

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



Měření teplotních cyklů na svarovém spoji
Measurement of thermal cycles on welded joint

Autor práce: Ondřej Skotnica
Vedoucí práce: Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Skotnica**

Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor: 3911R034 Materiály a technologie pro automobilový průmysl

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

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte studii, týkající se žárovečných ocelí
2. Zpracujte studii, týkající se teplotních cyklů svařování a tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje
3. Navrhněte experiment vedoucí ke stanovení teplotních cyklů
4. Proveďte naměření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji
5. Proveďte srovnání naměřených cyklů s dostupnými literárními zdroji
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
- VODÁREK, V. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)% Cr ocelí*, monografie VŠB – TUO, Ostrava: VŠ - TUO, 2003. 163 s. ISBN 80-248-0329-1
- Kolektiv autorů. *Přídavné materiály pro stavbu elektráren*. Praha: Böhler Uddeholm CZ s.r.o., 2007. 18 s.

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

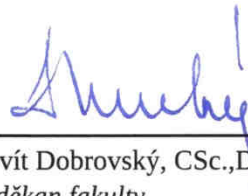
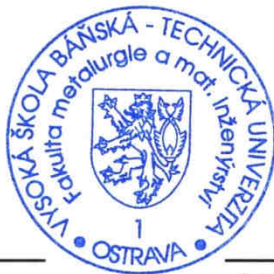
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Mohyla, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 30.04.2013



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



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan 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 | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (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 právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) 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 8).

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 7) 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 8) 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*

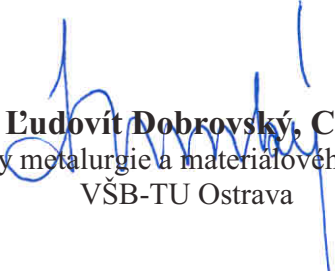
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

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.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. 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 2012/2013.

Ostrava 30. 11. 2012


Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

Prohlášení

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen 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.

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 26. 4. 2013



podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na měření teplotních cyklů na svarovém spoji oceli 16Mo3.

V teoretické části bakalářské práce je uvedeno rozdělení žárovevých ocelí používaných pro tepelně namáhané součásti kotlů a dále svařitelnost nízkolegovaných žárovevých ocelí. V závěru teoretické části je popsán teplotní cyklus svařování, teplotní pole a tepelně ovlivněná oblast svarového spoje.

V experimentální části bylo navrženo a provedeno měření teplotních cyklů při svařování metodou ručního obloukového svařování obalenou elektrodou. V závěru experimentální části bakalářské práce jsou uvedeny reprezentativní teplotní cykly pro jednotlivá pásma tepelně ovlivněné oblasti.

Klíčová slova: teplotní cyklus, ocel 16Mo3, tepelně ovlivněná oblast, svarové spoje

Abstract

The bachelor thesis is focused on the measurement of the thermal cycles at the weld joint of steel 16Mo3.

In the theoretical part of the bachelors thesis there is the partition of creep resistant steels used for heat-stressed parts of boilers and weldability of low-alloyed creep resistant steels. At the end of the theoretical part there is described the thermal cycle of welding, temperature field and heat affected zone of welded joint.

In the experimental part, measurements of thermal cycles during manual metal arc welding with coated electrode were designed and made. Representative thermal cycles for each zone of heat affected zone are listed at the end of the experimental part of the bachelor thesis.

Keywords: thermal cycle, steel 16Mo3, heat affected zone, welded joints

Obsah

Úvod	10
1 Studie žárovevných ocelí	11
1.1 Nelegované oceli	11
1.2 Nízkolegované oceli	12
1.2.1 Ocel 16Mo3	13
1.3 Vysokolegované oceli.....	14
1.4 Austenitické oceli	15
1.5 Svařitelnost nízkolegovaných žárovevných ocelí	16
2 Studie teplotních cyklů svařování a tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje	18
2.1 Teplotní cyklus svařování.....	18
2.2 Teplotní pole.....	20
2.2.1 Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole.....	21
2.2.2 Trojměrné kvazistacionární teplotní pole.....	21
2.3 Tepelně ovlivněná oblast	22
3 Návrh experimentu vedoucí ke stanovení teplotních cyklů....	25
4 Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji	27
4.1 Zjištění teplot A_{c1} , A_{c3} a T_p	30
4.2 Měření teplotních cyklů na desce s předehřevem.....	31
4.3 Měření teplotních cyklů na desce bez předehřevu.....	34
4.4 Metalografie vybraných vzorků	37
4.4.1 Metalografie vybraných vzorků z desky s předehřevem.....	38
4.4.2 Metalografie vybraných vzorků z desky bez předehřevu.....	45

5 Srovnání naměřených cyklů s dostupnými literárními zdroji ...	50
.....	
6 Vyhodnocení dosažených výsledků	53
7 Závěr.....	54
Seznam použité literatury	56
Seznam obrázků	59
Seznam tabulek.....	61
Seznam příloh	62

Seznam značek, symbolů a zkratek

Symbol (značka, zkratka)	Jednotka	Název
A	[%]	Tažnost
A _{c1}	[°C]	Překrystalizační teplota
A _{c3}	[°C]	Překrystalizační teplota
HZ	[μm]	Hranice ztavení
I	[°C]	Intenzita svařovacího proudu
k	-	Koeficient tepelné účinnosti
M _S	[°C]	Martenzit start
R _{EH}	[MPa]	Horní mez kluzu
R _m	[MPa]	Mez pevnosti
R _{P0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
Q _S	[kJ·mm ⁻¹]	Specifické vnesené teplo
t _{T1/T2}	[s]	Doba chladnutí v určitém intervalu teplot
T _{max}	[°C]	Maximální teplota
TOO	-	Tepelně ovlivněná oblast
T _p	[°C]	Teplota přehřátí
U	[°C]	Napětí při svařování
v _r (T)	[mm·s ⁻¹]	Rychlost chladnutí za určité teploty
v _S	[mm·s ⁻¹]	Rychlost svařování
x, y, z	[cm]	Kartézské souřadnice bodu
α	-	Ferit
γ	-	Austenit
Δt _{8/5}	[s]	Doba chladnutí v intervalu teplot 800 °C - 500 °C

Úvod

Celosvětově nejrozšířenějším zdrojem elektrické energie jsou tepelné elektrárny spalující uhlí. V současné době se velmi klade důraz na alternativní a obnovitelné zdroje, ale vzhledem k dostupným zásobám uhlí se nepředpokládá významná změna v produkci této energie.

11. března předminulého roku bylo Japonsko zasaženo zemětřesením o síle 7 stupňů Richterovy stupnice a přílivovou vlnou tsunami. Přílivová vlna zasáhla jadernou elektrárnu Fukušimu I a způsobila velmi těžkou havárii. Tato havárie vyvolala mezinárodní politickou diskuzi o dalším využívání jaderné energie a o přísnějším bezpečnostním opatření. Ihned po této havárii Německo odstavilo 7 elektráren postavených před rokem 1980 a do roku 2022 chce opustit jadernou energii. K tomuto kroku se přidávají další země jako Belgie a Japonsko, které chtějí postupně rušit své jaderné elektrárny.

Vzrůstající spotřeba elektrické energie a rušení jaderných elektráren způsobí výstavbu nových tepelných elektráren a rekonstrukce stávajících elektráren. Tyto události daly do pohybu nový výzkum na větší požadavky ohledně žárovevných ocelí a svarových spojů u těchto ocelí pro tepelnou energetiku. V těchto elektrárnách je velký počet různých svařovaných součástí žárovevných ocelí, na které se musí dbát vyšší pozornost z důvodu oslabené části tepelně ovlivněné oblasti.

Z těchto aspektů vznikla bakalářská práce zabývající se teplotními cykly svarového spoje na nízkolegované žárovevné oceli 16Mo3. Tato práce je rozčleněna na část teoretickou a praktickou (experimentální).

Teoretická část je zaměřena na rozdělení žárovevných ocelí a svařitelnosti nízkolegovaných ocelí. Dále se bude práce zaměřovat na teplotní cyklus, teplotní pole a tepelně ovlivněnou oblast.

V praktické části proběhne měření teplotních cyklů na dvou navržených vzorcích. Jeden vzorek bude svařován s předehřevem a druhý bez předehřevu. Oba vzorky budou svařovány metodou ručního obloukového svařování obalenou elektrodou. Z vybraných částí desky bude odebrán vzorek na přípravu makrostruktury pro určení tepelně ovlivněné oblasti.

Navržené vhodné parametry teplotních cyklů se použijí pro následné modelování jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje. Tato bakalářská práce je první fází rozsáhlého experimentálního projektu.

1 Studie žárovevných ocelí

Žárovevné oceli se používají při vysokých teplotách a musí splňovat několik kritérií (obvyklé protichůdných). Při zvýšených a vysokých teplot dochází ke creepu materiálu. Ten se projevuje pozvolnou plastickou deformací při působení konstantního napětí pod mezí kluzu. Žárovevné materiály při vysokých teplotách musí být odolné vůči dlouhodobému zatížení. Mezi další požadavky patří dostatečná odolnost proti korozi, při které vzniká souvislá oxidická vrstva na povrchu oceli. Při postupující oxidaci povrchu oceli dochází k odlupování vrstvy korozních produktů, a tím se porušuje ochranná bariéra oceli. Při dlouhodobé expozici má soustavný úbytek materiálu negativní vliv na mechanické vlastnosti oceli. Hlavní spojovací technologií je svařování, které se využívá u komponentů a strojních součástí ze žárovevných ocelí v tepelném a chemické průmyslu. U svařovaných konstrukcí není možné vždy provést tepelné zpracování, proto by měly mít žárovevné oceli zaručenou svařitelnost. Na vlastnosti celého zařízení mají vliv vlastnosti svarových spojů. [1, 2]

Rozdělení žárovevných ocelí

Žárovevné oceli lze podle chemického složení rozdělit do těchto skupin:

- nelegované (uhlíkové) oceli (použitelné do 480 °C),
- nízkolegované oceli (do 580 °C),
- vysokolegované chromové oceli (580-650 °C),
- austenitické oceli (do 750 °C).

K uvedenému rozdělení je vhodné připomenout, že ocel pro teplotu nad 750 (800) °C je již prakticky nemožné použít z důvodu velmi nízké žárovevnosti i žáruvzdornosti.

Všeobecně platí, že čím je žárovevná ocel výše legovaná, tím je cena vyšší a většinou i náročnější technologie jejího zpracování. Na druhou stranu vyšší užitné vlastnosti u zmíněných legovaných skupin žárovevných ocelí vedou k výraznému odlehčení konstrukcí. Optimální volba závisí na celkovém posouzení výše uvedených předností i nedostatků. [1, 2]

1.1 Nelegované oceli

Nelegované (uhlíkové) oceli jsou použitelné v moderních zařízeních do teploty 480 °C. U nelegovaných ocelí jsou často použity přísady mikrolegur vanadu nebo niobu. Žárovevnost se zvyšuje precipitačním zpevněním fázemi V (C, N) a Nb (C, N). I když tyto oceli jsou vhodné pro nižší teploty, lze jejich správným nasazením dosáhnout výrazného ekonomického efektu. [1]

Pro nízkoteplotní okruhy parních kotlů se používá hlavně ocel 11 483. Z oceli 12 021 a 12 022 se vyrábí kotlové trubky. Mikrolegovaná ocel 12 025 je vyráběná ve variantách mikrolegur 0,02 až 0,05 hm.% Nb nebo 0,05 až 0,07 hm.% V a jejich použitelnost se blíží k teplotě až 500 °C [2].

1.2 Nízkolegované oceli

Nízkolegované oceli se používají pro součásti tlakových systému tepelných energetických zařízení pracujících do teploty 580 °C. Největší podíl tepelně namáhaných komponentů bloků tepelné energetiky z hlediska hmotnosti jsou dva základní typy ocelí, a to CrMo oceli a CrMoV oceli. Nejpoužívanější nízkolegovanou žárovevnou ocelí ve světě je CrMo ocel typu 2,25%Cr-1%Mo, např. ocel T22 (u nás 15 313 dle ČSN 41 5313). V posledních třiceti letech v České republice byla používána pro konstrukce většiny energetických bloků nízkolegovaná CrMoV ocel typu 0,5%Cr-0,5%Mo-0,25%V (v Česku 15 128 dle ČSN 41 5128). V západní Evropě je dávána přednost CrMo oceli, i když CrMoV oceli mají při tečení vyšší mez pevnosti. U CrMoV ocelí se hlavně při svařování vyskytuje nedokonalé zvládnutí technologických problémů. To je další důvod, proč použít CrMo ocel. V současnosti jsou CrMo oceli nahrazovány moderními CrMoV, jako např. T23 (HCM2S) a T24 (7CrMoVTi10-10). [2, 3]

Z důvodu zvyšování účinnosti energetických zařízení se musí i v oblasti nízkolegovaných ocelí stále vyvíjet tlak na zvyšování žárovevnosti. Velká pozornost se v poslední době zaměřuje na oceli na bázi 2 až 3,5% Cr, legovaných Mo, V, a dalších prvků jako W, Nb, Ti, Ta, N, B s obsahem C do 0,2 hm.%. U těchto ocelí se volí především nízký obsah uhlíku s ohledem na podmínky svařování, u kterých nelze provádět přehřev ani žíhání svárových spojů. [2, 3]

Nízkolegované oceli se vyznačují dobrou oxidační odolností v rozmezí teplot 450-590 °C a jsou vhodnou náhradou za dražší 9-12% Cr oceli. [1]

Chemické složení vybraných nízkolegovaných žárovevných ocelí používaných pro konstrukce v energetických zařízeních je uvedeno v Tabulce 1.

Tabulka 1: Chemické složení vybraných nízkolegovaných žárovevných ocelí [4]

Typ oceli	Obsah prvků v hm. %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	B	N	Ostatní
2,25Cr-1Mo (T22)	0,15	0,30	0,45	2,25	1,0	-	-	-	-	-	-
2,25Cr-1,6WVNb (T23)	0,06	0,20	0,45	2,25	0,1	1,6	0,25	0,06	0,003	-	-
2,25Cr-1MoVTi (T24)	0,08	0,30	0,50	2,25	1,0	-	0,25	0,08	0,004	0,03	0,07 Ti
3Cr-3WV	0,10	0,14	0,50	3,00	-	3,0	0,25	-	-	-	
3Cr-3WVTa	0,10	0,14	0,50	3,00	-	3,0	0,25	0,25	-	-	0,10 Ta

1.2.1 Ocel 16Mo3

16Mo3 je nízkolegovaná ocel legovaná molybdenem s 0,25 až 0,35 hm.%. Tato ocel se běžně používá pro výměníky tepla a parní generátory. Teplotní podmínky pro tuto ocel při zatížení se obvykle pohybují okolo 200 až 500 °C. Zejména se používají na potrubní materiál pro kotle, trubky přehříváků, horké parní potrubí, kolektorové trubky a pro účely ropného průmyslu. [5, 6, 7]

Tento materiál se využívá pro svařování průmyslových kotlů a ocelových tlakových nádob používaných na olej, plyn a v chemickém průmyslu. 16Mo3 má vynikající tepelnou odolnost a odolnost proti korozi. Celosvětoví výrobci dodávající materiály pro chemický průmysl vyžadují nejvyšší specifikace oceli, která se používá při výrobě tlakových nádob a průmyslových kotlů. Do této kategorie spadá ocel 16Mo3, která je podle EN 10028. [8]

Materiál nabízí dobré svařovací vlastnosti při použití konvenčních svařovacích metod a vzhledem k vynikající tepelné odolnosti, je použit pro potrubí na přepravu horkých tekutin. Má dobré tvářecí schopnosti za tepla i za studena a standardně se dodává ve stavu válcovaném za tepla. Molybden zlepšuje mechanické vlastnosti při vysokých teplotách a chrom zvyšuje odolnost a také prodlužuje životnost oceli. [8]

V následujících tabulkách je uvedeno chemické složení, mechanické vlastnosti a mez kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách oceli 16Mo3.

Tabulka 2: Chemické složení 16Mo3 dle EN 10028-2 [8]

Typ oceli	Obsah prvků v hm. % dle EN 10028-2									
	C	Si	Mn	P	S	N	Cu	Cr	Ni	Mo
16Mo3	0,12 - 0,20	max 0,35	0,4 - 0,9	max 0,025	max 0,01	max 0,012	max 0,3	max 0,3	max 0,3	0,25 - 0,35

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti 16Mo3 [9]

Typ oceli	Tloušťka výrobku v mm		Mez kluzu R_{EH} [Mpa]	Pevnost v tahu R_m [Mpa]	Tažnost A [%]
	nad	do			
16Mo3		16	275	440 - 590	24
	16	40	270		
	40	60	260		
	60	100	240	430 - 680	22
	100	150	220	420 - 570	19

Tabulka 4: Mez kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách 16Mo3 [9]

Typ oceli	Tloušťka výrobku v mm		Mez kluzu $R_{p0,2}$ při teplotě [°C]						
	nad	do	200	250	300	350	400	450	500
			MPa min.						
16Mo3		60	215	200	170	160	150	145	140
	60	100	200	185	165	155	145	140	135
	100	150	190	175	155	145	140	135	130

1.3 Vysokolegované oceli

Nejvýznamnější skupinou vysokolegovaných feritických ocelí jsou modifikované 9-12% Cr oceli. Hlavní výhodou je na rozdíl od nízkolegovaných ocelí posun žáropevnosti až k teplotě 650 °C a dobrá odolnost proti korozi v prostředí vodní páry. Od počátku 70. let u této skupiny ocelí probíhá intenzivní výzkum na optimalizaci obsahu C, N, Mo, V, Nb a dalších legujících prvků jako Co, W a B. V tomto vývoji představuje ocel P91 (9Cr1MoVNbN) důležitý mezník. Pro použití v jaderné energetice je vyvinutá další významná ocel Eurofer'97. [10]

Chemické složení vybraných vysokolegovaných žáropevných ocelí používaných pro konstrukce v energetických zařízeních je uvedeno v Tabulce 5.

Tabulka 5: Chemické složení vybraných vysokolegovaných žárovevných ocelí [4]

Typ oceli	Obsah prvků v hm. %										
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Nb	B	N	Ostatní
P/T9 (9Cr-1Mo)	0,12	0,60	0,45	9,0	1,0	-	0,20	0,08	-	0,05	-
P/T91	0,10	0,40	0,40	9,0	1,0	-	0,20	0,08	-	0,05	-
E911	0,11	0,40	0,40	9,0	1,0	1,0	0,20	0,08	-	0,07	-
P/T92 (NF616)	0,07	0,06	0,45	9,0	0,5	1,8	0,20	0,05	0,004	0,06	-
EUROFER'97	0,11	0,05	0,50	8,5	-	1,0	0,25	-	0,005	-	0,08 Ta
T122 (HCM12A)	0,11	0,10	0,60	12,0	0,4	2,0	0,25	0,05	0,003	0,06	1,00 Cu

1.4 Austenitické oceli

Tato skupina ocelí má dobré mechanické vlastnosti a výbornou odolnost proti korozi i při teplotách 650-700 °C. Výhoda vyšších provozních teplot je spojena s nevýhodami, jako jsou např. velká teplotní roztažnost a nízká tepelná vodivost. Při použití těchto ocelí při cyklických teplotních režimech v elektrárnách, může dojít k nebezpečnému poškození materiálu tepelnou únavou. Poměrně vysoká cena těchto ocelí brání širšímu využití. [1, 2]

V současné době jsou v Evropě, USA a Japonsku používané austenitické žárovevné oceli Super 304H, TP 347 HFG, Tempaloy A-1 pro teploty do 660 °C. Pro maximální provozní teploty 680 °C jsou použitelné moderní austenitické oceli NF 709, SAVE 25 nebo HR6W. [11]

U austenitických ocelí se vyskytují optimalizované obsahy Ti, Nb, W, Mo, nebo Cu a N. Důraz klademe hlavně na odolnost proti mezikrystalové korozi, kterou získáme pomocí stabilizace oceli prvky jako Ti a Nb. Zlepšení creepových vlastností dosáhneme přidáním minoritních prvků Cu a N. [10]

Chemické složení vybraných austenitických žárovevných ocelí používaných pro konstrukce v energetických zařízeních je uvedeno v Tabulce 6.

Tabulka 6: Chemické složení vybraných austenitických žárovevných ocelí [11]

Typ oceli	Obsah prvků v hm. %										
	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	V	Nb	Ti	Ostatní
Super 304H	0,10	0,8	0,2	9	18	-	-	-	0,40	-	3 Cu; 0,1 N
Tempaloy A-1	0,12	0,6	1,6	10	18	-	-	-	0,10	0,08	-
ASME TP347 HFG	0,08	0,6	1,6	10	18	-	-	-		0,08	-
Esshete 1250	0,12	0,5	6,0	10	15	1,0	-	0,2	1,00	0,06	-
NF 709	0,15	0,5	1,0	25	20	1,5	-	-	0,20	0,10	-
SAVE 25	0,10	0,1	1,0	18	23	-	1,5	-	0,45	-	3 Cu; 0,2 N

1.5 Svařitelnost nízkolegovaných žárovevných ocelí

Svařitelnost nízkolegovaných žárovevných ocelí je značně ovlivňována legujícími prvky. Z důsledku vyššího obsahu C, Mn, Cr, Mo a Ni, může dojít k zakalení svarového spoje v TOO. Při svařování CrMo a CrMoV ocelí musíme zařadit předehřev z důvodu legující přísady chromu, která má vysokou vrubovou citlivost. U větších tloušťek svarových spojů se aplikuje dohřev. Potřebnou výši teploty předehřevu a teploty interpass pro vybrané nízkolegované oceli uvádí Tabulka 7. Předehřev svarových spojů snižuje rychlost ochlazování svaru, a tím zabraňuje zakalení TOO svarového spoje a svarového kovu. Také prodlužuje čas, po který může vodík difundovat ze svarového spoje. Po ukončení svařování je nutné dodržet tepelné zpracování (žhánění) svarového spoje. Snažíme se mít co nejmenší obsah difúzního vodíku, jelikož zvětšujícím se obsahem martenzitu dochází ke vzniku studených (vodíkových) trhlin. Tyto trhliny mohou vznikat ve svarovém kovu nebo v tepelně ovlivněné oblasti. [3,12, 13, 14]

Tabulka 7: Minimální teplota předehřevu, minimální teplota interpass a maximální teplota interpass [14]

Typ oceli	Tloušťka [mm]	Minimální teplota předehřevu a minimální teplota interpass [°C]			Maximální teplota interpass [°C]
		Stupeň obsahu vodíku			
		D ≤ 5 (ml/100g)	C 5 až 10 (ml/100g)	A > 15 (ml/100g)	
0,3 Mo	≤15 >15≤30 >30	20 75 75	20 75 100	100 100 nepoužitelné	250
1Cr0,5Mo 1,25Cr0,5Mo	≤15 >15	20 100	100 150	150 nepoužitelné	300
0,5Cr0,5Mo0,25V	≤15 >15	100 100	150 200	nepoužitelné nepoužitelné	300
2,25Cr1Mo	≤15 >15	75 100	150 200	200 nepoužitelné	350
5Cr0,5Mo 7Cr0,5Mo 9Cr1Mo	všechny	150	200	nepoužitelné	350
12CrMoV	≤8 >8	150 200 ^a 350 ^b	nepoužitelné nepoužitelné	nepoužitelné nepoužitelné	300 ^a 450 ^b

^a Martenzitická metoda, při které je teplota předehřevu nižší než teplota počátku martenzitické transformace Ms a transformace na martenzit nastává při svařování.

^b Austenitická metoda, při které je teplota předehřevu vyšší než Ms a spoj musí být ochlazen pod Ms, aby bylo zajištěno, že transformace na martenzit nastane před tím, než je použito jakékoliv tepelné zpracování po svařování.

Po svařování nízkolegovaných žárovevých ocelí se často zařazuje popouštění svarových spojů při teplotách v rozsahu 650 až 750 °C. Doporučená doba výdrže na popouštěcí teplotě je cca 4 minuty na 1 mm tloušťky svarového spoje. Nízkolegované oceli jsou náchylné k tvorbě žíhacích trhlin, tudíž se musí dodržet povolené rychlosti ohřevu a ochlazení. Náchylnost k trhlinám roste s vyšším obsahem legujících prvků a tloušťkou svarů. Pro svařování nízkolegovaných žárovevých ocelí se používají přídatné materiály podle meze pevnosti při tečení. I když přídatný materiál je totožný se základním materiálem, tak žárovevost svarových spojů je přibližně o 20 % nižší než u základního materiálu. [13, 14]

Pro svařování nízkolegovaných žárovevých ocelí se používají metody jako: svařování v ochranné atmosféře, ruční obloukové svařování, laserové svařování, svařování pod tavidlem, svařování třením nebo svařování elektrickým odporem. [13]

2 Studie teplotních cyklů svařování a tepelně ovlivněné oblasti svarového spoje

2.1 Teplotní cyklus svařování

Při procesu svařování za působení soustředěného zdroje tepla dojde krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Dodaným teplem se natavuje malý objem kovu. Důsledkem tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Při svařování způsobují vysoké teploty a jejich změny v základním materiálu: [12]

- a) Fázové přeměny – tavení základního a přídavného materiálu, jeho tuhnutí a změny v tuhém stavu,
- b) Fyzikálně chemické reakce,
- c) Změny struktury v oblasti svarového spoje,
- d) Změny objemu, které způsobují vnitřní napětí a deformace.

Velikost a četnost těchto změn jsou převážně závislé na svařovaném základním materiálu (chemické složení, fyzikální vlastnosti, geometrické rozměry), metodě svařování a množství tepla vneseného do svarového spoje na jednotku délky. [12]

Množství tepla vneseného do svaru při svařování na jednotku délky se vypočítá podle vzorce: [16]

$$Q_s = k \cdot \frac{U \cdot I}{v_s} \cdot 10^{-3} \text{ [kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (1)$$

kde : Q_s [kJ·mm⁻¹]..množství tepla přivedeného do svarového spoje na jednotku jeho délky

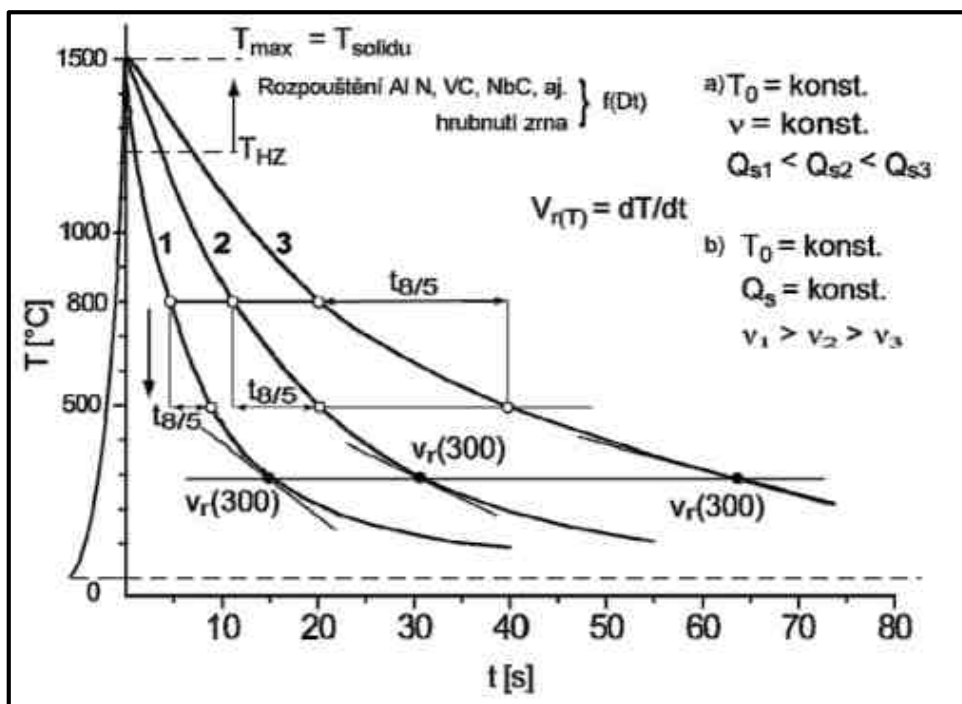
kkoeficient tepelné účinnosti metody svařování

U [V]napětí při svařování

I [A]intenzita svařovacího proudu

v_s [mm·s⁻¹]rychlost svařování

Celý teplotní cyklus lze popsat matematicky, jelikož jeho průběh lze jednoznačně popsat rychlostí chladnutí za určité teploty $v_r(T)$ nebo dobou chladnutí v určitém intervalu teplot ($t_{T1/T2}$) (viz Obr. 1). Cyklus tímto způsobem lze zapsat pouze tehdy, pokud v daném intervalu teplot neprobíhá fázová transformace, neboť uvolněné latentní teplo by zkreslilo výsledek. Kvůli tomu se u svařitelných ocelí počítá nebo měří doba chladnutí v intervalu 800-500 °C. [15]

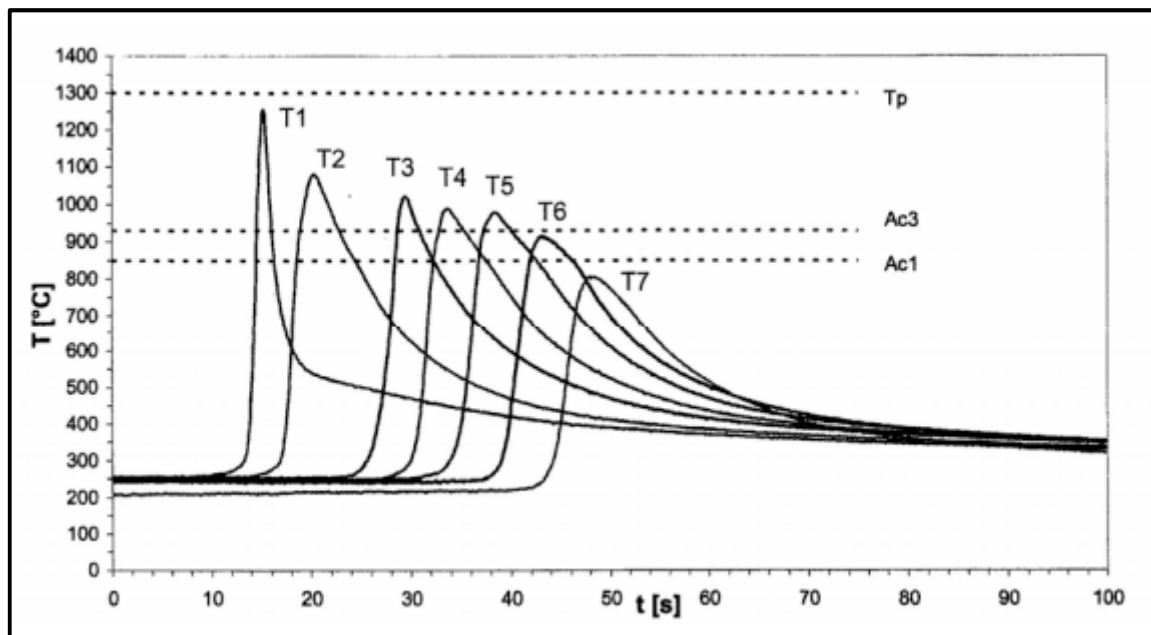


Obr. 1: Závislost ochlazování $t_{8/5}$ a rychlosti chladnutí $v_r(T)$ na průběhu teplotního cyklu [15]

Na Obr. 1 jsou znázorněny tři druhy teplotních cyklů, které odpovídají rozdílným podmínkám svařování. Uhlíkové a nízkolegované oceli mají odlišné složení, ale přibližně stejné fyzikální vlastnosti. Proto je průběh teplotního cyklu závislý pouze na velikosti přivedeného tepla Q_s a na rychlosti odvedení (funkce Q_s , tloušťky plechu, geometrii svaru a výchozí teploty plechu). Svar tenkého plechu při nízkém Q_s nebo tlustého plechu při vysokém Q_s , může mít podobný průběh teplotního cyklu. [15]

Výpočet doby chladnutí $t_{8/5}$ nebo rychlosti chladnutí $v_r(300)$ je docela rychlý a spolehlivý. Problém vzniká ve chvíli, kdy se rozhodujeme, jakým způsobem dát výsledky výpočtu do souvislosti s konkrétním materiálem, neboť do teď není dostatek pokladů pro objektivní rozhodování. Pokud máme podklady, můžeme z nich sestavit optimální rozmezí rychlosti ochlazování (oblast mezi rychlostí ve kterém hrozí opožděné trhliny a rychlostí, kdy se nevyhovujícím způsobem zhorší vlastnosti TOO (viz Obr. 1). Materiál se dá charakterizovat jediným číslem, které odpovídá optimální době nebo rychlosti chladnutí a je považováno za důležitý parametr. [15]

V posuzovaném místě svarového spoje je závislost průběhu teploty na čase popisována teplotním cyklem. Na Obr. 2 můžeme vidět obvyklý průběh teplotních cyklů v TOO svarového spoje v různých vzdálenostech od hranice nastavení. [16]



Obr. 2: Průběh teplotních cyklů [16]

2.2 Teplotní pole

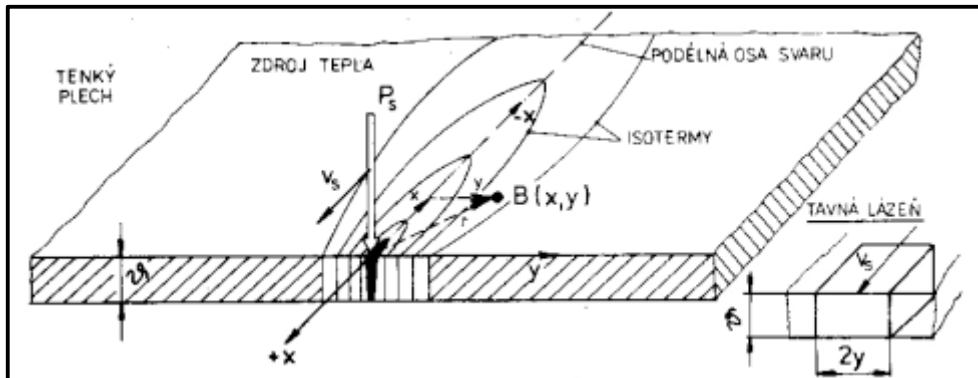
Důsledkem šíření tepla z místa působení zdroje tepla do okolního základního materiálu, vzniká teplotní pole. Geometrie teplotního pole závisí na vlastním zdroji tepla (výkonu, charakteristických vlastnostech přenosu tepla a rychlostí pohybu), dále na podmínkách odvodu tepla ovlivněných rozměry a fyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu (jeho měrnou hmotností, specifickým teplem, tepelnou vodivostí a nezanedbatelná je i tloušťka materiálu). Pokud je vyšší teplotní vodivost a k tomu je dodaná větší hodnota specifického vneseného tepla Q_s , je teplotní pole širší. [17]

Možnost matematického popisu teplotního pole je pouze za řady zjednodušujících předpokladů. Materiál musí být hlavně homogenní, izotropní a v tuhém stavu. Zdroj tepla může být bodový (z bodu na povrchu plechu se teplo šíří ve směru tří os) nebo čárový (pronikající celou tloušťkou plechu a teplo se z něj šíří ve směru dvou os). [17]

V praxi má hlavní význam teplotní pole, které se tvoří okolo zdroje konstantního výkonu a pohybuje se konstantní rychlostí svařování v_s [$\text{dm}\cdot\text{s}^{-1}$] kolem osy svaru. Pokud v dostatečné vzdálenosti od začátku svaru nastává ustálený stav a vzhledem k místu přívodu tepla nemění teplotní pole svůj tvar, označuje se jako kvazistacionární. [17]

2.2.1 Dvojměrné kvazistacionární teplotní pole

Při svařování zdrojem o vysoké plošné hustotě energie u poměrně tenkého plechu je závar hluboký a v celé tloušťce plechu se nachází tavná lázeň (viz Obr. 3). Ve směru osy (z) lze zanedbat pohyb tepla, tím pádem se teplo šíří jen ve směrech osy (x, y). Tomuto teplotnímu poli se v praxi nejvíce blíží svařování plazmovým obloukem, svazkem elektronů, laserem vysokého výkonu nebo svařování obloukem vysokého výkonu a nižší rychlostí svařování. [17]

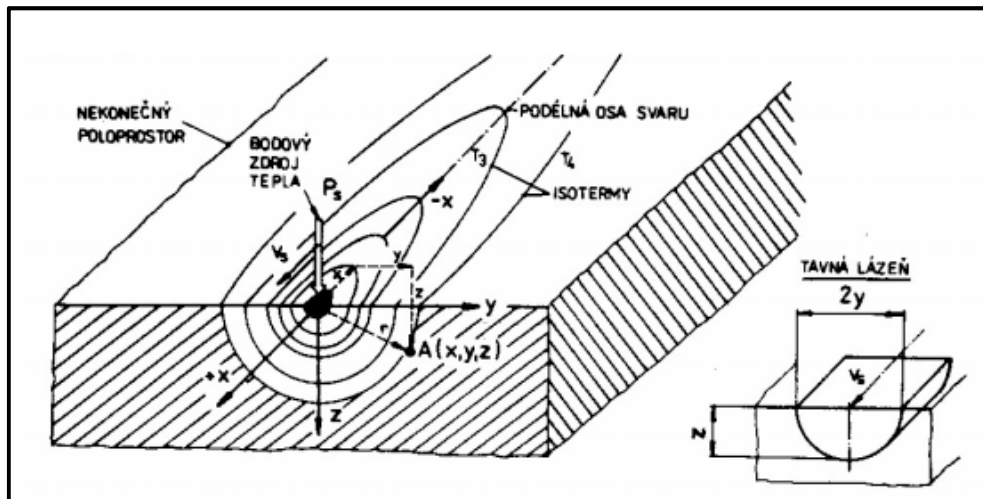


Obr. 3: Dvojměrné teplotní pole v nekonečném plechu [17]

2.2.2 Trojměrné kvazistacionární teplotní pole

U trojměrného pole v matematickém popisu se předpokládá, že bodový zdroj tepla působí ve středu souřadného systému (x, y, z) na povrchu tlustého plechu a s konstantní rychlostí v_s se pohybuje ve směru osy (+ x). Do poloprostoru ohraničeného povrchem plechu difunduje teplo vnesené v místě působení zdroje. Při toku tepla do základního materiálu je možné tepelné ztráty radiací a konvekcí do ovzduší zanedbat. [17]

Trojměrné pole v praxi se nejvíce podobá případu navařování housenky na tlustý plech tenkou elektrodou s nízkým proudem (tavná lázeň je mělká a relativně malá, viz Obr. 4). Zdroj tepla můžeme považovat za bodový a tlustý plech znázorňuje nekonečný poloprostor. [17]

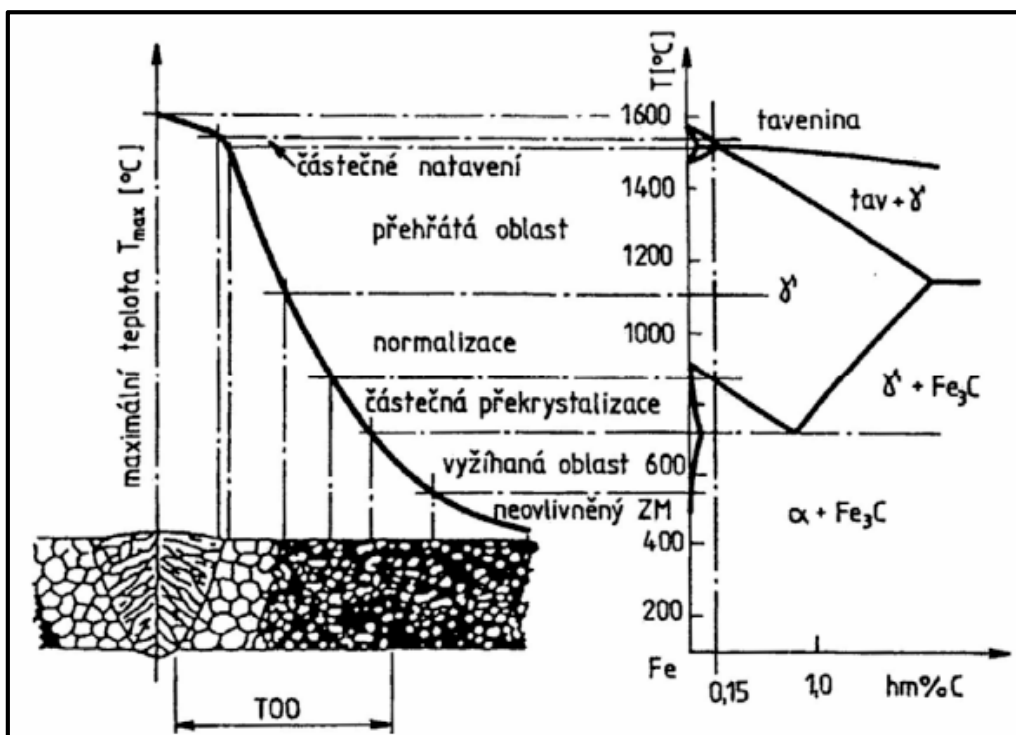


Obr. 4: Trojrozměrné teplotní pole [17]

2.3 Tepelně ovlivněná oblast

Tepelně ovlivněnou oblast nazýváme oblast základního materiálu, ve kterém byly vlastnosti a mikrostruktura silně ovlivněny procesem a technikou svařování. Dodané teplo do materiálu při jeho tavení a následném ochlazení způsobuje změny materiálu v oblasti přiléhající ke svaru. Velikost tepelně ovlivněné oblasti je závislá na tepelné vodivosti základního materiálu. Když je velká tepelná vodivost, tak ochlazovací rychlost materiálu je taktéž velká a tepelně ovlivněná oblast malá. [3, 12]

Tepelně ovlivněná oblast je složená z pásem, které jsou charakteristické specifickými změnami v jejich mikrostrukturu a jsou znázorněny na Obr. 5. Patří zde pásma částečného natavení, pásmo přehřátí, pásmo normalizace, pásmo částečné překrytality a vyžíhaná oblast. [3, 12]



Obr. 5: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [3]

Pásmo částečného natavení

Tato oblast tvoří přechod z TOO do svarového kovu a má maximální teplotu T_{max} . U většiny ocelí se toto pásmo redukuje na linii nazývanou hranice ztavení, protože rozdíl mezi teplotou solidu a likvidu je minimální. Současně zde existuje tavenina společně s austenitem, tím dochází k tavení základního materiálu a promícháním se svarovým kovem. [3, 12]

Pásmo přehřátí

Oblast s teplotami nad A_{c3} překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn se nazývá pásmo přehřátí. Z důvodu rozpuštěných precipitátů, bránících růst austenitických zrn za nižších teplot se tato oblast někdy nazývá hrubozrnná. Výsledkem je výrazné zhrubnutí austenitických zrn. V ocelích s nízkým obsahem chromu vzniká ochlazením bainiticko-martenzitická mikrostruktura. U nelegovaných ocelí je teplota přehřátí okolo 1050 °C, pro mikrolegované oceli je teplota cca 1250 až 1300 °C a u nízkolegovaných ocelí je asi 1200 °C. [3, 12]

Pásmo normalizace

Pásmo normalizace je definováno teplotami A_{c3} a teplotou přehřátí s úplnou transformací $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$. Struktura je tvořena austenitem a malým podílem precipitátů bránících růst austenitického zrna. Z uvedeného důvodu vzniká během chladnutí výsledná jemnozrnná

struktura. Tato oblast svarového pásma se jeví jako nejkritičtější z hlediska dlouhodobé creepové expozice. [3, 12]

Pásma částečné překrystalizace

Toto pásmo se nachází mezi teplotami A_{c1} a A_{c3} , ve kterém dochází během ohřevu k částečné transformaci feritu na austenit. Během svařování je netransformovaný bainit vyžíhán. Část precipitátů se rozpustí a po tepelném zpracování může dojít k zhrubnutí nerozpuštěných částic. Po ochlazení se vzniklá struktura vyznačuje přítomností nově vzniklého bainitu a vyžíhané nebo rekrystalizované původní mikrostruktury. Toto pásmo svarového spoje je charakteristické malou velikostí zrna a vykazuje nejnižší hodnoty tvrdosti. [3]

Vyžíhaná oblast

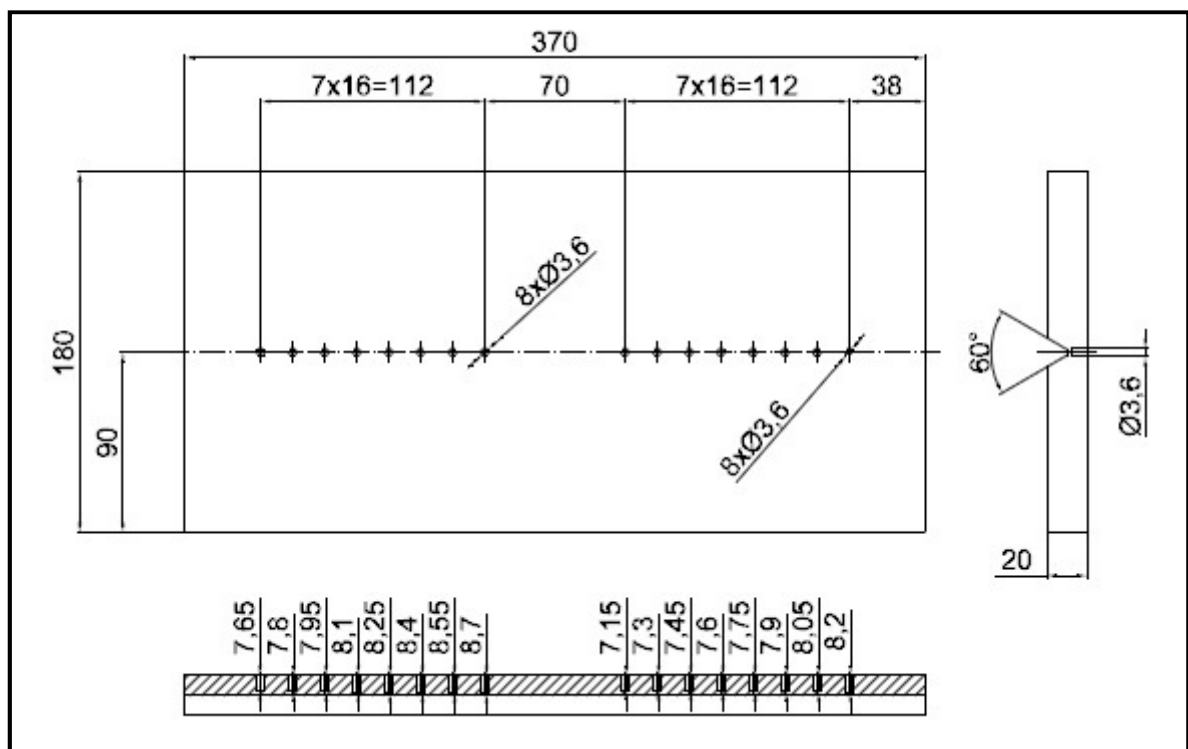
Při teplotách blízko pod A_{c1} nedochází k fázové přeměně mikrostruktury, ale k lokálnímu přehřátí oproti chladnějšímu základnímu materiálu. V důsledku vyššího koeficientu difúze při dané teplotě dochází k hrubnutí precipitátů. [3]

3 Návrh experimentu vedoucí ke stanovení teplotních cyklů

Cílem experimentu je naměřit teplotní cykly při svařování oceli 16Mo3. Pro svařování této oceli byla vybrána metoda ručního obloukového svařování obalenou elektrodou (metoda 111) o $\varnothing 2,5$ mm.

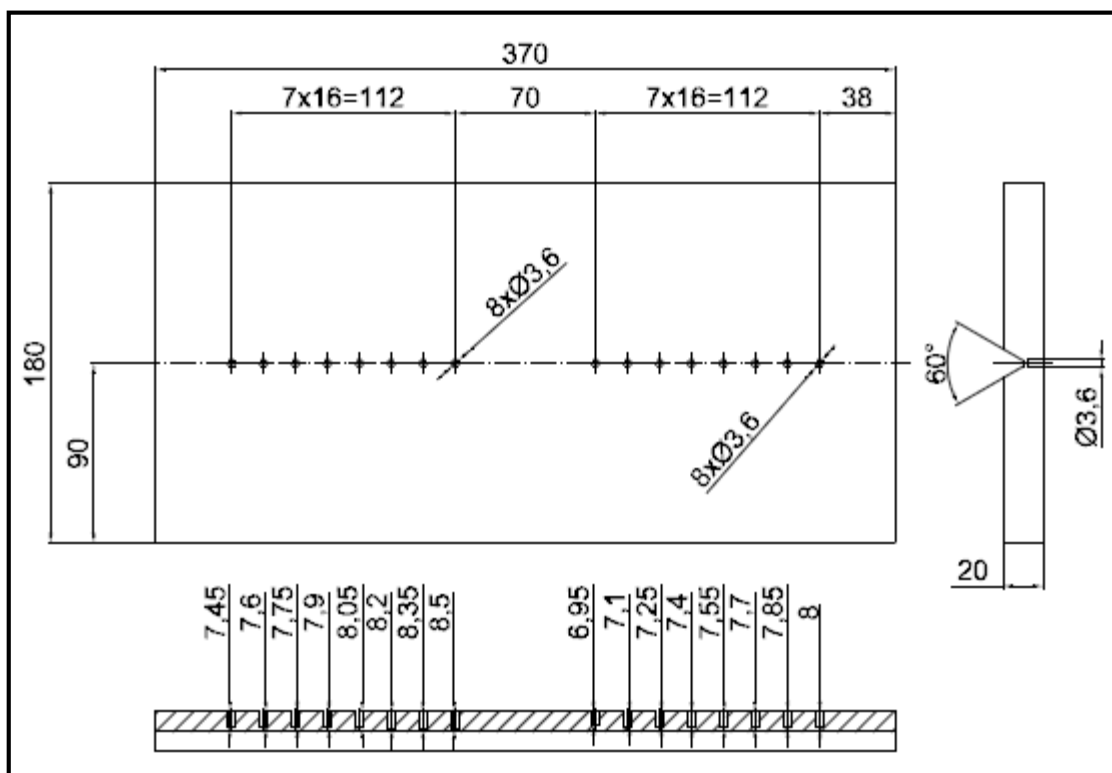
Měření teplotních cyklů při svařování bude provedeno na dvou deskách o šířce 180 mm, délky 370 mm a tloušťky 20 mm. Každá deska je navrhnutá na dvě měření pro samostatné svarové housenky. První deska bude svařována při pokojové teplotě a u druhé desky bude před svařováním proveden předehřev na teplotu 200 °C. V deskách bude zhotoveno 16 plochých děr o průměru 3,6 mm.

U první desky, která bude svařována při pokojové teplotě, jsou navrženy hloubky děr. U prvního měření bude hloubka odstupňována od 7,65 mm do 8,7 mm a pro druhé měření bude odstupňována od 7,15 mm do 8,2 mm (viz Obr. 6).



Obr. 6: Návrh desky pro svařování při pokojové teplotě

U druhé desky, kde bude předehřev na teplotu 200 °C, jsou navrženy hloubky děr pro první měření od 7,45 mm do 8,5 mm. Pro druhé měření bude odstupňována hloubka děr od 6,95 mm do 8 mm (viz Obr. 7).



Obr. 7: Návrh desky pro svařování s předehřevem

Měření teplotních cyklů při svařování bude provedeno připevněnými termočlánky v plochých dírách navrhnutých desek. Tyto termočlánky budou připojeny pomocí kompenzačního vedení k měřicí stanici. Pomocí měřicí stanice a dodaným softwarem získáme naměřené teplotní cykly při svařování.

4 Měření teplotních cyklů na reálném svarovém spoji

Elektroda použitá při svařování desek z oceli 16Mo3 byla OK 48.00 od firmy ESAB. Na Obr. 8 jsou parametry této elektrody.

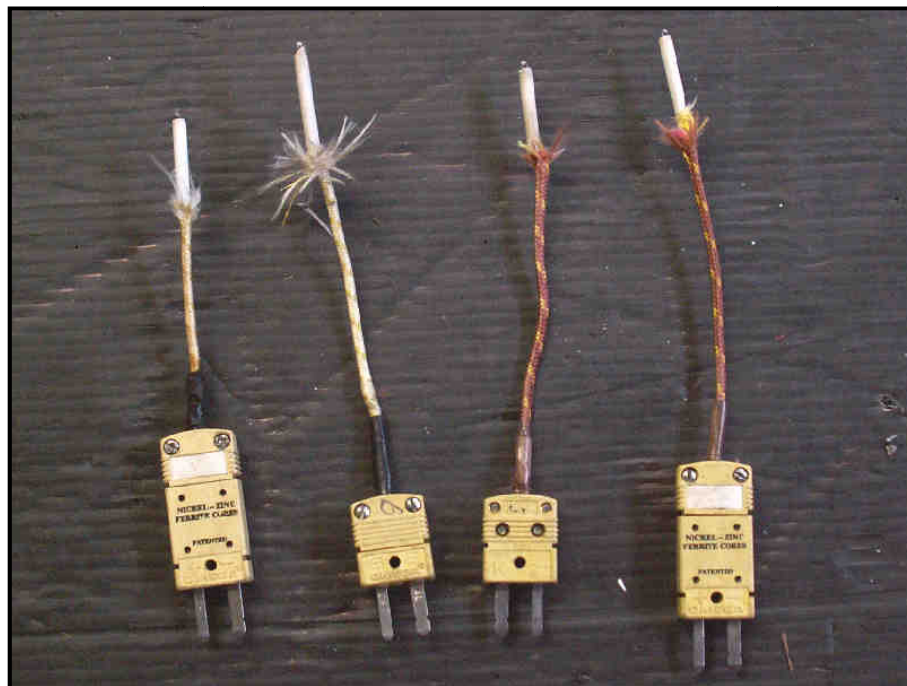
OK 48.00			Použití:								
SFA/AWS A 5.1: E 7018			Nejrozšířenější OK bazická elektroda pro svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí především označení P235/S235 až P420/S420 aj. Použitelná pro všechny polohy svařování s výjimkou polohy shora dolů. Obal se sníženou navlhavostí poskytuje houževnatý svarový kov odolný proti praskavosti s nízkým obsahem vodíku.								
EN ISO 2560-A: E 42 4 B 42 H 5			Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:								
Klasifikace/certifikace:			Typické chemické složení čistého svarového kovu:								
CE	EN 13479	GL 3 YH5	Podmínky	Stav	R_m MPa	R_{eL} MPa	A₅ %	KV (J)/°C			
ABS	3 YH5	LR 3,3YH5	ISO	TZ 0	540	445	29	-20	-40		
BV	3 YH5	RS 3 YH5	TZ 0 - stav po svařování								
DB	10.039.12	TUV 00690	Výkonové parametry:								
DNV	3 YH5	Ostatní: PRS	Průměr (mm)	Délka (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost (%)	Doba hoření (s)	Podíl sv. kovu (%)	(ks/kg sv. kovu)	Výkon navař. (kg/h)
Typické chemické složení čistého svarového kovu:			1,6	300	30 - 55	22	127	50	0,59	192	0,38
C			2,0	300	50 - 80	24	123	50	0,63	119	0,60
Si			2,5	350	80 - 110	23	130	56	0,65	62,5	1,00
Mn			3,2	450	90 - 140	23	119	76	0,64	32,3	1,50
Obal: bazický			4,0	450	125 - 210	26	123	86	0,67	20,5	2,10
Teplota přesušení: 350°C/2h			5,0	450	200 - 260	23	121	102	0,69	13,5	2,60
Svařovací proud:			6,0	450	220 - 340	23	117	102	0,72	9,6	3,70
Obsah difúzního vodíku: < 5ml/100g svar. kovu											
Polohy svařování:											

Obr. 8: Parametry použité elektrody při svařování od firmy ESAB [18]

Měření teplotních cyklů při svařování bylo provedeno na dvou deskách. U první desky označené 3-VDK-245 (viz příloha A) byl proveden přehřev na teplotu 200 °C. Druhá označena 3-VDK-246 byla svařována při pokojové teplotě a díry na termočlánky byly o 0,2 mm hlubší než u desky 3-VDK-245 (viz příloha B). Při svařování každé desky bylo zapisováno do záznamu o svařování svařovací proud, napětí, typ proudu, rychlost svařování a tepelný příkon (viz příloha C pro desku 3-VDK-245 a příloha D pro desku 3-VDK-246).

Před zahájením svařování a měřením teplotních cyklů se musely připravit vlastní termočlánky typu K. Nejprve jsem odizoloval 2 drátky termočlánků (Ni-Cr, Ni) o Ø 0,5 mm z obou stran, které se nacházely pod hlavní izolací. Poté se jedna strana připevnila do konektorů a u druhé strany se dva drátky provlékly keramickou kapilárou, kde se konce zapletly do sebe (viz Obr. 9). Ze zapletených konců se svařily kuličky pro přesnější hodnoty měření. Tímto způsobem připravené termočlánky se pomocí kondenzátorové odporové svářečky přivařily ke dnu plochých děr v deskách. Tento způsob uchycení byl proveden z důvodu přesnějšího měření a nevypadnutí termočlánku z díry. Poté se konce termočlánku připojily na kompenzační vedení s malým vlastním odporem, které zajišťovaly spojení termočlánku s měřicí stanicí OMB DAQ-54/55/56 (viz Obr. 10). Pomocí měřicí stanice se softwarem Personal Daq View bylo možné získat grafické průběhy a naměřená data

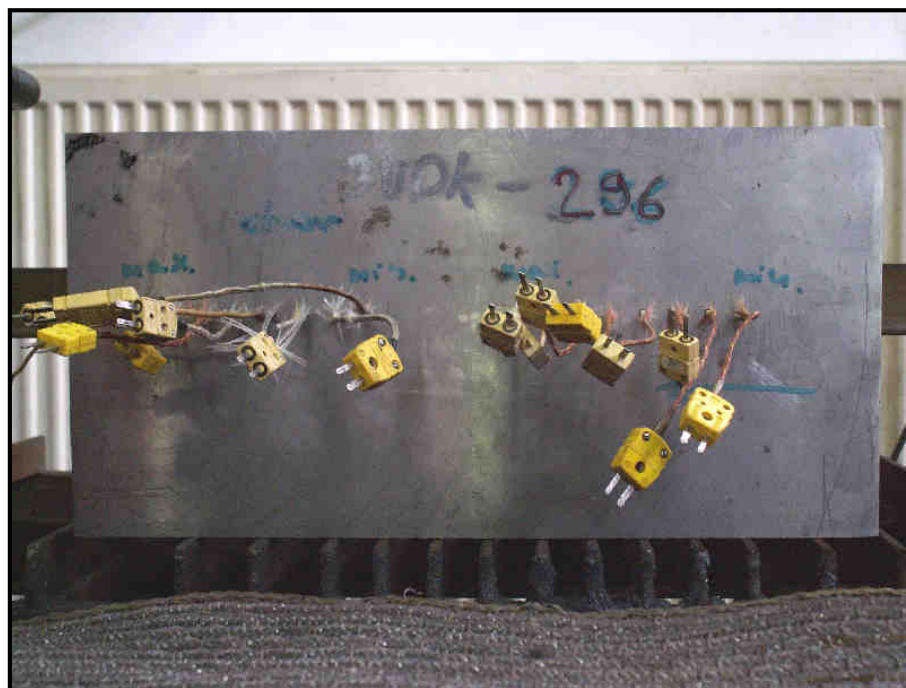
teplotních cyklů při svařování. U připravených termočlánků typu K je maximální teplota pro měření 1 372 °C (viz [19]).



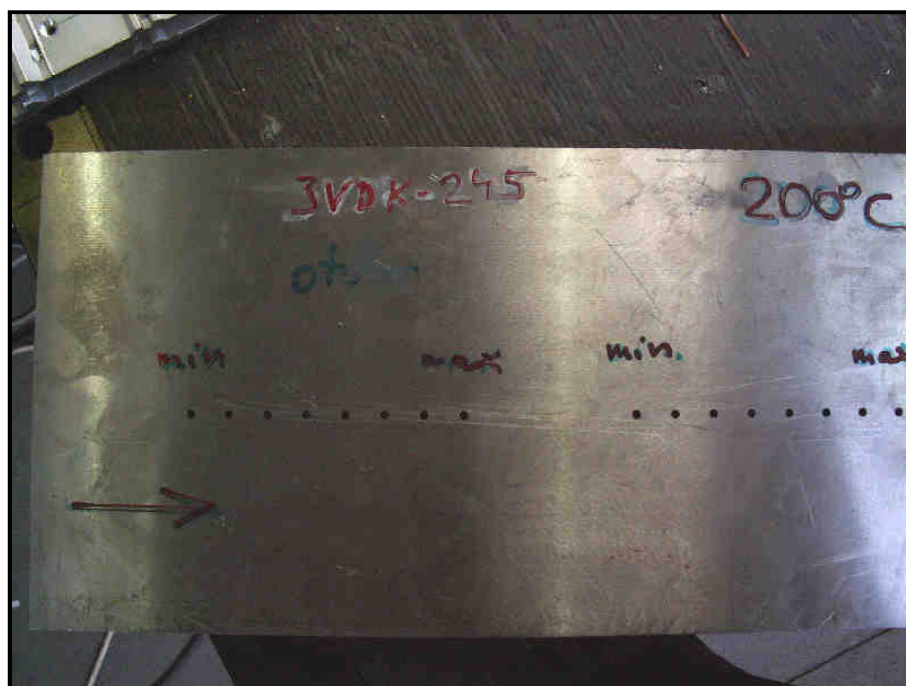
Obr. 9: Připravené termočlánky s kapilárou pro přivaření ke dnu plochých děr



Obr. 10: Měřicí stanice s připojeným kompenzačním vedením



Obr. 11: Přivařené termočlánky kondenzátorovou odporovou svářečkou ke dnu díry



Obr. 12: Deska číslo 3-VDK-245 pro měření teplotních cyklů s předeřevem

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

Výpočet přibližných teplot A_{c1} a A_{c3} jsem provedl podle Hougardy [20]. Chemické složení pro výpočet teplot A_{c1} a A_{c3} pro svařování desek z oceli 16Mo3 je uvedeno v atestu (viz příloha E).

Teplota A_{c1}

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

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

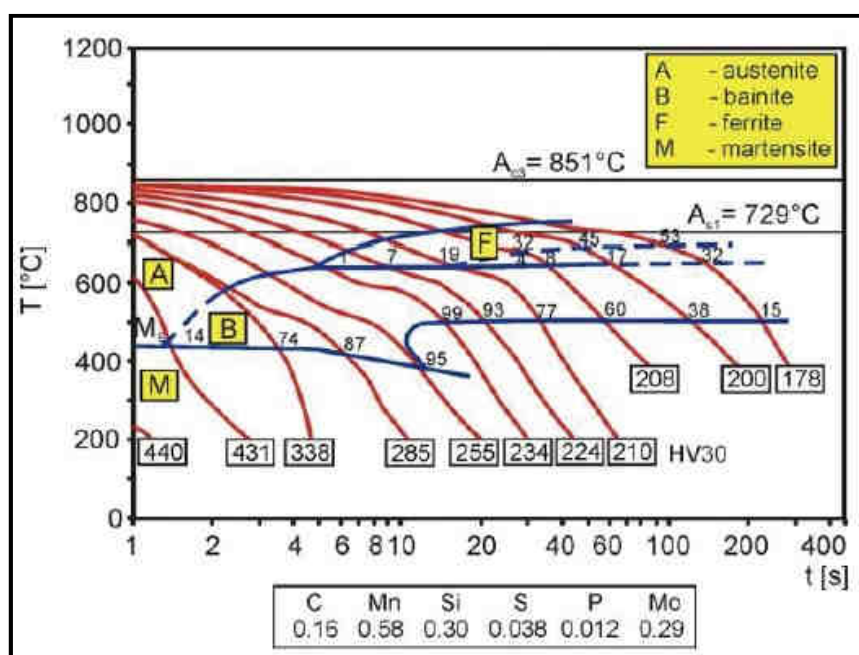
$$A_{c1} = 734 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplota A_{c3}

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

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

$$A_{c3} = 855 \text{ } ^\circ\text{C}$$



Obr. 13: ARA diagram 16Mo3 [21]

Vypočtené a zjištěné teploty z ARA diagramu se liší jen o několik stupňů. V experimentální části budu vycházet z teplot z ARA diagramu.

Teplota T_p

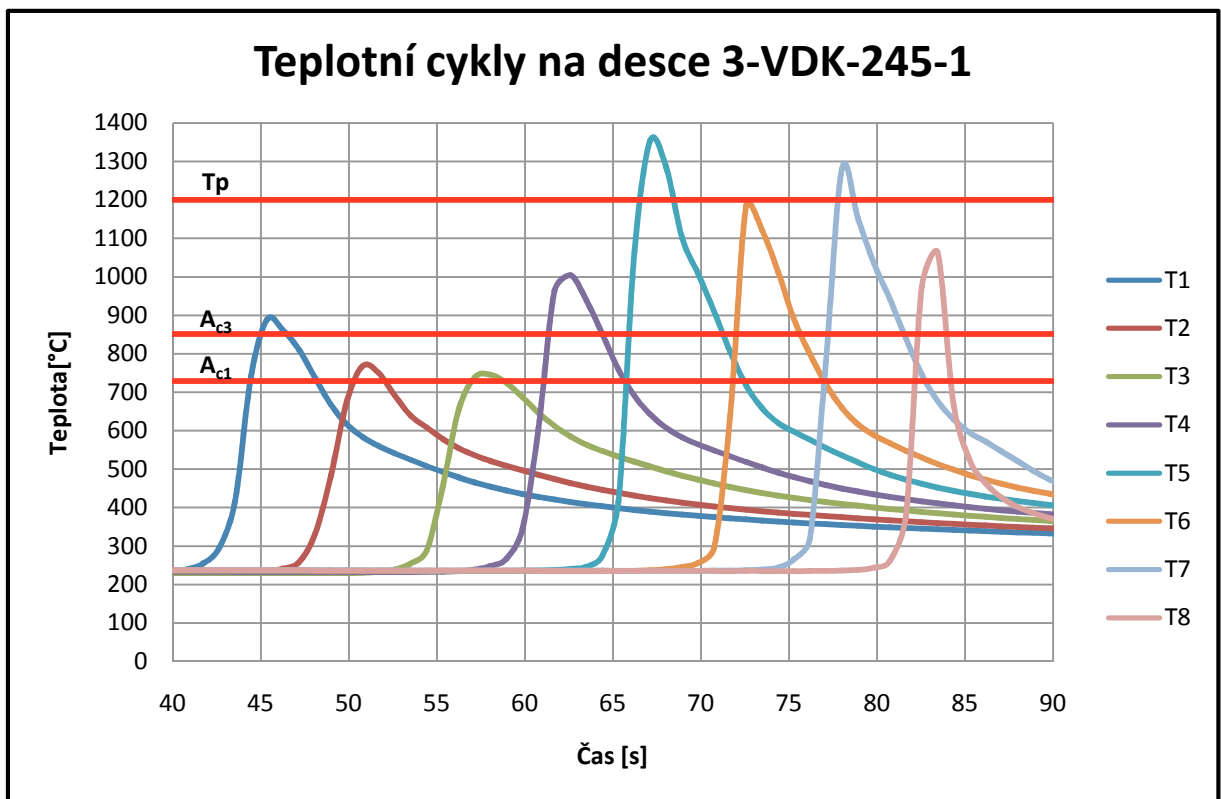
Teplota přehřátí u nízkoalokovaných ocelí je přibližně $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$, která vyplývá z literatury [12].

4.2 Měření teplotních cyklů na desce s přehřevem

Před svařováním byl u první desky označené 3-VDK-245 proveden přehřev na teplotu 200 °C pomocí odporové dečky. Na desce byly provedeny dvě měření pro samostatné svarové housenky pomocí elektrody OK 48.00 o \varnothing 2,5 mm od firmy ESAB. Měření č. 1 proběhlo na straně s větší tloušťkou materiálu pod svarem a měření č. 2 bylo na straně s menší tloušťkou materiálu pod svarem.

Měření č. 1

Grafické znázornění všech osmi termočlánků je na Obr. 14. Při svařování první části desky 3-VDK-245 byla naměřena maximální teplota cyklů 1 353 °C (termočlánek číslo 5). Vybrané vzorky pro zjištění makrostruktury TOO svaru byly odebrány od termočlánků číslo 1, 2, 5 a 7.



Obr. 14: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-1

Tabulka 8: Parametry svařování na desce 3-VDK-245-1

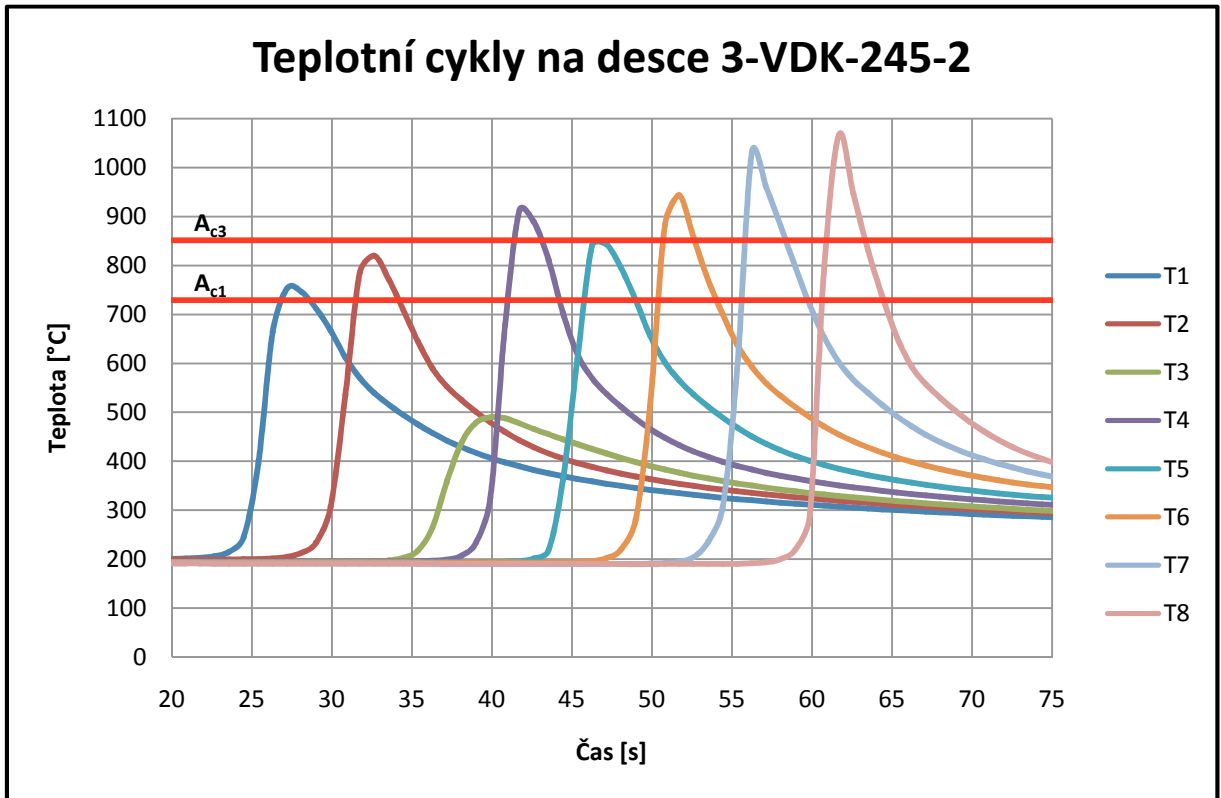
Průměr elektrody	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Teplota přehřevu [°C]
Ø 2,5	92	25,1	DC/+	2,86	0,65	200

Tabulka 9: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-1

Označení vzorku	T _{max} [°C]	Δt _{8/5} [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (A _{C1})	851 °C (A _{C3})	
3-VDK-245-1-1	889	7,5	3,8	1,4	1 643,3
3-VDK-245-1-2	768	-	1,7	-	1 432,3
3-VDK-245-1-3	745	-	1,8	-	-
3-VDK-245-1-4	1 004	9,3	4,6	3,0	-
3-VDK-245-1-5	1 354	8,6	6,6	5,3	0
3-VDK-245-1-6	1 184	8	5,2	3,6	-
3-VDK-245-1-7	1 280	6,3	5,7	4,3	247,6
3-VDK-245-1-8	1 064	1,5	2,0	1,7	-

Měření č. 2

Grafické znázornění všech osmi termočlánků je na Obr. 15. Při svařování druhé části desky 3-VDK-245 byla naměřena maximální teplota cyklů 1 066 °C (termočlánek číslo 8). Termočlánek číslo 3 byl zřejmě špatně připraven. Mohlo dojít ke kontaktu drátků před kapilárou. Tímto způsobem se teplotní cyklus neměřil na kontaktech termočlánu a svařované desky, ale v kontaktu překřížených drátků před kapilárou. Vybrané vzorky pro zjištění makrostruktury TOO svaru byly odebrány od termočlánků číslo 2, 6 a 8.



Obr. 15: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-2

Tabulka 10: Parametry svařování na desce 3-VDK-245-2

Průměr elektrody	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Teplota předehřevu [°C]
Ø 2,5	91	23,9	DC/+	3,14	0,55	200

Tabulka 11: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-2

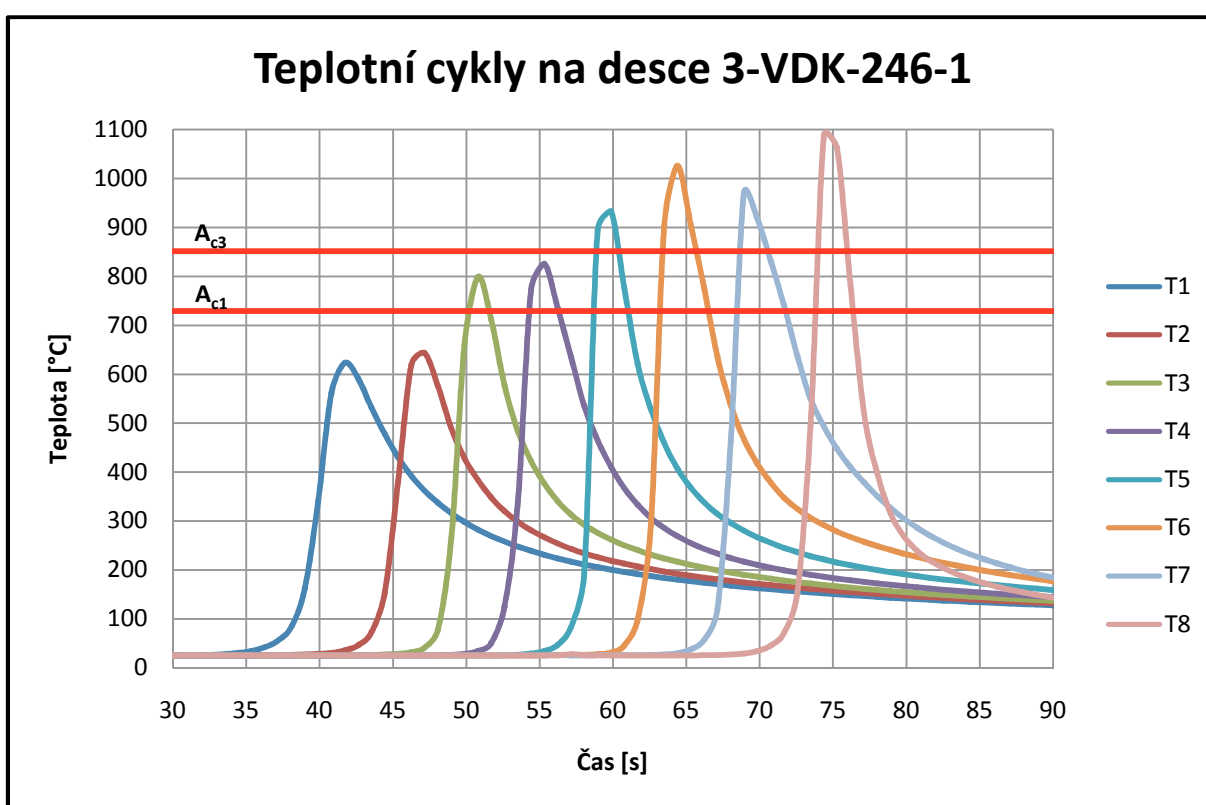
Označení vzorku	T _{max} [°C]	Δt _{8/5} [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (Ac1)	851 °C (Ac3)	
3-VDK-245-2-1	753	-	1,8	-	-
3-VDK-245-2-2	820	6	2,7	-	1 760,1
3-VDK-245-2-3	490	-	-	-	-
3-VDK-245-2-4	912	5	3,2	1,7	-
3-VDK-245-2-5	843	6	3,2	-	-
3-VDK-245-2-6	944	6	3,6	2,0	1 263,9
3-VDK-245-2-7	1 031	6	4,1	2,6	-
3-VDK-245-2-8	1 066	5,2	3,8	2,4	976

4.3 Měření teplotních cyklů na desce bez přehřevu

Druhá deska označená 3-VDK-246 byla svařována při pokojové teplotě. Taktéž byly na desce provedeny dvě měření pro samostatné svarové housenky pomocí elektrody OK 48.00 o \varnothing 2,5 mm od firmy ESAB. Měření č. 1 proběhlo na straně s větší tloušťkou materiálu pod svarem a měření č. 2 bylo na straně s menší tloušťkou materiálu pod svarem.

Měření č. 1

Grafické znázornění všech osmi termočlánků je na Obr. 16. Při svařování první části desky 3-VDK-246 byla naměřena maximální teplota cyklů 1 089 °C (termočlánek číslo 8). Vybrané vzorky pro zjištění makrostruktury TOO svaru byly odebrány od termočlánků číslo 3 a 7.



Obr. 16: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-246-1

Tabulka 12: Parametry svařování na desce 3-VDK-246-1

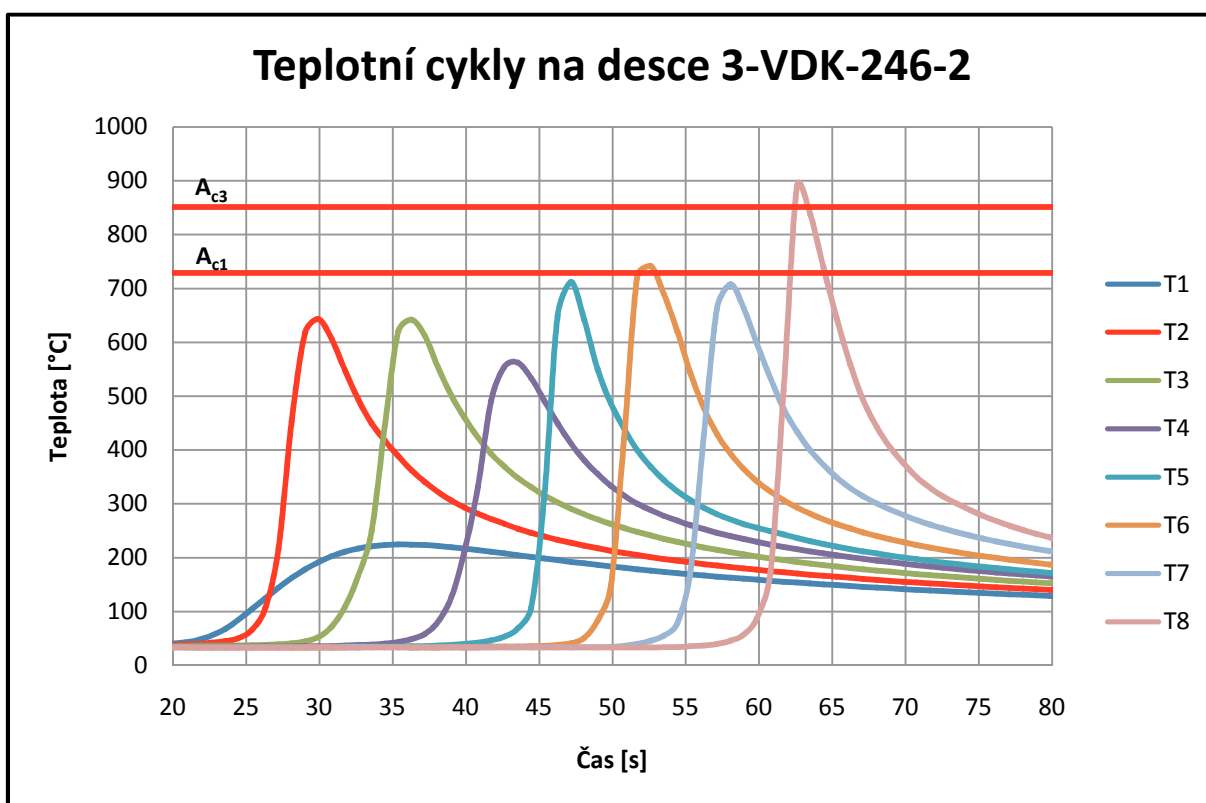
Průměr elektrody	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Teplota přehřevu [°C]
Ø 2,5	90	25,2	DC/+	3,05	0,59	-

Tabulka 13: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-246-1

Označení vzorku	T_{max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (A_{c1})	851 °C (A_{c3})	
3-VDK-246-1-1	623	-	-	-	-
3-VDK-246-1-2	644	-	-	-	-
3-VDK-246-1-3	799	-	1,4	-	1 600,1
3-VDK-246-1-4	825	2,7	2,0	-	-
3-VDK-246-1-5	933	2,2	2,3	1,6	-
3-VDK-246-1-6	1026	3,4	3,5	2,3	-
3-VDK-246-1-7	970	3	3,3	2,0	642,6
3-VDK-246-1-8	1 089	1,1	2,6	2,0	-

Měření č. 2

Grafické znázornění všech osmi termočlánků je na Obr. 17. Při svařování druhé části desky 3-VDK-246 byla naměřena maximální teplota cyklů 895 °C (termočlánek číslo 8). Termočlánek číslo 1 byl zřejmě špatně připraven. Mohlo dojít ke kontaktu drátků před kapilárou. Tímto způsobem se teplotní cyklus neměřil na kontaktech termočlánu a svařované desky, ale v kontaktu překřížených drátků před kapilárou. Vybrané vzorky pro zjištění makrostruktury TOO svaru byly odebrány od termočlánků číslo 3 a 7.



Obr. 17: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-2

Tabulka 14: Parametry svařování na desce 3-VDK-246-2

Průměr elektrody	Proud [A]	Napětí [V]	Typ proudu / polarita	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Teplota přehřevu [°C]
Ø 2,5	90	25,1	DC/+	2,88	0,63	-

Tabulka 15: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-246-2

Označení vzorku	T _{max} [°C]	Δt _{8/5} [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			734 °C (A _{C1})	845 °C (A _{C3})	
3-VDK-246-2-1	225	-	-	-	-
3-VDK-246-2-2	643	-	-	-	-
3-VDK-246-2-3	642	-	-	-	2243
3-VDK-246-2-4	562	-	-	-	-
3-VDK-246-2-5	712	-	-	-	-
3-VDK-246-2-6	742	-	1,1	-	1 604,9
3-VDK-246-2-7	708	-	-	-	-
3-VDK-246-2-8	895	3,1	2,3	1,0	1 348,1

4.4 Metalografie vybraných vzorků

Vybrané vzorky z místa spoje termočlánků s deskou byly rozřezány pro metalografickou analýzu. Vzorky se brousily na brousícím zařízení Abramin od výrobce Struers při 150 ot/min (viz Obr. 18). Pro zjištění makrostruktury se nejprve musela odstranit povrchová vrstva ovlivněna řezáním. Tato vrstva byla odebrána na brusném papíru 80. Poté se brousily vzorky na jemnějším brusném papíru při dodávané diamantové suspenzi 9 μm . Na konec byly leštěny na leštícím papíru při přidávání diamantové suspenze 3 μm . Po každé operaci se musely vzorky opláchnout vodou a lihem z důvodu náchylnosti ke korozi. Po opláchnutí byly vysušeny pomocí fénu. Takto připravené vzorky byly naleptány v 4% HNO_3 a zkoumány pod mikroskopem Olympus IX 70 pomocí softwaru Quick PHOTO PRO.

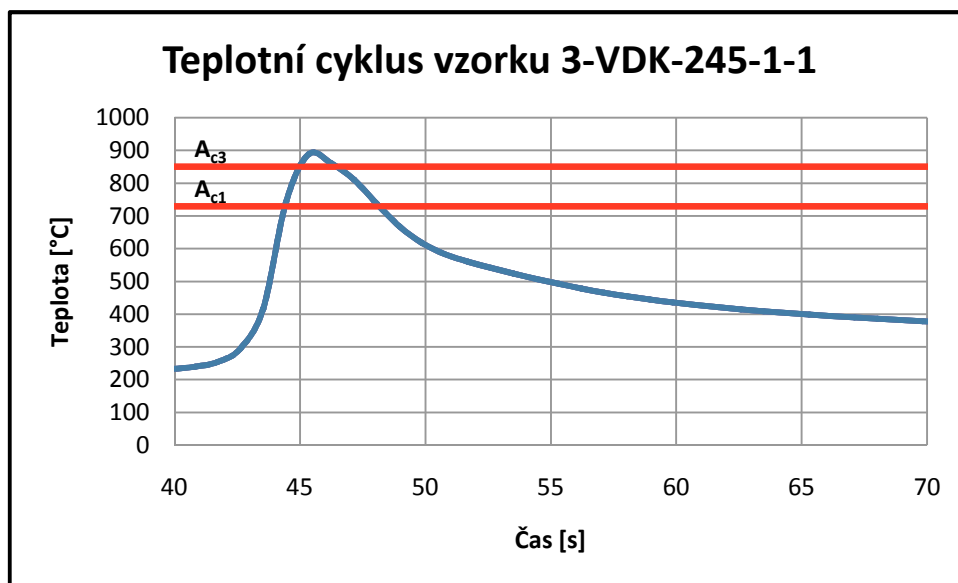


Obr. 18: Brousící zařízení Abramin od firmy Struers

4.4.1 Metalografie vybraných vzorků z desky s předehevem

Vzorek 3-VDK-245-1-1

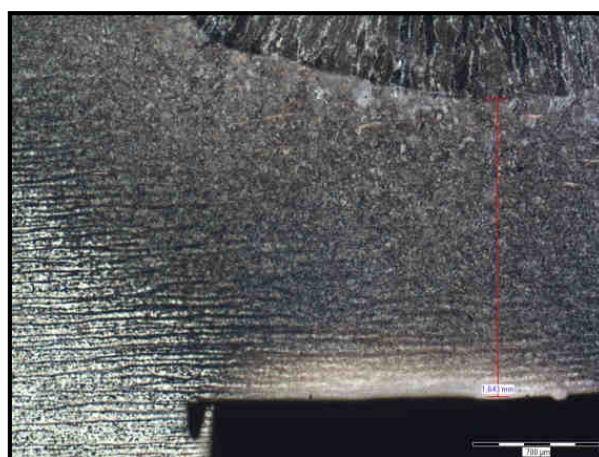
Tento vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 889 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 7,5 sekundy. Vzdálenost od hranice ztavení k termočláňku byla 1 643,3 μm .



Obr. 19: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-1



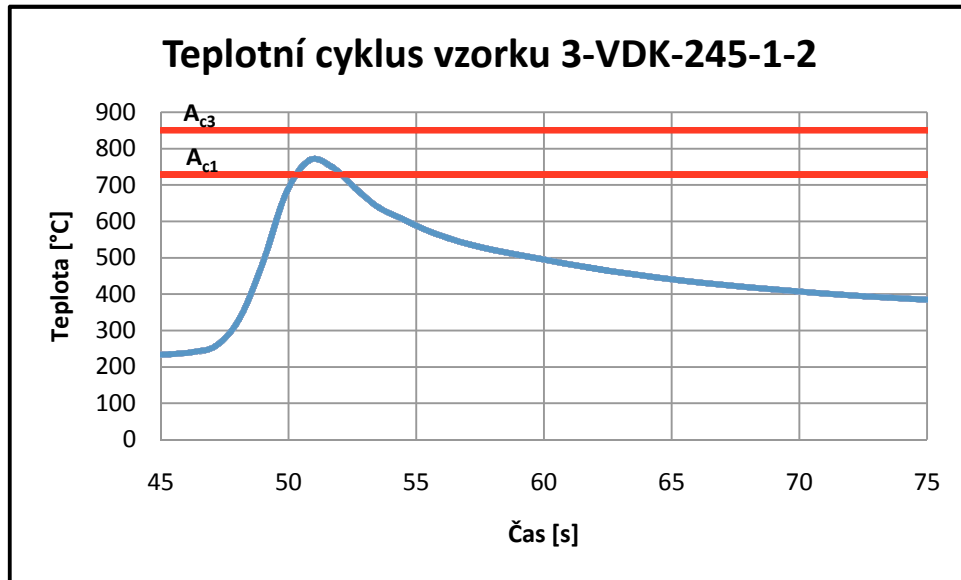
Obr. 20: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-1



Obr. 21: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-1 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-1-2

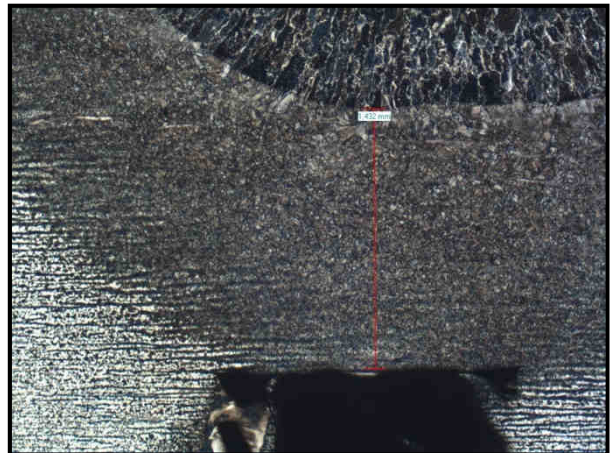
Tento vzorek se nachází v pásnu částečné překrytalizace. Maximální teplota u tohoto cyklu byla 768 °C. Vzdálenost od hranice ztavení k termočládku byla 1 432,3 μm.



Obr. 22: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-2



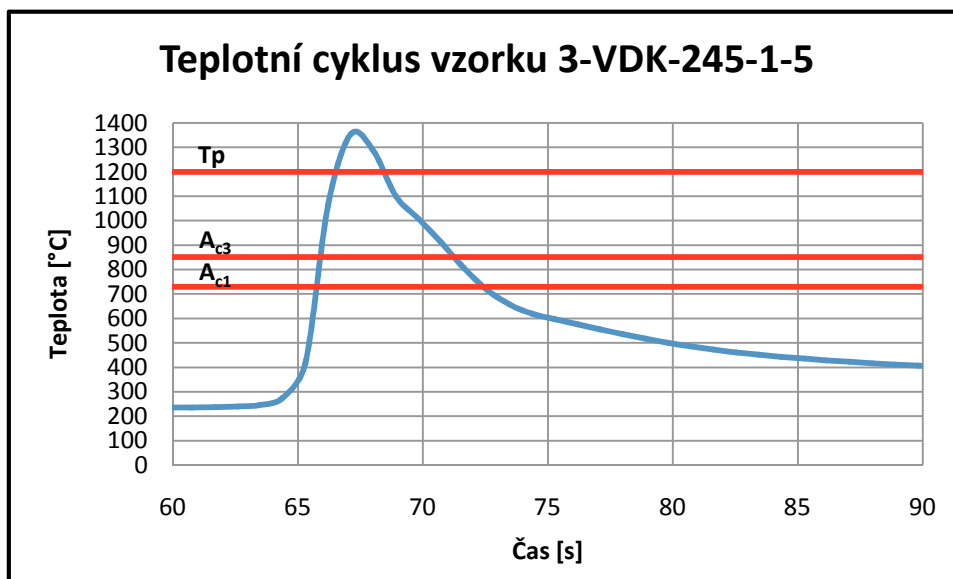
Obr. 23: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-2



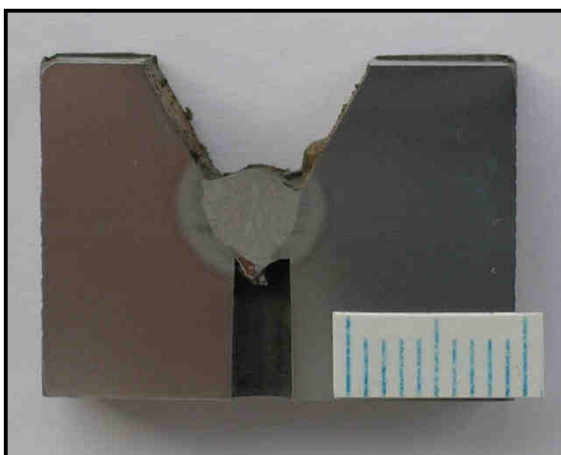
Obr. 24: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-2 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-1-5

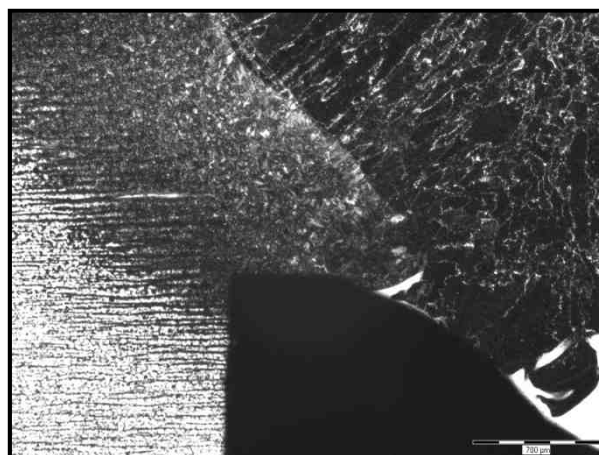
U tohoto vzorku se při svařování svarový kov protekl až k termočláнку (viz Obr. 26) a znehodnotil měření teplotního cyklu. Kvůli tomu je vzdálenost od hranice ztavení 0 μm . Naměřená teplota 1 354 $^{\circ}\text{C}$ je pouze orientační a je daná maximem rozsahu použitého termočláнку. Skutečná teplota u termočláнку je mnohem vyšší z důvodu protečení svarového kovu. Čas ochlazování z teploty 800 $^{\circ}\text{C}$ na 500 $^{\circ}\text{C}$ byl 8,6 sekundy.



Obr. 25: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-5



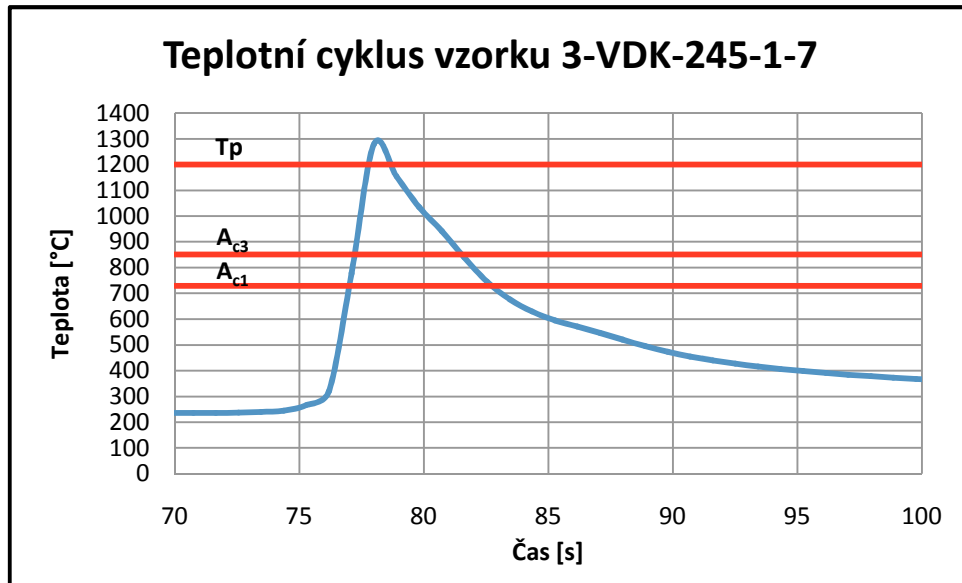
Obr. 26: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-5



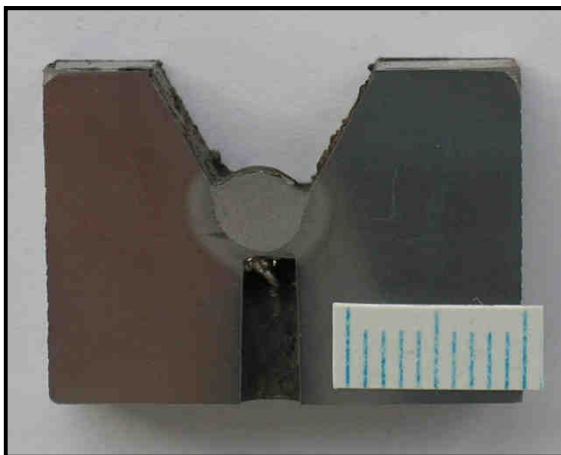
Obr. 27: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-5 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-1-7

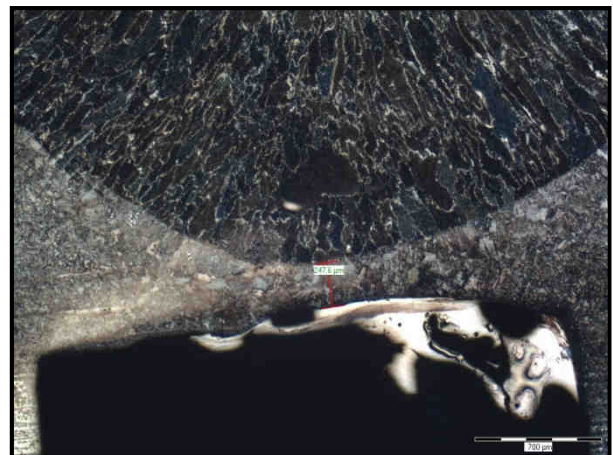
Tento vzorek je v pásmu přehřátí. Z mikrostruktury (viz Obr. 29) je viditelná hrubozrnná přehřátá zóna v místě termočlánku. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 1 280 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 6,3 sekundy. Vzdálenost od hranice ztavení k termočlánku byla 246,6 μm.



Obr. 28: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-7



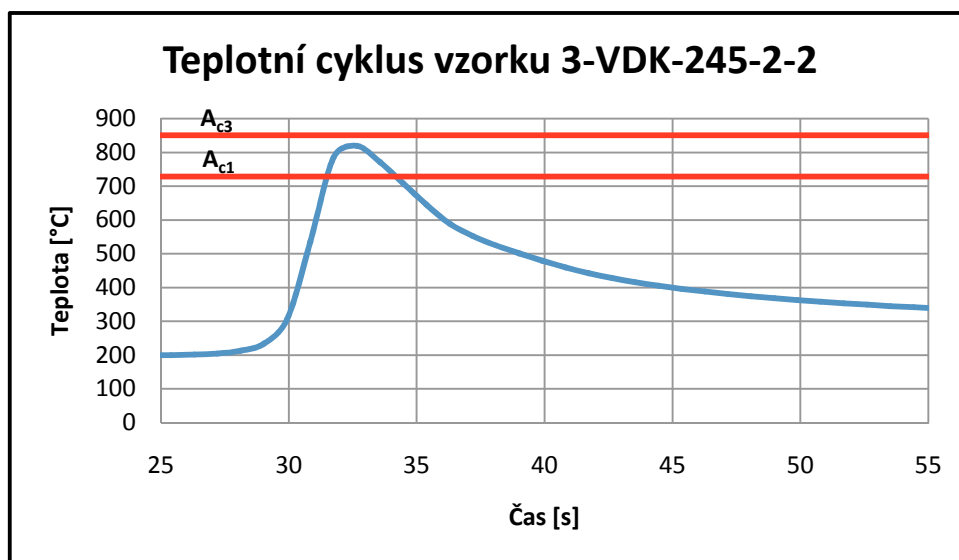
Obr. 29: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-7



Obr. 30: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-7 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-2-2

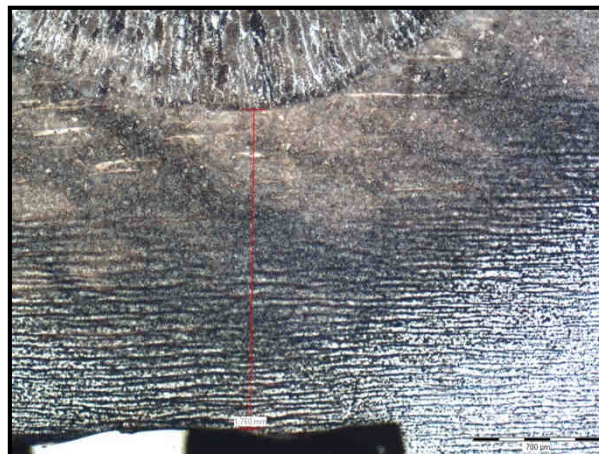
Tento vzorek se nachází v pásnu částečné překrytalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 820 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 6 sekund. Vzdálenost od hranice ztavení k termočlánku byla 1 760,1 μm.



Obr. 31: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-2



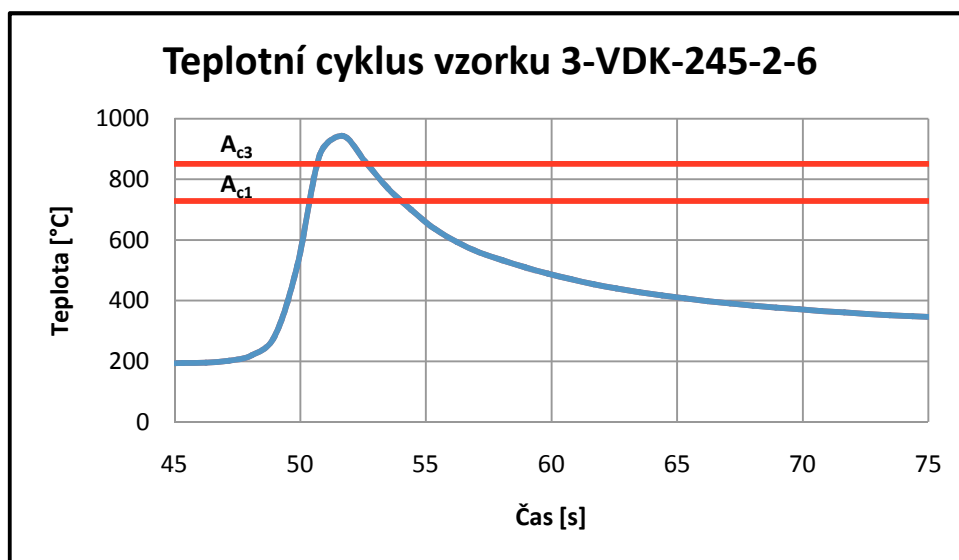
Obr. 32: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-2



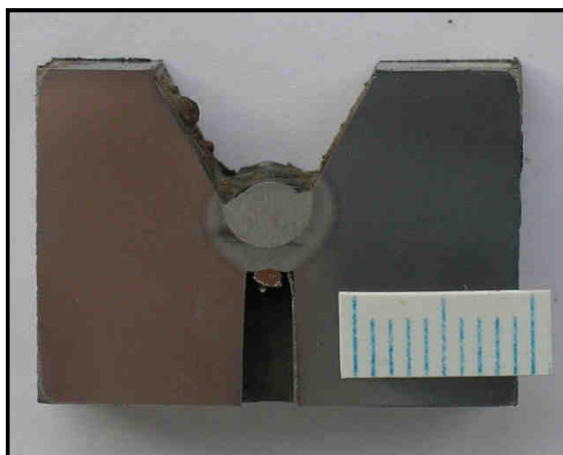
Obr. 33: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-2 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-2-6

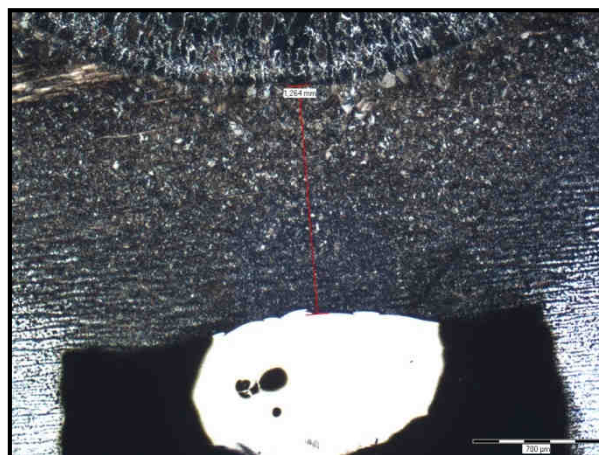
Tento vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 944 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 6 sekund. Vzdálenost od hranice ztavení k termočlánku byl 1 263,9 μm.



Obr. 34: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-6



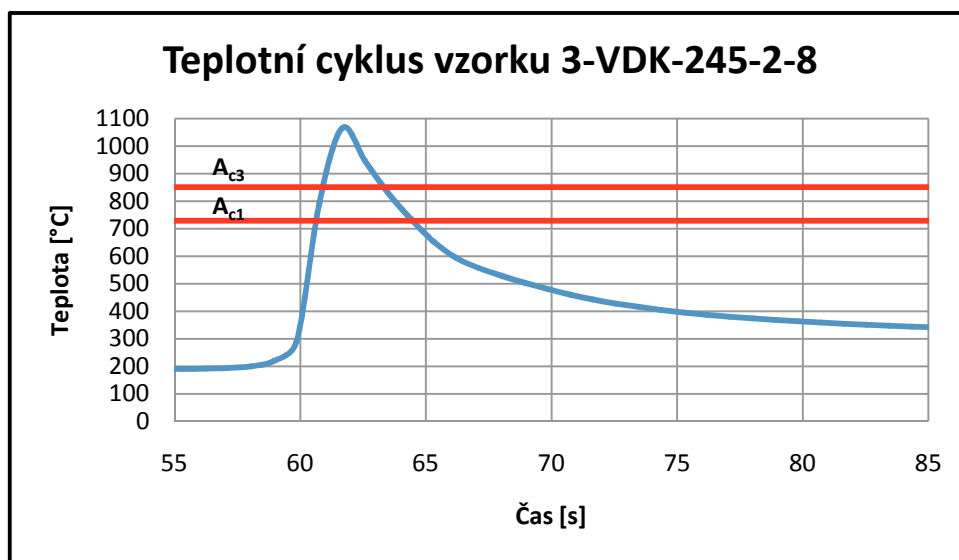
Obr. 35: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-6



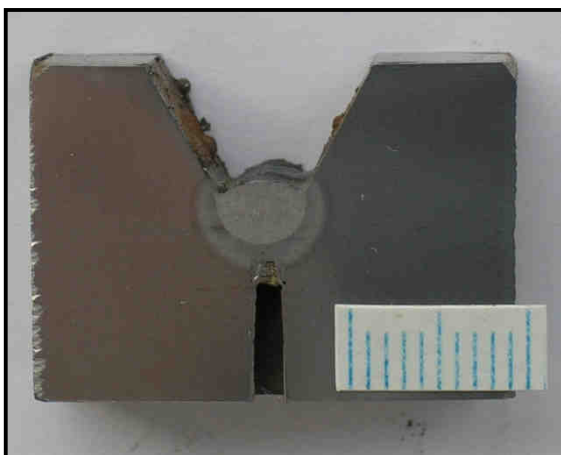
Obr. 36: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-6 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-245-2-8

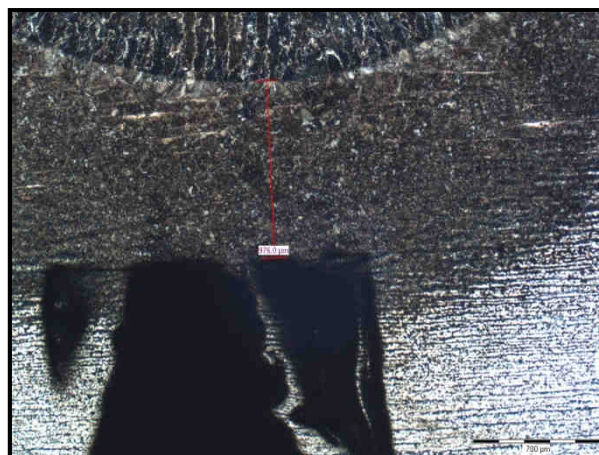
Tento vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 1 066 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 5,2 sekundy. Vzdálenost od hranice ztavení k teročlánku byl 976 μm.



Obr. 37: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-8



Obr. 38: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-8

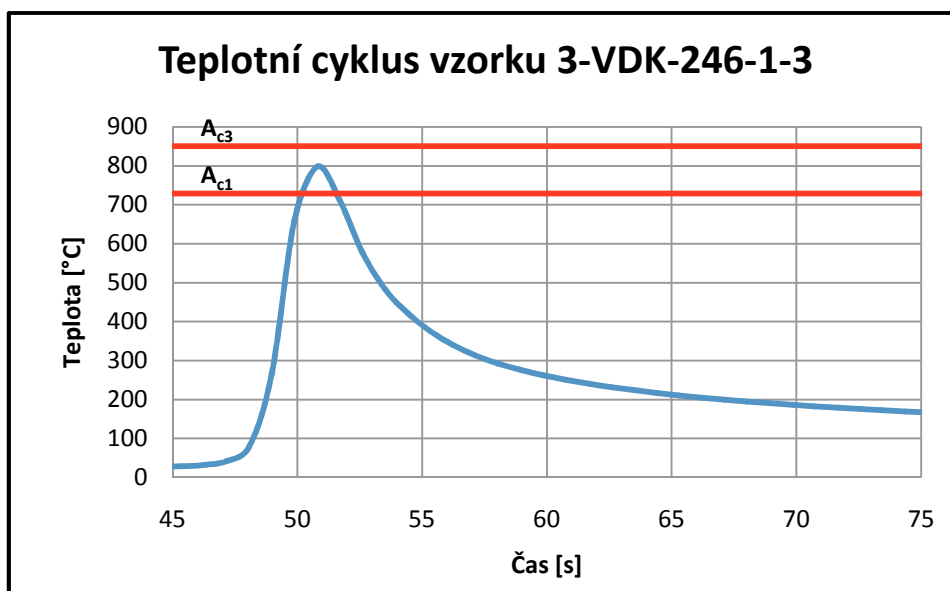


Obr. 39: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-8 při zvětšení 20x

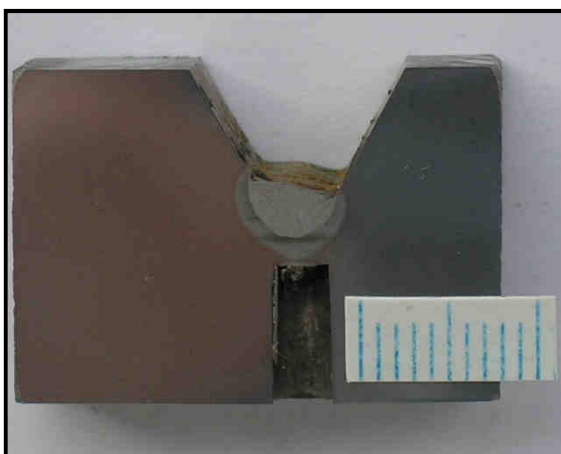
4.4.2 Metalografie vybraných vzorků z desky bez přehřevu

Vzorek 3-VDK-246-1-3

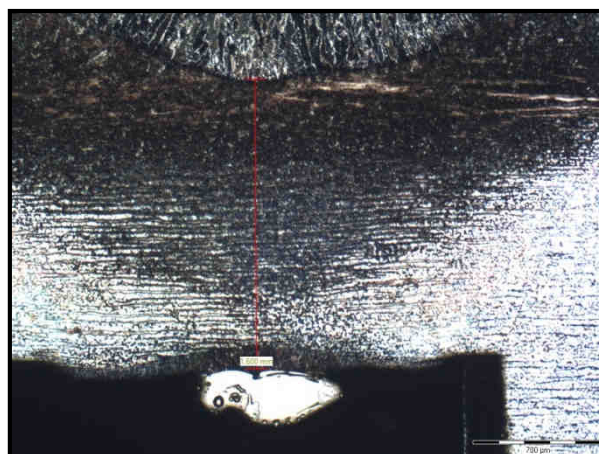
Tento vzorek se nachází v pásnu částečné překrytalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 799 °C. Vzdálenost od hranice ztavení k termočláňku byla 1 600,1 μm.



Obr. 40: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-1-3



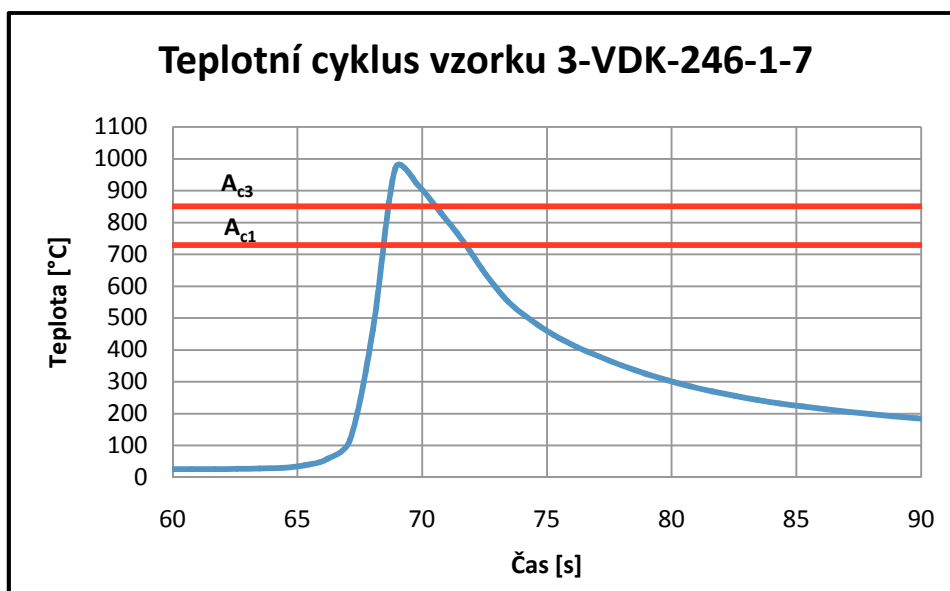
Obr. 41: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-3



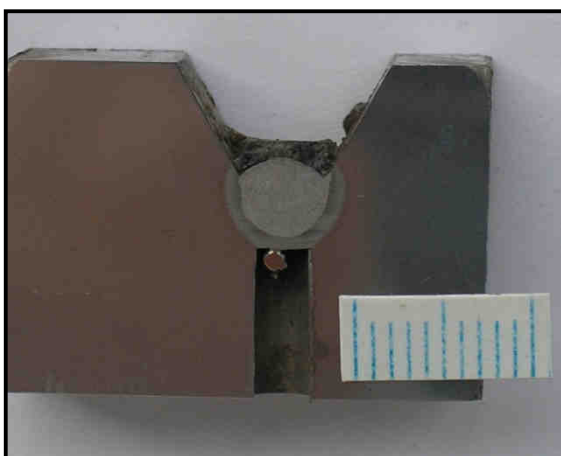
Obr. 42: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-3 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-246-1-7

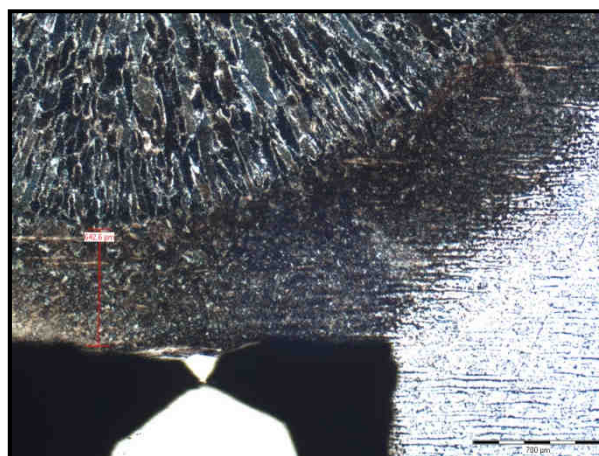
Tento vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 970 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 3 sekundy. Vzdálenost od hranice ztavení k termočládku byla 642,6 μm.



Obr. 43: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-1-7



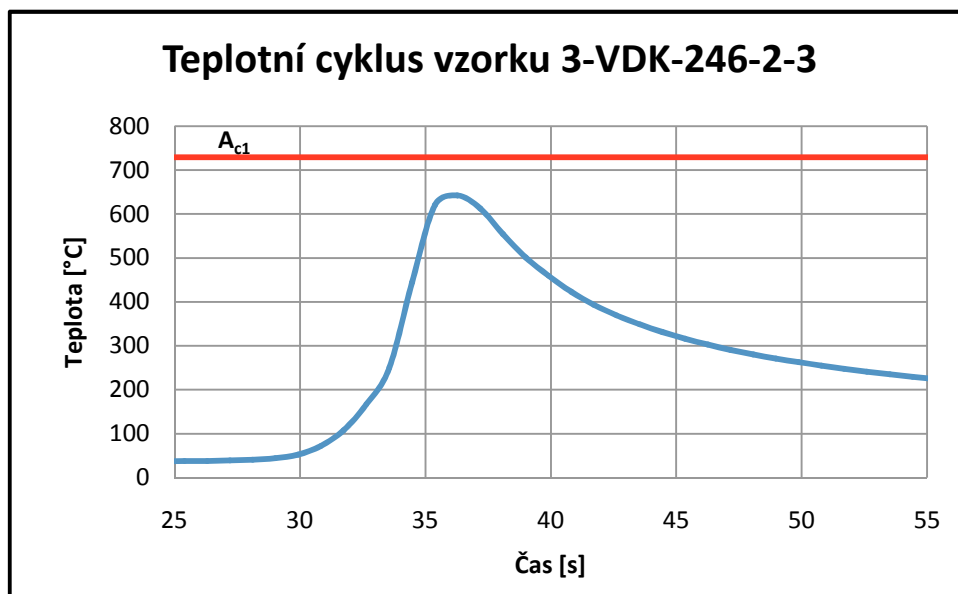
Obr. 44: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-7



Obr. 45: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-7 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-246-2-3

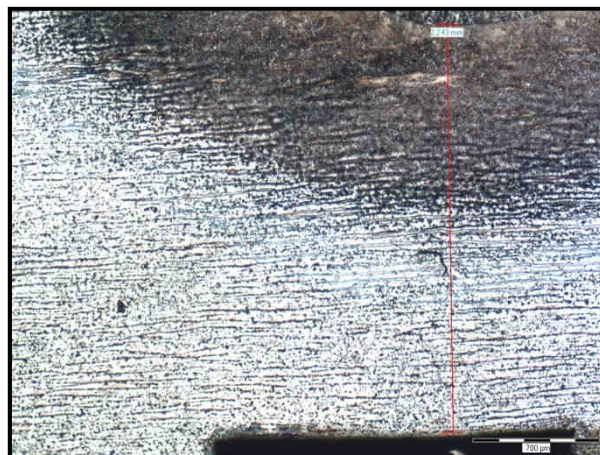
Tento vzorek se nachází ve vyžíhané oblasti. Maximální teplota tohoto cyklu byla 642 °C a vzdálenost od hranice ztavení k termočlánku je 2 243 μm.



Obr. 46: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-3



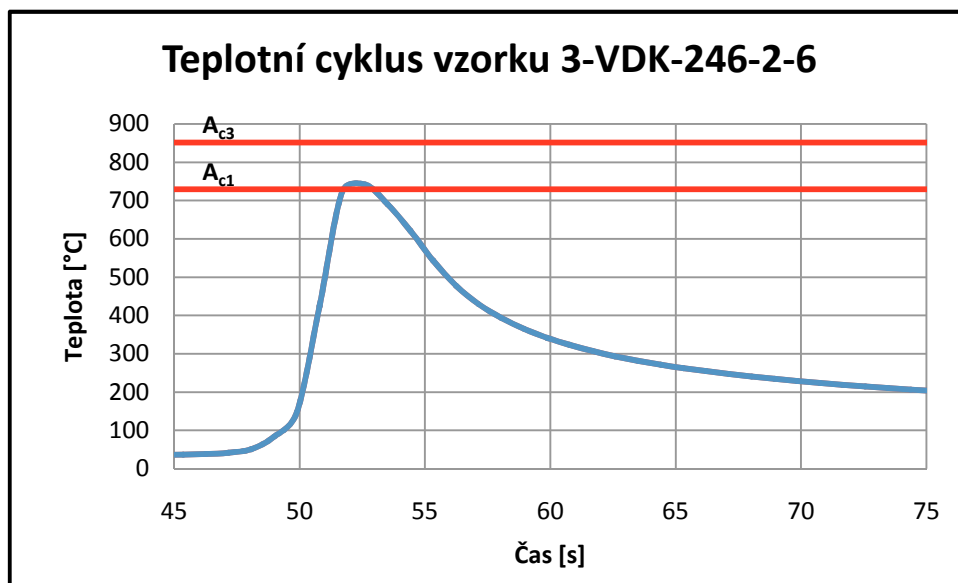
Obr. 47: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-3



Obr. 48: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-3
při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-246-2-6

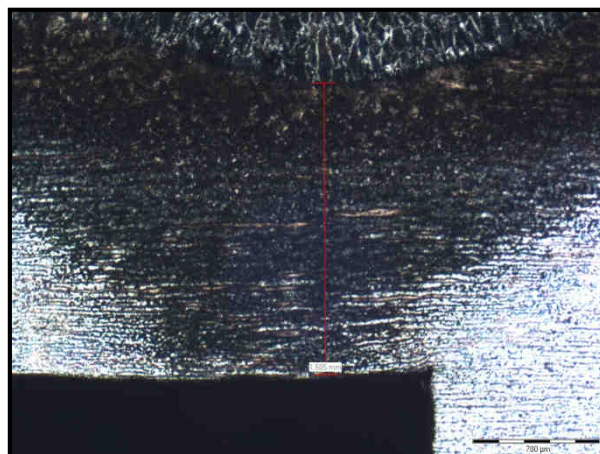
Tento vzorek se nachází v pásmu částečné překrytalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 742 °C. Vzdálenost od hranice ztavení k termočláнку byla 1 604,9 μm.



Obr. 49: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-6



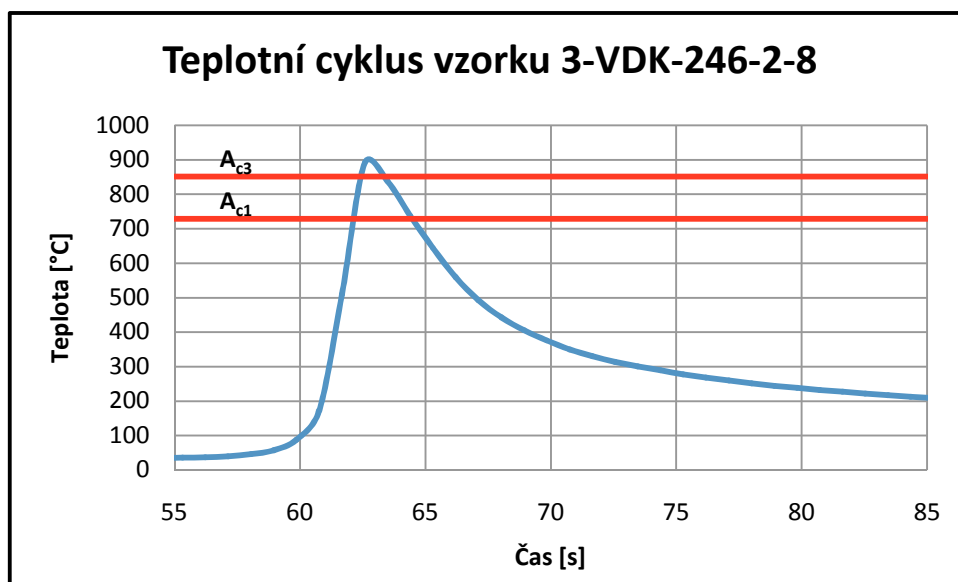
Obr. 50: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-6



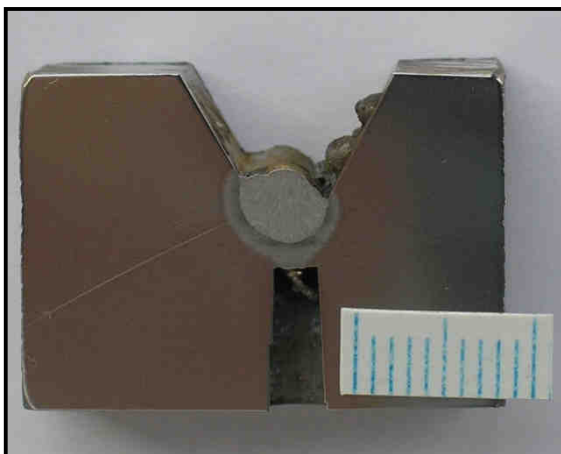
Obr. 51: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-6 při zvětšení 20x

Vzorek 3-VDK-246-2-8

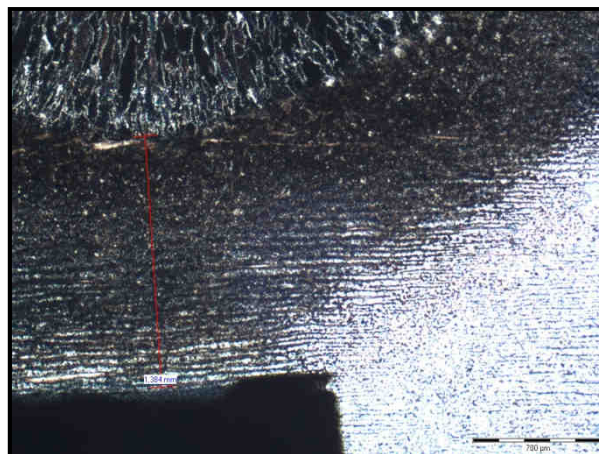
Tento vzorek se nachází v pásmu normalizace. Maximální teplota cyklu u tohoto vzorku byla 895 °C. Čas ochlazování z teploty 800 °C na 500 °C byl 3,1 sekundy. Vzdálenost od hranice ztavení k termočládku byla 1 348,1 μm.



Obr. 52: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-8



Obr. 53: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-8



Obr. 54: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-8 při zvětšení 20x

5 Srovnání naměřených cyklů s dostupnými literárními zdroji

Srovnání s teplotními cykly naměřenými na oceli P92

Naměřené teplotní cykly budou srovnány s diplomovou prací od Ing. Havelky [22]. Jeho měření teplotních cyklů na svarovém spoji probíhalo na žárovečné oceli P92. Srovnání bude provedeno u měření teplotních cyklů s předehřevem při svařování elektrodou o $\varnothing 2,5$ mm.

Tabulka 16: Parametry naměřených teplotních cyklů – elektroda $\varnothing 2,5$ mm [19]

Označení vzorku	T_{\max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [mm]
			845 °C (A_{C1})	945 °C (A_{C3})	
T1-El.2,5 (Vzorek 4.1)	951	17,95	5,5	2,3	-
T2-El.2,5 (Vzorek 4.2)	969	13,00	5,2	3,0	1,40
T3-El.2,5 (Vzorek 4.3)	857	6,40	1,2	-	1,79
T5-El.2,5 (Vzorek 4.5)	1 140	11,25	5,9	4,4	-
T6-El.2,5 (Vzorek 4.6)	1 081	11,00	5,1	3,6	-
T7-El.2,5 (Vzorek 4.7)	999	9,75	4,3	3,0	-
T8-El.2,5 (Vzorek 4.8)	1 036	9,50	4,6	3,0	-

Tabulka 17: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-1

Označení vzorku	T_{\max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μ m]
			734 °C (A_{C1})	845 °C (A_{C3})	
3-VDK-245-1-1	889	7,5	3,8	1,4	1 643,3
3-VDK-245-1-2	768	-	1,7	-	1 432,3
3-VDK-245-1-3	745	-	1,8	-	-
3-VDK-245-1-4	1 004	9,3	4,6	3,0	-
3-VDK-245-1-5	1 354	8,6	6,6	5,3	0
3-VDK-245-1-6	1 184	8	5,2	3,6	-
3-VDK-245-1-7	1 280	6,3	5,7	4,3	247,6
3-VDK-245-1-8	1 064	1,5	2,0	1,7	-

U teplotního cyklu vzorku 3-VDK-245-1-1 (viz Tabulka 17) a T3-El.2,5 (viz Tabulka 16) je rozdíl teplot 32 °C. Doba chladnutí u 3-VDK-245-1-1 je 7,5 s a u T3-El.2,5 je 6,4 s. U těchto teplotních cyklů vidíme odchylku doby chladnutí 1,1 s.

U dalšího teplotního cyklu vzorku 3-VDK-245-1-4 (viz Tabulka 17) a T7-El.2,5 (viz Tabulka 16) je rozdíl teplot nepatrný a to o 5 °C. Odchylka u těchto vzorků v době chladnutí je minimální a to 0,45 s.

Poslední vybrané teplotní cykly pro srovnání jsou 3-VDK-245-1-6 (viz Tabulka 17) a T5-El.2,5 (viz Tabulka 16). Jejich rozdíl teplot je 44 °C. Odchylka doby chladnutí je 1,75 s. Tato odchylka u doby chladnutí je maximální ze tří srovnávaných teplotních cyklů.

U vybraných teplotních cyklů je viditelné, že při rozdílu maximální dosažené teploty cca 30 °C se liší doba chladnutí $\Delta t_{8/5}$ v řádu sekund (0,45 s až 1,75 s). Tento rozdíl je nevýrazný vzhledem k tomu, že jednotlivé teplotní cykly byly naměřeny na různých ocelích (P92 a 16Mo3, tloušťka a rozměry zkušebních desek byly shodné).

Srovnání teplotních cyklů na desce s předehřevem a bez předehřevu

Pro srovnání jsou vybrány velmi podobné teplotní cykly při svařování s předehřevem a bez předehřevu.

Tabulka 18: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů

Označení vzorku	T_{\max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (A _{C1})	851 °C (A _{C3})	
3-VDK-245-1-4	1 004	9,3	4,6	3,0	-
3-VDK-246-1-6	1 026	3,4	3,5	2,3	-

Tabulka 19: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů

Označení vzorku	T_{\max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (A _{C1})	851 °C (A _{C3})	
3-VDK-245-1-8	1 064	1,5	2,0	1,7	-
3-VDK-246-1-8	1 089	1,1	2,6	2	-

Tabulka 20: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů

Označení vzorku	T_{\max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]	Vydrž na teplotě [s]		Vzdálenost od HZ [μm]
			729 °C (A _{C1})	851 °C (A _{C3})	
3-VDK-245-2-4	912	5	3,2	1,7	-
3-VDK-246-2-8	895	3,1	2,3	1,0	1 348,1

U vybraných teplotních cyklů můžeme pozorovat velké odchylky dob chladnutí mezi deskou s předehřevem a bez předehřevu. U desky s předehřevem vidíme pomalé ochlazení z teploty 800 °C na 500 °C z důvodu dodaného tepla při předehřevu. U desky svařované při pokojové teplotě vidíme rychlé ochlazení z teploty 800 °C na 500 °C. Při pomalém a plynulém ochlazení z vysokých teplot vzniká vhodnější struktura a nedochází ke vzniku trhlin.

6 Vyhodnocení dosažených výsledků

Tato bakalářská práce má hlavní přínos v naměření průběhu teplotních cyklů při svařování oceli 16Mo3 metodou ručního obloukového svařování obalenou elektrodou. V praktické části byly naměřeny data průběhu teplotních cyklů podle navrhnutého experimentu, ze kterých byly následně vytvořeny grafy. Z těchto grafů byly zjištěny maximální teploty, doby chladnutí $\Delta t_{8/5}$ pro jednotlivé teplotní cykly, výdrž na teplotě A_{c1} a A_{c3} .

Z ARA diagramu [21] byly zjištěny teploty A_{c1} a A_{c3} (kapitola 4.1). Teplota přehřátí vyplývá z literatury [12]. Z těchto teplot jsou vytvořeny rozsahy pásem jednotlivých oblastí.

Rozsah pásem jednotlivých oblastí:

- A_{c1} až A_{c3} – pásmo částečné překrystalizace => 729 °C až 851 °C
- A_{c3} až T_p – pásmo normalizace => 851 °C až 1200 °C
- více než T_p – pásmo přehřátí => nad 1 200 °C

Naměřené hodnoty teoreticky odpovídají stanoveným hodnotám. Z praktického hlediska mají největší přínos teplotní cykly při svařování s předeřevem. Proto jsem z těchto měření vybral reprezentativní cykly pro pásma jednotlivých oblastí.

Tabulka 21: Reprezentativní naměřené cykly na desce 3-VDK-245-1

	Označení vzorku	T_{max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]
Pásmo částečné překrystalizace	3-VDK-245-1-2	768	-
Pásmo normalizace	3-VDK-245-1-4	1 004	9,3
Pásmo přehřátí	3-VDK-245-1-7	1 280	6,3

Tabulka 22: Reprezentativní naměřené cykly na desce 3-VDK-245-2

	Označení vzorku	T_{max} [°C]	$\Delta t_{8/5}$ [s]
Pásmo částečné překrystalizace	3-VDK-245-2-2	820	6
Pásmo normalizace	3-VDK-245-2-6	944	6

7 Závěr

Svarové spoje jsou nejslabším článkem u komponent a konstrukcí pracujících za zvýšených teplot a tlaků z důvodu snížené odolnosti proti tečení v tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Proto je nutné věnovat svarovým spojům a jejich tepelně ovlivněné oblasti (TOO) velkou pozornost. Výsledky bakalářské práce mohou být využity pro simulování teplotních cyklů jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti. Jednotlivá pásma tepelně ovlivněných oblastí mají rozdílnou mikrostrukturu a mechanické vlastnosti, tedy i rozdílnou odolnost proti tečení. Zjistit mechanické a žárovevné vlastnosti jednotlivých pásem lze jen za použití metody modelování teplotních cyklů, ze kterých můžeme získat dostatečně velký vzorek s mikrostrukturou jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti (TOO).

Výsledky z této bakalářské práce jsou důležitým podkladem pro modelování teplotních cyklů při jednovrstvém svařování oceli 16Mo3. Je to tedy začátek rozsáhlého experimentálního projektu pro zjištění mechanických vlastností u jednotlivých pásem tepelně ovlivněné oblasti. Na základě měření mechanických a žárovevných vlastností v jednotlivých namodelovaných pásmech tepelně ovlivněné oblasti bude možno určit nejslabší a nejsilnější pásmo tepelně ovlivněné oblasti (TOO). Tyto výsledky přispějí k zvýšení životnosti a provozní spolehlivosti svařovaných komponent žárovevných ocelí.

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Mohylovi Ph.D. za cenné rady, užitečné připomínky a odborné vedení v průběhu vypracování mé bakalářské práce.

Také chci poděkovat pracovníkovi Českého svářečského ústavu Petrovi Pustějovskému za provedení svarových spojů na zkušebních deskách oceli 16Mo3. Současně děkuji Ing. Vladislavovi Ochodkovi a Ing. Lukášovi Havelkovi za pomoc při experimentální části. Dále chci poděkovat Naděždě Brychtové za pomoc při zjištění makrostruktury a mikrostruktury vybraných vzorků ze zkoumaných desek po vlastním svaření. V neposlední řadě chci poděkovat firmě Flash Steel Power, a.s. za poskytnutí zkušebních desek z oceli 16Mo3.

Seznam použité literatury

- [1] FREMUNT, P., PODRÁBSKÝ, T. *Konstrukční oceli*. Brno: Cerm, 1996. 261 s. ISBN 80-85867-95-8.
- [2] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. Skripta pro výuku svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
- [3] JECH, D. *Struktura a vlastnosti svarového spoje rotorových ocelí* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-04-11]. 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, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Foret, CSc.
- [4] KLUEH, E. L.; NELSON, A. T. *Ferritic/martensitic steels for next-generation reactors*. Journal of Nuclear Materials [online]. 2007, vol. 371, no. 1-3, s. 37-52 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022311507007398>
- [5] FOLDYNA, V.; KUBOŇ, Z.; SCHELLONG, T.; KÜBEL, Z. *How to improve creep rupture strength of microalloyed steels*. METAL [online]. 2001, s. 1-11 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2001/sbornik/papers/112.pdf>
- [6] 16Mo3_1.5415_engl. In: [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.s-k-h.com/media/de/Service/Werkstoffblaetter_englisch/Kesselrohre_EN/16Mo3_1.5415_engl.pdf
- [7] HOFFMANN, M.; BIERMANN, H. *Static and Cyclic Deformation Behavior of the Ferritic Steel 16Mo3 Under Monotonic and Cyclic Loading at High Temperatures*. Steel research international [online]. 2012, vol. 83, no. 7, s. 631-636 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/srin.201100238/full>
- [8] YUSHENG IRON AND STEEL CO.,LIMITED. *EN 10028-2 16Mo3*. In: [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: <http://www.ysteelplate.com/EN10028-16Mo3.html>
- [9] Bohdan Bolzano s.r.o. *EN 10028-2*. In: [online]. [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://prirucka.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/konstrukcni_oceli/normy_tdp/EN10028_2/

- [10] VODÁREK, V. *Fyzikální metalurgie modifikovaných (9-12)% Cr ocelí*, monografie VŠB – TUO, Ostrava: VŠ - TUO, 2003. 163 s. ISBN 80-248-0329-1.
- [11] HODIS, Z. *Difúze uhlíku a dusíku ve svarových spojích žárovečných feritických ocelí* [online]. Brno, 2009 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3854/disertace_Hodis.pdf?sequence=1. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce doc. RNDr. Jiří Sopoušek, CSc.
- [12] KOUKAL, J., ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.* skripta VŠB – TUO. Ostrava: VŠB – TUO, 2005. 133 s. ISBN 80-248-0870-6.
- [13] CHURÝ, T. *Materiály a způsoby jejich svařování při výrobě rotorů parních turbín* [online]. Brno, 2012 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/12777/2012_BP_Chury_Tomas_126061.pdf?sequence=1 Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Ing. Martin Juliš, Ph.D.
- [14] MOHYLA, P., KOUKAL, J. *Svařitelnost uhlíkových, mikro a nízkolegovaných ocelí pro tlaková zařízení* [online]. Ostrava, 2009 [cit. 2013-04-18]. Dostupné z: http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/Svaritelnost_oceli.doc
- [15] URBAN, V. *Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli* [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/7868/DP_Urban_V.pdf?sequence=1 Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [16] NĚMEC, K. *Vliv vneseného tepla na vlastnosti a strukturu svarového spoje duplexní oceli* [online]. Brno, 2010 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26902 Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [17] KRÍŽEK, S. *Nové materiály ve svařování* [online]. Brno, 2008 [cit. 2013-04-11]. Dostupné z:

- <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3848/Stanislav%20K%C5%99%C3%AD%C5%BEek,%20NOV%C3%89%20MATERI%C3%81LY%20VE%20SVA%C5%98OV%C3%81N%C3%8D,%202008.pdf?sequence=1>> Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [18] ESAB VAMBERK, s.r.o. *ESABvyber2012_cz*. In: [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: http://products.esab.com/ESABImages/ESABvyber2012_cz.pdf>
- [19] OMEGA Engineering, INC. *Thermocouple Color Codes*. In: [online]. [cit. 2013-04-20]. Dostupné z: <http://www.omega.com/techref/colorcodes.html>>
- [20] GORNI, A. A. *Steel forming and heat treating handbook* [online]. Brazílie, 2013 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: http://www.gorni.eng.br/e/Gorni_SFHTHandbook.pdf>
- [21] 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 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: <http://bib.irb.hr/datoteka/544625.001-013-sbz2011.pdf>>
- [22] HAVELKA, L. *Měření teplotních cyklů svarových spojů oceli P92* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2013-04-22]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/93808/HAV369_FS_N2301_2303T002_20_2012.pdf?sequence=1> Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechanické technologie. Vedoucí práce: Ing. Petr Mohyla, Ph.D.

Seznam obrázků

Obr. 1: Závislost ochlazování $t_{8/5}$ a rychlosti chladnutí $v_r(T)$ na průběhu teplotního cyklu.....	19
Obr. 2: Průběh teplotních cyklů.....	20
Obr. 3: Dvojměrné teplotní pole v nekonečném plechu.....	21
Obr. 4: Trojměrné teplotní pole.....	22
Obr. 5: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje.....	23
Obr. 6: Návrh desky pro svařování při pokojové teplotě.....	25
Obr. 7: Návrh desky pro svařování s předeřevem.....	26
Obr. 8: Parametry použité elektrody při svařování od firmy ESAB.....	27
Obr. 9: Připravené termočlánky s kapilárou pro přivaření ke dnu plochých děr.....	28
Obr. 10: Měřicí stanice s připojeným kompenzačním vedením.....	28
Obr. 11: Přivařené termočlánky kondenzátorovou odporovou svářečkou ke dnu díry.....	29
Obr. 12: Deska číslo 3-VDK-245 pro měření teplotních cyklů s předeřevem.....	29
Obr. 13: ARA diagram 16Mo3.....	30
Obr. 14: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-1.....	31
Obr. 15: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-2.....	33
Obr. 16: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-246-1.....	34
Obr. 17: Průběh teplotních cyklů při svařování na desce 3-VDK-245-2.....	35
Obr. 18: Broušící zařízení Abramin od firmy Struers.....	37
Obr. 19: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-1.....	38
Obr. 20: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-1.....	38
Obr. 21: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-1 při zvětšení 20x.....	38
Obr. 22: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-2.....	39
Obr. 23: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-2.....	39
Obr. 24: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-2 při zvětšení 20x.....	39
Obr. 25: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-5.....	40
Obr. 26: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-5.....	40
Obr. 27: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-5 při zvětšení 20x.....	40
Obr. 28: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-1-7.....	41
Obr. 29: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-7.....	41
Obr. 30: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-1-7 při zvětšení 20x.....	41
Obr. 31: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-2.....	42
Obr. 32: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-2.....	42

Obr. 33: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-2 při zvětšení 20x.....	42
Obr. 34: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-6	43
Obr. 35: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-6.....	43
Obr. 36: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-6 při zvětšení 20x.....	43
Obr. 37: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-245-2-8	44
Obr. 38: Makrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-8.....	44
Obr. 39: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-245-2-8 při zvětšení 20x.....	44
Obr. 40: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-1-3	45
Obr. 41: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-3.....	45
Obr. 42: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-3 při zvětšení 20x.....	45
Obr. 43: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-1-7	46
Obr. 44: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-7.....	46
Obr. 45: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-1-7 při zvětšení 20x.....	46
Obr. 46: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-3	47
Obr. 47: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-3.....	47
Obr. 48: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-3 při zvětšení 20x.....	47
Obr. 49: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-6	48
Obr. 50: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-6.....	48
Obr. 51: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-6 při zvětšení 20x.....	48
Obr. 52: Průběh teplotního cyklu při svařování u vzorku 3-VDK-246-2-8	49
Obr. 53: Makrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-8	49
Obr. 54: Mikrostruktura vzorku 3-VDK-246-2-8 při zvětšení 20x.....	49

Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické složení vybraných nízkolegovaných žárovevných ocelí	13
Tabulka 2: Chemické složení 16Mo3 dle EN 10028-2	14
Tabulka 3: Mechanické vlastnosti 16Mo3.....	14
Tabulka 4: Mez kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách 16Mo3	14
Tabulka 5: Chemické složení vybraných vysokolegovaných žárovevných ocelí	15
Tabulka 6: Chemické složení vybraných austenitických žárovevných ocelí	16
Tabulka 7: Minimální teplota přehřevu, minimální teplota interpass a maximální teplota interpass	17
Tabulka 8: Parametry svařování na desce 3-VDK-245-1	32
Tabulka 9: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-1	32
Tabulka 10: Parametry svařování na desce 3-VDK-245-2.....	33
Tabulka 11: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-2.....	33
Tabulka 12: Parametry svařování na desce 3-VDK-246-1	34
Tabulka 13: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-246-1.....	35
Tabulka 14: Parametry svařování na desce 3-VDK-246-2.....	36
Tabulka 15: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-246-2.....	36
Tabulka 16: Parametry naměřených teplotních cyklů – elektroda \varnothing 2,5 mm	50
Tabulka 17: Parametry naměřených teplotních cyklů na desce 3-VDK-245-1.....	50
Tabulka 18: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů	52
Tabulka 19: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů	52
Tabulka 20: Vybrané parametry pro srovnání teplotních cyklů	52
Tabulka 21: Reprezentativní naměřené cykly na desce 3-VDK-245-1	53
Tabulka 22: Reprezentativní naměřené cykly na desce 3-VDK-245-2.....	53

Seznam příloh

Příloha A - Výkres desky 3-VDK-245

Příloha B - Výkres desky 3-VDK-246

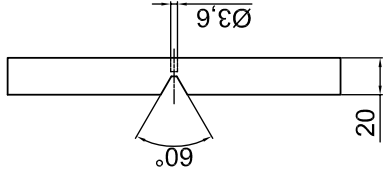
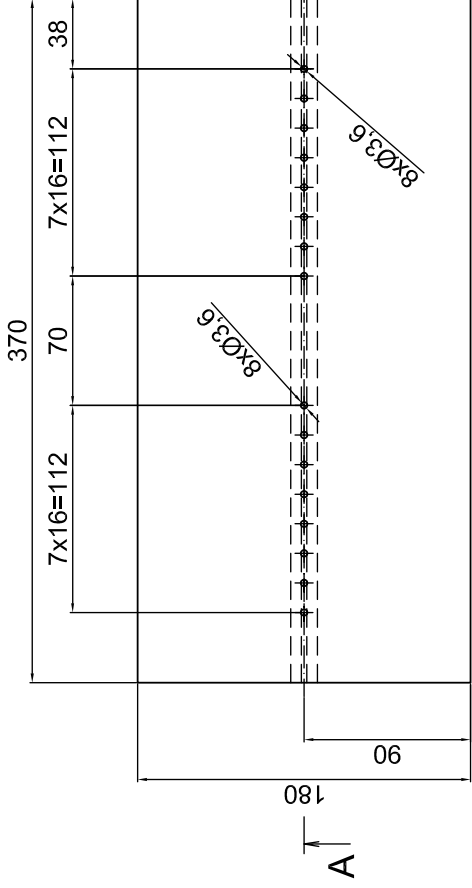
Příloha C - Záznam o svařování desky 3-VDK-245

Příloha D - Záznam o svařování desky 3-VDK-246

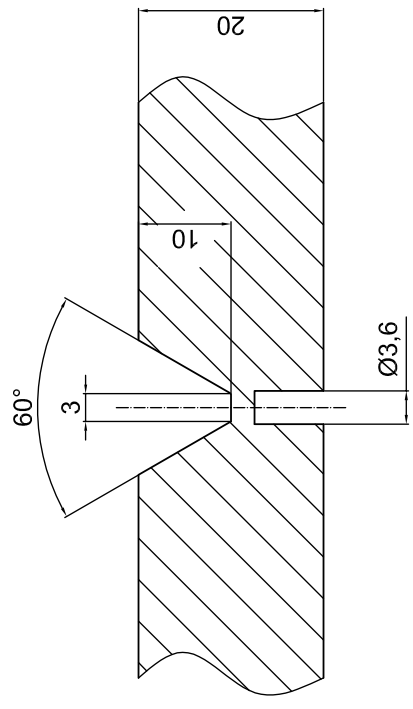
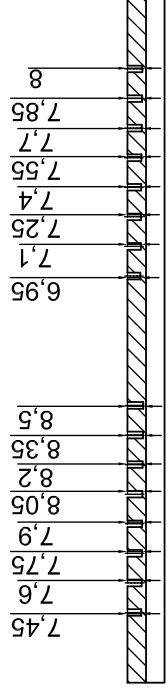
Příloha E - Atest oceli 16Mo3

Příloha A

Výkres desky 3-VDK-245



A-A



INDEX	POČET	ZNAČKA	POJEM	POJEM	POJEM	POJEM	POJEM
KRESIL	KONTROLOVAL	NORMA	REFERENT	TEPELNÝ TECHNOLOG	SVAR	TECHNOLOG	SCHVÁLIL
VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE
21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013	21.3.2013
ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F	ESD 278P-C-K, ESD 139P-C-F
CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg	CELOVNÍ HMOTNOST kg
DESKA	DESKA	DESKA	DESKA	DESKA	DESKA	DESKA	DESKA
FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL	FLASH STEEL
3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245	3-VDK-245
VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE	VERZE
1	1	1	1	1	1	1	1
CZ	CZ	CZ	CZ	CZ	CZ	CZ	CZ
1	1	1	1	1	1	1	1

Příloha B

Výkres desky 3-VDK-246

ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ	Akreditovaný postup	Registrační č.	Strana
			1/2

Norma:	-		
Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:	-		
Postup svařování výrobce (pWPS):	-		
Datum svařování:	4. 4. 2013	Místo svařování:	Český svářečský ústav s.r.o.
Jméno svářeče:	Petr Pustějovský	Kvalifikace svářeče:	

ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)			
Značka dle standardu:	16Mo3		
Další označení:	-		
Tloušťka:	20	Vnější průměr:	-

SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)					
Index SM	Typ	Označení výrobce	Výrobce	Norma: Klasifikace	Režim sušení
A	ELDA	OK 48.00	ESAB		
B					
C					
D					
E					

SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS				
Typ svarového spoje:	Tupý		Označení zkušebního spoje:	-
Způsob přípravy úkosu:	Frézováním		Způsob čištění:	-
Metoda svařování:	111		Poloha svařování:	PA
Wolframová elektroda (Typ/Velikost):	-		Drážkování kořene:	-
Ochrana svaru (Index SM):	B		Množství:	-
Ochrana kořene (Index SM):	-		Množství:	-
Další informace (je-li požadováno):				
Rozkvy (šířka housenky):	-		Vzdálenost kontaktní špičky:	-
Údaje o pulsním svařování:	-		Sklon hořáku:	-

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT			
PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING		PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)	
Teplota předehřevu:	200 °C	Rychlost ohřevu:	-
Interpass teplota:	max. 300 °C	Teplota/Čas výdrže:	- /-
Teplota/Čas dohřevu:	-/-	Rychlost ochlazování:	-
Další informace:	-	Další informace:	-

ZÁZNAM O SVAŘOVÁNÍ SCHVÁLENÍ POSTUPU SVAŘOVÁNÍ	Akreditovaný postup	Registrační č.	Strana
			1/2

Norma:	-		
Doplňkové požadavky mimo rozsah ČSN EN 288:	-		
Postup svařování výrobce (pWPS):	-		
Datum svařování:	4. 4. 2013	Místo svařování:	Český svářečský ústav s.r.o.
Jméno svářeče:	Petr Pustějovský	Kvalifikace svářeče:	

ZÁKLADNÍ MATERIÁL(Y) / PARENT MATERIAL(S)			
Značka dle standardu:	16Mo3		
Další označení:	-		
Tloušťka:	20	Vnější průměr:	-

SVAŘOVACÍ MATERIÁLY (SM) / WELDING MATERIALS (WM)					
Index SM	Typ	Označení výrobce	Výrobce	Norma: Klasifikace	Režim sušení
A	ELDA	OK 48.00	ESAB		
B					
C					
D					
E					

SVAŘOVACÍ PODMÍNKY / WELDING CONDITIONS				
Typ svarového spoje:	Tupý		Označení zkušební spoje:	-
Způsob přípravy úkosu:	Frézováním		Způsob čištění:	-
Metoda svařování:	111		Poloha svařování:	PA
Wolframová elektroda (Typ/Velikost):	-		Drážkování kořene:	-
Ochrana svaru (Index SM):	B		Množství:	-
Ochrana kořene (Index SM):	-		Množství:	-
Další informace (je-li požadováno):				
Rozkvy (šířka housenky):	-		Vzdálenost kontaktní špičky:	-
Údaje o pulsním svařování:	-		Sklon hořáku:	-

TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ / HEAT TREATMENT			
PŘI SVAŘOVÁNÍ / DURING WELDING		PO SVAŘOVÁNÍ / AFTER WELDING (PWHT)	
Teplota předehřevu:	-	Rychlost ohřevu:	-
Interpass teplota:	-	Teplota/Čas výdrže:	- /-
Teplota/Čas dohřevu:	-/-	Rychlost ochlazování:	-
Další informace:	-	Další informace:	-

Příloha E
Atest oceli 16Mo3

A04/A1



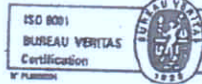
ISD TRADE SP. Z O.Ó. SP. K.

02-627 WARSZAWA UL. NARUSZEWICZA 9

A02
SWIADECTWO ODBIORU
 Inspection certificate/Abnahmeprüfzeugnis
 wg. PN EN 10204/06-3.1

Nr. A03 294/AK/12/1-1

Date: 2012.02.27



A05 Wystawca 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

A09 Specyfikacja/Specification/Spezifikation N°: 12/02 5976

Lot N°:

A08 Nr potwierdzenie_Huty/ Our Confirm. N°
/Unsere Auftrags N°.
203-5020A07 Kontrakt / to Order Note / zu Lieferanzeige N°
1112311B09+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. BB02 Gatunek/Grade/Güte:
16M03

EN 10028-2:2009

B04 Stan dostawy/State of Delivery/Lieferzust.:

B07 Nr wytopu Heat N° Schmelze Nr	C00/C02 Kier. i nr próby Sample N° and orientat Probe N° und richtung Q	C11 Granica Plast. Yield stress Streckgr MPa Re	C12 Granica wytrzm. Tensile Strength Zugfestig- keit MPa Rm	C13 Wydl. Elong. Bruch- Dehnung % A5	C40 - C49 Próba uderności / Impact test / Kerbschlag test								C43 Wart Średnia Average Mittel wert	C30/C32 Twardość Hardness Test HRC HBW
					C45 Energia praca Energy work Kerbschlag Arbei	C02 Kier. Próby Sample orientat Proben Lage Q	C40/C41 Typ próby Sample type Typ Probenart	C03 Temp. °C	C42					
									Udam. Impact value Kerb Schlag	Udam. Impact value Kerb Schlag	Udam. Impact value Kerb Schlag			
577937	220147 K	353	486	30.7	J	Q	KV2/300	+20	1.	2.	3.	90		
577937	220147 F	358	494	30.6	J	Q	KV2/300	+20	81	106	82	94		

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

B07 Nr wytopu Heat N° Schmelze N°	B08 Szt. Pcs. Taf.	B13 Masa Weight Masse [Mg]	C71 - C92 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

Erweichungsverfahres / EAF-Oxygen Electric Arc Furnace/Nr wytopu / Heat N° / Schmelze N° / Zakres blach/ Plate N°/Waltztafel N° / Badania dodatkowe/ Additional Tests / Prüfungen Zusätzliche:
EAF-577937:220147-2

C70/D01

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

Bl.spelnia wymogi dyrektywy 97/23/BG/Grobl.erfullen die Anforderungen nach die Direkt.97/23/BG.Zert.01 202 PL/Q-04 0004

Energostal Torun

D02 - D50
D51 - D99

Q- Poprzeczna/Quer/ Transverse L- Wzdłużna/Längs/ Longitudinal F- Stopa/Bottom/Fuss K- Głowa/Top/Kopf	Blachy warkowane/ Plates Markings/Kennzeichnung: Znak producenta/Mark of the Manufacturer/Zeichen d. Herstellwerk Gatunek /Grade/Güte, Nr pasma / Plate N° / Waltztafel N°. Nr wytopu / Heat N°/Schmelze N°. Znak KJ/ Quality Control's Stamp / Zeichen d. Technische Kontrolle Znak inspektora / Inspector's Stamp / Zeichen d. Sachverständigen	B06 St. Strojecki 2012.02.27 Specjalista Kontrolni / Wertis Inspector/ Der Werksachverständige	Z02	Z03
Niniejszym potwierdzam się, że dostawa została sprostolowana i odpowiada warunkom zamówienia./We hereby certify, that the material described above has been tested and complies with terms of the order contract./ Es wird bestätigt, as die Lieferung geprüft wurde und den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht.				
ISD HUTA STALI CZĘSTOCHOWA SP.Z O.O. JEST WYTWÓRCĄ UŻYKANYM PRZEZ URZĄD DOZORU TECHNICZNEGO ODDZIAŁ CZĘSTOCHOWA NR.M-04-S/5-01. Badanie radioaktywności-wywnik <0.1 Bq/g / Radioactivity value <0.1 Bq/g				