

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily



Měření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji
Measurement of thermal cycles on single-layer welded joint

Autor práce: Lukáš Szkandera
Vedoucí práce: Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálů a technologií pro automobily

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Szkandera**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

Téma: **Měření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji**
Measurement of thermal cycles on single-layer welded joint

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii, týkající se žárovevých ocelí a jejich svařování
2. Zpracujte studii, týkající se teplotních cyklů svařování
3. Zpracujte studii týkající se tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje
4. Proveďte naměření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji
5. Navrhněte parametry pro modelovaná pásma TOO svarových spojů
6. Vyhodnoťte dosažené výsledky a vyslovte závěry

Seznam doporučené odborné literatury:

SONDEL, M. Studium vlastností modelovaných pásem TOO svarových spojů oceli P91. Disertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2005. 101s.

KUČERA, J. Teorie svařování. Skripta VŠB. Ostrava: VŠB – TUO, 1991, 408 s.

Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3

Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0

KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. Svařování I. skripta VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6

Kolektiv autorů. Přídavné materiály pro stavbu elektráren. Praha: Böhler Uddeholm CZ s.r.o., 2007. 18 s.

Odborné články z konferencí METAL, CREEP, COST, LIEGE Conference, aj.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 29.11.2013

Datum odevzdání: 30.04.2014



doc. Ing. Petr Tomčík, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

- ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.
- ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.
- ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).
- ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnické nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.
- ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.
- ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.
- ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:
- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
 - Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
 - Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.
- BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.
BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).
Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na

ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahore: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*


dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2013/2014.

Ostrava 1. 2. 2014


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 –užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 –školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská –Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB – TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

.....

podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Szkandera, L. *Měření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji*. Bakalářská práce, VŠB – TUO, FMMI, Katedra materiálů a technologií pro automobily. 2014, 50 s.

Cílem této bakalářské práce je měření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji oceli 16Mo3.

V první, teoretické části bakalářské práce je zpracována studie žárovevných ocelí, teplotních cyklů a tepelně ovlivněné oblasti. V experimentální části je popsán průběh měření teplotních cyklů. Práce obsahuje analýzu makrostruktury a mikrostruktury TOO použité oceli. V závěru je uvedeno vyhodnocení dosažených výsledků.

Klíčová slova: ocel 16Mo3, tepelně ovlivněná oblast, teplotní cyklus, žárovevná ocel, mikrostruktura

Abstract

The aim of this thesis is the measurement of thermal cycles on single-layer welded joint in steel 16Mo3.

In the first, theoretical part of the thesis is a study of creep-resistant steels, thermal cycles and heat affected zone. In the experimental part is described the measurement of thermal cycles. The work includes an analysis of the microstructure and macrostructure of the steel. At the end is stated to evaluate the results.

Keywords: steel 16Mo3, heat-affected zone, thermal cycle, creep-resistant steel, microstructure

Obsah

Úvod	9
1. Studie žárovevných ocelí.....	10
1.1 Tečení neboli creep	10
1.2 Žárovevnost.....	11
1.2.1 Rozdělení žárovevných ocelí	12
1.3 Technologie svařování nízkolegovaných žárovevných ocelí	17
1.3.1 Volba přídavného materiálu.....	19
2. Studie teplotních cyklů svařování	20
3. Tepelně ovlivněná oblast	22
4. Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji	25
4.1 Výpočet teplot A_{c1} , A_{c3} a T_p	30
4.2 Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji	31
4.3 Metalografie	35
4.3.1 Vzorek T1-3VKD-246-1	36
4.3.2 Vzorek T3-3VKD-246-1	37
4.3.3 Vzorek T1-3VKD-246-2	39
5. Parametry pro modelování pásem tepelně ovlivněné oblasti	42
6. Závěr	43
Seznam použitých zdrojů a literatury.....	44
Seznam obrázků a tabulek	46

Úvod

Při provozu zařízení za zvýšených provozních teplot, tj. při teplotách cca 400 až 650 °C, již nestačí pro definici odolnosti materiálu vůči vnějším vlivům pouze krátkodobé pevnostní charakteristiky. Kromě meze kluzu a meze pevnosti je nutné počítat také s procesem tečení, jakož dominantního mechanismu porušujícího integritu dané součásti [1].

Součástí výroby energetických zařízení je technologický proces svařování. Kritické místo z hlediska životnosti celého zařízení představují svarové spoje. Proto je velmi důležité předpovědět chování svarových spojů při dlouhodobých creepových expozicích [6,13].

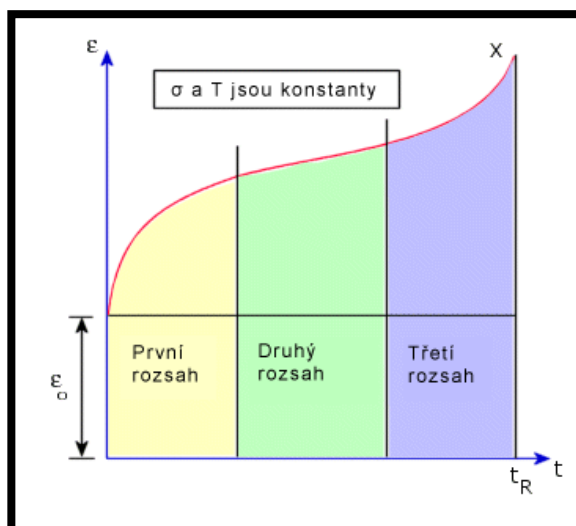
Tato bakalářská práce se zabývá měřením teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji. V první teoretické části je vypracována studie žárovevných ocelí a jejich svařování. Následuje studie teplotních cyklů a tepelně ovlivněné oblasti. V druhé praktické (experimentální) části je zpracován samotný experiment, tedy měření teplotních cyklů. K měření bude použita navrhnutá deska z nízkolegované žárovevné oceli 16Mo3. Tato ocelová deska bude svařována bez přehřevu a bude použita metoda obloukového svařování netavicí se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu. Nakonec budou vybrány části ocelové desky, u kterých se připraví makrostruktura, mikrostruktura a určí se tepelně ovlivněná oblast.

1. Studie žárovevných ocelí

Širokou řadu kovových materiálů představují žárovevné oceli. Jedná se o oceli určené pro práci za zvýšených a vysokých teplot. Tyto materiály se používají v tzv.oblasti creepového namáhání.

1.1 Tečení neboli creep

Tečení je definováno jako pomalá plastická deformace materiálu vyvolaná dlouhodobým působením napětí za zvýšených teplot. Na základě tečení definujeme vlastnost oceli žárovevnost. Za podmínek konstantního napětí a konstantní teploty dochází k trvalému přírůstku deformace s časem. Rozlišují se tři stádia časového průběhu creepu, které jsou patrné z křivky tečení v jednoduchém diagramu deformace – čas(viz.obr.1) [5,6,7].



Obr.1 Křivka tečení [5]

V počátečním, tzv.primárním stadiu, dochází k prvotnímu nárůstu deformace po aplikaci zatížení. Z technologického hlediska je toto stádium málo významné. Následuje stadium tzv.ustáleného tečení. Dochází zde po relativně dlouhou dobu k lineárnímu přírůstku deformace s časem. Proces tečení pokračuje terciálním stadiem tečení s vysokým poškozováním vnitřní struktury kovu, což vede k prudkému nárůstu deformace a následně k lomu. Nejdůležitějším stadiem je z technologického hlediska druhé stadium creepu, po které je uvažováno využívání služby zařízení. Proces creepu je velmi závislý především na teplotě a

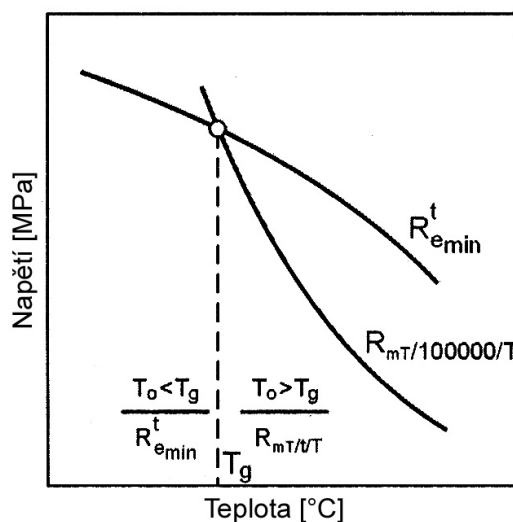
na vnějším napětí. Creepový proces významně urychlují zvýšení teploty, ovšem také zvýšení zatížení [6,7].

1.2 Žáropevnost

Žáropevnost je schopnost materiálu odolávat plastické deformaci za konstantního napětí a konstantní teploty [6].

Žáropevné oceli jsou používány na konstrukci zařízení pro energetický nebo chemický průmysl, u nichž je hlavní spojovací technologií svařování. U těchto svařovaných konstrukcí není vždy možné provést tepelné zpracování po svařování, a proto je vhodné, aby měly žáropevné oceli zaručenou svařitelnost. Vlastnosti svarových spojů tak mají vliv na vlastnosti celého zařízení [1,6].

Pro práci za zvýšené teploty jsou základními žáropevnými materiály slitiny kovů, hlavně oceli a pro práci za vysoké teploty to jsou slitiny niklu a kobaltu. Všechny oceli a slitiny, které jsou používány pro práci za teploty vyšší než T_g jsou nazývány žáropevnými. Mezní teplotu T_g vyznačuje pro daný materiál průsečík dvou charakteristik pevnostních vlastností za zvýšené teploty. Jedná se o minimální hodnotu meze kluzu R_e a mez pevnosti při tečení $R_{mT}/T/t$ (viz.obr.2) [3].



Obr.2 Určení mezní teploty T_g [3]

Žáropevné oceli pracují v podmínkách tečení (creepového namáhání), zatímco v materiálech pracujících pod mezní teplotou T_g procesy tečení neprobíhají. Jejich pracovní teplota bývá většinou nižší než 400 °C [3].

Žáropevné oceli se využívají hlavně pro konstrukce energetických strojů a zařízení, tj. kotlů, parních a plynových turbín, parovodních potrubí, armatur a dalších součástí tepelných strojů. Hlavním požadavkem kladeným na žáropevné oceli je zachování určitých mechanických vlastností při zvýšené teplotě. Požadované vlastnosti na žáropevné oceli jsou např.:

- vysoká dlouhodobá pevnost při tečení
- vysoká mez kluzu a pevnost v tahu
- dobrá svařitelnost a tvařitelnost
- vysoká odolnost proti tepelné a tepelně-mechanické únavě
- stabilita struktury a vlastností [3]

1.2.1 Rozdělení žáropevných ocelí

Žáropevné oceli lze rámcově rozdělit z hlediska úrovně legování a teplotního použití do následujících skupin (viz. tab. 1) [1].

Tab. 1 Rozdělení žáropevných ocelí [1]

Typ oceli	Použitelná teplota do °C
Uhlíkové kotlové oceli tř. 11 a 12 (do 0,2 hm.% C)	450 (480)
Nízkolegované oceli tř. 15 (Mo, Cr-Mo-Cr-MoV)	560 (580)
Feritické chromové oceli tř. 17 (legované Cr, Mo; V; W, Nb; N)	600 (620)
Austenitické CrNi oceli typu 18/8 vytvrditelné (Nb; Zr; N)	650
	750

Uhlíkové kotlové oceli tř. 11 a 12

Jemnozrnné oceli s nízkým obsahem uhlíku. Využívají se pro nízkoteplotní okruhy parních kotlů do teplot 450 °C. Do této skupiny spadají oceli 11 483, a také 12 021, 12 022 a 12 025 pro kotlové trubky. V tab. 2 jsou uvedeny chemické složení vybraných uhlíkových ocelí [1,6].

Tab.2 Chemické složení uhlíkových ocelí [6]

ČSN	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	V	P	S
12021	0,07	0,35	0,17	max.	max.	max.		max.	max.
	0,15	0,60	0,35	0,25	0,25	0,25		0,040	0,040
12022	0,15	0,50	0,17	max.	max.	max.		max.	max.
	0,22	0,80	0,37	0,25	0,25	0,25		0,040	0,040
12025	0,14	0,60	0,17	max.	max.	max.	0,05		
	0,20	1,00	0,37	0,25	0,25	0,25	0,09		

Nízkolegované oceli tř. 15

Velmi rozšířená skupina žárovevých ocelí používaných hlavně na bázi CrMo a CrMoV. Nejrozšířenější je ocel 15 313 na bázi 2,25 Cr – 1 Mo. Dále ocel legovaná vanadem typ 15 128 na bázi 0,5 Cr – 0,5 Mo – 0,3 V. Tyto oceli se používají na trubkové varné systémy, přehříváky a parovody. Další ocelí je typ 15 236 na bázi 1,5 Cr – 0,5 Mo – 0,6 V, který se využívá na lopatky turbín a svorníky. Podobná ocel je typu 15 320 na bázi 1,5 Cr – 0,7 Mo – 0,25 V, využívaná na rotory a skříně turbín [1].

Do této skupiny se při vyšším legování chromem uvádí také vodíkovzdorné a žárovevné nízkolegované oceli. Jedná se o oceli 15 313, 15 421 (3Cr – 0,5 Mo) a 15 423 (3 Cr – 0,5 Mo – 0,5 V) [1].

Nízkolegovaná ocel 16Mo3

Tato bakalářská práce je zaměřena na ocel 16Mo3 (EN 10216-2). Jedná se o nízkolegovanou žárovevnou ocel 15 020 dle ČSN 41 5020. V tab.3 je zaznamenáno chemické složení této oceli [1,6,12].

Tab.3 Chemické složení oceli 16Mo3 [6]

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	N
Chemické složení (%)	0,12-0,20	0,40-0,90	max. 0,35	max. 0,025	max. 0,01	max. 0,30	0,25-0,35	max. 0,30	max. 0,30	max. 0,012

Tato žárovečná ocel je dobře tvárná za tepla i za studena, a také dobře obrobitelná. Dále je odolná proti korozi v prostředí vodní páry do 530 °C. Využívá se tedy na energetická a chemická zařízení při teplotě použití do 530 °C. Mez pevnosti se pohybuje mezi hodnotami 440 až 590 Mpa a mez kluzu je 220 až 275 Mpa [1]. V tab.4 jsou zaznamenány chemické složení vybraných nízkolegovaných ocelí, spolu s ocelí 16Mo3.

Tab.4 Přehled nízkolegovaných ocelí [6]

Označení			Chemické složení (%)								Pracovní teplota (°C)
ČSN	EN 10216-2	Jiné	C	Mn	Si	Cr	Mo	V	P	S	
15020	16Mo3 (15Mo3) 1.5415		0,12 0,20	0,40 0,90	max. 0,35	max. 0,30	0,25 0,35		max. 0,025	max. 0,010	530
15121	13CrMo4-5 1.7335	T12	0,10 0,18	0,40 0,70	0,15 0,35	0,70 1,30	0,40 0,60		max. 0,040	max. 0,040	560
15128	14MoV6-3 1.7715		0,10 0,18	0,45 0,70	0,15 0,40	0,50 0,75	0,40 0,60	0,22 0,35	max. 0,040	max. 0,040	580
15229			0,13 0,18	0,40 0,80	0,20 0,40	0,40 0,80	0,40 0,60	0,55 0,75	max. 0,030	max. 0,030	580
15236			0,17 0,27	0,30 0,60	0,15 0,40	0,20 0,50	0,25 0,50	0,45 0,65	max. 0,035	max. 0,035	550
15313	10CrMo9-10 1.7380	T22	0,08 0,15	0,40 0,80	0,15 0,40	2,0 2,5	0,9 1,1		max. 0,035	max. 0,040	580
15320			0,20 0,28	0,50 0,80	0,17 0,37	1,10 1,40	0,55 0,75	0,15 0,30	max. 0,035	max. 0,035	560

Feritické chromové oceli

Žárovečné feritické oceli mají zvýšený obsah chromu. Zvýšeným obsahem Cr u feritických ocelí se docílí vyšší žárovečnosti, ale také zvýšené opaluvzdornosti při pracovních teplotách až do 650 °C. Většina výše uvedených ocelí se hlavně používají při výrobě tlakových systémů kotlů (přehříváky a parovody), dále při výrobě rotorů parních a plynových turbín a turbínových lopatek. Začínají od obsahu 5 hm.% Cr, jedná se o typ oceli 17 102 dle ČSN 41 7102. Oceli o vyšší žárovečnosti obsahují 9 až 12 hm.% Cr legované dále malými obsahy Mo (do 1hm.%) a V (do 0,5 hm.%). Typickou feritickou žárovečnou ocelí je široce využívaná ocel 17 134 na bázi 12 Cr – 1 Mo – 0,5 V. Dále zde patří také vodíkovzdorné oceli na bázi 9 Cr - 1 Mo a 9 Cr – 1 Mo – 0,5 V, jedná se o ocel 17 116, resp. 17 117. V dnešní

době se hojně využívá modifikovaná ocel známá pod označením P91 na bázi 9 Cr – Mo – V – Nb – N (17 119). U této oceli se využívá vytvrzení tuhého roztoku hlavně atomy Mo a také vyloučení precipitátů na bázi karbonitridů vanadu a niobu. Dalším vývojem oceli P91 vznikly moderní chromové žárovevné oceli P92 a E911. U těchto ocelí došlo k optimalizaci chemického složení, a to hlavně přidáváním wolframu do oceli. Přehled chromových žárovevných ocelí je přehledně zaznamenaný v tab.5 [1,6].

Tab.5 Chemické složení chromových žárovevných ocelí [6]

Označení oceli EN 10216-2 ČSN ASME Code	Chemické složení (%)										
	C	Si	Al	Cu	Cr	Ni	Mo	W	Nb	B	N
X20CrMoV11-1 1.4922 17134	0,20	0,3	0,03		12	0,7	0,8		0,03	0,002	0,05
X10CrMoVNb9-1 1.4903 17119 T91/P91 NF 616	0,10	0,3	≤0,04		9,0	0,25	1,0		0,07		0,05
X10CrWMoVNb9-2 T92/P92	0,10	0,10	≤0,01		9,0	≤0,1	0,5	1,8	0,065	0,002	0,04
X11CrMoWVNb9-1-1 1.4905 E911 HCM 12	0,11	0,2	≤0,025		9,0	0,25	1	1	0,07	0,03	0,06
HCM 12A P122/T122	0,10	0,25	≤0,02		12,0	≤0,2	1	1	0,05		0,03
HCM 12A P122/T122	0,12	0,20	≤0,025	0,9	11,0	0,3	0,4	1,9	0,05	0,003	0,06

Austenitické žárovevné oceli

Jedná se o skupinu ocelí s nejvyšší odolností proti tečení za vysokých teplot. Dochází zde k snadné tvorbě tzv.vrstevných chyb, které znemožňují skluzový pohyb dislokací a k jejich dalšímu pohybu je nutné výrazného zvýšení napětí. Díky tomu je žárovevnost těchto austenitických ocelí velmi vysoká [1,6].

Mezi austenitické žárovevné oceli patří např. ocel 17 246 (18Cr-10Ni-2Mo) s teplotou použití do 620 °C a ocel 17 341 (18Cr-12Ni-2Mo) s teplotou použití až 650-700 °C. Následují špičkové typy s možností dalšího legování, např. V,W,B,Al. Příkladem je ocel 17 335 na bázi 12Cr-15Ni-35W-3Ti. Další moderní austenitické oceli jsou HR3C a Alloy617 s vysokými obsahy chromu a niklu [9,10,11].

Souhrnně vzato, se jedná o oceli s vysokou žárovevností, avšak s obtížnou technologickou zpracovatelností, a také jsou nesrovnatelně dražší kvůli vysokým obsahům Cr a Ni. Použití ocelí je pro teploty přesahující 750 °C prakticky nemožné, a to z důvodu nedostatečné žárovevnosti i žáruvzdornosti. Vybrané austenitické oceli a jejich chemické složení je zaznamenáno v tab.6 [1,6].

Tab.6 Chemické složení vybraných austenitických ocelí [6,10]

Označení oceli	Chemické složení (%)						
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Co
17246	0,25	2,0	1,0	17,9	10,2		
17341	0,06	max. 2,0	max. 1,0	16,5- 18,5	10,0- 13,0	2,0-2,5	
HR3C	max. 0,1	max. 2,0	max. 1,5	23,0- 27,0	17,0- 23,0		
Alloy617	0,05- 0,15	max. 1,0	max. 1,0	20,0- 24,0	min. 44,5	8,0- 10,0	10,0- 15,0

1.3 Technologie svařování nízkolegovaných žárovevných ocelí

Degradace žárovevných a mechanických vlastností v každém svarovém spoji je způsobena rozdíly v chemickém složení základního materiálu a svarového kovu, licí strukturou a mikrodefekty svarového kovu, a teplotními cykly při svařování. Ve svarovém spoji a zvláště pak v TOO dochází ke změnám mechanických a žárovevných vlastností, které jsou příčinou změn mikrostruktury. Základním požadavkem při použití technologie svařování je snaha tyto nepříznivé jevy minimalizovat [3]. Hlavní technologická opatření při svařování nízkolegovaných ocelí jsou předehřev, interpass teplota, mezioperační teplota a teplota dohřevu.

Předehřev

Předehřev se musí u svařování žárovevných ocelí používat kvůli vyšší náchylnosti ke vzniku prasklin, pro snížení tvrdosti svaru a také pro uvolnění vodíku ze svaru [4].

Interpass teplota

Interpass teplota nebo také mezihouseňková teplota je teplota svarového kovu bezprostředně před započatím svařování následující vrstvy u vícevrstvého svařování [4].

Mezioperační teplota

Jedná se o teplotu udržovanou mezi procesem svařování a procesem žíhání. Při svařování spojů, u kterých je vyžadováno žíhání se nedoporučuje pokles teploty svaru na teplotu okolí. Mezioperační teplota se volí v rozmezí 150 – 250 °C. Při nedodržení této operace může dojít ke vzniku trhlin anebo lomů [4].

Teplota dohřevu

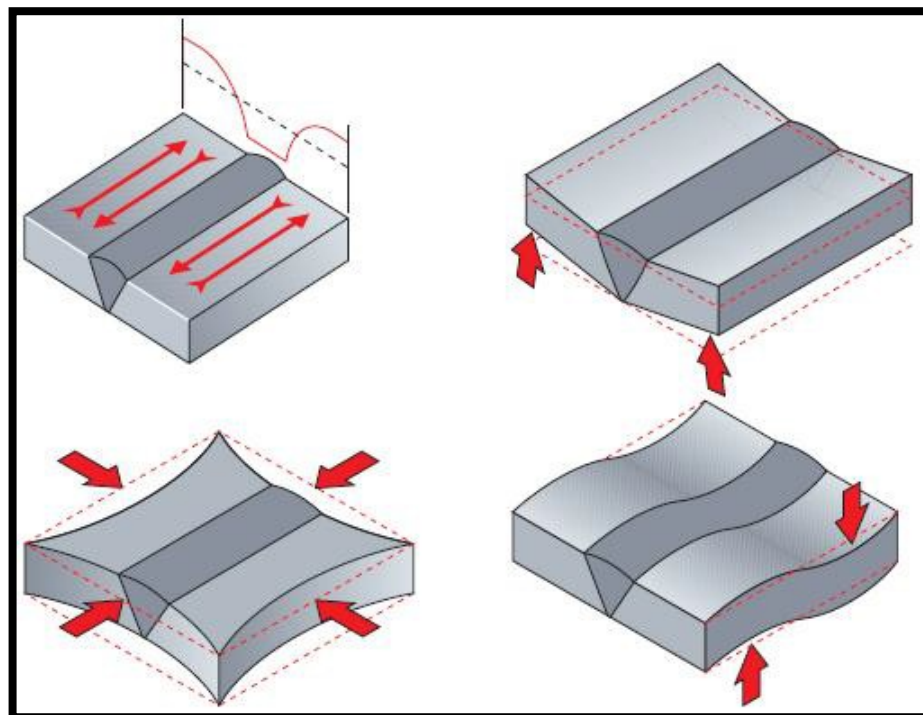
Jedná se o minimální teplotu v oblasti svaru, kterou je nutné udržovat, pokud dojde k přerušování svařování [4].

V následující tabulce jsou zaznamenány teploty předehřevu a teploty interpass pro nízkolegované oceli. Pro ocel s obsahem 0,3 Mo, což odpovídá oceli 16Mo3, je minimální teplota předehřevu 20 °C, maximální 100 °C a hodnota maximální teploty interpass je 250 °C. V tabulce jsou dále také teploty předehřevu a interpass pro další nízkolegované oceli(viz.tab.7).

Tab.7 Minimální teplota předehřevu a interpass [16]

Typ oceli	Tloušťka (mm)	Minimální teplota předehřevu a interpass(°C)			Maximální teplota interpass
		Stupeň obsahu vodíku			
		D max. 5 (ml/100g)	C 5 až 10 (ml/100g)	A min. 15 (ml/100g)	
0,3Mo	≤ 15	20	20	100	250
	> 15 ≤ 30	75	75	100	
	> 30	75	100	nepoužitelné	
1Cr 0,5Mo	≤ 15	20	100	150	300
1,25Cr 0,5Mo	> 15	100	150	nepoužitelné	

Abychom zabránili vzniku možných deformací, které by se mohly projevit během a po svařování, je vhodné dodržet všechny zmíněné operace. Obecně tedy můžeme považovat teplotu předehřevu, teplotu interpass, mezioperační teplotu a teplotu dohřevu za vhodné nástroje k odstranění zbytkového napětí ze svarového spoje. Avšak hlavní operací je žíhání na snížení vnitřního pnutí [4]. Na obr.3 jsou vyobrazeny příklady možných deformací.



Obr.3 Zbytkové napětí ve svaru a možnosti deformace [4]

1.3.1 Volba přídavného materiálu

Volba vhodného přídavného materiálu je definována vždy s ohledem na požadované užité vlastnosti svarového spoje, chemické složení a provozní podmínky. Mezi požadované vlastnosti svarového spoje můžeme zařadit například pevnost, vrubovou houževnatost, korozivzdornost a žárovevnost [4].

Chemické složení přídavného materiálu a mechanické vlastnosti svarového kovu se musí co nejvíce přibližovat základnímu materiálu. Svarový kov nízkolegovaných žárovevných ocelí, které se používají za vysokých teplot v oblasti creepu, musí mít stejně dobrou creepovou pevnost jako základní materiál. Vhodným legováním přídavného materiálu se dají zlepšit vlastnosti svarového spoje. Je vhodné používat kombinaci chromu a molybdenu jako legujících prvků přídavného materiálu. Chrom v přídavném materiálu zvyšuje pevnost svaru a molybden zvyšuje pevnost a rázovou houževnatost svaru [4].

2. Studie teplotních cyklů svařování

Teplotní cyklus lze charakterizovat jako grafickou závislost teploty na čase v libovolném místě (bodu) svarového spoje. Lze tedy říci, že se jedná o vývin teplot v průběhu svařování pro zvolené místo ve svarovém spoji. Teplotní cykly lze využít pro výzkum a vývoj mechanických vlastností materiálu a také pro detailní studium mikrostruktury. V důsledku působení teplotního cyklu na materiál se mění jeho struktura a vlastnosti. Velikost a charakter změn je možné hodnotit na základě následujících charakteristik teplotního cyklu [1].

Oblast ohřevu

Oblastí ohřevu se rozumí nárůst teploty z počáteční teploty až na maximální teplotu teplotního cyklu. Důležitým faktorem je rychlost ohřevu. Čím vyšší je rychlost ohřevu, tím se posouvají teploty transformačních přeměn (A_{c1}, A_{c3}, \dots) k vyšším hodnotám. Rychlost ohřevu je dána fyzikálními vlastnostmi svařovaného materiálu, použitou technologií svařování a intenzitou použitého zdroje [5].

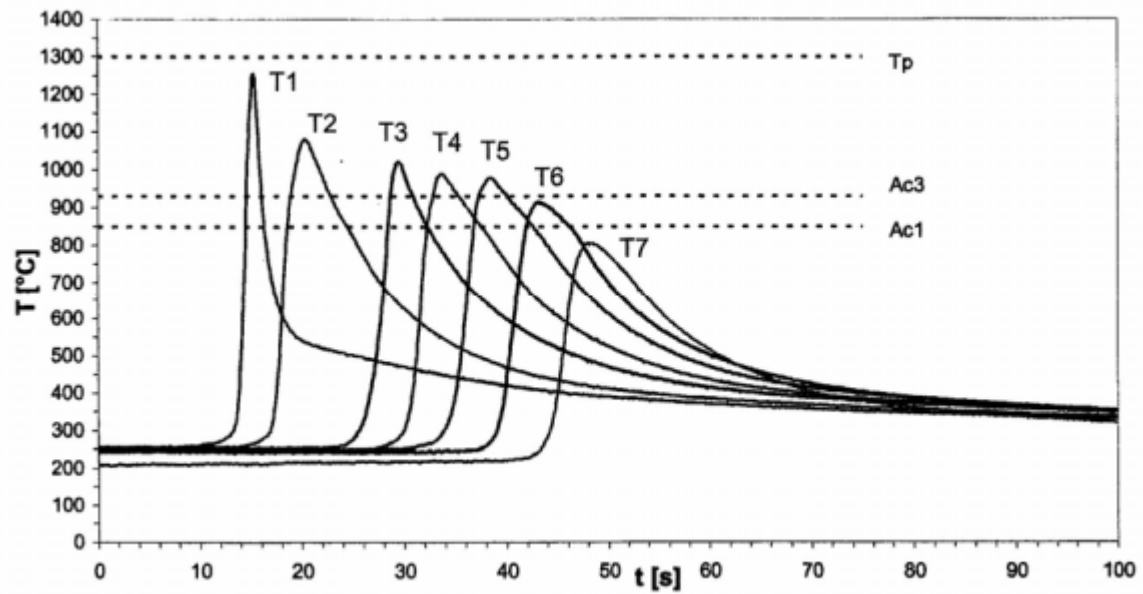
Maximální teplota cyklu T_{max} a doba setrvání nad určitou vysokou teplotou

Čím je vyšší doba setrvání, tím lze očekávat větší zrna. Doba setrvání tedy udává míru zhrubnutí zrna [5].

Rychlost ochlazování

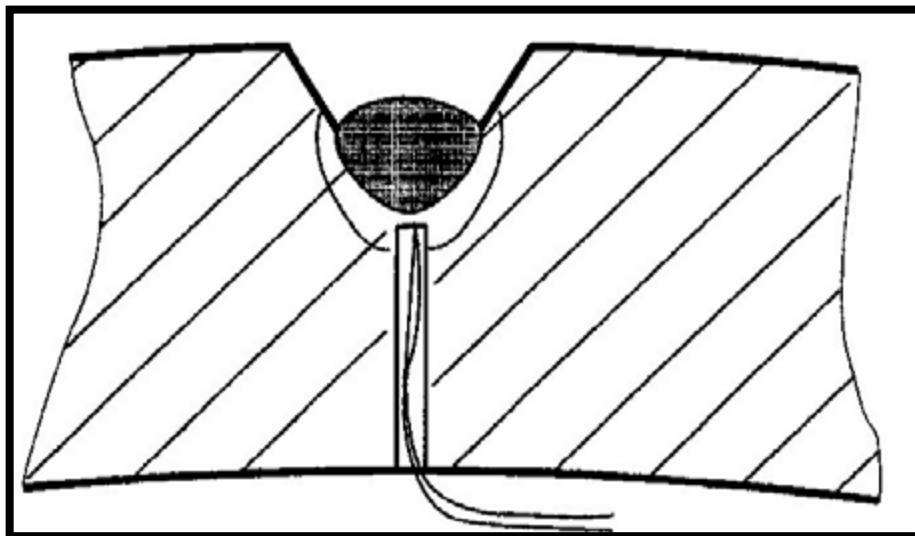
Čím vyšší je rychlost ochlazování, tím vyšší je pravděpodobnost získání nerovnovážné zakalené struktury. Pro odhad mikrostruktury se používají ARA diagramy „in situ“, které jsou konstruované pro podmínky svařování. U těchto diagramů, se oproti klasickému ARA diagramu, vynáší na vodorovné ose místo času parameter ochlazování $\Delta t_{8/5}$. Parameter ochlazování $\Delta t_{8/5}(\Delta t_{800^{\circ}\text{C}\rightarrow 500^{\circ}\text{C}})$ je doba ochlazování, za kterou se dané místo svarového spoje ochladí z 800 °C na 500 °C [1,5].

Zdroj tepla je při svařování příčinou vzniku teplotních cyklů. Teplotní cyklus znázorňuje závislost teploty na čase v daném místě svarového spoje. Na obr.4 je zaznamenán typický průběh teplotních cyklů v tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje [5].



Obr.4 Typický průběh teplotních cyklů [5]

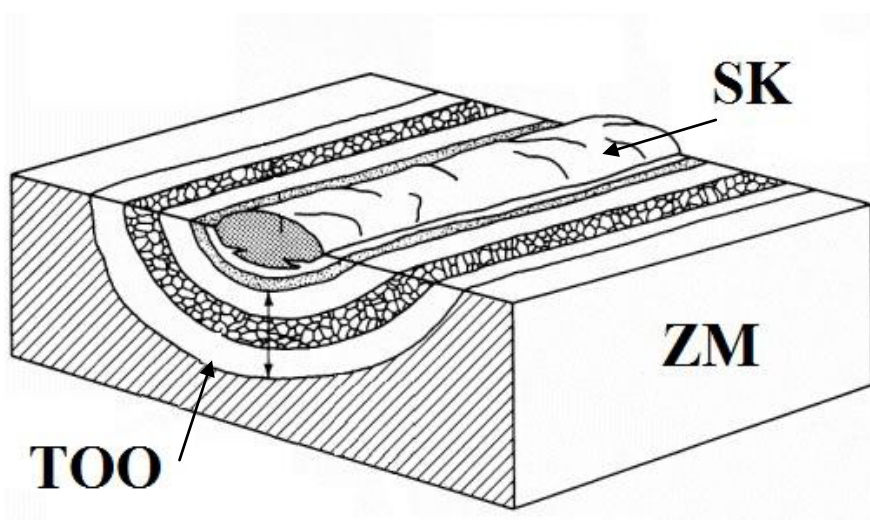
Na dalším obrázku je zaznamenaný řez materiálem a lze na něm přehledně vidět válcová díra s plochým dnem, do které je termočlánek přivařený (viz. obr. 5). Pro vyhodnocení teplotních cyklů se využívají výpočtové softwary, které jsou s termočlánsky propojeny pomocí konektorů.



Obr.5 Řez materiálem při měření teplotních cyklů [5]

3. Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněnou oblastí nazýváme oblast základního materiálu, ve kterém byly vlastnosti a mikrostruktura silně ovlivněny procesem a technikou svařování. Změny materiálu v oblasti přiléhající ke svaru způsobuje teplo vnesené do materiálu při jeho tavení a následném ochlazování. Velikost tepelně ovlivněné oblasti závisí na tepelné vodivosti základního materiálu. Pokud je tepelná vodivost vysoká, tak je vysoká i ochlazovací rychlost materiálu a tepelně ovlivněná oblast je malá. Na obr.6 je přehledně vyobrazena struktura svarového spoje (Tepelně Ovlivněná Oblast, Svarový Kov, Základní Materiál) [2,4].



Obr.6 Struktura svarového spoje [4]

Tepelně ovlivněná oblast obsahuje oblasti, které jsou typické specifickými změnami v jejich mikrostruktuře. Jedná se o oblast částečného natavení, oblast přehřátí, oblast normalizace, interkritickou oblast a oblast vyžíhanou. Všechny uvedené oblasti jsou znázorněny na obr. 7 [2,4].

Oblast částečné překrystalizace

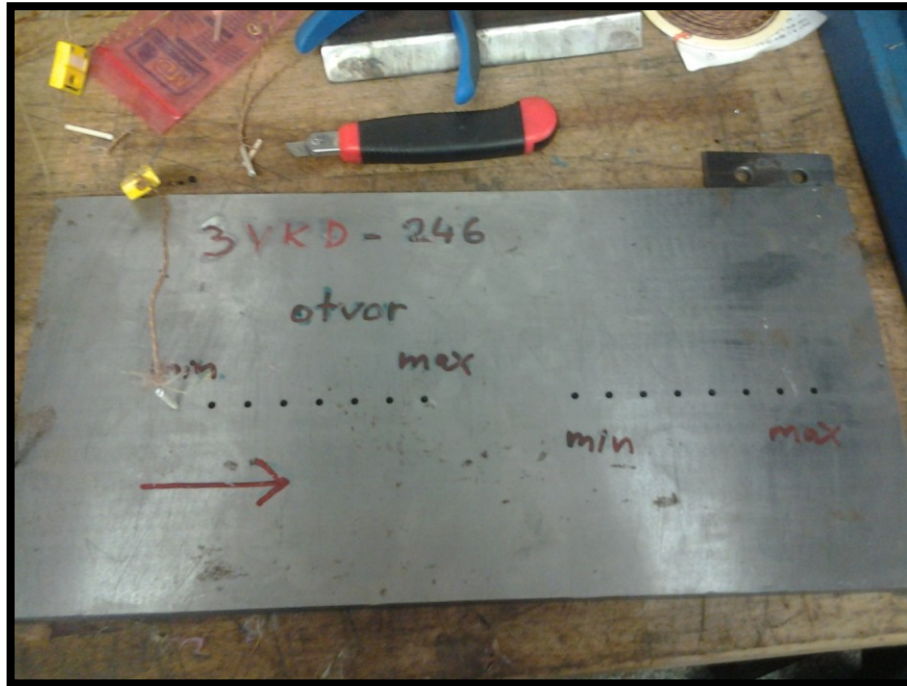
Oblast se nachází mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} , kde během ohřevu dochází k částečné transformaci feritu na austenit. Netransformovaný bainit je během svařování vyžíhán. Struktura vzniklá po ochlazení vykazuje přítomnost nově vzniklého bainitu a vyžíhané nebo rekrytalizované původní mikrostruktury. [2,4].

Oblast vyžíhaná

V mikrostruktuře při teplotách blízko pod A_{c1} sice nedochází k fázové transformaci, ale dochází k lokálnímu přehřátí oproti chladnějšimu základnímu materiálu. [4].

4. Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji

Experimentální část bakalářské práce se zaměřuje na měření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji. Před samotným měřením teplotních cyklů bylo nutné připravit desku z oceli 16Mo3, která byla použita pro experiment (viz. obr. 8). V příloze B je uveden výkres použité desky.



Obr.8 Ocelová deska 16Mo3

Jako první jsem si připravil 14 termočlánků typu K. Na jednom konci jsem odstranil hlavní izolaci a odizoloval jsem 2 vnitřní drátky. Každý z nich, tedy plusový a minusový pól, jsem zapojil do konektoru tzv. samice. Na obr.9 jsou zobrazeny oba konektory.



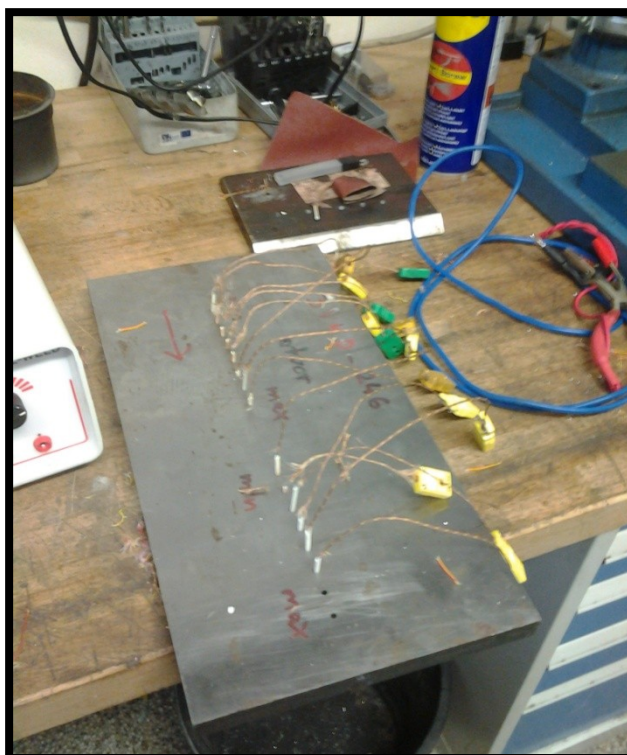
Obr.9 Konektory termočlánku

U druhého konce termočlánku jsem následně také odstranil část hlavní izolace a opět jsem odizoloval oba vnitřní drátky. Oba drátky jsem provléknul keramickou kapilárou a konce jsem k sobě svařil pomocí kondenzátorové odporové svářečky(viz.obr.10).



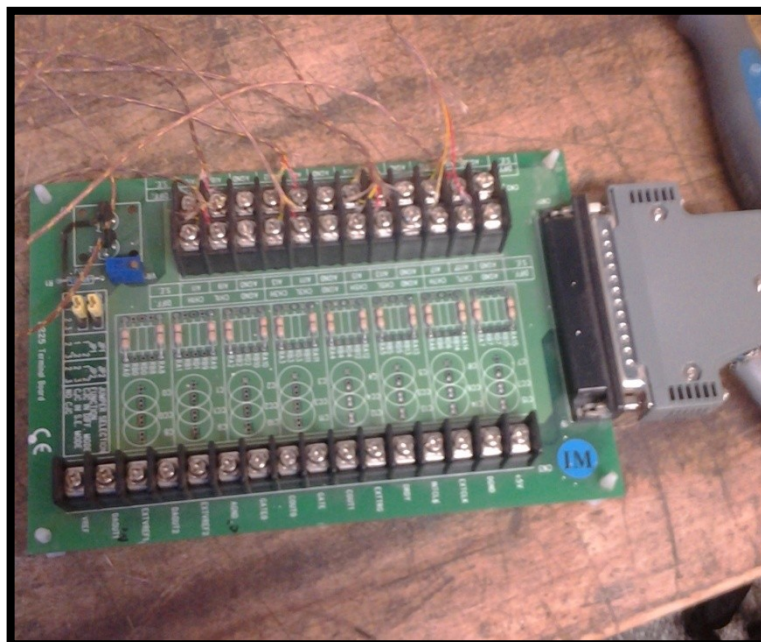
Obr.10 Kondenzátorová odporová svářečka

Na konci termočlánku tím vznikla tzv.kulička a termočlánek byl připraven k přivaření. Stejným postupem jsem připravil všechny ostatní termočlánky a mohl jsem přejít k přivaření.



Obr.11 Přivařené termočlánky

Použil jsem opět stejnou svářečku a všechny připravené termočlánky jsem přivařil ke dnu plochých děr v desce(viz.obr.11). Dále jsem připravil druhou část vedení stejným způsobem, avšak s tím rozdílem, že na jednu stranu termočlánku jsem připevnil druhou část konektoru tzv.samce a na druhé straně termočlánku jsem odizolované drátky připevnil k měřicí sběrnici(viz.obr.12).



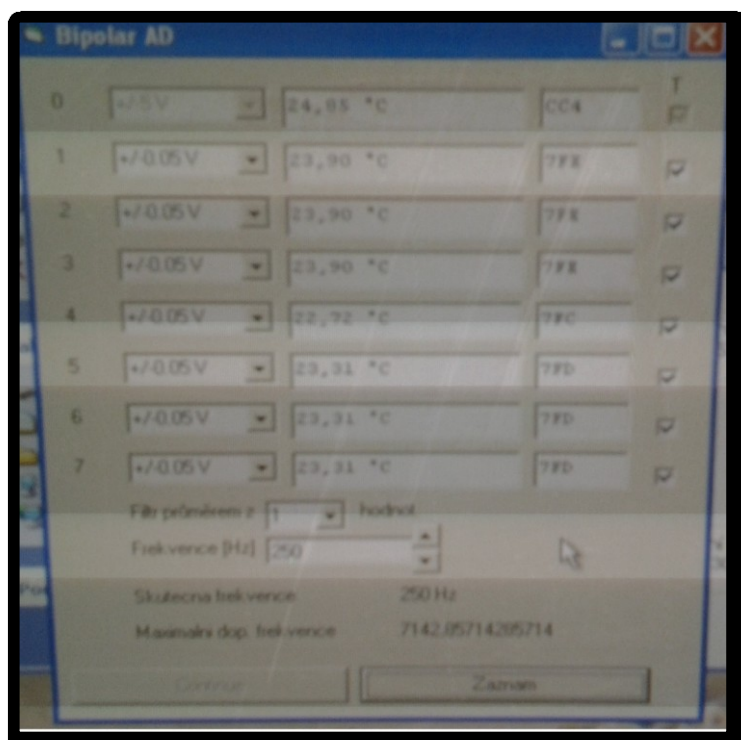
Obr.12 Datová sběrnice

Sběrnici jsem propojil datovým kabelem se stolním počítačem a pomocí softwaru Bipolar AD jsem vyzkoušel funkčnost správného měření termočlánků(viz.obr.13).



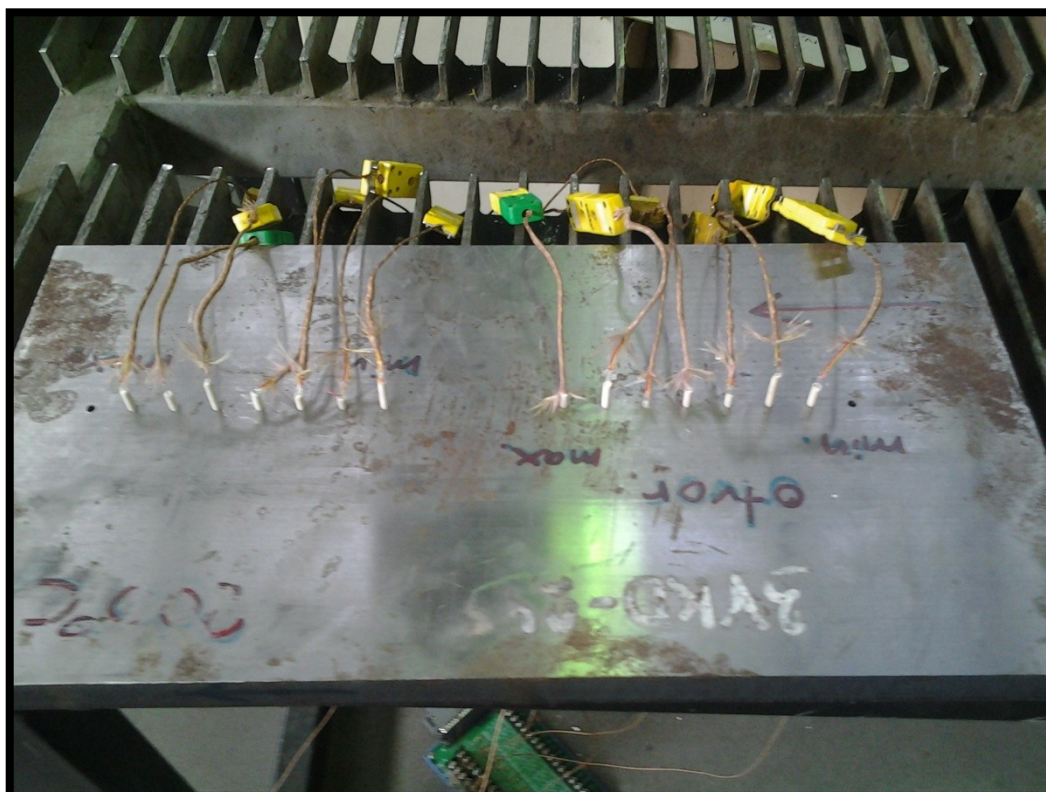
Obr.13 Připojení k PC

V programu Bipolar AD jsem poté zkontroloval, zda jsou hodnoty teplot u všech termočlánků přibližně stejné. Následně jsem navíc vyzkoušel funkčnost také za lehce zvýšené teploty. Použil jsem horkovzdušnou pistoli a plynule jsem ohříval všechny termočlánky. Zároveň jsem kontroloval, zda hodnoty teplot vzrůstají. Pokud by teploty nerostly, bylo by to nejpravděpodobněji zapříčiněno špatným přivařením termočlánku ke dnu díry. Pokud by došlo naopak k poklesu teploty, znamenalo by to nechtěné zaměnění plusových a minusových drátků v určitém konektoru. Na obr.14 je vyfocen software Bipolar AD, použitý pro měření teploty pomocí termočlánků.



Obr.14 Software Bipolar AD pro měření teploty

Použitý software dokáže měřit najednou maximálně 7 termočlánků. Na výzkumné desce tedy proběhly dvě měření a jelikož je na obou polovinách desky 8 děr, tak bylo potřeba na každé straně jeden termočlánek vynechat. Na obr.15 je tedy zřetelně vidět, že byl po domluvě vynechán první termočlánek v první části a poslední termočlánek v druhé části.



Obr.15 Zapojení 14 termočlánků

Takto připravená deska byla následně na svařovacím stole otočena a svařena metodou TIG pomocí svářečky Fronius MagicWave 3000(viz.obr.16). Přídavným materiálem byl drát OK Tigrod 13.09 o průměru 2,4 mm, legovaný 0,5% Mo pro svařování žárovevných ocelí, konkrétně oceli 16Mo3. Typické chemické složení drátu udává tab.8.

Tab.8 Chemické složení použitého drátu [8]

OK Tigrod 13.09			
C	Si	Mn	Mo
0,10	0,70	1,10	0,50



Obr.16 Fronius MagicWave 3000

4.1 Výpočet teplot A_{c1} , A_{c3} a T_p

Pro výpočet překrystalizačních teplot A_{c1} a A_{c3} je nutné znát chemické složení prvků daného materiálu. V příloze A jsou v atestu oceli 16Mo3 zaznamenány veškeré hodnoty chemických složení prvků. Výpočet překrystalizačních teplot jsem provedl podle H.P. Hougardy [15].

$$A_{c1} = 739 - 22 \cdot C + 2 \cdot Si - 7 \cdot Mn + 14 \cdot Cr + 13 \cdot Mo - 13 \cdot Ni$$

$$A_{c1} = 739 - 22 \cdot 0,18 + 2 \cdot 0,24 - 7 \cdot 0,75 + 14 \cdot 0,06 + 13 \cdot 0,28 - 13 \cdot 0,06$$

$$A_{c1} = 733,97^\circ\text{C} \doteq 734^\circ\text{C}$$

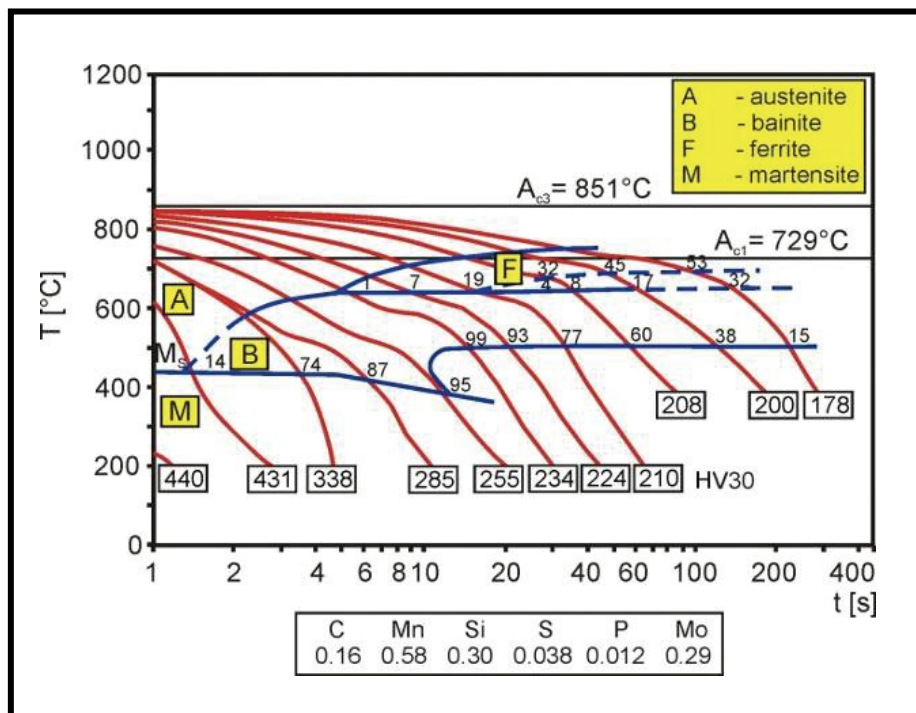
$$A_{c3} = 902 - 255 \cdot C + 19 \cdot Si - 11 \cdot Mn - 5 \cdot Cr + 13 \cdot Mo - 20 \cdot Ni + 55 \cdot V$$

$$A_{c3} = 902 - 255 \cdot 0,18 + 19 \cdot 0,24 - 11 \cdot 0,75 - 5 \cdot 0,06 + 13 \cdot 0,28 - 20 \cdot 0,06 + 55 \cdot 0$$

$$A_{c3} = 854,55 \doteq 855^\circ\text{C}$$

Teplota přehřátí nízkolegovaných ocelí je udávána přibližně na 1200°C [2].

Na obr.17 je uveden ARA diagram oceli 16Mo3, ve kterém jsou uvedeny překrystalizační teploty. Hodnoty těchto teplot se oproti vypočteným podle H.P. Hougardy liší pouze o 4°C až 5°C . V dalším postupu experimentu využijí hodnoty z ARA diagramu.



Obr.17 ARA diagram oceli 16Mo3[17]

4.2 Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji

Měření teplotních cyklů na desce s označením 3VKD-246 bylo prováděno bez předehřevu. Na této desce byly provedeny dvě samostatné měření, každé pro jednu svarovou housenku.

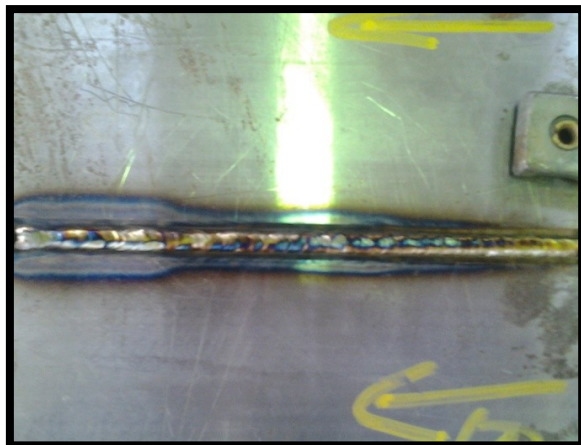
Měření č.1

Veškeré parametry z prvního měření, tedy z měření první části desky 3VKD-246, jsou zaznamenány v tab.9.

Tab.9 Svařovací parametry 1.měření

Měření č.1							
Metoda svařování	Délka svaru [mm]	Čas svařování [s]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost svařování [mm.s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ.mm ⁻¹]	Typ proudu / polarita
141	200	203	155	14-15	0,99	1,36	DC/-

Na následujících obrázcích jsou zaznamenány svary. Na obr.18 je svar vyfocen ihned po svařování a na následujícím obr.19 lze vidět svar po kartáčování.



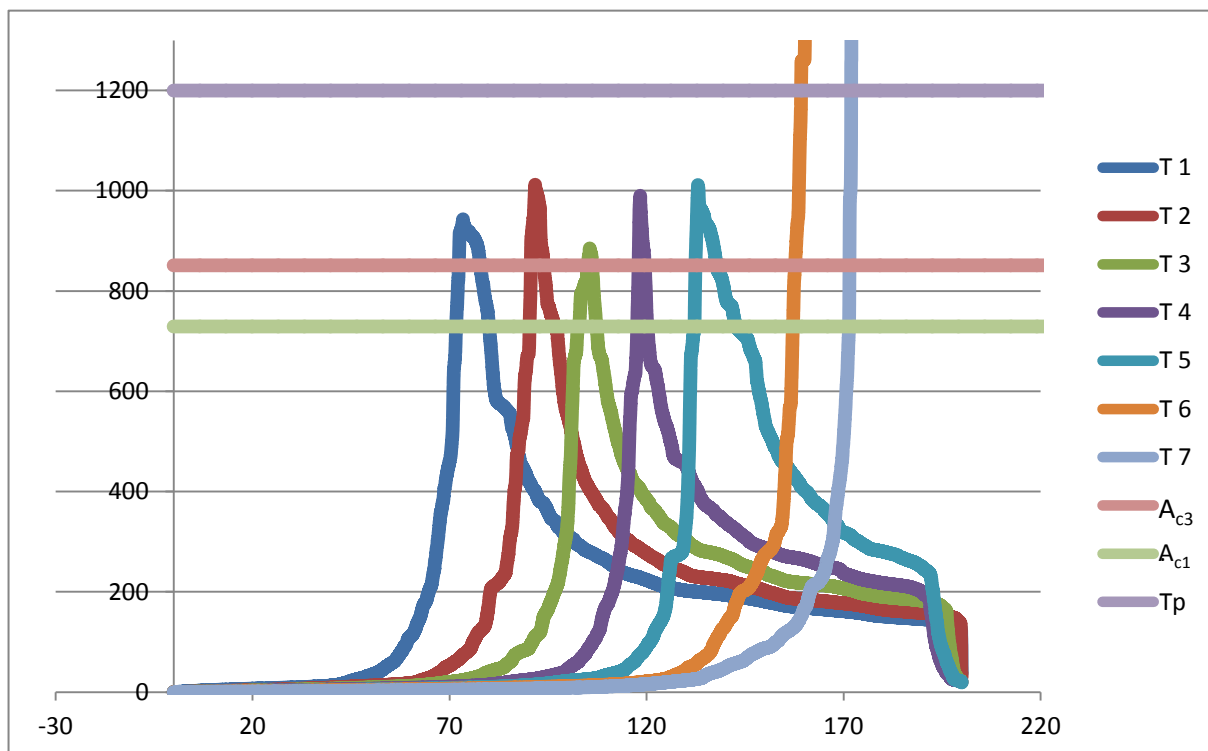
Obr.18 Svar č.1 ihned po svařování



Obr.19 Svar č.1 po kartáčování

Výstupem této bakalářské práce je naměření teplotních cyklů. Pro první měření jsou teplotní cykly zaznamenány na následujícím obrázku(viz.obr.20). V grafu závislosti teploty na čase je

zobrazeno 7 teplotních cyklů. U dvou posledních termočlánků došlo ke spálení vlivem teploty vyšší než 1250°C, tedy teploty, kterou již termočlánky typu K nejsou schopny snést. Dále jsou v grafu také vyznačené překrystalizační teploty A_{c1} , A_{c3} a teplota přehřátí T_p .



Obr.20 Naměřené teplotní cykly při 1.měření

V následující tabulce jsou zaznamenány vyhodnocené parametry měření. Jedná se o maximální naměřenou teplotu, parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ a výdrž na teplotách A_{c1} , A_{c3} (viz.tab.10).

Tab.10 Vyhodnocené parametry 1.měření

Označení vzorku	Maximální teplota [°C]	Parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ [s]	Výdrž na teplotě [s]	
			A_{c1} 729 °C	A_{c3} 851 °C
T1-3VKD-246-1	943	8,14	8,42	5,46
T2-3VKD-246-1	1012	6,88	6,42	3,27
T3-3VKD-246-1	885	6,07	4,70	1,11
T4-3VKD-246-1	990	6,26	2,56	1,57
T5-3VKD-246-1	1011	12,21	10,61	5,36

Měření č.2

Svařovací parametry z druhého měření, tedy měření druhé části desky, udává tab.11.

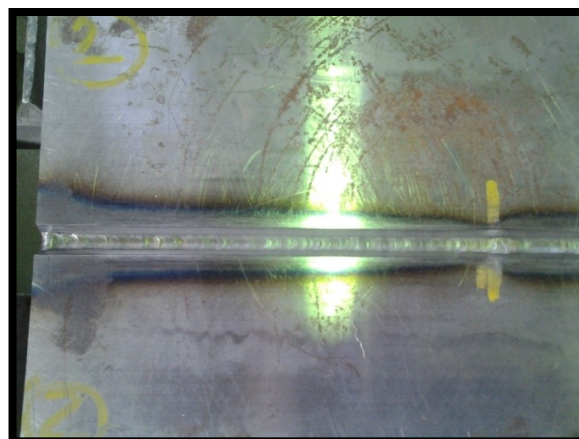
Tab.11 Svařovací parametry 2.měření

Měření č.2							
Metoda svařování	Délka svaru [mm]	Čas svařování [s]	Svařovací proud [A]	Svařovací napětí [V]	Rychlost svařování [mm.s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ.mm ⁻¹]	Typ proudu / polarita
141	200	265	145	14	0,7	1,74	DC/-

Na následujících obrázcích jsou opět zaznamenány provedené zkušební svary. Na obr.21 svar ihned po svařování a na obr.22 svar po kartáčování.

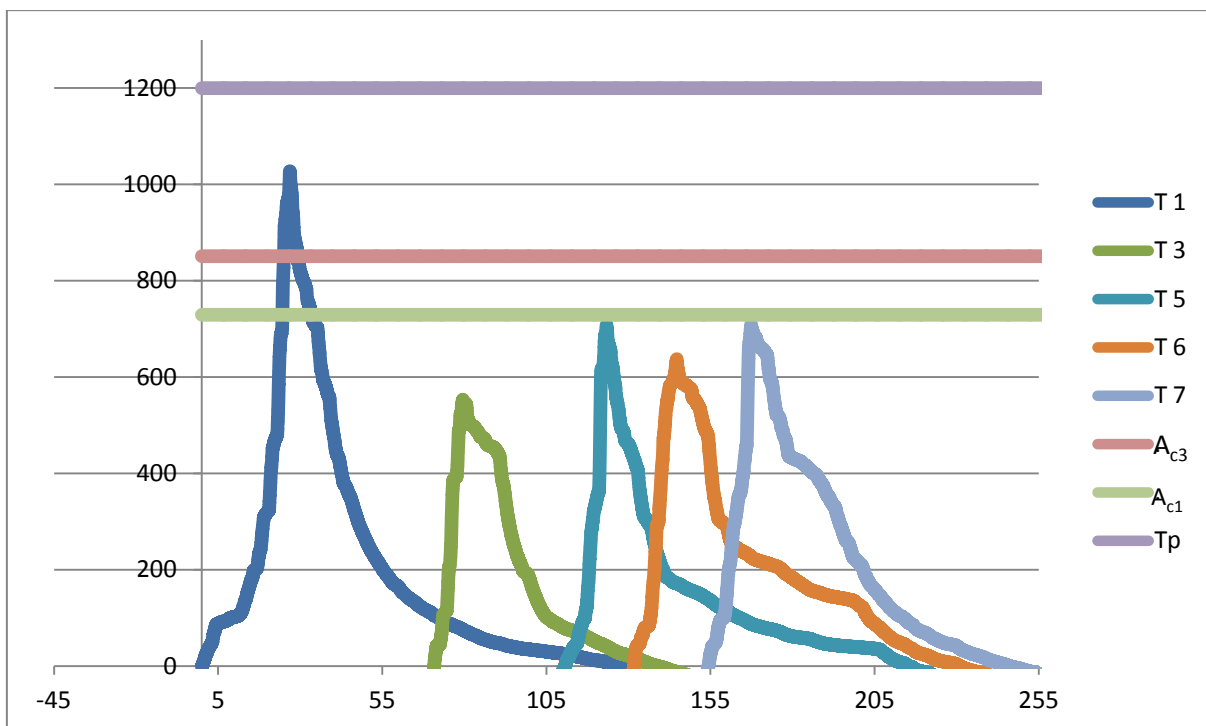


Obr.21 Svar č.2 ihned po svařování



Obr.22 Svar č.2 po kartáčování

Teplotní cykly pro druhé měření jsou obsaženy na dalším obrázku(viz.obr.23). U druhého a čtvrtého termočlánku došlo ke spálení.



Obr.23 Naměřené teplotní cykly při 2.měření

V tab.12 jsou uvedené vyhodnocené parametry druhého měření.

Tab.12 Vyhodnocené parametry 2.měření

Označení vzorku	Maximální teplota [°C]	Parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ [s]	Výdrž na teplotě [s]	
			A_{c1} 729 °C	A_{c3} 851 °C
T1-3VKD-246-2	1027	8,82	8,84	4,12
T3-3VKD-246-2	553	-	-	-
T5-3VKD-246-2	707	-	-	-
T6-3VKD-246-2	637	-	-	-
T7-3VKD-246-2	709	-	-	-

4.3 Metalografie

Metalografie probíhala ve společnosti Flash Steel Power, a.s., při které se zjišťovala makrostruktura a mikrostruktura vybraných vzorků. Vybrané vzorky byly nejprve vyřezány z ocelové desky (viz. obr. 24). Poté bylo nutné vzorky zalít technickým Dentacrylem, pro dosažení následně lepší manipulace se vzorky (viz. obr. 26). Po následném ztuhnutí (viz. obr. 25), bylo možné přejít k samotnému broušení.



Obr.24 Vyříznutý vzorek



Obr.25 Vzorky po ztuhnutí

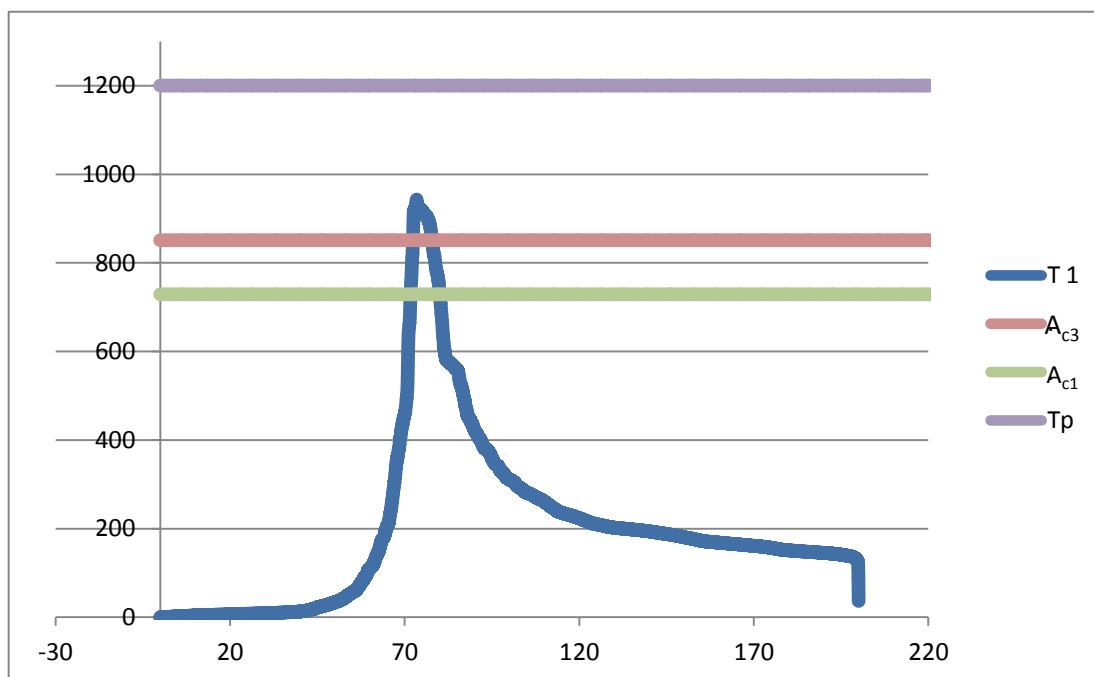


Obr.26 Vzorky zalité technickým Dentacrylem

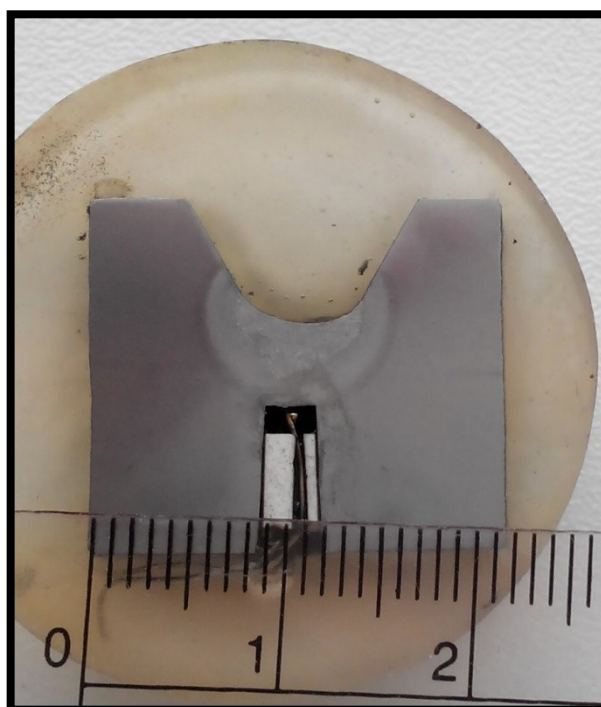
Takto připravené vzorky se následně brousily pomocí brousícího zařízení Leco Spectrum System 1000 při 200 ot/min. Povrchová vrstva se nejprve brousila na brusném papíru 80. Poté následovaly brusné papíry 120, 220, 320 a 500. Mezi každou výměnou papíru byl vzorek očištěn vodou a lihem, kvůli vysoké náchylnosti ke korozi. Po vybroušení brusným papírem 500 se provedlo naleptání vzorku v 5% HNO_3 a byla zkoumána makrostruktura. Broušení dále pokračovalo na brusných papírech 800, 1000 a 1200. Nakonec byl vzorek doleštěn pomocí mikrozrné diamantové pasty. Vzorek byl poté znovu naleptán, a to v chemické sloučenině NITAL 2%, a byla zkoumána jeho mikrostruktura.

4.3.1 Vzorek T1-3VKD-246-1

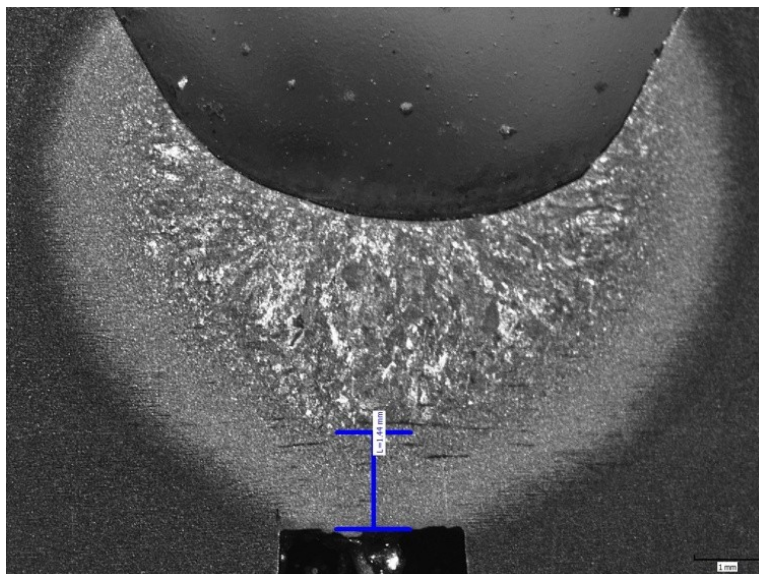
První vybraný vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální dosažená teplota teplotního cyklu je 943 °C a hodnota parametru ochlazování je 8,14 s(viz.obr.27). Hodnota vzdálenosti od termočlánku k hranici ztavení je 1,44 mm. Na následujících obrázcích je vyfotografována makrostruktura(viz.obr.28) a mikrostruktura daného vzorku, a to při zvětšení 12x(viz.obr.29), a při zvětšení 30x(viz.obr.30).



Obr.27 Teplotní cyklus vzorku T1-3VKD-246-1



Obr.28 Makrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1



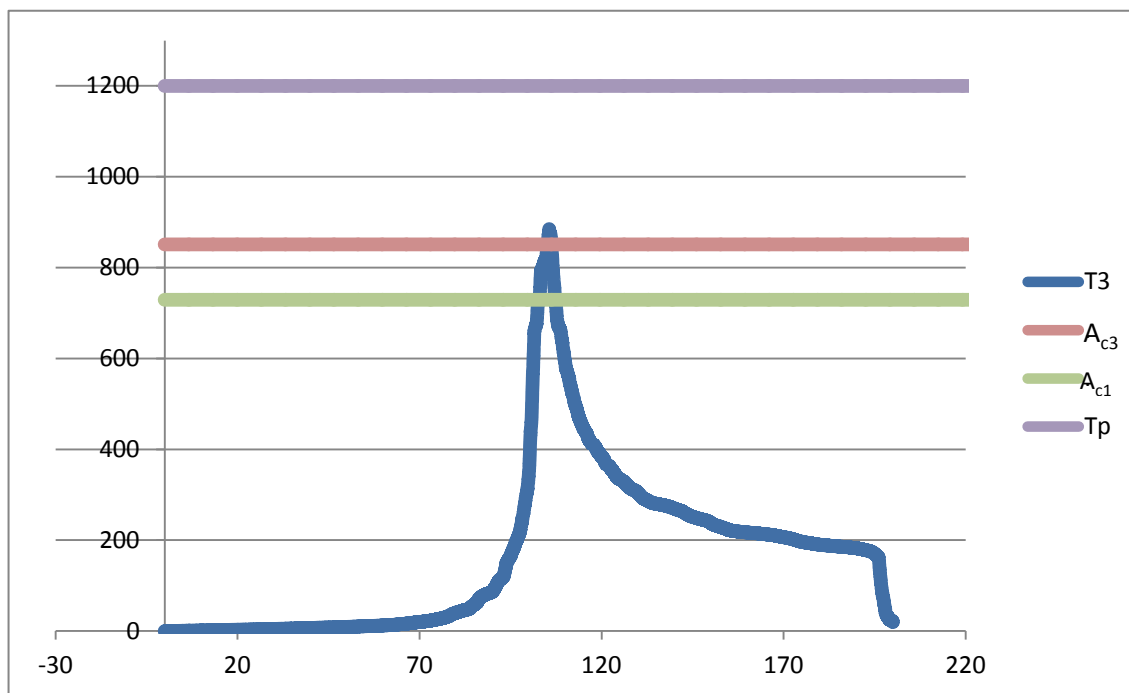
Obr.29 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1 při zvětšení 12x



Obr.30 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1 při zvětšení 30x

4.3.2 Vzorek T3-3VKD-246-1

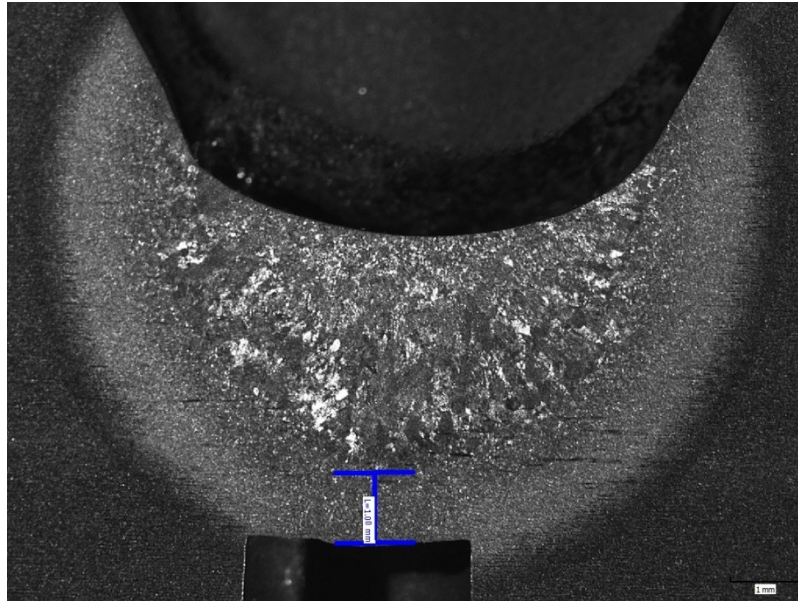
Následující vzorek se nachází v oblasti normalizace. Maximální teplota tohoto teplotního cyklu je 885 °C a doba ochlazování z 800 °C na 500 °C byla 6,07 s(viz.obr.31). Hodnota vzdálenosti od termočlánku k hranici ztavení je 1,00 mm. Následují fotografie makrostruktury vzorku(viz.obr.32) a mikrostruktury vzorku. Mikrostruktura je vyobrazena při zvětšení 12x(viz.obr.33) a při zvětšení 30x(viz.obr.34).



Obr.31 Teplotní cyklus vzorku T3-3VKD-246-1



Obr.32 Makrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1



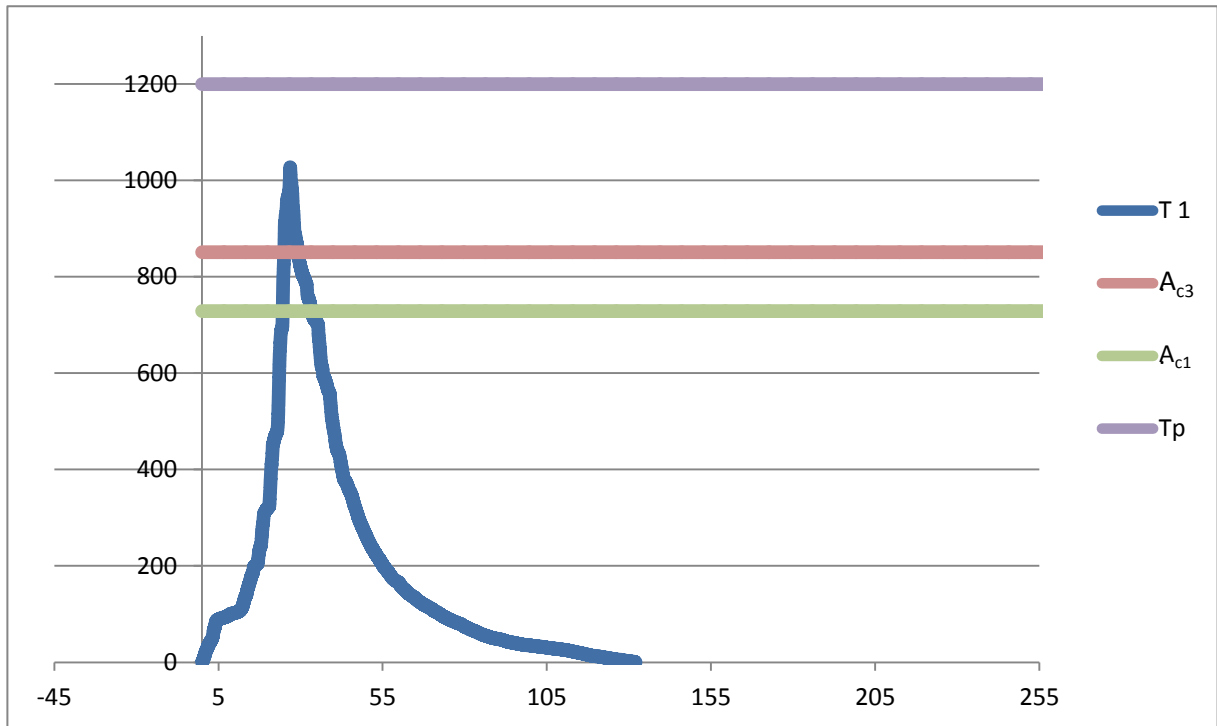
Obr.33 Mikrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1 při zvětšení 12x



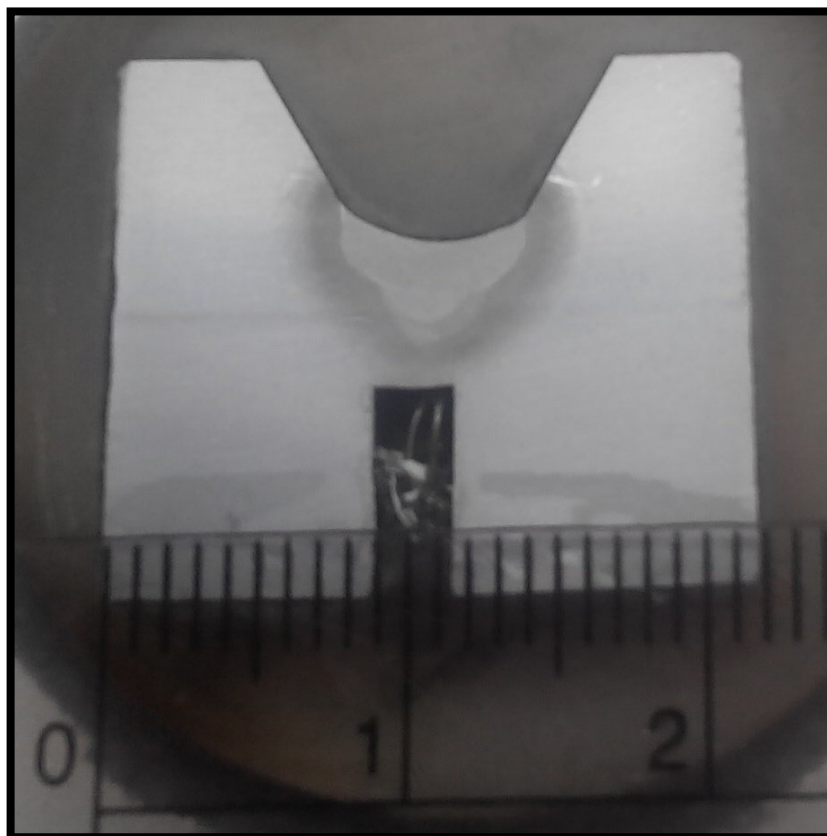
Obr.34 Mikrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1 při zvětšení 30x

4.3.3 Vzorek T1-3VKD-246-2

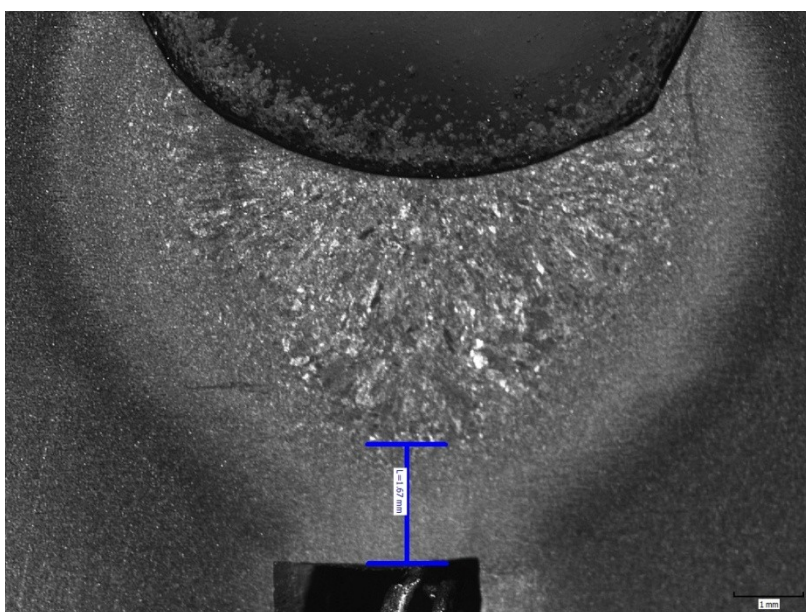
Poslední vybraný vzorek se nachází v pásmu normalizace a maximální teplota teplotního cyklu je 1027 °C(viz.obr.35). Hodnota parametru ochlazování je 8,82 s. Hodnota vzdálenosti od termočládku k hranici ztavení je 1,67 mm. Na následujících snímcích je opět vyobrazena makrostruktura(viz.obr.36) a mikrostruktura. Mikrostruktura je zaznamenána při zvětšení 12x(viz.obr.37) a při zvětšení 30x(viz.obr.38).



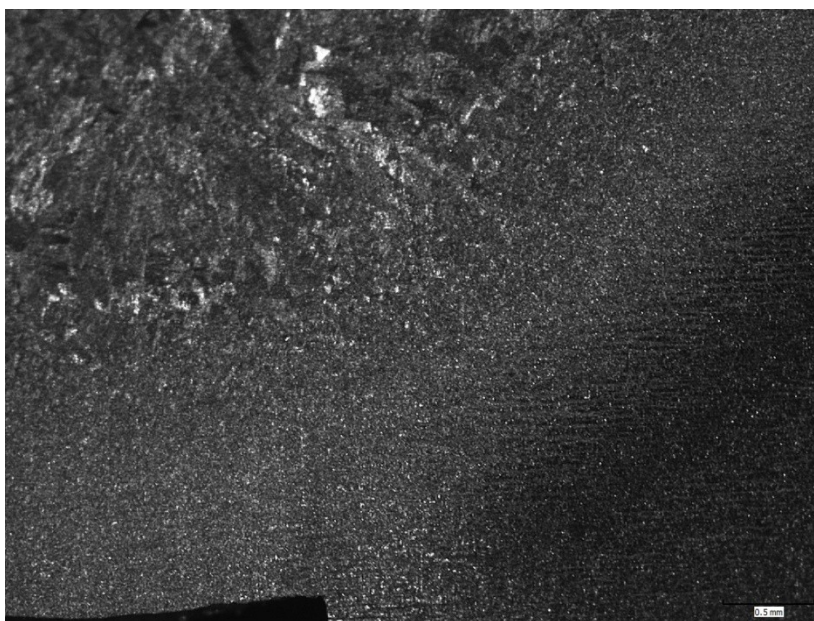
Obr.35 Teplotní cyklus vzorku T1-3VKD-246-2



Obr.36 Makrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2



Obr.37 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2 při zvětšení 12x



Obr.38 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2 při zvětšení 30x

5. Parametry pro modelování pásem tepelně ovlivněné oblasti

Překryšalizační teploty A_{c1} a A_{c3} vytváří spolu s teplotou přehřátí rozsahy pásem tepelně ovlivněných oblastí. V následující tabulce jsou rozděleny jednotlivá pásma podle intervalů teplot (viz. tab. 12).

Tab. 13 Rozsahy pásem TOO

Interval teplot	Pásmo tepelně ovlivněné oblasti	Hodnoty teplot
A_{c1} až A_{c3}	Pásmo částečné překryšalizace	729 °C až 851 °C
A_{c3} až T_p	Pásmo normalizace	851 °C až 1200 °C
Vyšší než T_p	Pásmo přehřátí	Vyšší než 1200 °C

V experimentální části této práce jsou zpracovány grafy teplotních cyklů, ze kterých byla následně zjištěna maximální teplota, výdrž na teplotě A_{c1} a A_{c3} , parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ a hodnota vzdálenosti od hranice ztavení k termočládku. Ze všech teplotních cyklů byl vybrán jeden reprezentativní cyklus, nacházející se v pásmu normalizace. Veškeré parametry tohoto cyklu jsou zaznamenány níže (viz. tab. 14).

Tab. 14 Parametry reprezentativního cyklu

Označení vzorku	Pásmo TOO	Maximální teplota [°C]	Parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$ [s]	Výdrž na teplotě [s]		Vzdálenost od hranice ztavení [mm]
				A_{c1}	A_{c3}	
T1-3VKD-246-1	Pásmo normalizace	943	8,14	8,42	5,46	1,44

Maximální teplota reprezentativního cyklu je 943 °C a hodnota parametru ochlazování $\Delta t_{8/5}$ je 8,14 s. Výdrž na teplotě A_{c1} udává hodnotu 8,42 s a výdrž na teplotě A_{c3} má hodnotu 5,46 s. Hodnota vzdálenosti od hranice ztavení k termočládku je 1,44 mm.

6. Závěr

Kritickým místem každé konstrukce z hlediska odolnosti vůči creepu je svarový spoj. Je tedy důležité přihlížet na problematiku svařování se zvýšenou pozorností. Hlavním přínosem této bakalářské práce je naměření teplotních cyklů na jednovrstvém svarovém spoji oceli 16Mo3. Jedná se o nízkolegovanou žárovečnou ocel, která byla svařována metodou obloukového svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu.

V experimentální části této práce byly naměřeny průběhy teplotních cyklů oceli 16Mo3. Z těchto cyklů byla následně zjištěna maximální teplota jednotlivých cyklů, parametr ochlazování $\Delta t_{8/5}$, výdrž na teplotách A_{c1} , A_{c3} a hodnota vzdálenosti od hranice ztavení k termočládku. Veškeré naměřené cykly se nacházely v pásmu normalizace, tedy v intervalu teplot od A_{c3} do T_p . Z provedených měření byl vybrán reprezentativní teplotní cyklus.

Tato bakalářská práce je první částí rozsáhlého experimentu, který vede ke zjištění mechanických vlastností oceli 16Mo3. Výsledky experimentální části jsou podstatné pro další použití a zkoumání. Dále bude totiž následovat simulace naměřených teplotních cyklů na teplotním simulátoru. Podkladem pro simulaci budou teplotní cykly naměřené v této bakalářské práci. Získají se jednotlivá pásma tepelně ovlivněné oblasti. Také bude možno provést zkoušky mechanických vlastností. Bude zkoumán proces tečení a metalografie materiálu. Na základě provedených experimentů pak bude možno určit kritické místo svarového spoje z hlediska namáhání za normálních teplot i z hlediska odolnosti proti tečení.

Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
- [2] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I*. skripta VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6
- [3] SONDEL, M. *Studium vlastností modelovaných pásem TOO svarových spojů oceli P91*. Disertační práce, VŠB – TU Ostrava, 2005. 101s.
- [4] JECH, D. *Struktura a vlastnosti svarového spoje rotorových ocelí* [online]. Brno, 2012. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55567
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [5] NĚMEC, K. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli* [online]. Brno, 2010. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/18962/2010_DP_Nemec_Karel_53498.pdf?sequence=1
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [6] HIST Project *Ocele odolné voči tečení* [online]. Dostupné z: http://histproject.no/sites/histproject.no/files/2_14_Ocele_odoln%C3%A9_vo%C3%A8i_te%C3%A8eniu.pdf
- [7] JANOVEC, J., CEJP, J. *Nauka o materiálu* [online]. Praha, 2007. Dostupné z: http://umi.fs.cvut.cz/files/3_2_struktura-a-vlastnostni-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf
- [8] ESAB VAMBERK, s.r.o. *vyber2013_opravy_duben* [online]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/vyber2013_opravy_duben.pdf
- [9] POMIKÁLEK, L., HERMANOVÁ Š., DOBROVODSKÁ, L. *Effect of welding on the properties of HR3C, Super 304H, TP347HFG and P92 steels* [online]. Ostrava, 2013. Dostupné z: <http://www.metal2014.com/files/proceedings/12/reports/1584.pdf>
- [10] CONTINENTAL Steel & Tube Co. *Nickel Alloy 617* [online]. Dostupné z: <http://continentalsteel.com/nickel-alloys/alloy-617-inconel-617.asp>
- [11] HRABOVSKÝ, M., KOPŘIVA, M. *Judgement of welds of AKVS steel, performed with electron beam* [online]. Olomouc, 2000. Dostupné z: http://publib.upol.cz/~obd/fulltext/Physica%2039/Physica%2039_12.pdf
- [12] YUSHENG IRON AND STEEL Co. *EN10028 16Mo3* [online]. Dostupné z: <http://www.ysteelplate.com/EN10028-16Mo3.html>

- [13] JANDOVÁ, D., KASL, J., KANTA, V. *Žárovevnost a mikrostruktura svarových spojů oceli P91* [online]. Hradec nad Moravicí, 2006. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_06/papers/169.pdf
- [14] OMEGA Engineering, INC. *Temperature Products* [online]. Dostupné z: http://www.omega.com/Temperature/images/SMPW-CC_m.jpg
- [15] PAWLOWSKI, B. *Critical points of hypoeutectoid steel – prediction of the pearlite dissolution finish temperature A_{c1f}* [online]. Kraków, 2011. Dostupné z: http://www.journalamme.org/papers_vol49_2/49225.pdf
- [16] ČSN EN 1011-2. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů* [online]. Dostupné z: http://csnonlinefirmy.unmz.cz/html_nahledy/05/63898/63898_nahled.htm
- [17] VUHEREE, T., GLIHA, V., MILOVIĆ, L., DUNĐER, M., SAMARDŽIĆ, I. *Upute za zavarivanje i pregled čelika za opremu Energetskih postrojenja te mogućnosti korištenja Simulacija u zut-u za unaprjeđenje kvalitete zavara* [online]. Slavonski Brod, 2011. Dostupné z: <http://bib.irb.hr/datoteka/544625.001-013-sbz2011.pdf>

Seznam obrázků a tabulek

Obr.1 Křivka tečení	10
Obr.2 Určení mezní teploty T_g	11
Obr.3 Zbytkové napětí ve svaru a možnosti deformace	18
Obr.4 Typický průběh teplotních cyklů	21
Obr.5 Řez materiálem při měření teplotních cyklů	21
Obr.6 Struktura svarového spoje	22
Obr.7 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje	23
Obr.8 Ocelová deska 16Mo3	25
Obr.9 Konektory termočlásku	25
Obr.10 Kondenzátorová odporová svářečka	26
Obr.11 Přivařené termočlásky	26
Obr.12 Datová sběrnice	27
Obr.13 Připojení k PC	27
Obr.14 Software Bipolar AD pro měření teploty	28
Obr.15 Zapojení 14 termočlásku	29
Obr.16 Fronius MagicWave 3000	29
Obr.17 ARA diagram oceli 16Mo3[17]	30
Obr.19 Svar č.1 po kartáčování	31
Obr.18 Svar č.1 ihned po svařování	31
Obr.20 Naměřené teplotní cykly při 1.měření	32
Obr.21 Svar č.2 ihned po svařování	33
Obr.22 Svar č.2 po kartáčování	33
Obr.23 Naměřené teplotní cykly při 2.měření	34
Obr.25 Vzorky po ztuhnutí	35
Obr.24 Vyříznutý vzorek	35
Obr.26 Vzorky zalité technickým Dentacrylem	35
Obr.27 Teplotní cyklus vzorku T1-3VKD-246-1	36
Obr.28 Makrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1	36
Obr.29 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1 při zvětšení 12x	37
Obr.30 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-1 při zvětšení 30x	37
Obr.31 Teplotní cyklus vzorku T3-3VKD-246-1	38
Obr.32 Makrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1	38
Obr.33 Mikrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1 při zvětšení 12x	39
Obr.34 Mikrostruktura vzorku T3-3VKD-246-1 při zvětšení 30x	39
Obr.35 Teplotní cyklus vzorku T1-3VKD-246-2	40
Obr.36 Makrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2	40
Obr.37 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2 při zvětšení 12x	41
Obr.38 Mikrostruktura vzorku T1-3VKD-246-2 při zvětšení 30x	41
Tab.1 Rozdělení žárovevných ocelí [1]	12
Tab.3 Chemické složení oceli 16Mo3 [6]	13
Tab.2 Chemické složení uhlíkových ocelí [6]	13
Tab.4 Přehled nízkolegovaných ocelí [6]	14
Tab.5 Chemické složení chromových žárovevných ocelí [6]	15
Tab.6 Chemické složení vybraných austenitických ocelí [6,10]	16

<i>Tab.7 Minimální teplota předehřevu a interpass [16]</i>	18
<i>Tab.8 Chemické složení použitého drátu [8]</i>	29
<i>Tab.9 Svařovací parametry 1.měření</i>	31
<i>Tab.10 Vyhodnocené parametry 1.měření</i>	32
<i>Tab.11 Svařovací parametry 2.měření</i>	33
<i>Tab.12 Vyhodnocené parametry 2.měření</i>	34
<i>Tab.13 Rozsahy pásem TOO</i>	42
<i>Tab.14 Parametry reprezentativního cyklu</i>	42

Příloha A
Atest oceli 16Mo3

A04/A1



ISD TRADE SP. Z O.O. SP. K.

02-627 WARSZAWA UL. NARUSZEWICZA 9

SWIADECTWO ODBIORU
Inspection certificate/Abnahmeprüfzeugnis
wg. PN EN 10204/06-3.1

Nr. 294/AK/12/1-1

Date: 2012.02.27



A65 Wytwórca dokumentu/Originator of the dok./Aussteller der Bescheinigung
Kontrola Jakości/Quality Department/QS-Abteilung.
42-200 Częstochowa ul. Kucelińska 22
Tef. (034) 323 78 87, (034) 323 88 70 Fax: (034) 323 0289

A06 Odbiorca/Customer/Empfänger

A07 Specyfikacja/Specification/Spesifikation N°: 12/02 5976

Lot N°:

A08 Nr potwierdzenia/Huty/Our Confirm. N°
/Unsere Auftrags N°.
203-5020

A07 Kontrakt / to Order Note / zu Lieferanzüge N°
1112311

809=11 Wymiary/ Dimensions/Abmessungen:
20.00 * 2000 * 12000

B01 Produkt/Product/Erzeugnis:

BLACHA KOTŁOWA / KESSELBL. / BOILERPL.

B03 Przep. odb./wym. dod. Terms of Deliv. a./or Official Regul. Lieferbedingungen u./o. amtliche Vorschriften
EN 10029:2010 Kl. B

B02 Getunek/Grade/Güte:
16MO3

EN 10028-2:2009

B04 Stan dostawy/State of Delivery/Lieferzust.

B07 Nr wytopu Heat N° Schmelz N°	C04C02 Kier. i nr próby Sample N° and orientat Probe N° und richtung Q	C11 Granica Plast. Yield stress Streckg. MPa Re	C12 Granica wytrzm. Tensile Strength Zaprzemg. MPa Rm	C13 Wydł. Dług. Bruch- Dehnung %	C06 - C09		Próba uderzeniowa / Impact test / Kerbschlag test			C03 Wart. Średnia Average Mittel wert	C04C03 Twardość Hardness Tem HBW		
					C06 Energia praca Energy wert Kerbschlag Arbei	C07 Kier. Próby Sample orientat Probe Lage	C08/C09 Typ próby Sample type Typ Probenart	C10 Temp. °C	C14 Uderm. Impact wart. Kerb Schlag			C15 Uderm. Impact wart. Kerb Schlag	C16 Uderm. Impact wart. Kerb Schlag
577937	220147 K	353	486	30.7	J	Q	KV2/300	+20	81	106	82	90	
577937	220147 P	358	494	30.6	J	Q	KV2/300	+20	103	88	90	94	

Badania mechaniczne / technologiczne / Prüfung der mechanische und technologische prüfungen / Mechanical and technological test/ - temp. + 20°C

B07 Nr wytopu Heat N° Schmelz N°	B08 Stl. Fcs. TaL	B09 Masa Ważność Masse [Ng]	C07 - C08 Analiza chemiczna [%] / Chemical Composition [%] / Chemische Zusammensetzung [%]														
			C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	N2	V	Nb	Ti	Ceq
577937	1		0.18	0.75	0.24	0.012	0.005	0.06	0.06	0.28	0.11	0.030	0.008	0.00	0.003	0.002	0.38

Endbezeichnung/oznaki / EAP-Oxygen Element Am Furnace/Nr wytopu/Heat N°/Schmelz N°/Zakres blasz/Plate N°/Ważność N° / Badania dodatkowe/ Additional Test / Prüfungen Zusätzliche.
EAP-577937:220147-2

C70/D01

Ultrasch. Probe-gut/ultrason. Test-positive/Bad. ultradz. - pozytywny wg EN-84/0601-05 kl.P6

El. spełnia wymogi dyrektywy 97/23/EG/Großbl. erfüllen die Anforderungen nach die Direkt. 97/23/EG. Zert. 01 202 PL/Q-04 0004 D02 - D06
Energostal Torun D01 - D09

Q - Poprawność/Qualität Truevness	Stacych oznakowania/Plates Markings/Kennzeichnung: Znak producenta/Mark of the Manufacturer/Zahlen d. Herstellwerk	B06	St. Stroj 2012.02.27	B07	203
L - Właściwość/Länge/ Longitude	Getunek i/Grade/Güte, Nr pasmo / Plate N° / Ważność N°, Nr wytopu / Heat N°/Schmelz N°				
P - Stopa/Bottom/Fluss K - Ciężar/Top/Kopf	Znak KJ/Quality Control's Stamp / Zeichen d. Technische Kontrolle Znak inspektora / Inspector's Stamp / Zeichen d. Sachverständigen		Specjalista Kierownik / Werks Inspektor/ Der Werk Sachverständige		

Niniejszym potwierdzam, że dostarczony materiał zbadany został i odpowiada warunkom zamawiania. / We hereby certify, that the material described above has been tested and complies with terms of the order contract. / Es wird bestätigt, so die Lieferung geprüft wurde und den Vertragsvorgaben bei der Bestellung entspricht.

ISD HUTA STALI CZĘSTOCHOWA S.P.A. JEST WYTWÓRCĄ, VERANFTWORTLICH FÜR DEN URSPRUNG TECHNISCHER DATEN: HUTA CZĘSTOCHOWA SA 04-50-01

Radionuklidy: aktywność - < 0,1 Bq/g / Radioaktivität: Aktivität - < 0,1 Bq/g

Příloha B
Výkres desky 3-VDK-246

