického složení a vývojem mikrotvrdosti.

Dále byly připraveny vzorky na zkoušku rázem v ohybu s vnitřním insertem z předem připravených návarů austenitické a bainitické ocele.

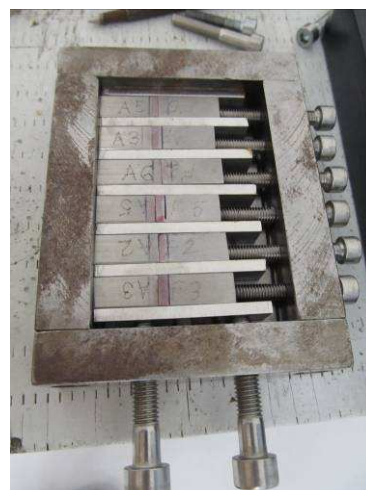
6.2.2. Výroba vzorků na zkoušku rázem v ohybu

Svařování vzorků bylo provedeno v laboratoři elektronového paprsku na Ústavu materiálových věd a inženýrství, na *obr. 19* je zobrazeno elektronové dělo. Kusy

připravené na svaření homogenních a heterogenních svarů byly čtvercového průřezu 5×5 mm a dlouhé 20-25 mm. Připravené kusy byly vloženy do přípravku na svařování, *obr. 20*, kde byly uloženy mezi podložkami a upevněny do požadované pozice postranními šrouby. Po uchytení vzorků se přípravek umístil na automatizovaný posuvný stůl, který zajel do pracovní komory, a ta byla po uzavření hlavního otvoru vyčerpána. Následovalo svařování elektronovým paprskem a volení svařovacích parametrů, které probíhalo na řídicí jednotce umístěné vedle elektronového děla. Svary prováděné na oceli 17 153 bylo nutné provádět s předehřevem z důvodu možného praskání svarů. K měření teploty byla použita termokamera umístěná v prostoru pracovní komory namířená na svařovaný materiál. Následně po skončení svařování byla pracovní komora odčerpána a vzorky vyndány z pracovní komory. Po vyndání vzorků z přípravku na svařování byly vzorky zbraveny podložek a zbrušeny v oblasti kořene svaru.



Obr. 19: Elektronové dělo

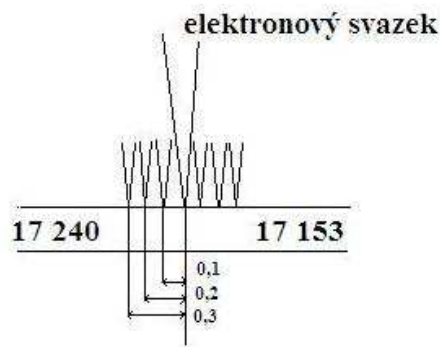


Obr. 20: Umístění vzorků do přípravku na svařování

6.2.3. Vychýlování elektronového svazku při svařování

U heterogenních svarů ocelí 17 240 a 17 153 byla provedena série svarů se stejným nastavením elektronového paprsku, ale s vychýlením elektronového svazku v závislosti na pozici paprsku vzhledem k rovině dotyku spojovaných materiálů. Vychýlení elektronového paprsku bylo 0,1, 0,2, 0,3 mm a to do obou ocelí. K porovnání byl vyroben i svar bez vychýlení elektronového paprsku. Náčrt zaostření elektronového paprsku s jeho vychýlením je na *obr. 21*.

Důvod pro zhotovení těchto vzorků bylo ověření, s jakou přesností lze vyrábět svary stejné kvality a jestli i u takto malých vychýlení elektronového svazku dochází ke změně mechanických vlastností a mikrostruktury svaru.



Obr. 21: Vychýlení elektronového svazku při svařování

6.2.4. Příprava vzorků pro metalografickou analýzu

Výsledné svary byly podrobeny hodnocení mikrostruktury pod světelným mikroskopem, kde byla hodnocena tepelně ovlivněná oblast svaru, přechodová oblast svaru a svarový kov.

Postup přípravy metalografického vzorku se skládal z rozříznutí svaru kolmo na jeho provedení, zalisování vzorků za tepla v lisu LECO PR-4X a následném broušení a leštění vzorků na stroji značky Struers. Na broušení vzorku byly použity SiC brusné papíry zrnitosti 80, 120, 220, 600 a 1000 vždy s vodním chlazením po dobu 3 minut. Leštění vzorků probíhalo na diamantových pastách o velikosti zrn 7 μm , 3 μm a 1 μm po dobu 3 minut s přidáním lihu jako smáčedla.

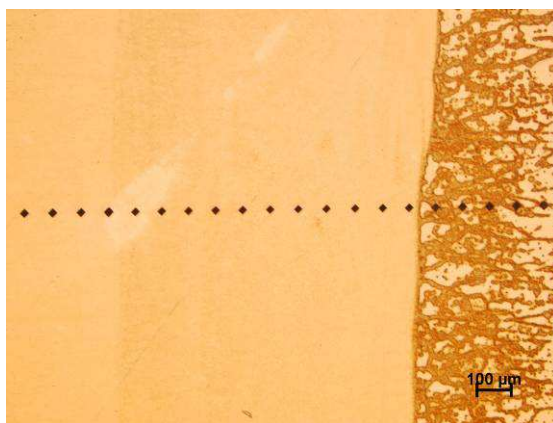
Celkem bylo připraveno 15 vzorků, tj. 4 vzorky pro homogenní austenitické svary (označení A1, A2, A3, A4), 4 vzorky pro homogenní feritické svary (označení F1, F2, F3, F4) a 7 vzorků pro heterogenní svary (označení H1, H2, H3, H4, H5, H6, H7).

K naleptání struktury bylo u vzorků A1, A2, A3, A4 použito leptadlo Nital 2%, u ostatních vzorků leptadlo Marble.

6.2.5. Měření mikrotvrdomosti

Na provedených svarech, homogenních i heterogenních, probíhalo měření mikrotvrdomosti přes daný svarový spoj. Měření procházelo ze základního materiálu, přechodovou oblast a svarový kov. Ze získaných hodnot byly sestrojeny grafy a následně porovnány hodnoty parametrů nastavení elektronového paprsku na výslednou tvrdost a tím i mikrostrukturu materiálu.

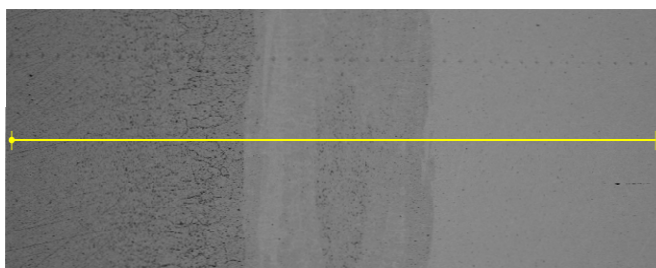
Mikrotvrdomost se měřila metodou Vickers HV0,1 na mikrotvrdoměru firmy Struers. Nastavení řady měření na automatizovaném zařízení bylo 50 vpichů s rozestupy 0,08 mm. Po provedení vpichů se pomocí objektivu v mikrotvrdoměru automaticky měřily úhlopříčky získaných vtisků, a ty byly pomocí software přepočítány na tvrdost HV0,1. Na obr. 22 je zobrazena řada vtisků na heterogenním svarovém spoji, zleva z austenitické oceli přes svarový kov do feritické oceli.



Obr. 22: Řada vpichů na heterogenním svarovém spoji

6.2.6. Měření lokálního chemického složení metodou EDS

Míra promíchání materiálů byla hodnocena metodou EDS v elektronovém mikroskopu Zeiss Ultra Plus na Ústavu materiálových věd a inženýrství. Měření probíhalo na všech vzorcích heterogenních svarů. Obrázek z elektronového mikroskopu se zobrazenou linií analýzy je uveden na obr. 23. Lze si povšimnout také řady vtisků měřené mikrotvrdosti nad linií analýzy.



Obr. 23: Liniová analýza chemického složení přes svarový kov vyznačená žlutou úsečkou

7. Výsledky experimentů

7.1. Homogenní svary na austenitické oceli 17 240

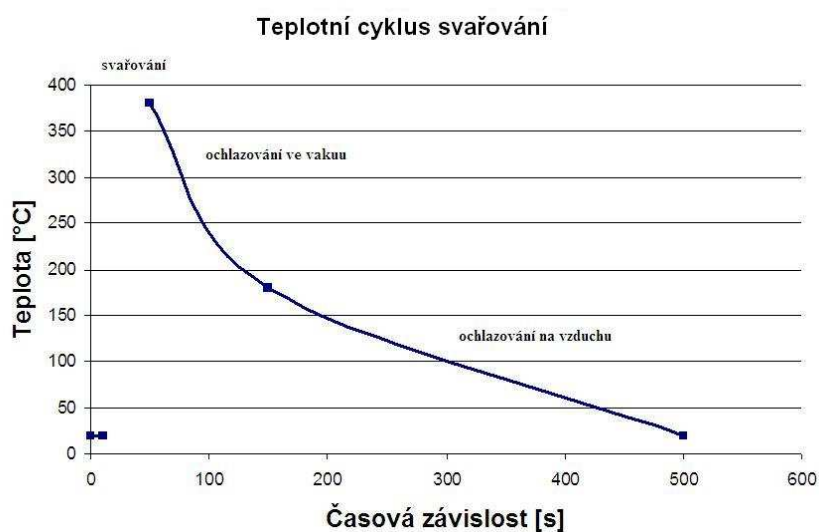
Parametry použité pro svařování elektronovým paprskem

V následující tab. 7 jsou uvedeny postupy svařování s rozdílnými parametry použitými při svařování homogenních austenitických svarů. Celkově byly provedeny 4 svary. Nejdůležitějšími parametry pro elektronový paprsek jsou: urychlovací napětí, proud ve svazku a fokusační proud. Proud ve svazku se měnil v rozmezí 32-34 mA a stal se rozhodujícím parametrem při provádění heterogenních svarů. Parametr SURF řídí pozici ohniska elektronového svazku, který je vychylován elektrickým proudem. Ve všech postupech svařování byl použit proud + 10 mA.

Svar se prováděl bez předehřevu viz Graf 1.

Vzorek	Urychlovací napětí [kV]	Proud ve svazku [mA]	Fokusační proud [mA]	SURF [mA]	Rychlost svařování [mm/s]	Tvar svazku	Velikost svazku [mm]	frekvence [Hz]
1A	120	34	2355	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
2A	120	32	2355	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
3A	120	32	2367	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
4A	120	33	2367	+10	20	○	0,5 x 0,5	500

Tab. 7: Parametry elektronového paprsku použité pro homogenní austenitické svary



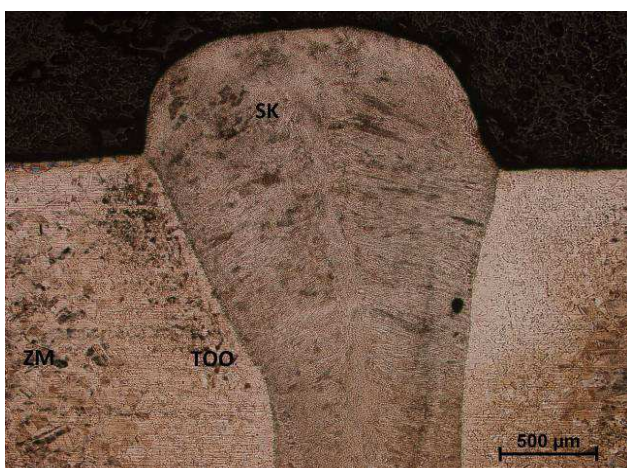
Graf 1: Teplotní cyklus svařování homogenních austenitických svarů

Po přípravě metalografických vzorků byly hodnoceny 3 části svaru: hlava, střední část a kořen. Uvedené fotografie reprezentují svařovací postupy a jsou uvedeny přehledně pro srovnání všech čtyř svarů v následujícím textu.

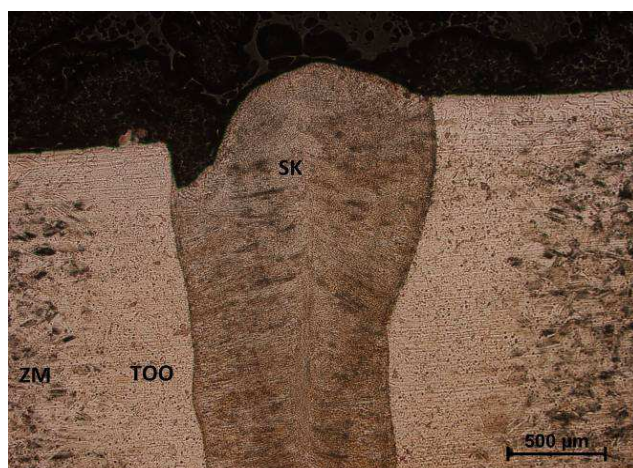
7.1.1. Hodnocení mikrostruktury

Porovnání svarů v oblasti hlavy svaru

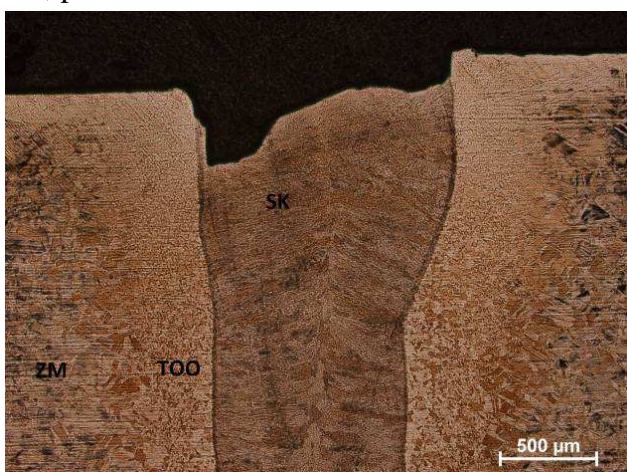
Na získaných fotografiích (obr. 24) lze rozlišit svarový kov (SK), tepelně ovlivněnou oblast (TOO) a základní materiál (ZM). Na všech vzorcích je viditelná osa svaru, která charakterizuje směr provedení svaru a směr tuhnutí. Z pohledu kvality provedení svaru je u vzorků 2A a 3A viditelné propadnutí hlavy svaru. Tato vada může být místem pro iniciaci trhliny nebo může být vyplněna mazem nebo tekutinou, což je pro kvalitu svaru nežádoucí.



1A, proud ve svazku 34 mA



2A, proud ve svazku 33 mA



3A, proud ve svazku 32 mA



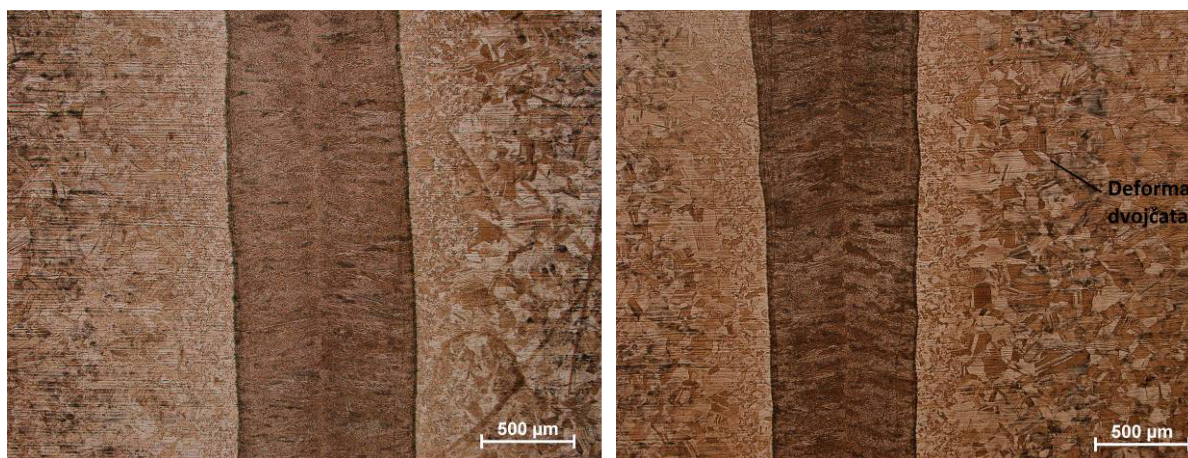
4A, proud ve svazku 32 mA

Obr. 24: Mikrostruktura homogenního austenitického svaru v oblasti hlavy svaru. Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.

Porovnání svarů ve střední oblasti svaru

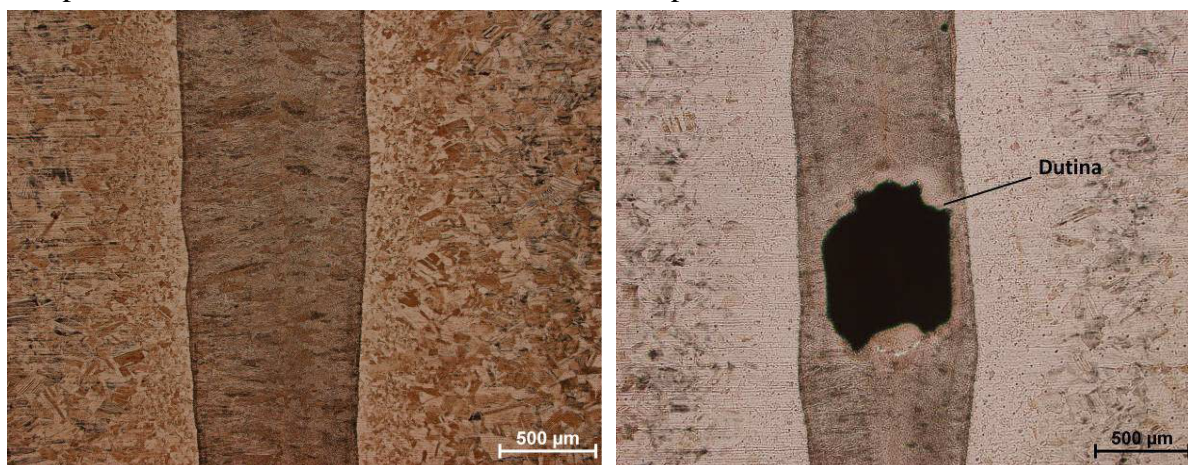
Na získaných fotografiích (obr. 25) lze pozorovat přechod základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti. V tepelně ovlivněné oblasti je vidět velmi jemnozrná austenitická

struktura, která přechází do základního materiálu. Dále si lze povšimnout deformačních dvojčat v základním materiálu, která vznikla při tváření za studena v základním materiálu. U vzorku 4A došlo ke vzniku dutiny rozměrů $600 \times 650 \mu\text{m}$.



1A, proud ve svazku 34 mA

2A, proud ve svazku 33 mA



3A, proud ve svazku 32 mA

4A, proud ve svazku 32 mA

*Obr. 25: Mikrostruktura homogenního austenického svaru ve střední oblasti svaru.
Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.*

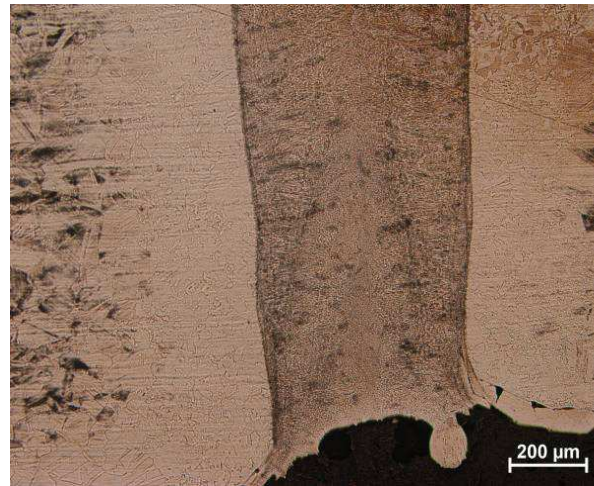
Porovnání svarů v oblasti kořene svaru

Na fotografiích (obr. 26) lze vidět, že všechny svary byly dokonale provařeny. Tloušťka svarů se liší při různých provedeních. Tloušťky svarů jsou závislé na hodnotě proudu ve svazku. Tloušťka svaru při hodnotě 34 mA proudu ve svazku ukazuje nejlépe provedený svar z hlediska volení parametrů. Ostatní kořeny svarů jsou také hodnoceny bez vad.

U svarů 1A a 4A došlo k provaření 2 mm s podkladem a následně byly svary odtrženy.



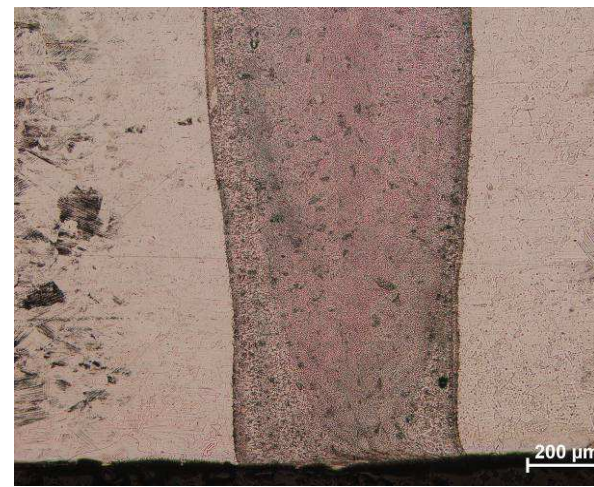
1A, proud ve svazku 34 mA



2A, proud ve svazku 33 mA



3A, proud ve svazku 32 mA

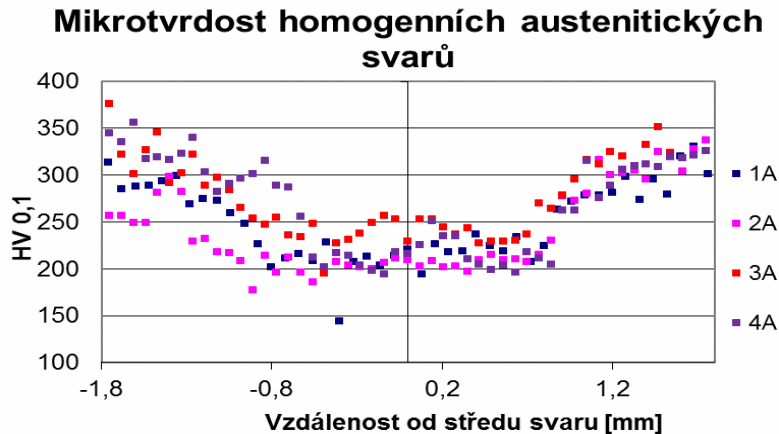


4A, proud ve svazku 32 mA

*Obr. 26: Mikrostruktura homogenného austenitického svaru v oblasti kořene svaru.
Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.*

7.1.2. Hodnocení mikrotvrdoti

Pro získání uceleného pohledu na provedených svarech byla měřena mikrotvrdot přes základní materiál, tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Výsledný graf je uvedený na *graf 2*. Z grafu lze vyčíst nižší tvrdost svarového kovu než základního materiálu. Změna tvrdosti je pozvolná měnící se přes tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov do základního materiálu. Tvrdost základního materiálu dosahuje 348 HV_{0,1} zatímco tvrdost svarového kovu je 203 HV_{0,1}. Pokles tvrdosti je patrně způsoben deformačním zpevněním původního austenitického materiálu, který má vyšší pevnost než čerstvě ztuhlá nedeformovaná struktura svarového kovu.



Graf 2: Vývoj mikrotvrdości homogenních austenitických svarů

7.1.3. Shrnutí poznání homogenního austenitického svaru

Všechny homogenní svary se podařilo vytvořit s plně provařeným kořenem. Nejlépe provedený svar byl svar A1 s volenými parametry elektronového paprsku: urychlovací napětí 120 kV, proud ve svazku 34 mA a SURF +10 mA. Mikrostruktura svarů je tvořena kolumnárními zrny vzniklými při rychlém ochlazení taveniny svarového kovu. Došlo k poklesu tvrdosti ve svarovém kovu ve srovnání s tvrdostí základního materiálu. Pokles tvrdosti je postupný, v žádné z oblastí nevzniká skok v hodnotách tvrdosti. Lze předpokládat, že chemické složení se výrazně nezměnilo a materiálem svaru je opět austenit.

7.2. Homogenní svary na feritické oceli 17 153

Parametry použité pro svařování elektronovým paprskem

Při svařování feritické oceli byl nutný předehřev materiálu v rozmezí teplot 350 – 380 °C. Předehřevem se materiál chrání před vznikem trhlin v oblasti rozhraní svaru. Z měření teploty na vzorku byl sestrojen graf 3, který ukazuje teplotu závislou na čase a zahrnuje dva předehřevy. První předehřev byl proveden proudem ve svazku 10 mA, kdy byl vzorek zahříván po dobu 90 s a druhý proudem 5 mA po dobu 20 s. Po svařování byl vzorek ochlazován ve vakuové komoře po dobu 300 s a poté na vzduchu.

Použitý proud ve svazku při svařování homogenních feritických svarů se měnil v rozmezí 27 – 35 mA a použité urychlovací napětí bylo u všech vzorků stejné – 120 kV. Ohnisko elektronového paprsku bylo kladně vychýlené proudem +10 mA, stejné jako u austenitických homogenních svarů. Parametry nastavení elektronového paprsku jsou uvedeny v tab. 8.



Graf 3: Teplotní cyklu elektronového svařování oceli 17 153

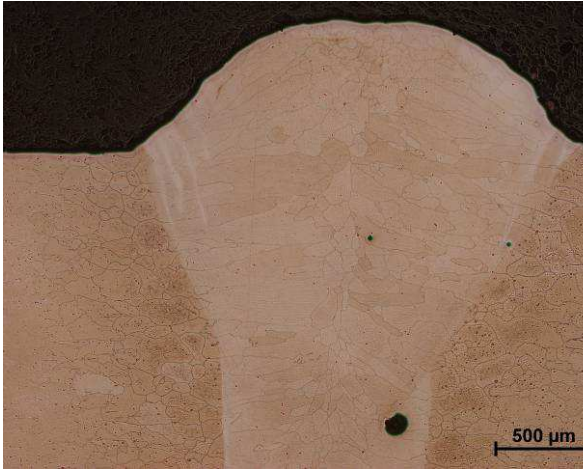
Vzorek	Urychlovací napětí [kV]	Proud ve svazku [mA]	Fokusační proud [mA]	SURF [mA]	Rychlost svařování [mm/s]	Tvar svazku	Velikost svazku [mm]	frekvence [Hz]
F1	120	35	2365	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
F2	120	33	2365	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
F3	120	30	2368	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
F4	120	27	2368	+10	20	○	0,5 x 0,5	500

Tab. 8: Parametry elektronového paprsku použité pro homogenní feritické svary

7.2.1. Hodnocení mikrostruktury

Porovnání svarů v oblasti hlavy svaru

Na následujících fotografiích (obr. 27) jsou zobrazeny mikrostruktury feritických homogenních svarů a ukazují velmi kvalitně provedené svary. Na fotografiích je zviditelněná přechodová oblast základního materiálu do tepelně ovlivněné oblasti s velmi nepatrnou změnou velikosti zrna. Svarový kov je tvořen kolumnárními zrny, které rostou směrem od základního materiálu do středu svaru. Jejich návaznost je možné pozorovat na neroztavená zrna v základním materiálu. Výsledné svary jsou hodnocené bez svarových vad.



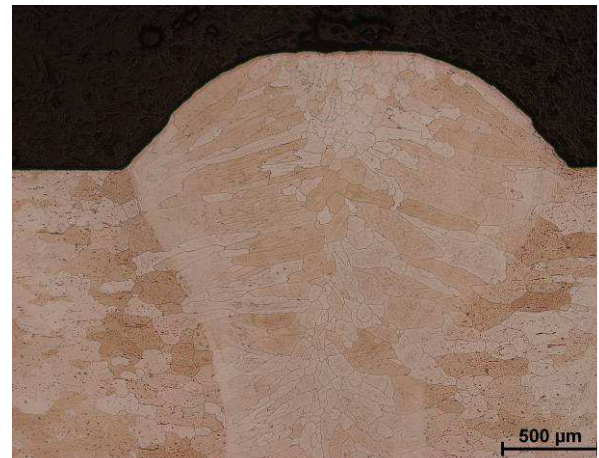
F1, proud ve svazku 35 mA



F2 proud ve svazku 33 mA



F3, proud ve svazku 30 mA

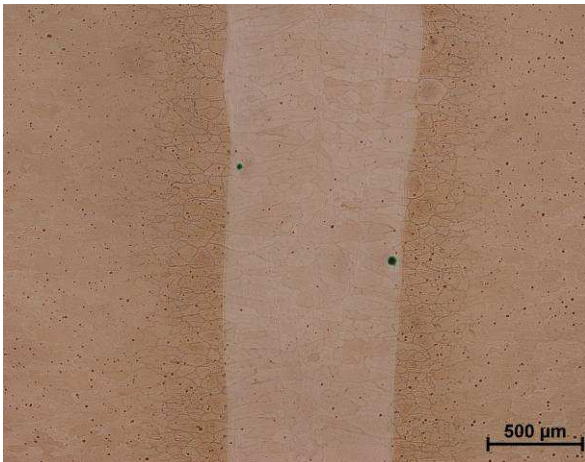


F4, proud ve svazku 27 mA

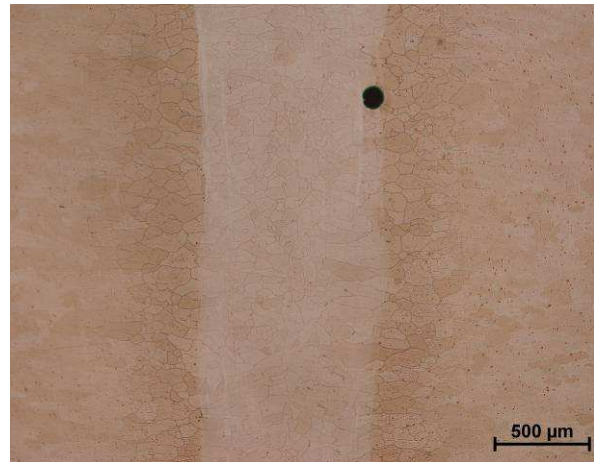
*Obr. 27: Mikrostruktura homogenního feritického svaru v oblasti hlavy svaru.
Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.*

Porovnání svarů ve střední oblasti svaru

Na fotografiích (obr. 28) je zobrazena střední část svaru. Lze si povšimnout, že při použití většího proudu ve svazku (F1) je velikost zrn v TOO větší než při použití nižšího proudu ve svazku (F4). Na fotografiích je viditelný směr tuhnutí svarového kovu směrem ke kořeni svaru a vyskytujících se malých bublin, které vznikly při tuhnutí svarového kovu.



F1, proud ve svazku 35 mA



F2, proud ve svazku 33 mA



F3, proud ve svazku 30 mA

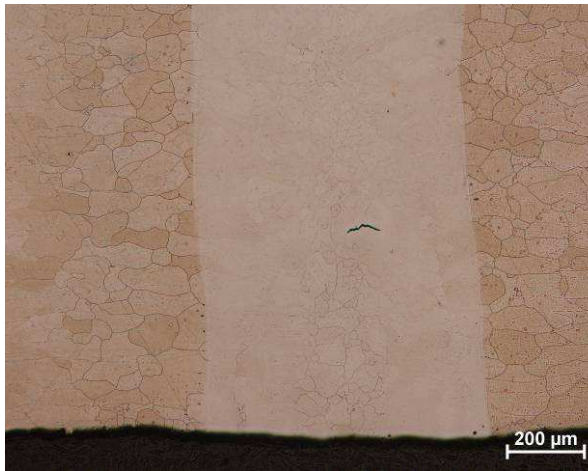


F4, proud ve svazku 27 mA

*Obr. 28: Mikrostruktura homogenního feritického svaru ve střední oblasti svaru.
Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.*

Porovnání svarů v oblasti kořene svaru

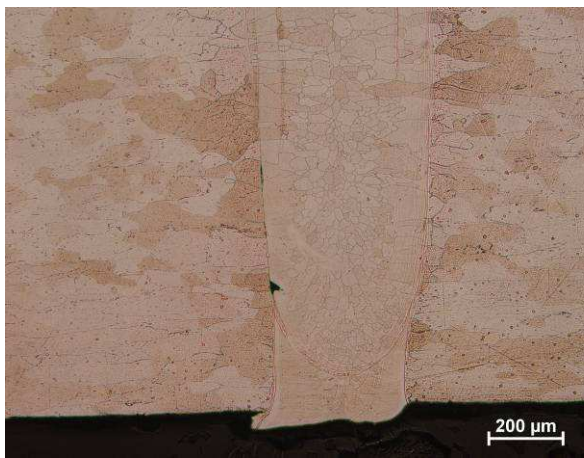
Z fotografií (obr. 29) lze vyvodit vliv na kvalitu svaru podle použitého proudu ve svazku. Při použití proudu 35 a 33 mA (F1, F2) byl svar provedený bez svarových vad. Naopak u vzorku svařeného při proudu 30 mA (F3) došlo k výraznému zúžení v místě kořene svaru a u vzorku svařeném při 27 mA k neprovaření materiálu. Z tohoto lze vyvodit, že použití méně jak 30 mA pro hodnotu proudu ve svazku je pro výsledný homogenní feritický svar nevyhovující.



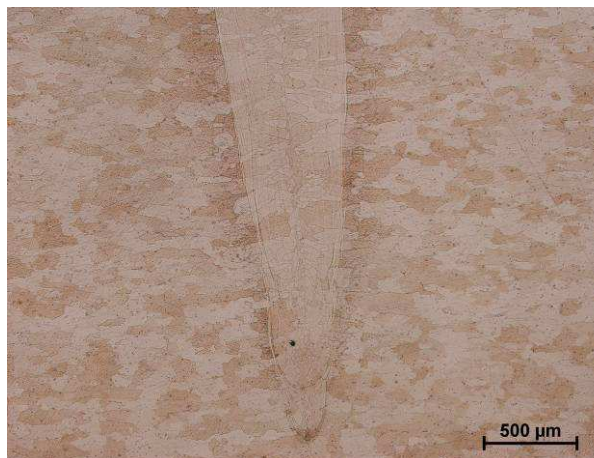
F1, proud ve svazku 35 mA



F2, proud ve svazku 33 mA



F3, proud ve svazku 30 mA



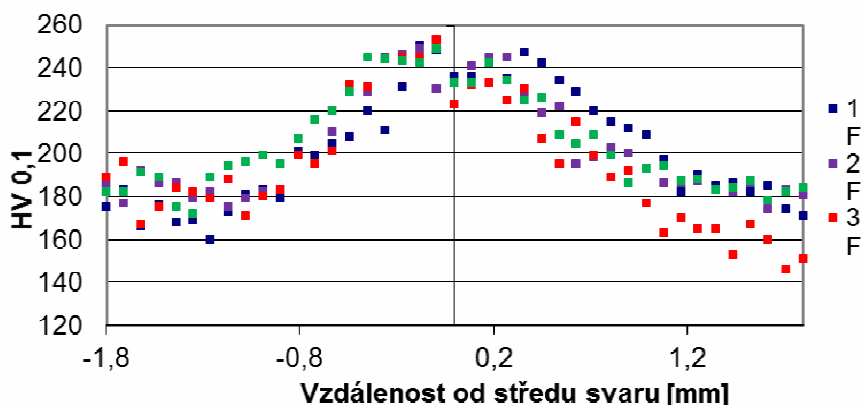
F4, proud ve svazku 27 mA

*Obr. 29: Mikrostruktura homogenního feritického svaru v oblasti kořene svaru.
Rozdílné hodnoty proudu ve svazku.*

7.2.2. Vývoj mikrotvrlosti

Vývoj měření mikrotvrlosti v přechodové oblasti: základní materiál, tepelně ovlivněná oblast a svarový kov. Narozdíl od austenitických svarů došlo v materiálu k výraznému zvýšení tvrdosti díky jemnější feritické mikrostruktuře. Vývoj mikrotvrlosti je zaznamenán na *graf 4*. Naměřená tvrdost základního materiálu byla 170 HV_{0,1} a svarového kovu 235 HV_{0,1}. Nárůst tvrdosti svarového kovu byl způsoben zjemněním feritické struktury.

Mikrotvrдость homogenních feritických svarů



Graf 4: Vývoj mikrotvrđosti homogenních feritických svarů

7.2.3. Shrnutí poznání homogenního feritického svaru

Svary se podařilo vytvořit za daných svařovacích podmínek. Nejlepší kvalitu má svar F1 s parametry elektronového paprsku: urychlovací napětí 120 kV, proud ve svazku 35 mA a SURF +10 mA. Mikrostruktura je tvořena kolumnárními zrní vzniklými při rychlém ochlazení taveniny svarového kovu. Za některých podmínek došlo k neprovaření kořene svaru nebo ke vzniku studeného spoje v kořeni svaru ve svaru F3. Došlo k nárůstu tvrdosti ve svarovém kovu ve srovnání s tvrdostí základního materiálu. Nárůst tvrdosti je postupný, v TOO je patrný mírný pokles. Lze předpokládat, že chemické složení svaru se výrazně nezměnilo a materiálem je opět ferit. K nárůstu tvrdosti mohlo dojít vlivem zjemnění feritické struktury materiálu.

7.3. Porovnání parametrů austenitického a feritického svaru

Parametry svarů

Pro ucelený pohled na provedené austenitické a feritické homogenní svary bylo provedeno porovnání důležitých parametrů u daných svarů. Hodnoty parametrů svarů byly měřeny na nejlépe provedeném svaru z dané čtveřice. U homogenních austenitických svarů to byl svar A1 a u feritických homogenních svarů svar F1. Ze získaných fotografií mikrostruktury lze vyvodit závislost hodnoty proudu ve svazku jako klíčového parametru pro kvalitu provedení svaru. V následující tabulce jsou uvedeny získaná data (tab. 9). Šířka feritického svaru byla ve všech ohledech větší než u austenitického, ale při porovnání tepelně ovlivněné zóny obou svarů dostáváme velmi podobné šířky – 0,46 mm u feritického svaru a 0,42 mm u svaru austenitického.

	Austenitický svar [mm]	Feritický svar [mm]
Šířka hlavy svaru	1,90	2,40
Šířka svaru 4 mm pod povrchem	1,05	1,15
Šířka svaru u kořene	0,96	1,04
Šířka TOO	0,42	0,46
Propadlá hlava	2×	0×

Tab. 9: Porovnání parametrů homogenních austenitických a feritických svarů

Porovnání mikrotvrdomosti austenitického a feritického svaru

Následující *tab. 10* ukazuje naměřené hodnoty mikrotvrdomosti základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu. U austenitických svarů docházelo ke snížení mikrotvrdomosti v oblasti svarového kovu na rozdíl od feritických svarů. Nárůst tvrdosti svarového kovu u homogenních feritických svarů byl způsoben zjemněním struktury. Naopak snížení tvrdosti u homogenních austenitických svarů bylo způsobeno vznikem kulumnárních zrn rostoucích směrem od základního materiálu do středu svaru.

	Austenitický svar [HV 0,1]	Feritický svar [HV 0,1]
Základní materiál	348	170
Tepelně ovlivněná oblast	211	216
Svarový kov	203	235

Tab. 10: Porovnání mikrotvrdomosti homogenních austenitických a feritických svarů

7.3.1. Porovnání svařovacích parametrů homogenních svarů

K provedení heterogenního spoje ocelí 14 240 a 17 153 bylo potřeba hodnot elektronového paprsku homogenních svarů, viz *tab. 11*. Hodnoty se u homogenního austenitického svaru volily s ohledem na úplné provaření kořene svaru, což bylo u všech svařovaných kusů. U těchto svarů byla hodnota proudu ve svazku, dostačující pro provaření svaru, 27 mA. U feritických homogenních svarů se hodnota proudu ve svazku volila stejným způsobem. Zde bylo potřeba 30 mA hodnoty proudu ve svazku pro provaření svaru. Hodnoty urychlovacího napětí a parametru SURF byly vždy stejné, a to 120 kV pro urychlovací napětí a +10 mA pro parametr SURF. Z těchto získaných parametrů byly zvoleny parametry pro heterogenní svařování.

Vzorek	Urychlovací napětí [kV]	Proud ve svazku [mA]	Fokusační proud [mA]	SURF [mA]	Rychlost svařování [mm/s]	Tvar svazku	Velikost svazku [mm]	frekvence [Hz]
4A	120	32	2355	+10	20	○	0,5 x 0,5	500
F3	120	30	2368	+10	20	○	0,5 x 0,5	500

Tab. 11: Vhodné parametry nastavení elektronového paprsku pro homogenní austenitické a feritické svary

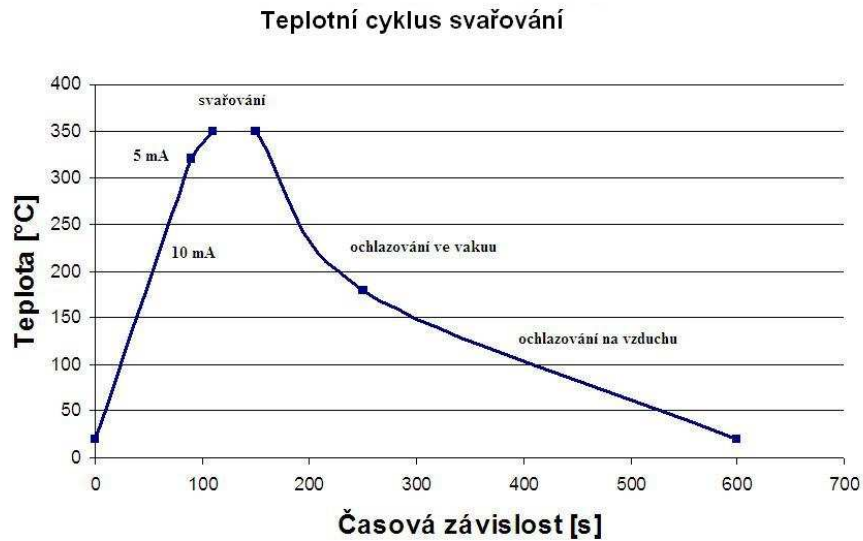
7.4. Heterogenní svarový spoj ocelí 17 240 a 17 153

Po provedení homogenních svarů a určení odpovídajících svařovacích parametrů byly provedeny heterogenní svary ocelí 17 240 a 17 153. Parametry svařování jsou uvedeny v tab. 12. Nastavení parametru SURF, který pomocí proudu zaostřuje ohnisko elektronového paprsku, byl nyní volen záporně -4 mA. Použití záporného parametru SURF umožnilo provést heterogenní svary bez svarových vad typu neprůvar a studený spoj. Urychlovací napětí bylo použito 120 kV a proud ve svazku 27 mA. Fokusační proud byl 2810 mA.

Při svařování těchto dvou ocelí byl nutný předehřev materiálu z důvodu zabránění vzniku trhlin na rozhraní svaru. Předehřev byl dvoufázový a probíhal ve vakuové komoře. První předehřev byl proveden proudem 10mA po dobu 90s a druhý předehřev proudem 5mA po dobu 30s. Při začátku svařování měl materiál 350 °C. Po svařování vzorky chladly ve vakuové komoře po dobu 100 s. Po vyndání z pracovní komory měly vzorky teplotu 180 °C a dále chladly na vzduchu viz graf 5.

Urychlovací napětí [kV]	Proud ve svazku [mA]	Fokusační proud [mA]	SURF [mA]	Rychlost svařování [mm/s]	Tvar svazku	Velikost svazku [mm]	Frekvence [Hz]
120	27	2810	-4	20	○	0,4 x 0,4	500

Tab. 12: Parametry elektronového svazku pro heterogenní svar



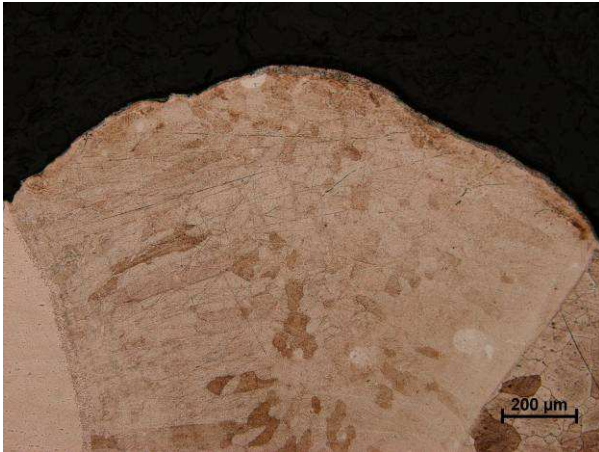
Graf 5: Teplotní cyklu svařování heterogenních feritických svarů

Heterogenní svary se prováděly s vychylováním elektronového paprsku podle náčrtu uvedeného na *obr. 21*. Na těchto svarech bylo provedeno měření mikrotvrdomosti, hodnocení mikrostruktury a průběh chemického složení.

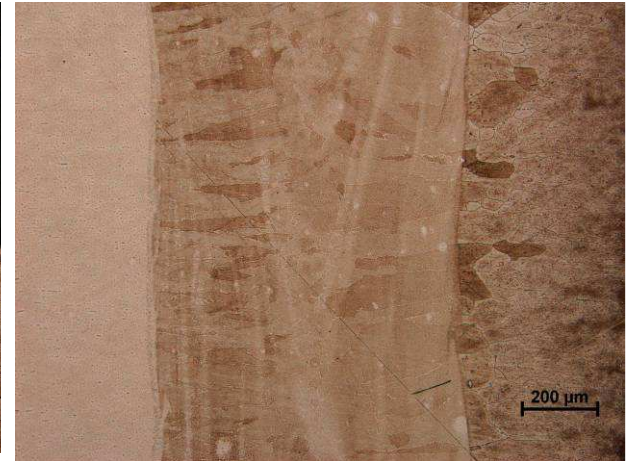
7.4.1. Heterogenní svar ocelí 17 240 a 17 153 bez vychýlení

V této práci bylo cílem porovnat kvalitu svarů s vychýlením elektronového svazku jak do oceli 17 240 tak do oceli 17 153 o 0,1; 0,2 a 0,3 mm. Prvním hodnoceným svarem je heterogenní svar bez vychýlení elektronového paprsku.

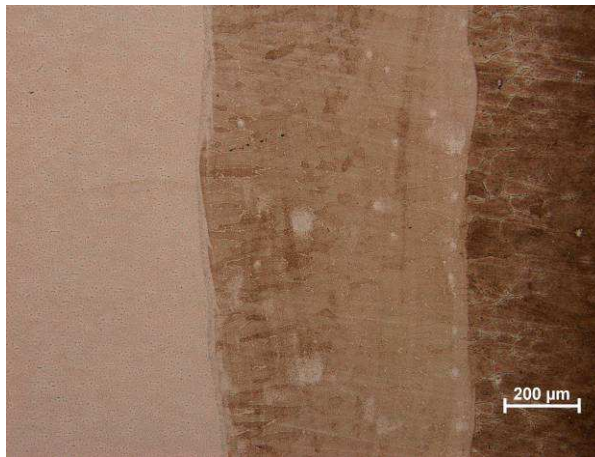
Svar H1 na *obr. 30* ukazuje kvalitně provedený svar, který byl dokonale provařený. Ve středu svaru lze vidět jeho osu s postupem chladnutí svarového kovu směrem ke kořeni. Svarový kov je z části od austenitické ocele tvořen kulumnárními zrny a postupně přes přechod do feritického materiálu jsou zviditelněná nenatavená feritická zrna.



H1, zobrazení hlavy svaru



H1, zobrazení střední části svaru



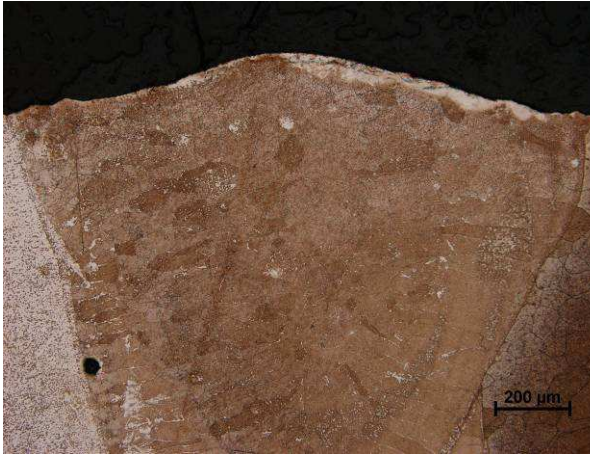
H1, zobrazení kořene svaru

Obr. 30: Vzorek H1, mikrostruktura částí heterogenního svaru provedeného bez vychýlení elektronového paprsku (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)

7.4.2. Heterogenní svary s vychýlením elektronového paprsku do oceli 17 153

Provedené svary s vychýlením paprsku do feritické oceli vykazovaly nedokonalé promíšení materiálu a tím i nevhodnou výslednou mikrostrukturu materiálu svarového kovu.

Uvedené fotografie hlavy svarů na *obr. 31* ukazují na vznik feritických pásů ve svarovém kovu. Vznik feritických míst je závislý na vychýlení elektronového paprsku a s větším vychýlením se vyskytuje větší množství feritových ploch. Začalo také docházet ke vzniku dutin.



H2, vychýlení svazku o 0,1 mm do 17 153



H3, vychýlení svazku o 0,2 mm do 17 153



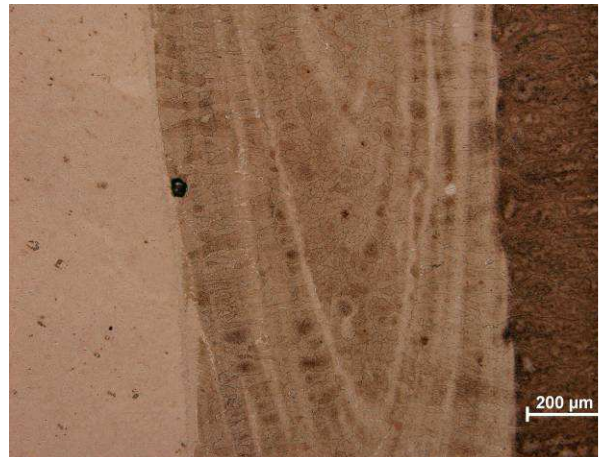
H4, vychýlení svazku o 0,3 mm do 17 153

Obr. 31: Heterogenní svary ocelí 17 240 vlevo a 17 153 vpravo, rozdílné vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 153, hlava svaru (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)

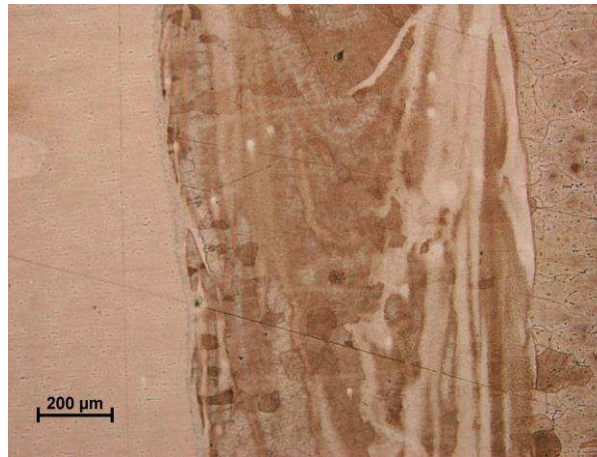
Porovnáním fotografií (*obr. 32*) střední částí svaru u heterogenních ocelí s vychýlením elektronového svazku do feritické oceli 17 153 dostáváme ucelený pohled na kvalitu provedení svarů. Na rozhraní svarový kov a ocel 17 153 vznikají dutiny, které mohou být místem pro iniciaci trhliny a tím se stává spoj křehkým a nebezpečným. Dále vzniklé nepromíšené části svaru s feritickými plochami mohou být vhodným místem pro iniciaci trhliny při vzniku Lavesových fází. U vychýlení paprsku o 0,3 mm jsou feritická místa velmi velkých rozměrů. S ohledem na tuto vzniklou strukturu lze očekávat výrazně odlišné chování těchto feritických oblastí ve srovnání s okolní feriticko – austenitickou směsí a tyto oblasti by mohly působit jako strukturální vruby oslabující vytvořený svar.



H2, vychýlení svazku o 0,1 mm do 17 153



H3, vychýlení svazku o 0,2 mm do 17 153



H4, vychýlení svazku o 0,3mm do 17 153

Obr. 32: Heterogenní svary ocelí 17 240 vlevo a 17 153 vpravo, rozdílné vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 153, střední část svaru (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)

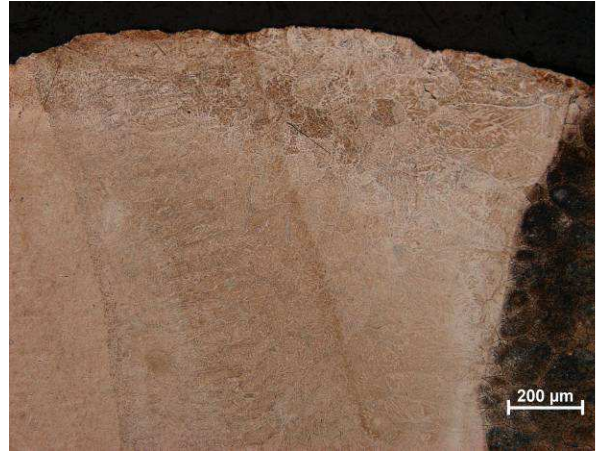
7.4.3. Heterogenní svar s vychýleným elektronovým paprskem do oceli 17 240

U svarů, kde byl svarový kov tvořen především materiálem z austenitického základního materiálu, narozdíl od svarů vychýlených do feritu, nedocházelo ke vzniku feritických pásů nebo jiných anomálií.

Porovnání mikrostruktury hlavy svaru, *obr. 33*, v závislosti na vychýlení elektronového paprsku lze vidět kvalitně provedené svary bez defektů, mikrostruktura u svarů s vychýlení 0,1 a 0,2 mm je dokonale promísená, u vychýlení 0,3 mm lze pozorovat mírnou změnu struktury na rozhraní svarový kov – ferit.



H5 vychýlení svazku o 0,1 mm do 17 240



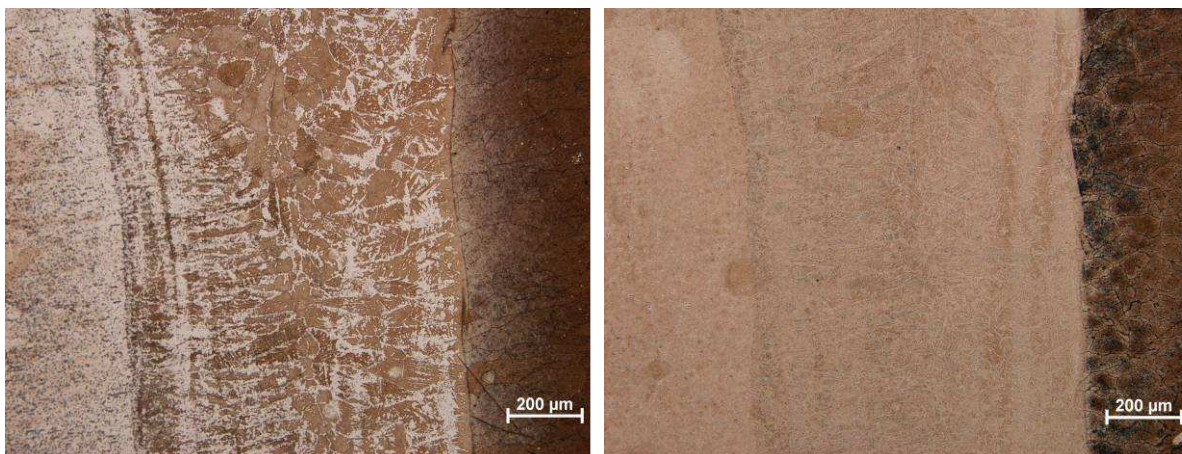
H6 vychýlení svazku o 0,2 mm do 17 240



H7 vychýlení svazku o 0,3 mm do 17 240

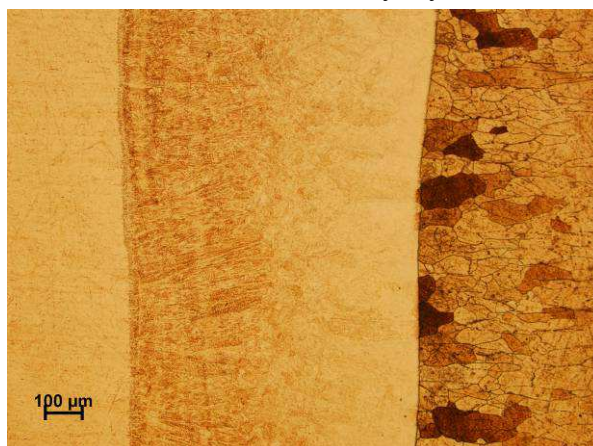
Obr. 33: Heterogenní svary ocelí 17 240 vlevo a 17 153 vpravo, rozdílné vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 240, hlava svaru, (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)

K ucelenému pohledu na svarový kov jsou dále uvedeny mikrostruktury svarů ze střední části na *obr. 34*. Svar s vychýlením 0,1 mm ukazuje strukturu s dendritickou strukturou, viditelnou primární osu a osy sekundární. U všech uvedených mikrostruktur jsou viditelná velká nenatavená feritická zrna, která přes rozhraní zasahují jako natavená a slouží jako zárodky pro růst dendritů.



H5 vychýlení svazku o 0,1 mm do 17 240

H6 vychýlení svazku o 0,2 mm do 17 240



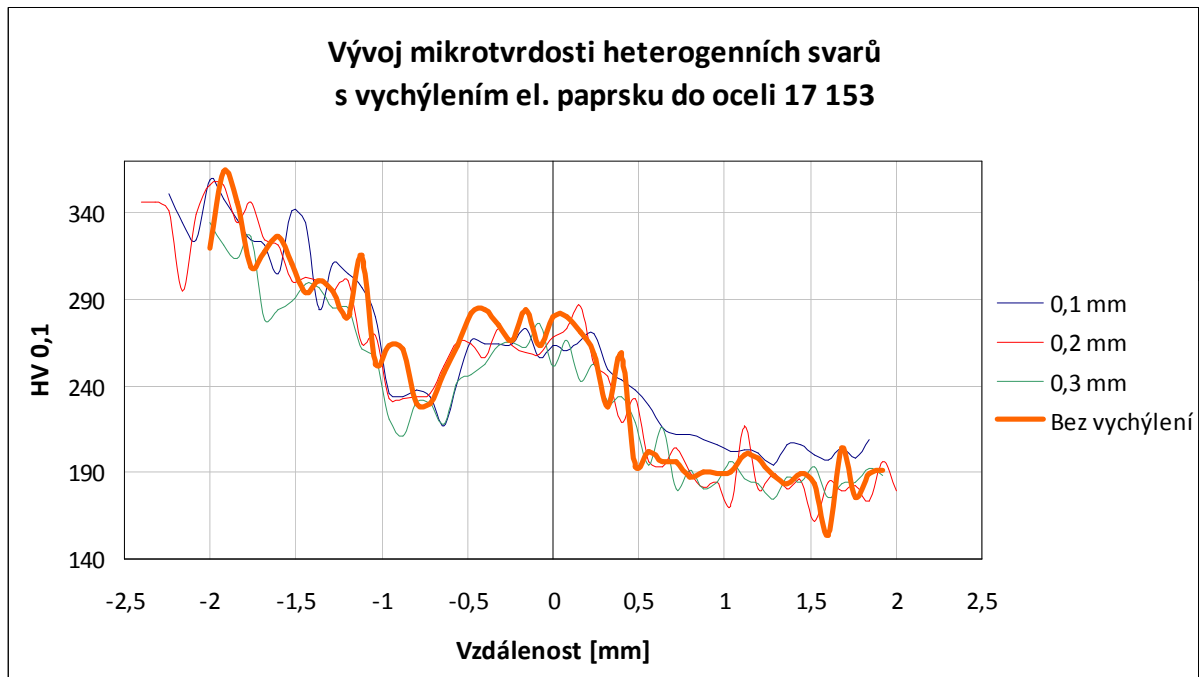
H7 vychýlení svazku o 0,3 mm do 17 240

Obr. 34: Heterogenní svary ocelí 17 240 vlevo a 17 153 vpravo, rozdílné vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 240, střední část svaru (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)

7.4.4. Hodnocení mikrotvrdomosti

Mikrotvrdomost heterogenních svarů s vychýlením do feritické oceli 17 153

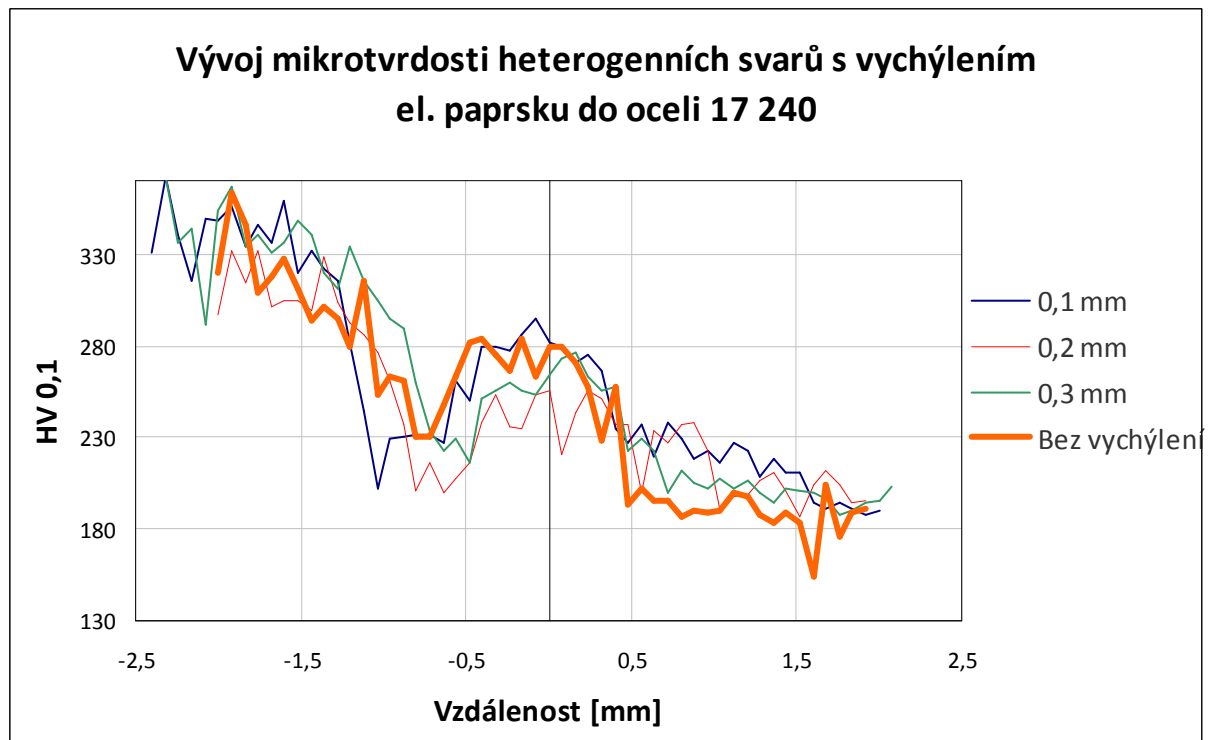
Na graf 6 je zobrazena křivka vývoje mikrotvrdomosti svaru bez vychýleného paprsku, ostatní průběhy jsou naznačeny tenkými přímkami. Z grafu lze vyčíst nepatrné zvýšení tvrdosti na rozhraní svarový kov – feritická ocel, ale s větším vychýlením tvrdost klesá. Struktura odpovídající tvrdosti 190 HV 0,1 s vychýlením el. paprsku do feritu, na rozhraní svarový kov – feritická ocel, je tvořena feritickými pásy, které se nestihly promísit do svarového kovu. Ve struktuře svarů s vychýlením 0,2 a 0,3 mm je možný vznik křehkých fází při nedostatečném promíšení materiálu, což by mohlo mít za následek pokles dynamických vlastností.



*Graf 6: Vývoj mikrotvrlosti heterogenních svarů s vychýlením
el. paprsku do oceli 17 153 (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)*

Mikrotvrlost heterogenních svarů s vychýlením do austenitické oceli 17 240

Průběh mikrotvrlosti heterogenních svarů s vychýlením do austenitické oceli je pro názornost opět porovnán s průběhem mikrotvrlosti stejného svaru bez vychýlení na *graf 7*. Rozhraní austenit – svarový kov vykazuje nepatrné rozdíly změn mikrotvrlosti i s různě zvoleným vychýlením elektronového paprsku. Na rozhraní svarový kov feritická ocel je možno pozorovat spíše postupný nárůst hodnot tvrdosti, není zde patrný výrazný skok v hodnotách mikrotvrlosti.

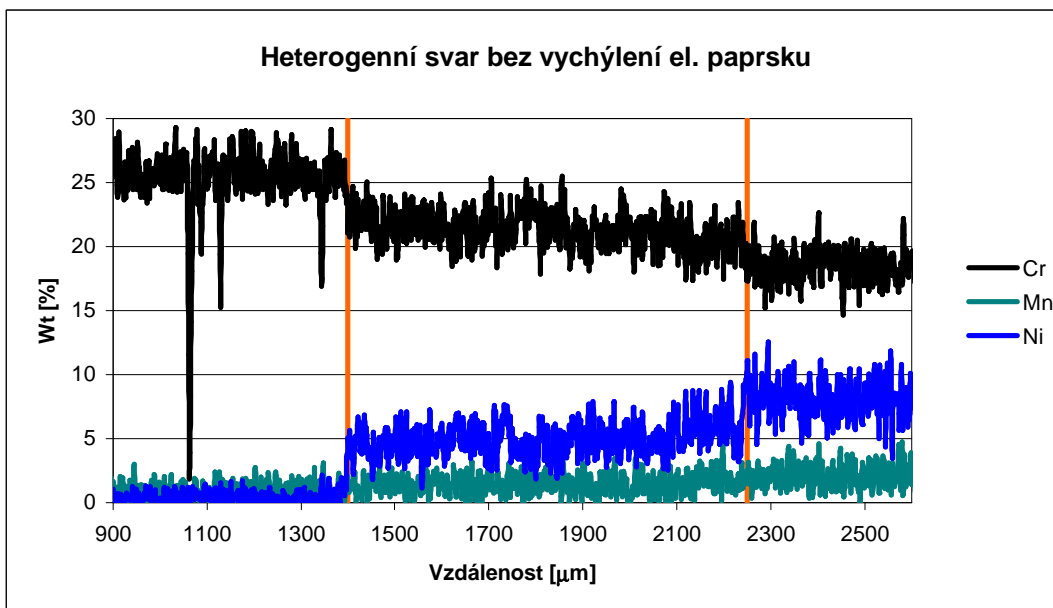


*Graf 7: Vývoj mikrotvrdości heterogenních svarů s vychýlením
el. paprsku do oceli 17 240 (vlevo ocel 17 240, vpravo ocel 17 153)*

7.4.5. Hodnocení chemického složení heterogenních svarů

Vývoj chemického složení heterogenních svarů byl proveden lineární chemickou analýzou pomocí metody EDS na elektronovém mikroskopu. Sledovanými prvky byl chrom, nikl a mangan. V grafech je vyznačen svarový kov mezi oranžovými úsečkami. Rozdílný obsah chromu v obou ocelích má za následek skokové změny v obsahu na rozhraních. U oceli 17 153 je v základním materiálu 26 hm % chromu, zatímco v oceli 17 240 je 17 hm % chromu. Ve výsledném svarovém kovu bylo naměřeno mezi 21-23 hm % chromu. Průběh chemického složení niklu je také u obou ocelí rozdílný. V základním materiálu oceli 17 153 je 1-2 hm % Ni a v oceli 17 240 je obsaženo niklu 7 hm %. Při hodnocení obsahu manganu v tomto heterogenním spoji můžeme vidět promísení dvou ocelí s podobným obsahem manganu. Výsledný svarový kov obsahoval kolem 2 hm %

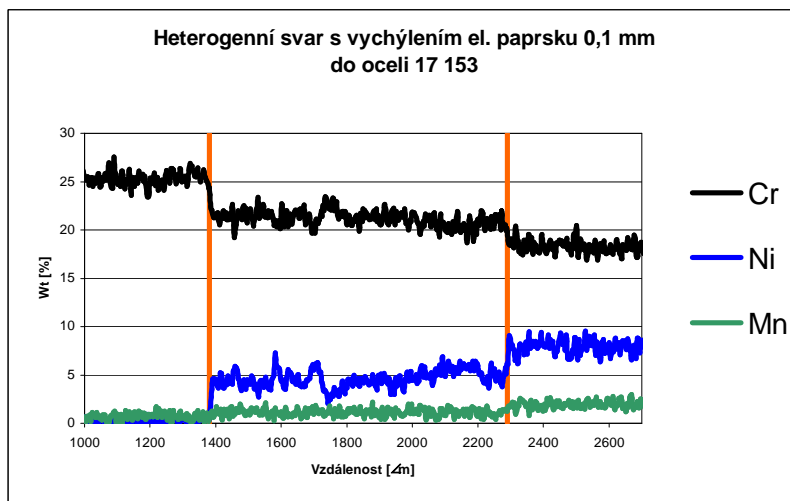
Graf chemického složení heterogenního svaru vytvořeného svazkem zaostřeným přímo na styk svařovaných ocelích, tedy bez vychýlení, je uveden na *graf 8*.



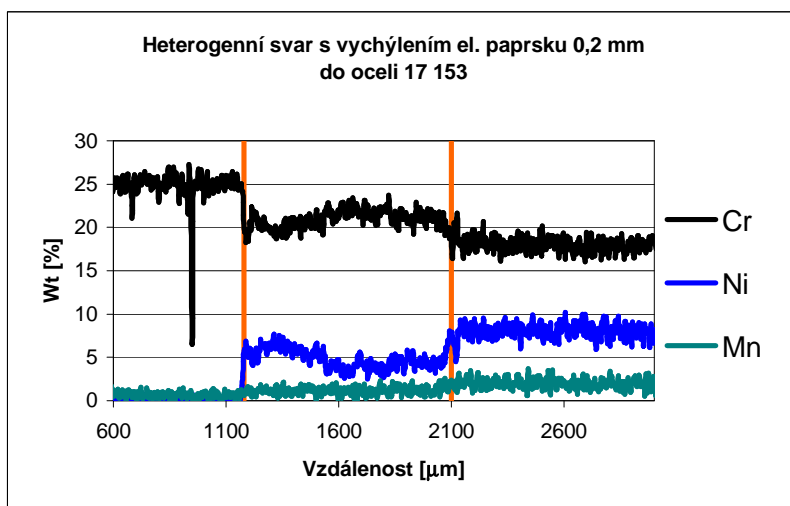
Graf 8: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno bez vychýleného el. Paprsku (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)

Vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 153

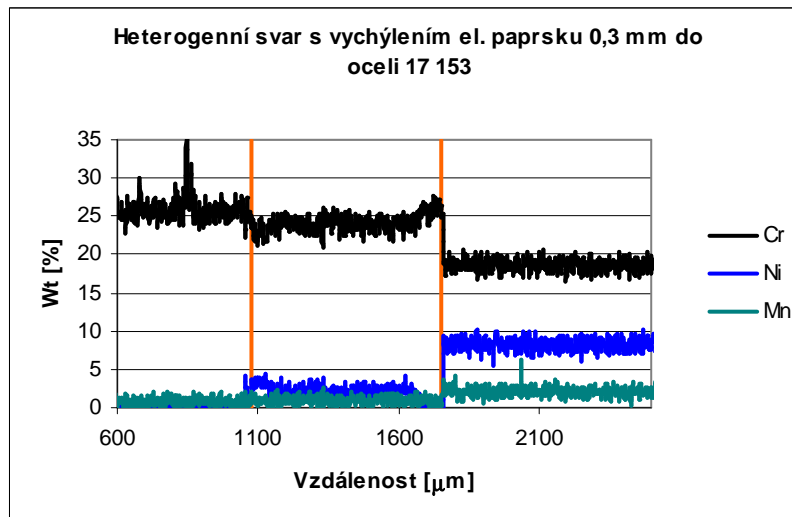
U heterogenních svarů s vychýleným elektronovým paprskem do oceli 17 153 došlo ke vzniku specifického charakteru profilu chemického složení viz *graf 9*, *graf 10* a *graf 11*. Při hodnotách 0,1 – 0,3 mm vychýlení svazku docházelo ke změně obsahu legujících prvků, zvláště niklu. Obsah niklu ve svarovém kovu byl se zvyšujícím se vychýlením elektronového paprsku od styku svařovaných ploch do feritické oceli klesající. U svaru s vychýlením el. paprsku o 0,1 mm byl obsah 5 hm%, u vychýlení 0,2 mm 4-5 hm% a u vychýlení 0,3 mm 3-4 hm %. To může způsobovat nižší pevnost provedeného svaru a náchylnost ke vzniku svarových vad. Podobnou logiku vývoje ukazuje i chrom. V původním profilu ve svaru bez vychýlení ukazuje gradient koncentrace směrem k nižším hodnotám v austenitické oceli a dvě skokové změny vždy na rozhraní svarového kovu a základního materiálu. Svary vychýlené směrem do feritické oceli mají svarový kov s výrazně vyšším obsahem chromu a skoková změna se vyskytuje výrazněji na straně austenitické ocele, což je velmi výrazně vidět na svaru s nejvyšším vychýlením – *graf 11*.



Graf 9: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,1 mm do oceli 17 153 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)



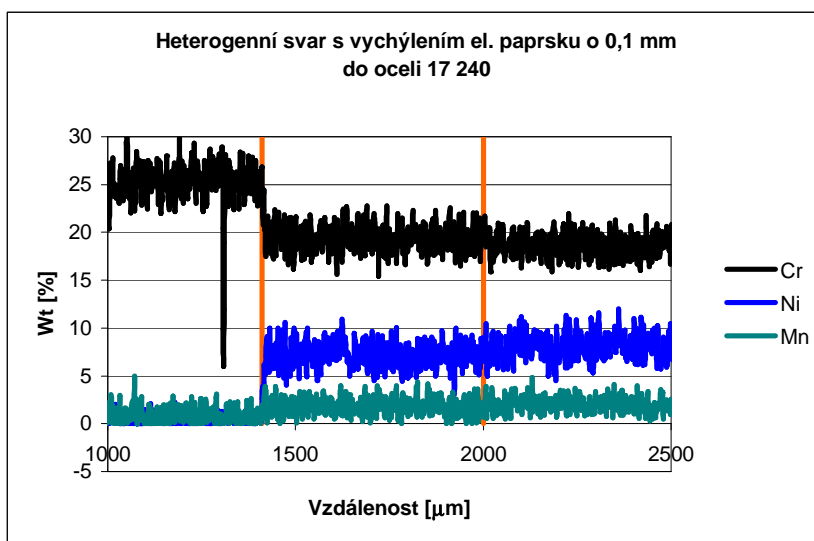
Graf 10: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,2 mm do oceli 17 153 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)



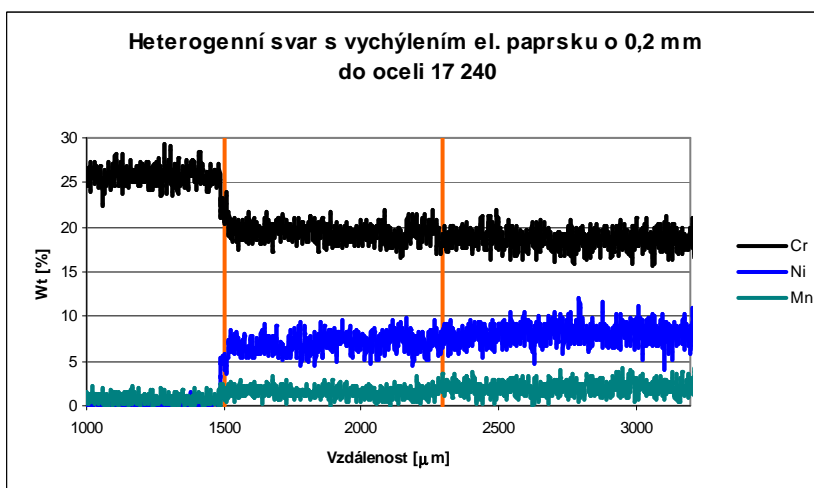
Graf 11: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,3 mm do oceli 17 153 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)

Vychýlení elektronového paprsku do oceli 17 240

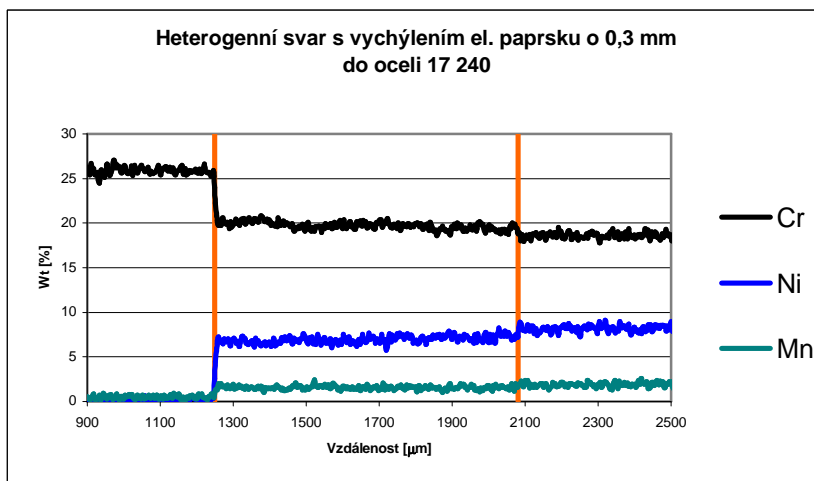
Průběhy chemického složení svarů pořízených s vychýlením paprsku do oceli 17 240 jsou uvedeny na *graf 12*, *graf 13* a *graf 14*. Z grafů lze vyčíst skoro identické složení svarového kovu jako oceli 17 240. Svarový kov je tedy obohacen niklem jako legujícím prvkem v zastoupení 7 hm % což je mírně pod koncentrací v samotném austenitu a je možno očekávat, že bude houževnatější než provedené svary s vychýleným elektronovým paprskem do oceli 17 153. Zastoupení chromu a manganu je opět blíže oceli 17 240; je zde patrný mírný nárůst v řádu 1 % u chromu. Na straně rozhraní svarového kovu a feritické oceli je opět patrný výrazný skok v chemickém složení – podobně jako na opačné straně svaru vychýleného do feritu.



Graf 12: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,1 mm do oceli 17 240 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)



Graf 13: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,2 mm do oceli 17 240 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)



Graf 14: Průběh chemického složení heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240, svařeno s vychýlením el. paprsku o 0,3 mm do oceli 17 240 (vlevo ocel 17 153, vpravo ocel 17 240)

7.4.6. Shrnutí poznání chemického složení heterogenních svarů

Z provedených měření profilu chemického složení napříč heterogenními svary vyplývá, že posunutím ohniska svazku mimo rovinu styku obou svařovaných kusů je výsledný svarový kov více ovlivněn původním chemickým složením materiálu, do kterého je svazek vychýlen.

Výrazná změna chemického složení je vidět na svarech vzorků H2, H3 a H4 na grafech: *graf 9*, *graf 10* a *graf 11*. V uvedených grafech chemického složení je výrazná skoková změna chemického složení. Z hlediska pevnosti svaru a samotného svarového kovu to znamená, že je možné volit chemické složení svarového kovu tak, aby byla maximálně omezena možnost vzniku křehkých fází, pokud takového nebezpečí u jednoho ze základního materiálu, nebo u svarového kovu průměrného složení, hrozí. V případě svařování niklové austenitické a chromové feritické oceli může při promíšení obou materiálů dojít ke vzniku dvoufázové oblasti s vznikem martenzitu, sigma fází a Lavesových fází, což může ohrozit celkovou pevnost svaru [30]. Je proto vhodné volit takové vychýlení svazku, aby chemické složení výsledného svarového kovu vytvářelo pokud možno jen houževnaté tuhé roztoky.

7.4.7. Rozměrové parametry heterogenního svaru ocelí 17 153 a 17 240

Provedení heterogenních svarů bylo nutným krokem k zjištění rozměrů daných svarů pro následné navržení insertu pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu. Hodnocené byly rozměry provedených heterogenních svarů s vychýlením elektronového svazku jak do oceli 17 240 tak do oceli 17 153. Následující *tab. 13* udává hodnoty šířky hlavy svaru, šířku svaru pod povrchem a šířku tepelně ovlivněné oblasti do obou ocelí.

Na provedení vhodných svarů při aplikaci svarů na vzorky s vnitřním insertem je vhodné volit svar se zaostřeným elektronovým paprskem nebo s paprskem zaostřeným do

oceli 17 240 do vzdálenosti 0,3 mm. Svary se zaostřeným paprskem do oceli 17 153 by nebylo vhodné volit kvůli možnosti snížení houževnatosti materiálu a taky naměřené snížené mikrotvrdosti.

	Heterogenní svar bez vychýlení [mm]	Heterogenní svar s max. vychýlením do oceli 17 240 [mm]	Heterogenní svar s max. vychýlením do oceli 17 153 [mm]
Šířka hlavy svaru	1,55	1,66	1,5
Šířka svaru 4 mm pod povrchem	0,9	1,1	1
Šířka TOO	0,40 do 17 240 0,53 do 17 153	0,41 do 17 240 0,47 do 17 153	0,37 do 17 240 0,55 do 17 153

Tab. 13: Parametry heterogenních svarů

Hodnocení mikrotvrdosti heterogenních svarů je uvedeno v tab. 14. Svařované ocele mají výrazně rozdílnou tvrdost. Ocel 17 153 je méně houževnatější a má tvrdost 195 HV 0,1; ocel 17 240 má tvrdost 330 HV 0,1. Výsledný svarový kov s kulumnárními zrny má tvrdost 280 HV 0,1.

	Heterogenní svar [HV 0,1]
Materiál 17 240	330
Materiál 17 153	195
Svarový kov	280
Tepelně ovlivněná oblast	229 do oceli 17 240 202 do oceli 17 153

Tab. 14: Hodnoty mikrotvrdosti heterogenního svaru

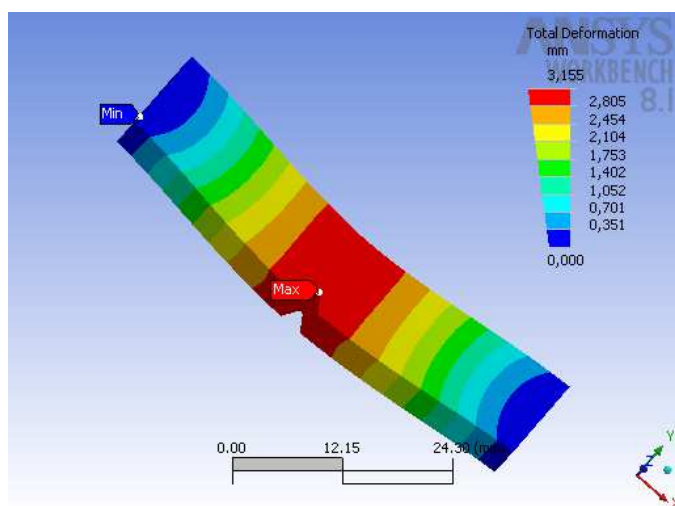
7.5. Návrh velikosti insertu pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu

Konstrukce vzorku pro zkoušku rázem v ohybu je složena ze 3 částí: vnitřního zkoušeného materiálu – insertu, a dvou bočních doplňkových materiálů. Tyto boční doplňkové materiály jsou vždy stejného materiálu. Výsledný vzorek musí splňovat rozměry 10×10×55 jako standardní vzorek na zkoušku rázem v ohybu. Při návrhu konstrukce vzorku bylo uvažováno o délce insertu a pomocí dostupných simulací z metod konečných prvků chování vzorku při přeražení kladivem obr. 35, a již provedených experimentálních vzorků s vnitřním insertem se do uvažování zahrnuly zvláště: oblast materiálu deformovaného při nárazu a šířka svaru s TOO. Šířka deformované oblasti

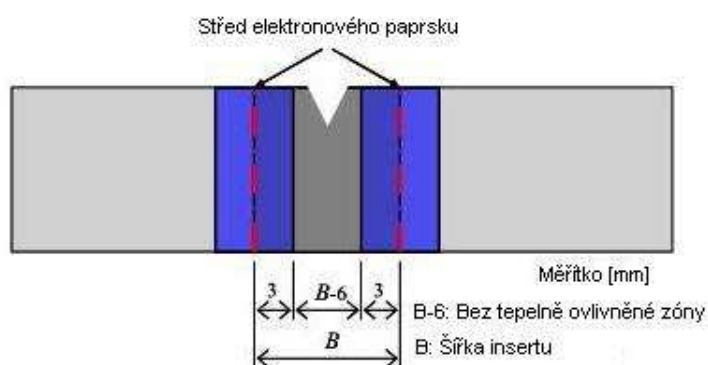
v oblasti vrubu dosahuje 3,155 mm před rozlomením vzorku [31]. Po zlomení vzorku může deformovaná oblast být až 5 mm široká. Je nutné, aby oblast deformované zóny nebyla přímo v kontaktu s provedenými svary. Šířka TOO a provedeného svaru zasahující do délky insertu je minimálně 1, mm z každé strany, tedy zasahují do insertu délkou 2 mm.

V uvedených studiích, [21, 32, 33], je uváděna délka insertu 4–24 mm v závislosti na druhu svařování. V uvedené studii [33] je vnitřní insert, *obr. 36*, pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu svařen elektronovým paprskem. Hodnota B reprezentuje šířku insertu a B – 6 oblast, která není ovlivněná provedenými svary.

Délka insertu byla hodnocena dvěma kritérii, a to mikrotvrdostí měřeného svaru a předpokládanou šířkou insertu bez TOO s provedeným svarem po elektronovém svařování. Výsledné naměřené hodnoty nárazové práce porovnané s hodnotou nárazové práce standardizovaného vzorku při 0 °C ukazují nejvyšší shodu s rekonstruovaným vzorkem s délkou insertu 13 mm. Výsledné hodnoty nárazové práce vzorku s insertem délky 9 mm se liší o 3 – 5 J od standardizovaného vzorku [33].



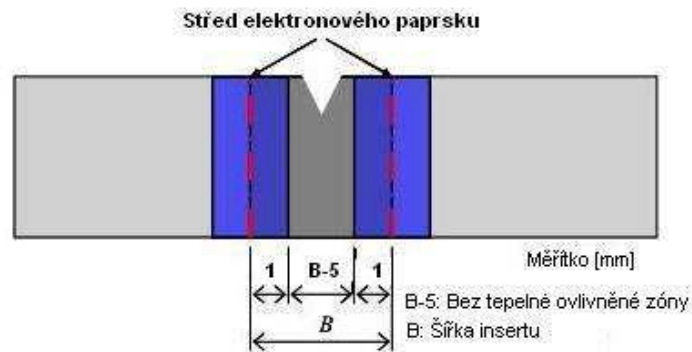
Obr. 35: Model deformace vzorku [31]



Obr. 36: Návrh šířky insertu na vzorek pro zkoušku rázem v ohybu, svary provedeny elektronovým paprskem [33]

Ze získaných informací lze navrhnout šířku insertu 7 mm, a větší, pro získání nezkreslených výsledků při provedení zkoušky rázem v ohybu na takto vyrobeném vzorku.

Návrh vzorku s vnitřním insertem je zobrazen na *obr. 37*, kde šířka insertu bez TOO a svarů je 5 mm a šířka provedených svarů s TOO z každé strany 1 mm. Rozměry insertu jsou tedy 7×10×10 mm a doplňkové materiály z obou stran 24×10×10 mm. Výsledné rozměry vzorku s V vrubem jsou 55×10×10 mm.



Obr. 37: Návrh šířky insertu podle provedených experimentů

Na základě provedených experimentů byl navržen vzorek pro zkoušku rázem v ohybu s rozměry insertu 7×10×10 mm při provedení svařovacími parametry: 27 mA proud ve svazku, 120 kV urychlovacím napětí a parametru SURF -4 mA.

Tento postup výroby vzorku je možné použít i v případech, kdy je vyroben jeden jediný masivní vzorek pro rázovou zkoušku a zvolená velikost insertu umožňuje vyrobit dva inserty z přeraženého vzorku a jedno zcela platné měření doplnit dvěma měřeními na rekonstruovaných vzorcích.

Při návrhu vzorků s insertem by měla být zahrnuta také vzniklá deformační zóna od podpěr testovacího stoje na uchycení vzorků. Tyto hodnoty by rozšířily poznání o chování zatěžovaného vzorku, ale v tomto návrhu vzorku nebyly zohledněny z důvodu nezajištění simulací chování vzorku při namáhání pomocí simulací metody konečných prvků.

8. Závěr

Tato diplomová práce shrnuje výsledky experimentů na homogenních a heterogenních svarech provedených elektronovým paprskem. Svary byly provedeny na austenitické korozivzdorné oceli 17 240 a feritické žáruvzdorné oceli 17 153. Nejprve byly provedeny homogenní svary pro zjištění vhodných parametrů na nastavení elektronového paprsku, poté heterogenní svary těchto dvou ocelí s nastavenými parametry: urychlovací napětí 120 kV, proud ve svazku 27 mA, urychlovací napětí 120 kV a zaostření elektronového paprsku, parametr SURF, proudem -4 mA. Heterogenní svary byly provedeny s vychýlením paprsku od styku čelních ploch svařovaných kusů o 0,1; 0,2; 0,3 mm do obou ocelí. Vyhodnocená mikrotvrdość a získané fotografie mikrostruktury potvrdily zhoršené hodnoty mikrotvrdości a tvorbu feritových pásů z důvodu nedokonalého promíšení materiálu svarů provedených s vychýlením elektronového paprsku do oceli 17 153, tedy do méně houževnaté ocele. Hodnocené svary, kde byl elektronový paprsek vychýlen do oceli 17 240, byly bez výrazné změny mikrotvrdości a také mikrostruktury. U těchto svarů bylo chemické složení svarového kovu téměř totožné s chemickým složením oceli 17 240. Heterogenní svary bez svarových vad a zhoršených mechanických vlastností je možné zaostřovat elektronovým paprskem přímo na styk svařovaných kusů nebo s možnou výchylnou do 0,3 mm do houževnatějšího materiálu, v tomto případě do oceli 17 240.

Tyto experimenty byly zařazeny pro následnou aplikaci heterogenních svarů pro rekonstrukci vzorků s malými inserty pro zkoušku rázem v ohybu. Vzorky s vnitřním insertem pro nárazovou zkoušku nejsou v tuto chvíli standardizované, ale s požadavky na testování houževnatosti materiálů používaných v energetickém průmyslu by měla být zkouška s prezentovanou konstrukcí vzorku v budoucnu normována. U heterogenních svarů byly měřeny parametry svaru, zvláště: šířka svaru 0,8 mm a šířka TOO maximálně 0,2 mm zasahující do části insertu z každé strany. Hodnocení napěťového pole v místě vrubu při úderu kladiva na vzorek a délka deformované oblasti je naměřena 3,155 mm. Při úplném přeražení vzorku může být deformovaná část až 5 mm. Tyto hodnoty byly zahrnuty do návrhu insertu pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu.

Ze získaných experimentálních dat a pomocí literatury [32, 33, 34] byly navrženy rozměry insertu pro vzorek nárazové zkoušky 7×10×10 mm s dvěma přídatnými kusy přídatné oceli o rozměrech 24×10×10 mm na doplnění potřebné délky vzorku. Rozměr insertu pro vzorek na zkoušku rázem v ohybu bude aplikovatelný dle těchto rozměrů při použití materiálů stejných pevností.

U materiálů jiných pevností, nebo při nutnosti vytvářet na rozhraní insert doplnkový materiál výrazně heterogenní svar, je potřeba zvětšení šířky insertu z důvodu možnosti vzniku křehkých fází v tepelně ovlivněné oblasti svarů nebo v samotném svarovém kovu.

9. Citace

[1] VODÁREK, Vlastimil. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12) % Cr ocelí*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 2003, 163 s. ISBN 80-248-0329-1.

[2] *Energetika* [online]. Dostupné z: <http://www.energetika-eu.cz/>

[3] ČECH, Bohuslav. *Vysokoteplotní materiály*. SNTL, 1966.

[4] KOUTSKÝ, Jaroslav. *Slitinové oceli pro energetické strojírenství*. Brno: TISK, 1981.

[5] MEETHAM, Geoffrey W a Marcel H VOORDE. *Materials for high temperature engineering applications*. Berlin: Springer, 2000, 164 s. ISBN 35-406-6861-6.

[6] BHADESHIA, H a R HONEYCOMBE. *Steels: Microstructure and properties*. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006, 344 s. ISBN 07-506-8084-9.

[7] *Creep-resistant steels*. Editor Torsten-Ulf Kern, Ramaswamy Viswanathan. Cambridge: Woodhead, 2008. ISBN 978-1-84569-178-3.

[8] *Stainless steel handbook*. 2013. Dostupné z: www.outokumpu.com

[9] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.

[10] PAN, C a Z ZHANG. *Morphologies of the transition region in dissimilar austenitic - ferritic welds*. 2003. Dostupné také z [:http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509703002499](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509703002499)

[11] EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů: Část 1: Tavné svařování*. 2007.

[12] SONDEL, Martin. *Mikrostrukturní parametry kombinovaného svarového spoje po dlouhodobé vysokoteplotní expozici*. 2011.

[13] PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Structural Stability of Deposits and Welded Joints in Power Engineering*. 1. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 1998, 176 s. ISBN 18-983-2608-8.

- [14] *ASM Handbook, Volume 8: Mechanical testing*. ASM International, 2000, s. 1353-1380. ISBN 0-87170-389-0.
- [15] VELES, Pavol. *Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov*. Bratislava: ALFA, 1985.
- [16] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy: Část 1: Zkušební metoda*. 2010. vyd.
- [17] NOVOTNÁ, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků: Zkouška rázem v ohybu*. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>
- [18] FORET, Rudolf a B ZLAMAL. *Structural Stability of Dissimilar Weld between Two Cr-Mo-V Steels*. 2006.
- [19] BOURDILIAU, B. *Comparative study on Charpy specimen reconstitution techniques*. 2011. Dostupné také z: www.elsevier.com/locate/nucengdes
- [20] KANDER, Ladislav. *Využití nestandardních zkušebních těles pro stanovení tranzitních teplot konstrukčních ocelí*. 2005. Dostupné také z: http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_05/papers/237.pdf
- [21] PETROV, P. *Advanced welding processes for reconstitution Charpy test specimens*. 2008. Dostupné také z: www.sciencedirect.com
- [22] MATOCHA, Karel a Bohumír STRNADEL. Vliv velikosti zkušebních těles na mechanické vlastnosti konstrukčních ocelí. *Metal 2004*. 2004. Dostupné také z: http://www.google.cz/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CCEQFjAA&url=http%3A%2F%2Fkonsys-t.tanger.cz%2Ffiles%2Fproceedings%2Fmetal_04%2Fpapers%2F123.pdf&ei=rrxZVcm3BlmvsAHh-YCwDw&usg=AFQjCNGXLcqJlu0jxEe_O0rUulssw_TnuQ&bvm=bv.93564037,d.bGg
- [23] KAUR, Aman a Colin RIBTONB. *Journal of Materials Processing Technology: Electron beam characterisation methods and devices for welding equipment*. 2014, s. 8. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013615000679>
- [24] SCHULTZ, Helmut. 1993. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington, viii, 232 s. ISBN 18-557-3050-2.
- [25] MRŇA, Libor. *Svařování svazkem elektronů: Studijní podklady*. 2013.

[26] EN 1011-7. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 7: Elektronové svařování*. 2004.

[27] SCHULTZ, Helmut. 1993. *Electron beam welding*. Cambridge: Abington, viii, 232 s. ISBN 18-557-3050-2.

[28] PREPARED BY THE AMERICAN WELDING SOCIETY (AWS) C7 COMMITTEE ON HIGH ENERGY BEAM WELDING AND CUTTING, under the direction of the AWS Technical Activities Committee. *Recommended practices for electron beam welding and allied processes*. 4th edition. 2013. ISBN 978-087-1718-358.

[29] JAN, Vít a Ondřej VYKLIČKÝ. *Makro a mikrostrukturní analýza vzorků svarových spojů s technologií opravy „Weld Overlay“*. Brno, 2013.

[30] ŠOHAJ, P. *Strukturní stabilita svarových spojů austenitických a feritických ocelí*. Brno:

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 77 s. Vedoucí disertační

práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc..

[31] BARAŇÁK, Libor. *ŘEŠENÍ PROBLEMATIKY LOMOVÉ HOUŽEVNATOSTI NA MODULÁRNÍCH MOBILNÍCH MOSTNÍCH PROSTŘEDCÍCH*. 2015, : 11. Dostupné také z: http://mostreal.sk/13_AUM_05/data/13.AUM05-Sborn%C3%ADk/Struktur%C3%A1ln%C3%AD%20anal%C3%BDza/LiborBaranak_Reseni_problematiky_lomove_houzevnatosti.pdf

[32] BOURDILIAU, B. *Comparative study on Charpy specimen reconstitution techniques*. 2011. Dostupné také z: <http://www.journals.elsevier.com/nuclear-engineering-and-design>

[33] KIYOSHI, Ono. *CHARPY IMPACT TESTS WITH TEST SPECIMENS MADE WITH STOP-HOLE-SIZE CORES*. 2012. Dostupné také z: http://www.pwri.go.jp/eng/ujnr/tc/g/pdf/27/27-6-2_ono.pdf

[34] MUKHERJEE, M. *Influence of Heat Input on Martensite Formation and Impact Property of Ferritic-Austenitic Dissimilar Weld Metals*. 2011. Dostupné také z: <http://www.jmst.org/fileup/PDF/20110658.pdf>

10. Seznam použitých zkratek

Zkratka/symbol	Popis	Jednotka
BCC	prostorově centrovaná buňka	1.0×10^{-10} m
FCC	plošně centrovaná buňka	1.0×10^{-10} m
ROS	ruční obloukové svařování	
TIG	svařování wolframovou elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu	
SAW	automatické svařování pod tavidlem	
SK	svarový kov	
ZM	základní materiál	
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
EB	elektronový paprsek	
R _a	průměrná aritmetická úchylka profilu	μm
T _{27J}	tranzitní teplota 27 J	
KV _{min}	minimální nárazová práce	Joule
KV _{max}	maximální nárazová práce	Joule
KV _{50%}	průměrné nárazové práce	Joule
HV0,1	mikrotvrdość dle Vickerse	

11. Přílohy

Příloha 1: Materiálový list oceli 17 240

Wnr. (číslo materiálu) 1.4301		Cr-Ni austenitická korozivzdorná ocel				OCEL Kurzne (značka) X5CrNi18-10	
Chemické složení [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S ¹⁾	Cr	Ni	N
max 0,07	max 1,00	max 2,00	max 0,045	max 0,015	17,0–19,5	8,00–10,5	max 0,11
Normy DIN							
DIN EN 10088 /1-3-95 korozivzdorné oceli							
DIN EN 10028/7-97 ploché výrobky z ocelí na tlakové nádoby; korozivzdorné oceli							
DIN EN 100222/5-00 výkovky z ocelí na tlakové nádoby; martenzitické, austenitické a austeniticko-fertické korozivzdorné oceli							
DIN EN 10250/4-00 volné výkovky z oceli pro všeobecné použití; korozivzdorné oceli							
DIN EN 10269-99 oceli a niklové slitiny na upevňovací části pro zvýšené a/nebo snížené teploty							
DIN 4133-91 ocelové komíny							
DIN 5512/3-91 oceli na kolejová vozidla; ploché výrobky z korozivzdorných ocelí							
DIN 17440-96 korozivzdorné oceli; plech, pás válcovaný za tepla a válcované tyče na tlakové nádoby, tažený drát a výkovky							
DIN 17441-97 korozivzdorné oceli; pás válcovaný za studena na tlakové nádoby							
DIN 17442-77 vývalky, výkovky a odlitky z korozivzdorných ocelí na lékařské nástroje							
Mechanické vlastnosti							
Rozměr t, d [mm]		≤ 6 ²⁾	≤ 12 ³⁾	≤ 75 ⁴⁾	≤ 160 ⁵⁾ 10)	161–250 ⁵⁾	
Stav		po rozpouštěcím žhání					
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min		230 ⁶⁾	210 ⁶⁾		190 ⁹⁾		
Mez kluzu R _p 1,0 [MPa]		260 ⁶⁾	250 ⁶⁾		225 ⁹⁾		
Mez pevnosti R _m [MPa]		540–750	520–720		500–700		
Tažnost A [%] min		45 ⁶⁾ 7)		45 ⁶⁾	45 ⁹⁾	35 ⁶⁾ 9)	
Kontrakce Z [%]							
Nárazová práce KV [J]	podél min	–	90		100 ⁹⁾	–	
	napříč min	–	60		–	60 ⁹⁾	
Tvrdost HB max		–	–		215 ⁹⁾		
Modul pružnosti E [GPa]		200					
Rozměr t _n [mm]		250 ¹¹⁾					
Stav		po rozpouštěcím žhání					
Mez kluzu R _p 0,2 [MPa] min		200					
Mez kluzu R _p 1,0 [MPa]		230					
Mez pevnosti R _m [MPa]		500–700					
Tažnost A %	podél min	45					
	napříč min	35					
Kontrakce Z [%]							

Nárazová práce KV [J]		podél min	100								
		napříč min	60								
KV ⁻¹⁹⁶ [J]		napříč min	60								
Modul pružnosti E [GPa]			200								
Min. hodnoty meze kluzu R _{p0,2} a R _{p1,0} a meze pevnosti R _m při zvýšených teplotách (stav po rozpouštěcím žhání)											
Teplota [°C]		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550
Mezi kluzu [MPa]	R _{p0,2}	155	140	127	118	110	104	98	95	92	90
	R _{p1,0}	190	170	155	145	135	129	125	122	120	120
Mez pevnosti R _m [MPa]		450	420	400	390	380	380	380	375	360	335
Hodnoty pevnosti v tahu, tažnosti a nárazové práce ve zpevněném stavu											
Označení		C700	C800	C850	C1000	C1150	C1300				
Mez pevnosti R _m [MPa]		700–850	800–1000	850–1000	1000–1150	1150–1300	1300–1500				
Tažnost A [%] min		20	12	–	–	–	–				
Nárazová práce	KV [J] min	80	–	–	–	–	–				
	KV ⁻¹⁹⁶ [J] min	50	–	–	–	–	–				
Mechanické vlastnosti při nízkých teplotách											
Teplota [°C]		-150				-196					
Mez kluzu R _{p0,2} [MPa] min		370				400					
Mez pevnosti R _m [MPa] min		1400				1500					
Tažnost A [%] min		40				35					
Nárazové práce KV [J] min		60				60					
Hodnoty modulu pružnosti E při zvýšených teplotách											
Teplota [°C]		100	200	300	400	500					
Modul pružnosti E [GPa]		194	186	179	172	165					
Fyzikální vlastnosti											
Hustota		Měrná tepelná kapacita		Teplotní součinitel roztažnosti		Tepelná vodivost		Rezistivita			
ρ [kg . m ⁻³]		c _p [J . kg ⁻¹ . K ⁻¹]		α [K ⁻¹]		λ _t [W . m ⁻¹ K ⁻¹]		[Ω . mm ² . m ⁻¹]			
7 900		500		16 . 10 ⁻⁶		15		0,73			
Odolnost proti degradačním procesům											
ODOLNOST PROTI MEZIKRYSTALOVÉ KOROZI											
– v dodávaném stavu: ano											
– po zcitlivění: ne											
Technologické údaje											
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ											
rozpouštěcí žhání		1000–1100 °C	ochlazovat ve vodě nebo na vzduchu [®])								
TVAŘITELNOST											
teploty tváření		1200–900 °C	ochlazovat na vzduchu								

SVARĚTELNOST

svařitelná všemi obvyklými postupy

Použití

Přístroje v potravinářském průmyslu (svařitelná, dobře lešitelná, zvláště hlubokotažná, odolná proi opotřebení).

Ostatní vlastnosti

magnetovatelnost: ne

Poznámky

- 1) pro výrobky určené k obrábění je doporučen a povolen obsah S = 0,015–0,030 %
- 2) pás válcovaný za studena
- 3) pás válcovaný za tepla
- 4) plech válcovaný za tepla
- 5) tyče a válcované dráty
- 6) napříč
- 7) pro materiál rovnaný protahováním je min hodnota o 5% nižší
- 8) nad 2 mm tloušťky pouze ve vodě
- 9) pro válcované dráty platí pouze hodnota meze pevnosti
- 10) pro profily a tyče s $t \leq 35$ mm tvářené za studena platí: HB = max 315, $R_m = 500\text{--}900$ MPa, A = min 36%
- 11) výkovky

Příloha 2: materiálový list oceli 17 153

WNr. (číslo materiálu) 1.4762		Žáruvzdorná feritická ocel				OCEL Kurzname (značka) X10CrAlSi25	
Chemické složení [hm. %]							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Al	
max 0,12	0,70–1,40	max 1,00	max 0,040	max 0,015	23,0–26,0	1,20–1,70	
Normy DIN							
DIN EN 10095-99 – oceli a niklové slitiny žáruvzdorné SEW 470-76 – válcované a kované žáruvzdorné oceli							
Mechanické vlastnosti ¹⁾							
Rozměr d [mm]	tyče ≤ 25						
Stav	žháný						
Mez kluzu $R_p 0,2$ [MPa] min	280						
Mez pevnosti R_m [MPa]	520–720						
Tažnost A [%] podél min	10						
Kontrakce Z [%]	–						
Nárazová práce [J]	–						
Tvrдость HB max	223						
Fyzikální vlastnosti							
Hustota	Měrná tepelná kapacita	Tepelný součinitel roztažnosti	Tepelná vodivost	Rezistivita			
ρ [kg.m ⁻³]	c_p [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	α [K ⁻¹]	λ_1 [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	[.mm ² .m ⁻¹]			
7 700	500	10,5 . 10 ⁻⁶	17	1,1			
Odolnost proti degradačním procesům							
ODOLNOST PROTI OXIDACI ZA ZVÝŠENÝCH TEPLOT (horký vzduch) do 1 150 °C (ztráta hmotnosti okujením není průměrně vyšší než 1 g . m ⁻² . h ⁻¹ pro 120 h namáhání se čtyřmi mezi-ochlazeními); nutno věnovat pozornost použití při teplotách 600–950 °C, kdy vzniká sigma-fáze a/nebo karbidické křehnutí							
– v oxidujícím prostředí s obsahem síry – velmi vysoká – v redukčním prostředí s obsahem síry – vysoká – v prostředí bohatém na dusík s nízkým obsahem O ₂ – malá – v redukčním prostředí – střední (při teplotách nad 900 °C)							
ODOLNOST PROTI TEČENÍ							
Mez pevnosti při tečení v tahu R_{mT} [MPa]							
Teplota [°C]	500	600	700	800	900		
$R_{mT}/10^3$	160	55	17	7,5	3,6		
$R_{mT}/10^4$	100	35	9,5	4,3	1,9		
$R_{mT}/10^5$	55	20	5	2,3	1,0		

Mez tečení v tahu R_T [MPa]					
$R_T/10^3/1$	80	27,5	8,5	3,7	1,8
$R_T/10^4/1$	50	17,5	4,7	2,1	1,0
Technologické údaje					
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ					
žhání ²⁾	800–860 °C	ochlazovat na vzduchu nebo ve vodě, ve zvláštních případech v peci			
TVAŘITELNOST					
vhodná ke tváření za tepla i za studena, před tvářením za studena se doporučuje žhání					
teploty tváření	1 100–800 °C				
SVAŘITELNOST					
podmíněně svařitelná elektrickým obloukem po předehřevu					
doporučené přídavné materiály pro svařování el. obloukem ručně: X8Cr30, X12CrNi26-5, X12CrNi22-12					
Použití					
Části namáhané vysokou teplotou a malým mechanickým zatížením, např. vodící plechy přehříváků parních kotlů.					
Ostatní vlastnosti					
způsob výroby: volí výrobce					
magnetičnost: ano					