



Optimalizace procesu rovnání po svařování ve firmě Bombardier Transportation a.s.

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Jan Krejčí**
Vedoucí práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan Krejčí**
Osobní číslo: **S14000298**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Optimalizace procesu rovnání po svařování ve firmě Bombardier Transportation a.s.**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Seznamte se s problematikou svařování kolejových vozidel (výhody, nevýhody, vstupy).
2. Seznamte se s problematikou rovnání po svařování ve firmě Bombardier Transportation a.s.
3. Prostudujte a popište způsob vzniku deformací po svařování.
4. Navrhněte a realizujte experimentální program.
5. Vyhodnoťte experimentální program, výsledky zpracujte.
6. Aplikujte získané výsledky na konkrétní vyráběnou podskupinu.
7. Stanovte závěry z dosažených výsledků a proveďte doporučení pro aplikaci ve výrobě.



Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **HRSTKA, D.** *Vliv směsi plynu na efektivitu provedení svaru a stabilitu procesu MAG.* /Diplomová práce/, Liberec 2007, TU Liberec, FS.
[2] **DuPONT, J.N., MARDER, A.J.** Thermal Efficiency of Arc Welding Processes. *Welding Journal*, Dec.1995, 406- 416 s.
[3] **AWS Welding Handbook.** Welding Science and Technology. 9th Ed., Vol.1, 2001.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **31. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **31. března 2017**

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan



Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Optimalizace procesu rovnání po svařování ve firmě Bombardier Transportation a.s.

Optimization of straightening process after welding in Bombardier Transportation a.s.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na rovnání deformací po svařování pomocí kyslíko-acetylenového plamene. Cílem je analyzovat a popsat proces rovnání tak, aby bylo zřejmé, jaké jsou hlavní proměnné, v jakých mezích je lze korigovat a jaký je jejich vliv na rovnaný materiál a jeho strukturu.

V teoretické části práce je popsán způsob vzniku napětí vlivem vnesené tepelné energie, což má přímý vliv na velikost deformací. Dále jsou zde uvedeny druhy rovnání po svařování, ale i zařízení a druhy plamene používané při rovnání. Část teorie je věnována materiálům používaným v Bombardier Transportation Czech Republic a.s.

Experimentální část práce je pak zaměřena na analýzu současného stavu rovnání ve firmě Bombardier, stanovení rychlosti ohřevu pro různé druhy nastavení plamene, vliv rovnání na strukturní změny v materiálu S355J2C+N a vyhodnocení tvrdosti v teplem zasažené oblasti. Na vzorcích odpovídajících realitě pak byla hledána optimální sekvence ohřevových bodů vedoucí k co největší eliminaci deformací vzniklých po svařování.

Klíčová slova: rovnání, kyslíko-acetylenový plamen, ohřev materiálu, ocel S355J2C+N

Annotation

The dissertation is focused on straightening of deformations after welding with oxy-acetylene flame. The target is to analyze and describe the straightening process so that is obvious what are the main variables, in which limits are they possible to adjust and how is their impact on the straightening material and its structure.

The theoretical part describes the way of producing tension due to the introduced thermal energy, which has direct impact on the degree of deformations. Furthermore there are defined types of straightening after welding and also device and type of flames using by straightening. One part of theory is dedicated to materials using in Bombardier Transportation Czech Republic a.s.

The experimental part of the dissertation is focused on the analysis of the current state of straightening in the company Bombardier, on determination of the speed of material heating for various setting of the flame, on the effect of the straightening on the structure changes in material S355J2C+N and on assessment of the hardness in the heat-affected part. On the real samples there was searched for optimal sequence of heating points which should lead to the greatest possible elimination of deformations after the welding.

Keywords: straightening, oxy-acetylene flame, material heating, S355J2C+N steel

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval zejména vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. Dále bych chtěl poděkovat mému konzultantovi diplomové práce, Ing. Marku Rusému. Velký dík patří také dalším kolegům z firmy Bombardier Transportation Czech Republic a.s., kteří mi byli nápomocni při realizaci experimentu, a to Karlu Slámovi, Tomáši Lebruškovi, Davidu Hamimu, Jiřímu Radovi a Miroslavu Strnadovi. V neposlední řadě také děkuji kolegům z oddělení kvality a technikovi laboratoře, Radku Kreisingerovi.

V Liberci dne 22.5. 2016

Bc. Jan Krejčí

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže /SGS 21121/ ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1. Úvod.....	11
2. Teoretická část	13
2.1 Materiály používané ve firmě BT CZ při svařování kolejových vozidel.....	13
2.2 Způsob vzniku deformací po svařování	14
2.2.1 Tepelné ovlivnění materiálu.....	14
2.2.2 Napětí vznikající při svařování	16
2.2.3 Deformace vznikající při svařování	22
2.3 Proces rovnání po svařování	25
2.3.1 Rovnání ohřevem pomocí elektromagnetické indukce	28
2.3.2 Rovnání plamenem.....	28
3. Experimentální část.....	37
3.1 Analýza současného stavu rovnání bočnic.....	37
3.2 Předpoklad experimentu.....	39
3.3 Ověření principu.....	40
3.4 Analýza strukturní změny ohříváných bodů	44
3.5 Nastavení plamene	57
3.6 Porovnání sekvencí bodových ohřevů	59
3.7 Zpracování výsledků	70
4. Aplikace ve výrobě a doporučení pro další výzkum	71
5. Závěr	72
Seznam literatury	74





Seznam použitých zkratk a symbolů

Označení	Rozměr	Význam
A	[%]	tažnost materiálu
A_1	[°C]	teplota politické přeměny (727°C)
B1-B3	[-]	body ohřevu
<i>BT CZ</i>	[-]	Bombardier Transportation Czech Republic a.s.
C	[-]	konstanta
d	[μm]	úhlopříčka vtisku diamantového hrotu (Vickers)
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
F	[N]	zatěžující síla
HB	[-]	tvrdost podle Brinella
HV10	[-]	tvrdost podle Vickerse se zátěží 98,07 N
I	[A]	svařovací proud
I	[-]	I svar
KCU	[J.cm ²]	vrubová houževnatost
L	[mm]	délka svaru
L_0	[mm]	původní délka tyče
pWPS	[-]	předběžná specifikace postupu svařování
q	[J.mm ⁻¹]	množství vneseného tepla do materiálu na jednotku délky svaru
R_e	[MPa]	výrazná mez kluzu
R_m	[MPa]	smluvní mez pevnosti
RV	[-]	redukční ventil
s	[mm]	tloušťka plechu
S1-S6	[-]	číslo vzorku
S235JR	[-]	označení oceli
S355J2C+N	[-]	označení oceli
T_{\max}	[°C]	maximální teplota
Z	[%]	kontrakce
z_1	[%]	podélné smrštění
z_p	[%]	příčné smrštění
z_u	[°]	úhlové smrštění
α	[K ⁻¹]	lineární součinitel teplotní roztažnosti
β	[°]	vrcholový úhel
ΔL	[mm]	změna délky tyče





ΔT	[K]	změna teploty tyče
ε	[-]	poměrné prodloužení
σ	[MPa]	napětí
\sphericalangle	[-]	koutový svar
\sphericalcap	[-]	půl oblý svar
C	[%]	obsah uhlíku
Si	[%]	obsah křemíku
Mn	[%]	obsah manganu
P	[%]	obsah fosforu
S	[%]	obsah síry
Cu	[%]	obsah mědi
C ₂ H ₂	[-]	molekula acetylenu
O ₂	[-]	molekula kyslíku
H	[-]	vodík
CO	[-]	oxid uhelnatý
H ₂ O	[-]	voda





1. Úvod

Kanadská společnost Bombardier se zabývá výrobou přepravných prostředků, a to jak pozemních, tak leteckých. Jedním z 60 výrobních závodů je Bombardier Transportation Czech Republic a.s. sídlící v České Lípě (dále jen BT CZ). Tento závod má v průmyslové výrobě velice dlouhou tradici, bez dvou let stoletou. Je specializovaný na výrobu kolejových vozidel, a to konkrétně na osobní vozy pro železniční dopravu, metro a tramvaje. Momentálně spolupracuje se čtyřmi zákazníky, s francouzskými SNCF a RATP, s belgickými SNCB a s německými Deutsche Bahn.

Výroba kolejových vozidel je založena z největší části na procesu svařování podskupin a celků. Při svařování dochází k vnášení velkého množství tepelné energie, což má za následek vznik zbytkového napětí po svařování. V důsledku vzniku zbytkového napětí ve svařovaných podskupinách dochází v závislosti na konstrukčním řešení (tuhost konstrukce, množství, velikost a typ svarů) a postupu svařování k mírné, ale někdy i velice významné deformaci. Tyto deformace jsou nežádoucí a je potřeba je nějakým způsobem redukovat na přípustnou velikost. V tu chvíli přichází v úvahu řešení pomocí procesu rovnání. Proces rovnání je velice složitý a mnohdy podceňovaný proces. Rovnat lze jak s pomocí ohřevů, tak i bez, přičemž při rovnání bez ohřevů je potřeba vyvinout obrovské vnější síly a ani ty mnohdy nestačí k tomu, aby materiál vyhovoval rozměrovým a tvarovým tolerancím požadovaných technickými specifikacemi, resp. zákazníkem. Zejména u složitých svařenců, mohou naopak vést až k poškození výrobku. Při rovnání s pomocí ohřevů se v materiálu lokálním ohřevem snižuje mez kluzu v daném místě, tudíž je i lépe poddajný k tváření. Vstupuje do něj ale další teplo, které při nevhodném použití může způsobit ještě větší deformaci, než byla na začátku. Proto je velice důležitá volba umístění ohřevu, ale také volba použitého zdroje tepla, aby byl proces co nejefektivnější.

Tato diplomová práce má sloužit jako návrh a ověření optimalizace procesu rovnání po svařování na bočnicích vozu německého zákazníka. To znamená, že by měla dopomoci ke snížení energetické a časové náročnosti, a také k lepšímu pochopení celého procesu. U rovnání bočnic je ve firmě BT CZ momentálně používán bodový plamenový ohřev. Tento ohřev je založen na fyzikálních principech tepelné roztažnosti a snížení meze kluzu při lokalizovaném ohřevu materiálu – tenkého plechu. Při ohřátí jednotlivých bodů na rovnaném materiálu dochází k jeho napěchování a tím zvětšení



tloušťky v místě ohřevu. Při chladnutí se rovnaný materiál začíná smršťovat, ale zároveň se mez kluzu vrací na původní hodnotu a plech se postupně vypíná a narovná, až dosáhne požadované rovinnosti. Při bodovém ohřevu velice záleží na sekvenci ohřívání bodů. Výzkum provedený pro tuto práci slouží k optimalizaci postupu rovnání oplechování bočnic.





2. Teoretická část

2.1 Materiály používané ve firmě BT CZ při svařování kolejových vozidel

Společnost Bombardier Transportation a.s., produkující nejen kolejová vozidla, ale také spoustu jiných dopravních prostředků, je vázána vysokými nároky zákazníka, který požaduje na mnohých místech svařovaných dílců a podskupin vysokou pevnost, při zachování dobré svařitelnosti.

Při stavbě kolejových vozidel se mechanické a fyzikální vlastnosti použitých materiálů pohybují v široké škále, a to od konstrukčních ocelí s nižší mezí kluzu, přes termomechanicky zpracované oceli, až po feritické a austenitické korozivzdorné oceli s vyšším obsahem niklu a chromu.

Při výrobě bočnic vozů pro zákazníka Deutsche Bahn, na které bude aplikována optimalizace procesu rovnání po svařování, se používají především oceli skupiny 1.2 podle ISO/TR 15608, což jsou oceli s mezí kluzu 275 – 360 MPa. Jedná se zejména o ocel **S355J2C+N**, kde **S** značí konstrukční oceli, číslo **355** definuje zaručenou hodnotu mez kluzu při teplotě 20°C, **J2** označuje minimální hodnotu nárazové práce v plochem ohybu 27 J při zkoušení za teploty -20°C, písmeno **C** značí, že se jedná o ocel se zvláštní tvářitelností za studena, a písmeno **N** značí normalizační žíhání nebo normalizační válcování (dle ČSN EN 10027-1).

Chemické složení plechů z oceli S355J2C+N je uvedeno v následující tabulce (dle ČSN EN 10025-2):

Tabulka 1: Chemické složení oceli S355J2C+N

Označení oceli	C % max.	Si % max.	Mn % max.	P % max.	S % max.	Cu % max.
S355J2	0,24	0,60	1,70	0,035	0,035	0,60

Z této tabulky vyplívá, že je tato ocel nízkouhlíková a s obsahem legur do 5%, tzn. nízkolegovaná.

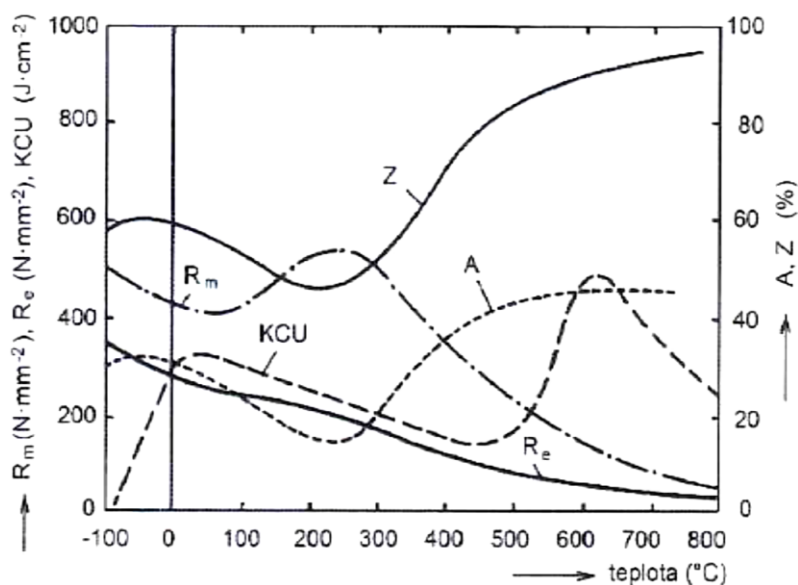


2.2 Způsob vzniku deformací po svařování

Napětí ve svařovaných dílech a jejich deformace vznikají na základě přívodu energie do místa vytváření spoje v důsledku vytvoření nestacionárních teplotních polí. Svařování představuje superpozici teplotních a deformačních účinků na základní materiál. Napětí a deformace vznikají v průběhu ohřevu a ochlazování vlivem dilatačních změn a metalurgických procesů. Mezi napětím a deformacemi existuje úzká souvislost. Omezí-li se deformace dílu například tuhým upnutím, obvykle dojde ke zvýšení zbytkových svařových napětí. [1]

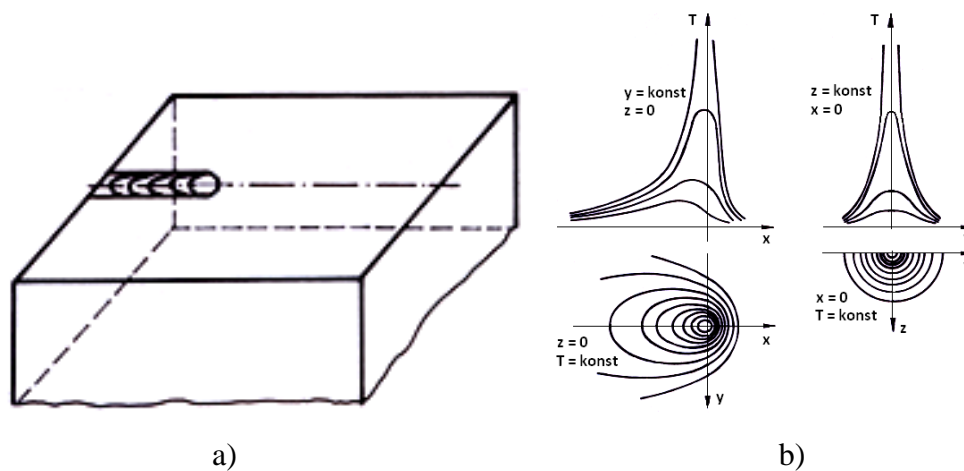
2.2.1 Tepelné ovlivnění materiálu

Tepelné ovlivnění materiálu je způsobeno vloženou energií ať už při svařování, nebo při následujících tepelných procesech (rovnání, tepelné zpracování, atd.). Všechny tyto procesy výrazně ovlivňují chování a vlastnosti základního materiálu (viz změna mechanických vlastností v závislosti na teplotě na obr. 2.1). Je zřejmé, že při zahřátí základního materiálu na vyšší teploty začne docházet ke snížení meze kluzu.

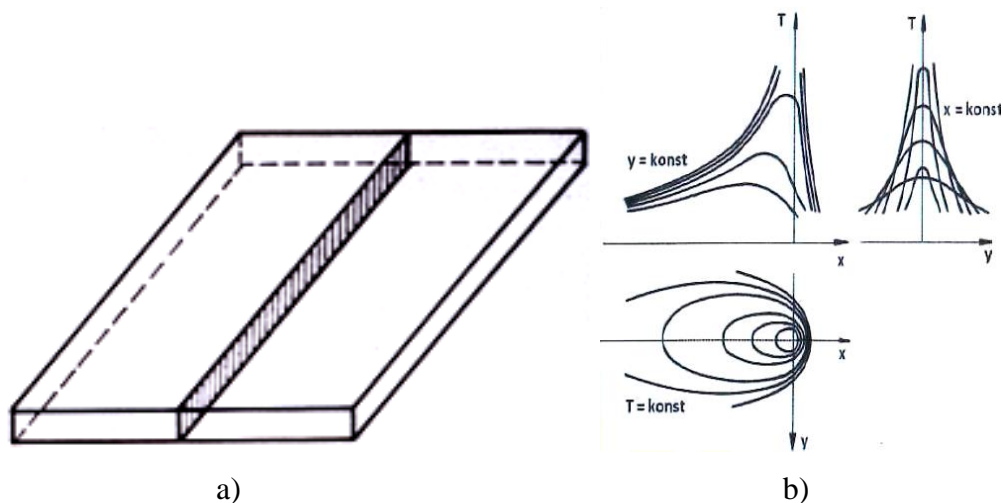


Obr.2.1: Závislost mechanických vlastností nelegované nízkouhlikové oceli (např. S355J2C+N) na teplotě [1]

Časové závislosti teploty v určitém místě základního materiálu nazýváme teplotní cyklus. Při svařování se uplatňují všechny známé způsoby přenosu tepla: vedení, proudění i sálání. Zdroje tepelné energie budeme idealizovat jako zdroj bodový, který si lze představit jako návar na tlustostěnnou desku (viz obr. 2.2), zdroj lineární, představující model dvou tenkých svařovaných desek (viz obr. 2.3), nebo rovinný zdroj tepla, který představuje stykový svar dvou tyčí (viz obr. 2.4). Z těchto tepelných zdrojů jsou dále odvozeny další tepelné zdroje blíže popisující reálný stav. Tyto prostorové zdroje odpovídají tvaru svarové lázně. Jsou to Gaussův zdroj rozložení tepla, polokulový zdroj, elipsoidní zdroj, dvouelipsoidní zdroj, který je využíván pro simulace svařování většiny metod obloukového svařování, a naposledy 3D Gaussian, nejnovější tepelný zdroj, vhodný pro simulace svařování s vysokou koncentrací tepelné energie, jako je svařování laserem, elektronovým svazkem nebo plasmou.

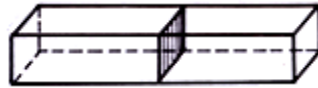


Obr.2.2: Bodový zdroj tepla (a) a teplotní pole pohyblivého bodového zdroje (b) [1]



Obr.2.3: Lineární zdroj tepla (a) a teplotní pole pohyblivého lineárního zdroje (b) [1]





Obr.2.4: Rovinný zdroj tepla [1]

Z obrázků je zřejmé, že šíření tepla v základním materiálu je velice nerovnoměrné. Vlivem takového šíření tepla a vlivem teplotní roztažnosti materiálu je způsobeno rozdílné namáhání v jednotlivých elementech základního materiálu. To způsobuje napěťový účinek a tím pádem i elastický deformační účinek. Ve chvíli, kdy překročí napětí mez kluzu, objevuje se i plastický deformační účinek. Při následném ochlazení materiálu na pokojovou teplotu se začíná elastická deformace vytrácet a mění se její polarita z tahu na tlak nebo naopak.

2.2.2 Napětí vznikající při svařování

Napětí ve svařovaných dílech a jejich deformace jsou zákonitým jevem při svařování a nelze jim zabránit. Lze je však omezit nebo je přesunout do vhodnějších míst úpravou technologického postupu, nebo vhodným konstrukčním řešením svařence. Napětí vznikající ve svařovaných materiálech v průběhu procesu, jsou označována jako tzv. vnitřní napětí. Ta zůstávají v tělese bez působení vnějších sil a vznikají i při jiných technologických procesech (např. při tepelném zpracování, nebo při tváření).

Faktory rozhodující o vzniku napětí:

- Nestacionární charakter teplotních polí
- Množství vneseného tepla na jednotku délky svaru
- Velikost a tvar svarové lázně
- Fyzikální a tepelně fyzikální vlastnosti základního materiálu (tepelná vodivost, teplotní roztažnost)
- Mechanické vlastnosti základního materiálu (hodnoty meze kluzu, modul pružnosti v tahu) v závislosti na teplotě
- Objemové změny v důsledku strukturních změn
- Tuhost svařence



Rozdělení napětí vznikajících při svařování:

Podle příčiny vzniku:

- Teplotní – vznikají v důsledku nerovnoměrného ohřevu a ochlazování materiálu
- Strukturní – vznikají v důsledku fázových transformací

Podle doby existence:

- Dočasná – působí v materiálu jen po dobu, kdy existuje příčina jejich vzniku
- Zbytková – zůstávají v materiálu i po ukončení svařovacího procesu a vychladnutí svarku (ve svařovaných dílech jsou vždy přítomna)

Podle směru působení vzhledem k ose svaru:

- Podélná – působí ve směru osy svaru
- Příčná – působí ve směru kolmém na osu svaru
- Ve směru tloušťky – vyskytuje se u tlustostěnných součástí

Na velikost vznikajících napětí má významný vliv hodnota lineárního součinitele teplotní roztažnosti. Tato hodnota figuruje ve vztahu (1), který určuje závislost velikosti prodloužení materiálu na změně teploty.

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (1)$$

ΔL ... změna délky tyče [mm]

L_0 ...původní délka tyče [mm]

α ... lineární součinitel teplotní roztažnosti [K⁻¹]

ΔT ... změna teploty tyče [K]



Představme si tyč o délce L_0 se součinitelem lineární teplotní roztažnosti α . Tato tyč je volně položena v místnosti o teplotě T_0 (viz obr. 2.5a). Po zahřátí na teplotu T_1 tyč dilataje o hodnotu ΔL (viz vztah 1) (viz obr.2.5 b). Při ochlazení zpět na teplotu T_0 tyč změní délku na původní L_0 (viz obr. 2.5c).

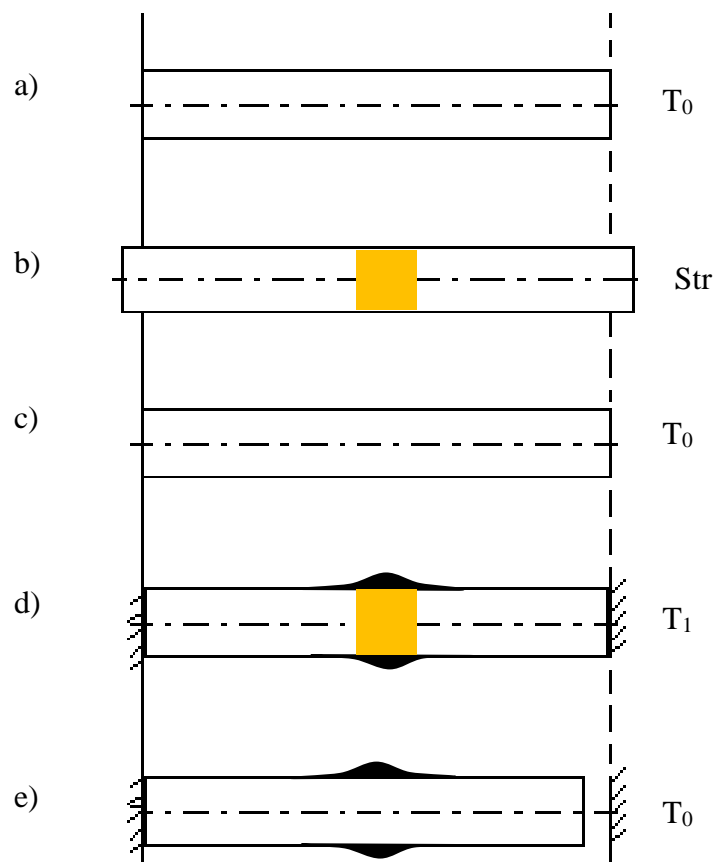
Ovšem pokud je tyč upnuta mezi dvě tuhé stěny a následně zahřáta na teplotu T_1 (viz obr. 2.5d), jsou znemožněny dilatace tyče a začíná vznikat napětí. Toto napětí lze vyjádřit vztahem (2). Pokud dojde k zahřátí na takovou teplotu, která má za následky vzniklé napětí na úrovni meze kluzu, tyč se začíná plasticky deformovat (pěchuje se). Po zpětném ochlazení na teplotu T_0 je tyč zkrácená oproti původní délce (viz obr. 2.5e).

$$\sigma = -\varepsilon \cdot E = -\frac{\Delta L}{L_0} \cdot E = -\alpha \cdot E \cdot \Delta T \quad (2)$$

ε ... poměrné prodloužení [-]

E ... modul pružnosti v tahu [MPa]

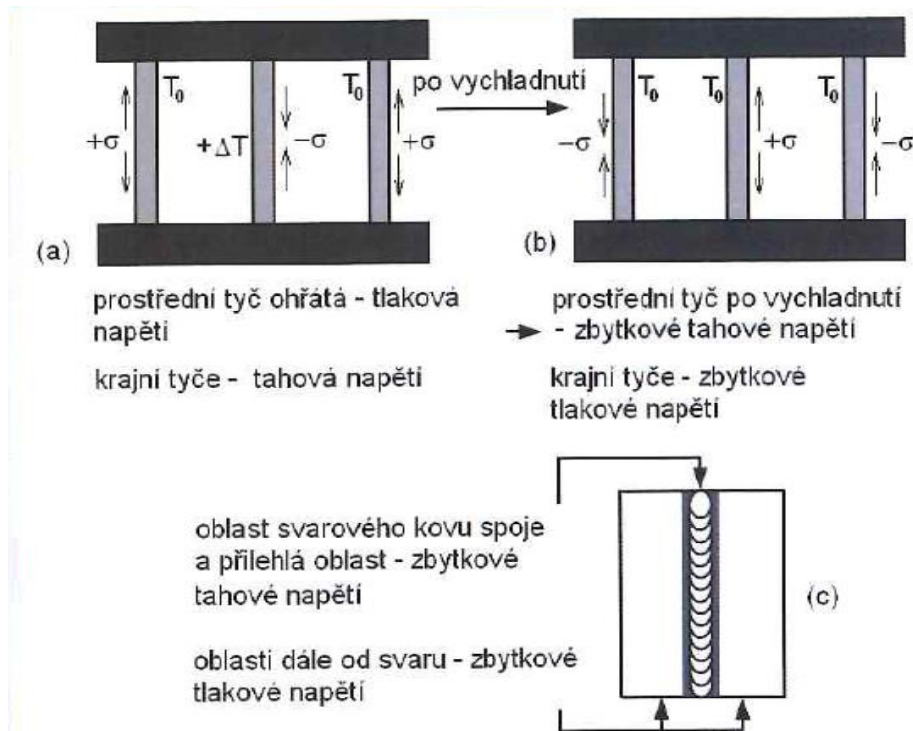
σ ... vzniklé napětí v tyči [MPa]



Obr.2.5: Schéma změny délky tyče v závislosti na teplotě

Zbytková napětí:

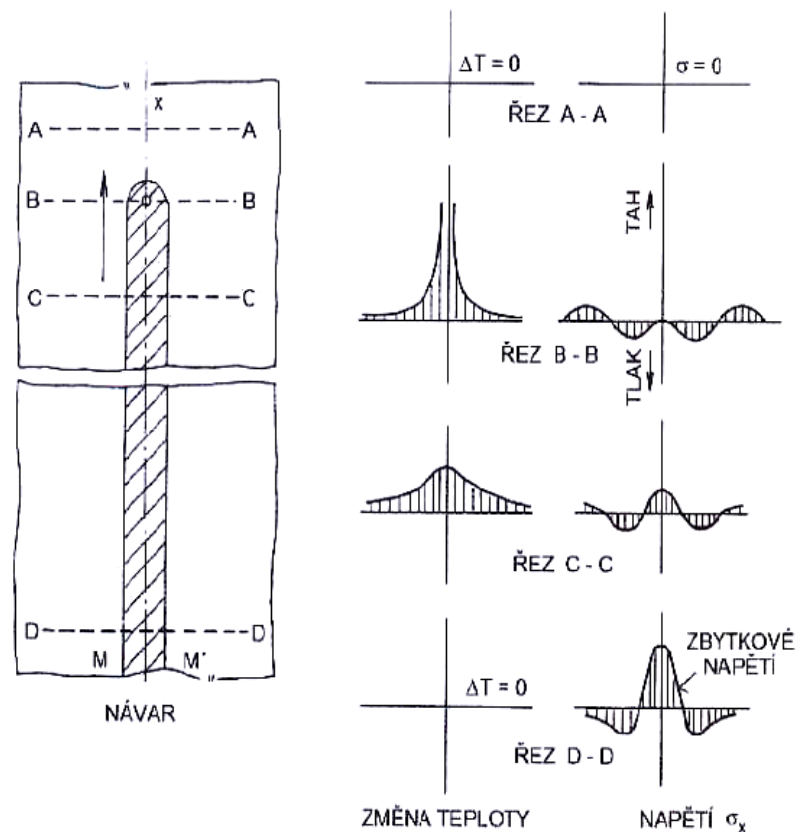
Na obrázku 2.6 je znázorněn jednoduchý experiment pro představu zbytkového napětí.



Obr.2.6: Zbytková napětí ve svaru [1]

Tři tyče jsou upevněny mezi dvěma tuhými deskami. Prostřední tyč je zahřívána, proto v ní začíná vznikat tlakové napětí. Přes tuhou desku působí na obě krajní tyče a vyvolává v nich tahové napětí (viz obr. 2.6a). Pokud dojde při ohřevu k překročení meze kluzu v tlaku prostřední tyče, dojde k jejímu napěchování, tedy k plastické deformaci. Při následném ochlazování prostřední tyče se snižují tlaková napětí a postupně přecházejí v tahová, která nakonec dosáhnou meze kluzu v tahu (viz obr. 2.6b). V krajní tyči tedy bude tlakové napětí, které odpovídá polovině tlakovému napětí v prostřední tyči. Tento model jen okrajově popisuje reálné namáhání svarku, přičemž prostřední tyč znázorňuje tahové napětí v oblasti svarového kovu spoje a krajní tyče znázorňují tlaková napětí základního materiálu dále od svaru (viz obr. 2.6c).



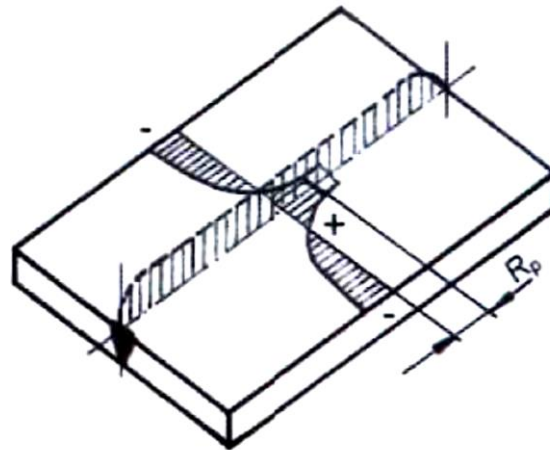


Obr.2.7: Model teplotních napětí při navařování na rovnou desku [1]

Reálná napětí při svařování jsou znázorněna na obrázku 2.7. V řezu A-A je prozatím teplotně nezasažené pole, tudíž se nevyskytují ani napětí. Řez B-B je veden napříč svarovou lázní, kde je nejvyšší teplota a materiál je natavený, tedy vysoce plastický. V lázni se tedy nevyskytují žádná napětí. V bezprostřední blízkosti vedle svarové lázně deska podélně dilataje, vzniká tedy tlakové napětí. Aby se toto napětí dostalo do rovnováhy, musí existovat opačné, tahové napětí, které je dále od místa svaru. V oblasti, kde návar již chladne, řez C-C, nejsou teplotní gradienty tak výrazné. V ose návaru se začíná vytvářet tahové napětí. V místě návaru, v kterém již nepřetrvává tak vysoká teplota, ale blíží se spíše k pokojové teplotě, zůstávají tepelná napětí, která již mají konečný charakter. Jedná se o zbytková napětí.

Podélná zbytková napětí:

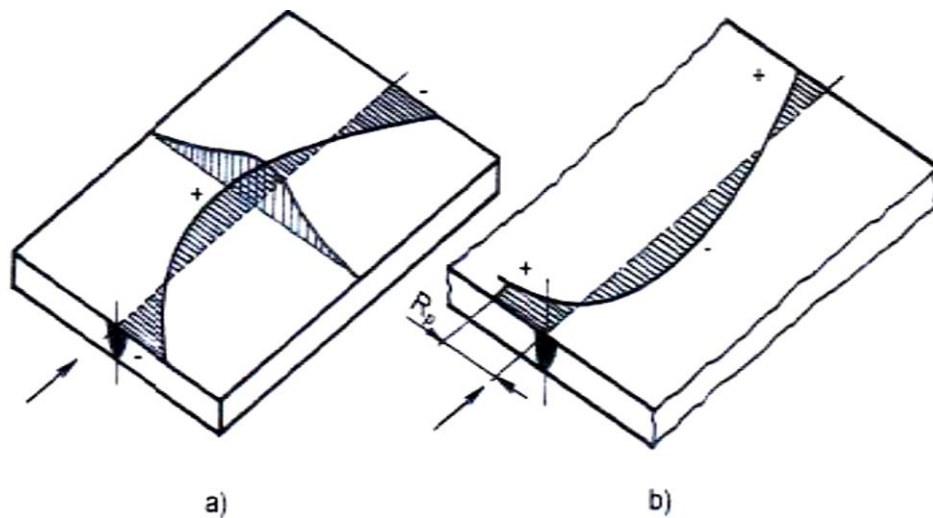
Na obrázku 2.8 je v rovině plechu zakresleno zbytkové podélné napětí. Podélné zbytkové napětí dosahuje maximálních tahových hodnot v blízkosti svaru. Tato hodnota je omezena mezí kluzu (základního materiálu i svarového kovu) při příslušné teplotě. S rostoucí vzdáleností od hranice ztavení se mění napětí z tahu na tlak a to až k okraji desky. V obrázku je znázorněn také průběh podélného zbytkového napětí v ose svaru ve směru svařování.



Obr.2.8: Podélné zbytkové napětí v rovině povrchu u tupého svaru [1]

Příčná zbytková napětí:

Na obrázku 2.9 je znázorněn průběh příčných zbytkových napětí od svarové housenky až k okraji plechu. Průběh zbytkových napětí je dán počtem a způsobem kladení svarových housenek. Obrázek 2.9a znázorňuje případ, kdy jsou desky neupnuté a v příčném směru působí pouze vlastní tuhost materiálu. Obrázek 2.9b znázorňuje situaci v případě, kdy jsou desky na okrajích upnuté.



Obr.2.9: Příčné zbytkové napětí v rovině povrchu u tupého svaru desky [1]

2.2.3 Deformace vznikající při svařování

Deformace po svařování jsou způsobeny tepelnou dilatací svařovaného materiálu a působeným napětím v případě pevného ukotvení svarku. Tyto deformace mohou být brány jako nepřipustná vada svařence ať už z hlediska estetického, nebo kvůli následné nemožné montáži. Deformace vznikající při svařování lze rozdělit do dvou skupin:

- Vnitřní – uplatňují se v jednotlivých objemových elementech tělesa uvnitř materiálu
- Vnější – projevují se změnami geometrického tvaru a vnějších rozměrů svařovaného dílu. Vnější vady se dále dělí na:
 - Elementární – týkají se deformace celkového spoje – příčné, podélné a úhlové deformace
 - Lokální – projevují se pouze v určité oblasti svařence
 - Celkové – projevují se jako změna rozměrů a změny geometrie celé svařované konstrukce

Podélné smrštění

Podélná smrštění jsou dána změnou rozměru ve směru podélné osy svaru (viz obr. 2.10). Závisí především na:

- Tuhosti svařovaného dílu
- Použité metodě svařování
- Geometrii svaru
- Způsobu vyplňování svarového úkosu

Hodnota podélného smrštění lze stanovit na základě empirického vztahu (3) [1]:

$$z_l = 0,012 \frac{I \cdot L}{s} \quad (3)$$

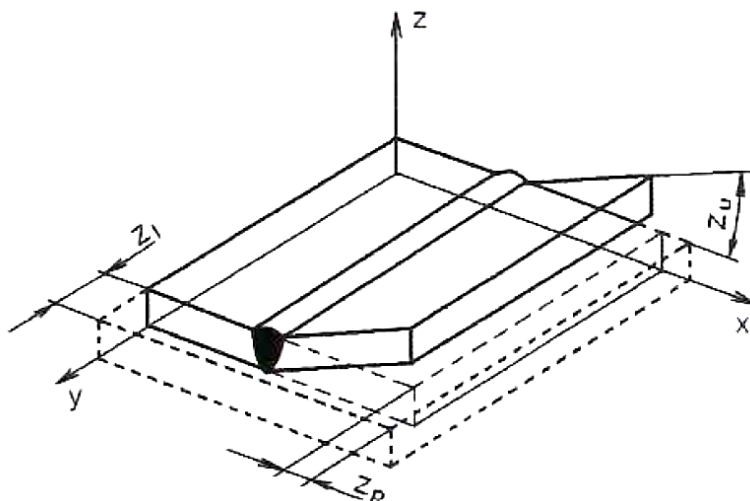
kde,

z_l ... podélné smrštění [%]

I ... svařovací proud [A]

s ... tloušťka plechu [mm]

L ... délka svaru [mm]



z_l – podélné smrštění, z_p – příčné smrštění, z_u – úhlové smrštění

Obr.2.10: Elementární deformace způsobené svařováním [1]



Příčné smrštění

Příčné smrštění je změna rozměru ve směru kolmém na osu svaru (viz obr 2.10) a je závislé na:

- Typu svaru
- Tloušťce materiálu
- Tuhosti a způsobu upnutí
- Množství vneseného tepla
- Způsobu svařování

Určuje se na základě experimentálně získaných dat nebo empirickým výpočtem (4).

$$z_p = 3,5 \cdot 10^{-6} \frac{q}{s} \quad (4)$$

kde,

z_p ... příčné smrštění [%]

q ... množství vneseného tepla do materiálu na jednotku délky svaru [$\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$]

s ... tloušťka plechu [mm]

Úhlové (angulární) smrštění

Úhlové smrštění (viz obr. 2.10) vzniká důsledkem nerovnoměrného příčného smrštění ve směru tloušťky plechu především u nesymetrických tupých svarů (zejména V svařky) a koutových svarů. Úhlové smrštění je jen zvláštním druhem příčného smrštění. Příčinou je rozdílná velikost příčného smrštění ve směru tloušťky. Tento druh deformace je hlavní příčinou zvlnění plechů přivařených ke konturám bočnic. Při stejném poměru velikosti svaru a tloušťky plechu se s rostoucí velikostí svaru úhlové smrštění zvětšuje.





2.3 Proces rovnání po svařování

Na společnost BT CZ jsou zákazníci kladeny vysoké požadavky na rovinnost svařovaných plechů a profilů. Při tavném svařování nebo při procesech, při nichž je materiál tepelně ovlivněn, dochází v důsledku nerovnoměrného ohřevu ke vzniku napětí a tím i k plastickým deformacím. Rovnání představuje účinný a osvědčený způsob opravy deformovaných dílců. Často je rovnání jedinou možností eliminace vzniklých deformací u daného typu svařované konstrukce.

Rovnáni je založeno na principu roztažnosti kovů, popsaném blíže v kapitole 2.2. Při lokálním ohřevu na teplotu odpovídající výraznému poklesu meze kluzu se materiál plasticky deformuje. Okolní studený materiál brání roztažení, čímž vznikají tlaková napětí a následně také plastické deformace. Po rychlém ochlazení plastické deformace zůstávají, uvedené místo se smršťuje a vzniklá tahová napětí vyrovnávají danou součást. [7]

V průmyslové oblasti je využívána spousta způsobů rovnání. Jeden ze způsobů rozdělení je podle typu použité energie, tedy:

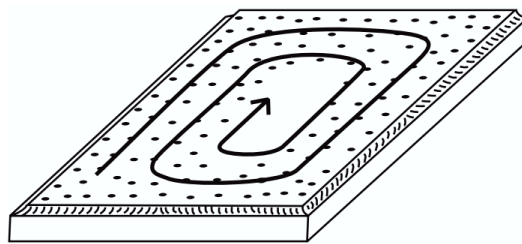
- Pomocí mechanické energie (rovnání za studena)
- Pomocí tepelné energie
- Pomocí mechanické i tepelné energie

Při rovnání za studena je nutno vyvinout obrovské množství síly a i přesto není zaručeno vyrovnání do požadované tolerance. Při rovnání pomocí tepelné energie je nutno zajistit tepelný zdroj, který je většinou energeticky náročný. Další nevýhodou je vnesené teplo, které ovlivňuje celou rovnanou konstrukci ať už vneseným napětím nebo v horším případě změnou struktury. I přesto je rovnání teplem velice hojně užívaná metoda, zejména proto, že je pro srovnání potřeba malé množství mechanické energie, přinejlepším žádné. Firma BT CZ je vybavena dvěma druhy zdrojů tepla využitelnými pro rovnání, a to **plamenem** a **elektromagnetickou indukci**. Těmto způsobům ohřevu jsou věnovány samostatné kapitoly uvedené níže.



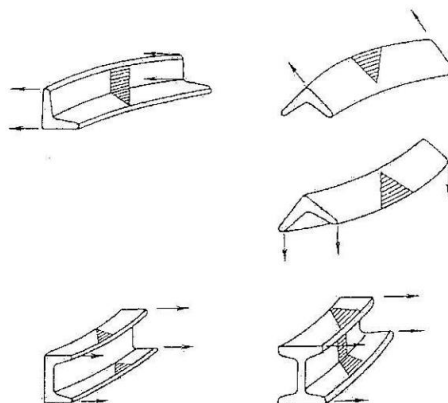
V závislosti na tvaru součásti lze využít následujících způsobů ohřevu:

Bodový ohřev se používá k eliminaci distorze pole tenkého plechu uvnitř kontury. Při bodovém ohřevu je využíváno tzv. sekvence ohřevu. Tato sekvence udává postup ohřívání rovnaného pole. Podle výrobců hořákových souprav je dán obecný postup ohřevu. Princip je ukázán na obrázku 2.11a a je realizován od krajů postupně do středu rovnaného plechu.



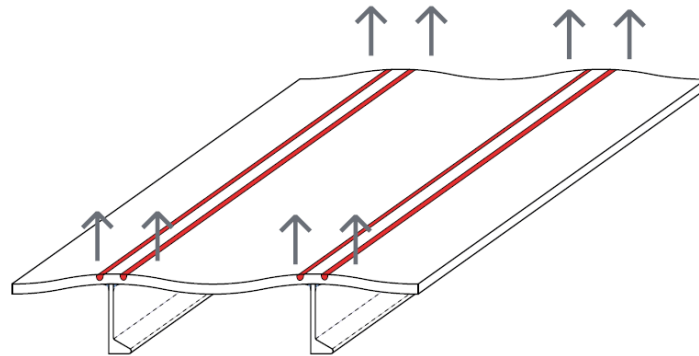
Obr. 2.11: Bodový ohřev při rovnání tenkého plechu [5]

Při **klínovém ohřevu** je ohřívána vždy strana, kterou je potřeba napěchovat, tzn. zkrátit. Ohřev se provádí do tvaru klínu u profilů a úzkých plechů, tak jak je ukázáno na obrázku 2.12.



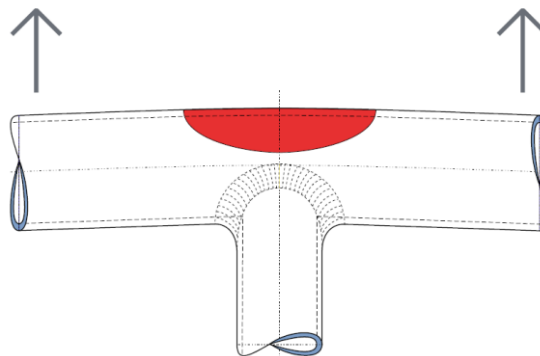
Obr. 2.12: Klínový ohřev při rovnání různých profilů [7]

Pásový ohřev se provádí při rovnání konstrukcí z důvodu odstranění úhlové deformace. Ohřev je prováděn vždy z druhé strany pásnice T-spoje, než je umístěn svar, tak jak je zřejmé ze schematického obrázku 2.13.



Obr.2.13: Pásový ohřev při rovnání konstrukcí [5]

Oválový ohřev se používá pro rovnání trubek a jiných rotačně symetrických součástí. Princip je ukázán na schematickém obrázku 2.14.



Obr.2.14: Oválový ohřev při rovnání trubek [5]

2.3.1 Rovnání ohřevem pomocí elektromagnetické indukce

Indukční rovnání využívá střídavý proud, který prochází přes vodivý materiál (indukční cívka). Vlivem elektromagnetického pole dochází ke vzniku tzv. vířivého proudu. Vířivý proud ohřívá plech přímo v jeho objemu (viz obr 2.15). K přenosu tepelné energie z indukční cívky do materiálu dochází radiací. Velkou výhodou indukčního ohřevu je volitelné nastavení výkonu a času sepnutí. Při docílení přednastaveného času dojde k vypnutí indukční cívky, což u plamenového ohřevu nelze.



Obr.2.15: Ilustrativní foto indukčního ohřevu [13]

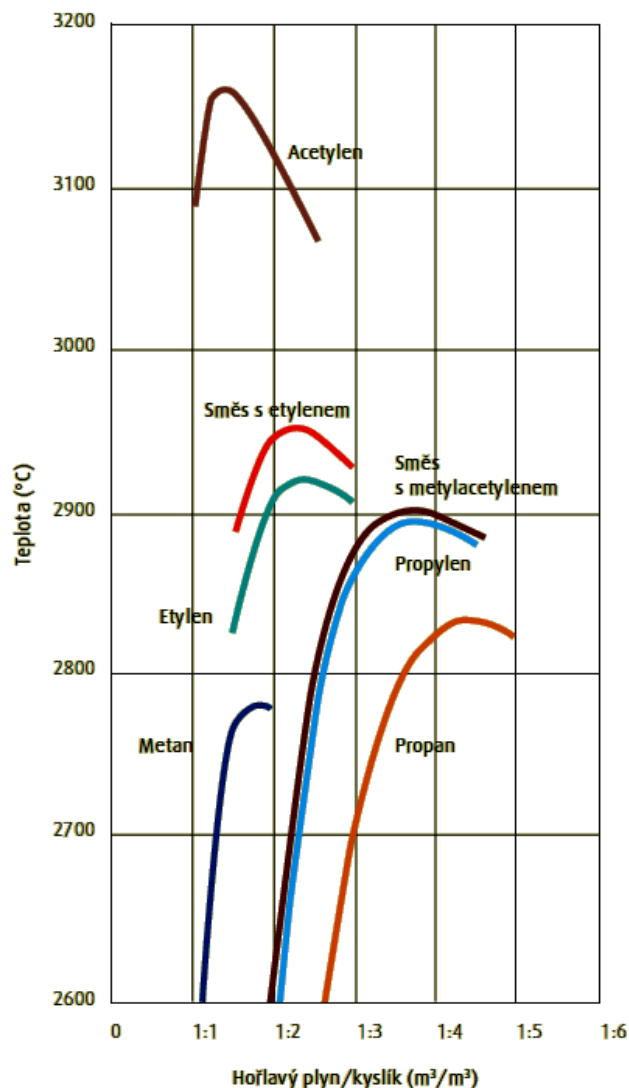
Naopak nevýhodou indukčního ohřevu je, že nelze použít pro austenitické oceli, případně pro jiné nemagnetické materiály. Operátor na sobě také nesmí mít žádné kovové předměty, jinak hrozí ohřev těchto předmětů a popálení. Dalšími nevýhodami jsou vysoká pořizovací cena přístroje, špatná manipulace ve svislých polohách a fakt, že zdroj nesmí obsluhovat operátor se srdečními problémy, který používá kardiostimulátor.

2.3.2 Rovnání plamenem

Jednou z možností rovnání, kterou používá i firma BT CZ, je rovnání plamenem. Tato kapitola je věnována technologii plamenového svařování a rovnání. Jde o technologii umožňující lokální ohřev velkou rychlostí ve velmi malé ploše materiálu. Konkrétně zde bude popsána podstata procesu, používané příslušenství a druhy plamenů.

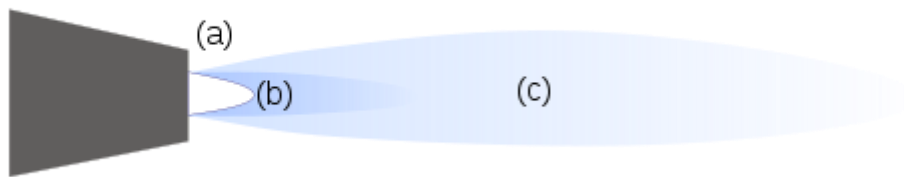
Směs hořlavého plynu

Výše teploty plamene je důležitým faktorem pro rychlý a koncentrovaný ohřev základního materiálu. Čím vyšší je tato teplota, tím rychlejší je přenos tepla mezi plamenem a základním materiálem a tím strmější je dosažený teplotní gradient, s čímž souvisí i velikost teplem ovlivněné oblasti. Z obrázku 2.16 je zřejmé, že nejúčinnější směsí pro plamenový ohřev je směs acetylenu s kyslíkem. Při správném poměru této směsi lze vyvinout teploty okolo 3150°C. S ohledem na uvedené výhody bude následující popis věnován právě kyslíko-acetylenové směsi.



Obr.2.16: Závislost poměru různých hořlavých plynů a kyslíku na teplotě [6]

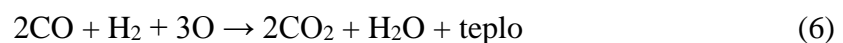
Hoření kyslíko-acetylenového plamene probíhá ve dvou fázích. V první fázi, vyjádřené rovnicí (5), dochází k částečnému spalování na povrchu vnitřního plamene, tzv. svařovacího kužele (viz obr. 2.17a), při němž se acetylen rozkládá na vodík a uhlík za vzniku oxidu uhelnatého. Vnitřní (svařovací) kužel má redukční účinky.



(a) svařovací kužel, (b) závoj, (c) chvost

Obr.2.17: Schéma kyslíko-acetylenového plamene [9]

Ve druhé fázi hoření, vyjádřené rovnicí (6), dochází ke spalování ve vnějším plameni, tzv. závoji (viz obr. 2.17b), kde si plamen k reakci přibírá kyslík z okolní atmosféry. Vnější plamen má oxidační účinky, ale zároveň vzniká oxid uhličitý, chránící ohřívané místo před přístupem okolní atmosféry.





Zařízení pro rovnání plamenem

Jako zdroj stlačeného plynu lze použít buď tlakový rozvod z centrálního zásobníku, nebo tlakovou nádobu s příslušným plynem. Tlaková lahev je složena z patky, tělesa lahve a hrdlového kroužku s lahvovým ventilem (viz obr. 2.18). Na lahvový ventil je pomocí třmenového šroubu (pro C_2H_2), nebo převlečné matice (pro O_2) připevněný redukční ventil. Z redukčního ventilu je plyn pomocí hadice přiveden do hořáku. Na hadici s hořlavým plynem musí být suchá nebo mokrá pojistka (předloha) proti zpětnému šlehnutí plynu.

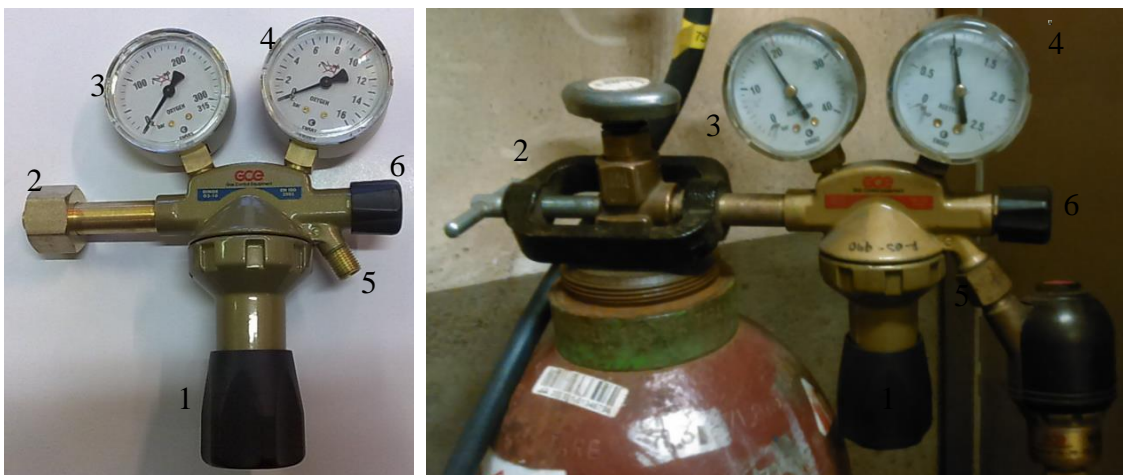


Obr.2.18: Tlaková lahev – 1- patka, 2 - těleso lahve, 3 - hrdlový kroužek, 4 - lahvový ventil

Redukční ventil:

Redukční ventily slouží k redukování (snížení) vysokého tlaku z tlakové láhve na tzv. pracovní tlak. Na obrázku 2.19 jsou znázorněny oba typy redukčních ventilů.





a)

b)

1 - regulační šroub;

2 - přípojka ventilu a) třmenový šroub (C_2H_2), b) převlečná matice (O_2);

3 - manometr vstupu (vysokotlaký); 4 - manometr výstupu (nízkotlaký) – tzv. pracovní manometr; 5 - výstupní přípojka; 6 - uzavírací výstupní ventil

Obr.2.19: Redukční ventil pro kyslíkovou (a) a pro acetylenovou lahev (b)

Suchá předloha:

Suchá předloha (viz obr. 2.20) je bezpečnostní zařízení, jehož úlohou je zabránit rozšíření zpětného šlehnutí plamene a pronikání kyslíku při poruše hořáku do zdroje acetyleny. Jsou konstruovány tak, aby se při vniknutí kyslíku do acetylenové hadice uzavřel zpětný ventil a tím bylo zabráněno dalšímu šíření plamene. Uvnitř předlohy je speciální vložka ze spékaných kovů, v jejichž dutinách se případný plamen uhasí, dále obsahuje tepelný uzavírací ventil a tlakový uzavírací ventil. Podmínkou správné funkce je, aby byl acetylen bez vlhkosti. Proto se nesmí na jednom rozvodu acetyleny současně používat vodní a suchá předloha.



Obr.2.20: Suchá předloha SG5





Hadice:

Hadice, sloužící k tlakové dopravě plynů z tlakových lahví do hořákové rukojeti, jsou tvořeny pryžovou vnitřní duší, výztuhou z textilního opletu a pryžovým vnějším pláštěm, která je odolná proti ozónu a otěru. Kyslíko-acetylenové hadice se pro průmyslové účely vyrábí jako spojené (viz obr. 2.21), a to v kombinacích průměrů 6,3+6,3; 8+8; 10+10 nebo 6,3 (O₂) +8 (C₂H₂) mm.



Obr.2.21: Dvojitá tlaková hadice pro technické plyny [14]

Hořák:

Důležitou součástí mající vliv na intenzitu ohřevu vzorku je hořák. Je složen ze dvou hlavních částí (viz obr. 2.22), a to z hořákové rukojeti a nástavné hubice. Nástavná hubice je vyráběna v různých velikostech podle možného průtoku plynu. V hořákové rukojeti jsou zabudovány dva regulační ventily pro řízení velikosti průtoku jednotlivých plynů a zároveň pro seřízení poměru vzájemného mísení plamenů. V tabulce na obrázku 2.23 Jsou uvedeny doporučené velikosti hořáků s ohledem na druh a tloušťku materiálu.



Obr.: Injektorová svařovací souprava U7 od firmy GCE [8]

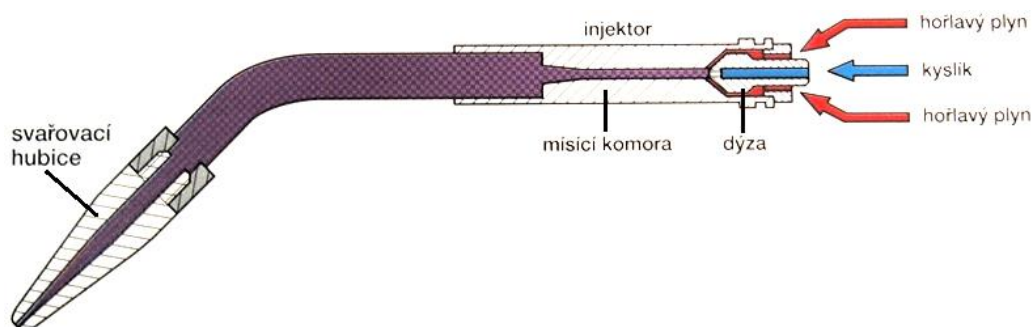


Tloušťka materiálu			Velikost hořáku	Spotřeba	
Měkká ocel	Auste- nitická CrNi ocel	Hliník a jeho slitiny		Acetylen	Kyslík
mm	mm	mm		l/min	l/min
1-2	2-3	1-2	1-2	2,5	2,8
2-4	3-4	2-3	2-4	5,0	5,5
2-5	5-8	2-4	4-6	8,3	9,2
4-6	7-12	3-5	6-9	12,5	13,8
5-7	10-18	4-8	9-14	19,2	21,1
6-12	15-30	5-10	14-20	28,3	31,2
10-16	25-50	8-15	20-30	41,7	45,8
15-25	> 50	10-20	30-50	66,7	73,3
20-40	> 50	15-30	50-100	125,0	137,5

Obr.2.23: Doporučené přiřazení velikosti hořáku k různým druhům a tloušťkám materiálů s danou spotřebou jednotlivých plynů od výrobce Linde Gas a.s.[15]

Hořáky lze rozdělit podle velikosti tlaku hořlavého plynu vstupujícího do hořáku:

- *Nízkotlaké (injektorové)* – kyslík při výtoku z dýzy vytváří ve směšovací komoře podtlak, který nasává hořlavý plyn. V mísící komoře se kyslík a acetylen promísí a tak vytvoří směs požadovaného složení (viz obr. 2.24).
- *Vysokotlaké* - Oba plyny, acetylen i kyslík vstupují do mísící komory pod přibližně stejným tlakem. Plyny se směšují ve směšovací komoře. Zvláštní typ vysokotlakého hořáku je rovnotlaký hořák. Pro oba plyny (kyslík a acetylen) je v tomto případě společný ventil. Protože tlak plynů musí být stejný, instalují se před hořák speciální redukční ventily, které s velkou přesností požadované tlaky zajistí.



Obr.2.24: Princip injektorového svařovacího hořáku[11]



Volba druhu plamene

Při ohřevu také záleží na druhu použitého ohřívacího plamene. Plamen lze rozdělit buď podle intenzity (výstupní rychlosti) plamene, nebo podle poměru průtokových objemů acetyleny a kyslíku. Seřizuje se pomocí ventilů na hořákovém držáku.

Intenzita plamene, tedy výstupní rychlost plynu z hořáku se volí podle toho na co je plamen použit. **Měkký plamen**, tj. plamen s malou výstupní rychlostí od 70 do 100 m.s⁻¹, je nestabilní a může způsobit tzv. zpětné šlehnutí plamene. Je používán především pro pájení. Pro svařování se používá **střední plamen** s výstupní rychlostí od 100 do 120 m.s⁻¹. **Ostrý plamen** s rychlostí vyšší než 120 m.s⁻¹ se pro svůj dynamický účinek používá pro bodový ohřev, rovnání nebo čištění. [9]

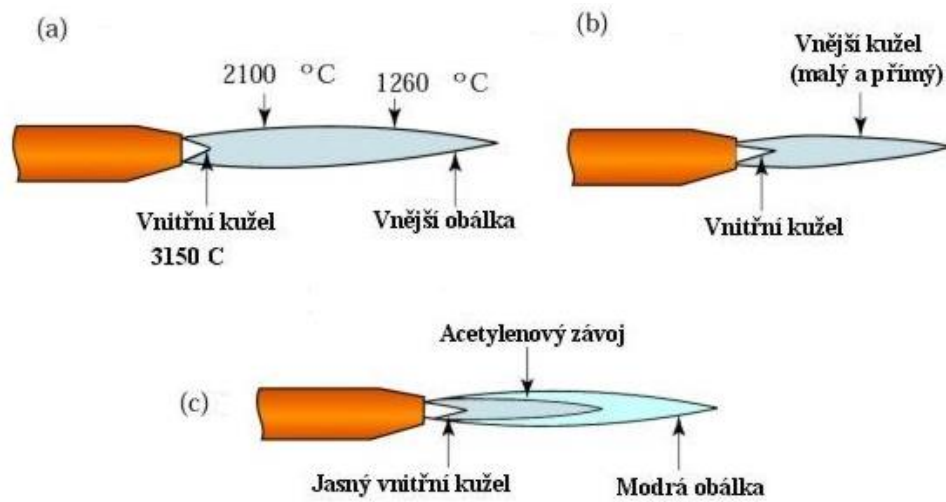
Další rozdělení plamene vyplývá z poměru kyslíku a acetyleny:

Při použití směsi kyslíko-acetylenového plamene v poměru 1:1 až 1,2:1 $\left[\frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{m}^3 \text{C}_2\text{H}_2} \right]$ vzniká **neutrální plamen** (viz obr. 2.25a). Jelikož tento plamen chemicky nijak neovlivňuje ohřívání kov a navíc dosahuje nejvyšší teploty oproti ostatním druhům plamene, stává se tak ideálním pro ohřev kovu. Je také vhodný pro svařování ocelí. Neutrální plamen má ostře ohraničený a oslnivě bílý vnitřní kužel, a plamen nemá nauhličující závoj.

Pokud je přebytek kyslíku větší, tedy když je poměr kyslíku a acetyleny zhruba 1,5:1 $\left[\frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{m}^3 \text{C}_2\text{H}_2} \right]$, vnitřní kužel se začíná zostřovat a měnit svou oslnivě bílou barvu na modrofialovou a tím se začne dosahovat **oxidačního plamene** (viz obr. 2.25b). Tento plamen je vhodný spíše pro svařování některých mosazí a bronzů.

Naopak při přebytku acetyleny je oslnivě bílý vnitřní kužel překryt bělavým acetylenovým závojem. Čím více acetyleny směs obsahuje, tím je bělavý závoj delší. Tento plamen se nazývá **redukční** (viz obr. 2.25c), nebo také karburační. Poměr obou plynů je menší než 1:1 $\left[\frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{m}^3 \text{C}_2\text{H}_2} \right]$. Redukční plamen se používá při svařování oceli pro zvýšení otěruvzdornosti, jelikož je jím kov cementován, a následně může být kalen. Dále se používá pro svařování hořčíku, hliníku a jejich slitin.





a) neutrální plamen, b) oxidační plamen, c) redukční plamen

Obr.2.25: Druhy kyslíko-acetylenového plamene [10]



3. Experimentální část

Experimentální část této práce je tvořena několika dílčími experimenty, které mají za cíl hlouběji proniknout do problematiky bodového rovnání kyslíko-acetylenovým plamenem a optimalizovat tento proces.

3.1 Analýza současného stavu rovnání bočnic

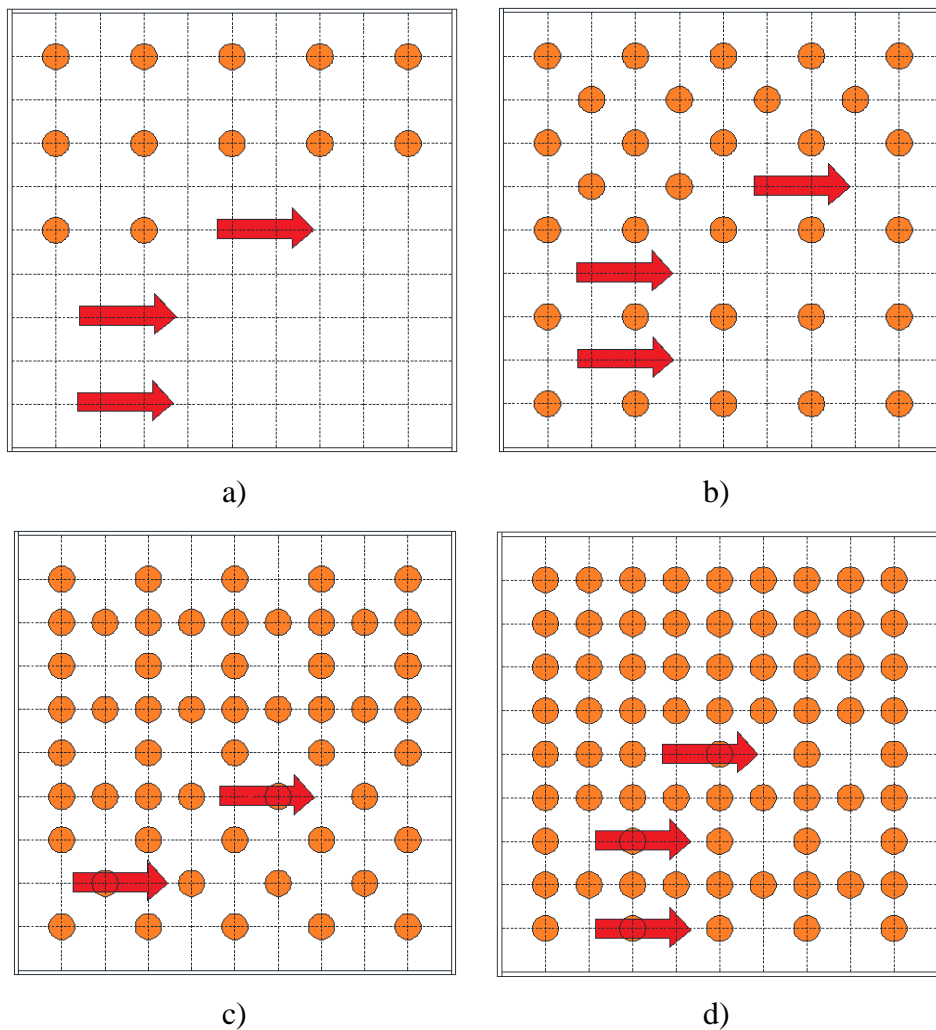
Existuje velké množství vstupů majících vliv na proces rovnání. Jedná se například o tvar a velikost deformace způsobené svařováním, výkon a teplota zdroje pro ohřev, doba ohřevu, vzdálenost plamene od materiálu nebo rozmístění, či sekvence bodů ohřevu. Proto je velmi obtížné stanovit pro tento proces jednoznačný postup. S velikým přičiněním zkušených rovnačů a výrobců hořákových souprav byl stanoven alespoň částečný návod pro bodové ohřevy.

Před započítím rovnání si rovnač proměří svařenec a nadefinuje jednotlivá místa ohřevu. Rozestup mezi jednotlivými body je doporučený minimálně 50 mm. Před zapálením plamene musí být správně zvolen nástavec hořáku o doporučené velikosti, která je závislá na tloušťce ohřívajícího materiálu (viz obr. 2.23). K ohřevu bodů se používá kyslíko-acetylenový plamen. Je nutné na redukčních ventilech tlakových lahví nastavit vhodné pracovní tlaky obou plynů (C_2H_2 – 0,5 až 1 bar; pro O_2 – 3 až 5 bar). Zažehnutý plamen musí být seřízen jako neutrální kvůli tomu, aby chemicky neovlivnil ohřívající materiál. Při ohřevu nesmí dojít k natavení materiálu, je tedy nutno sledovat barvu materiálu v průběhu ohřevu a podle toho určit dobu ohřevu. Doporučuje se pracovat ve dvojici. Při ohřevu zvoleného bodu dochází k vyboulení plechu v místě nahřátí a jedním úderem palice je do místa ohřevu vnášena plastická deformace z té strany, na níž se boule vytvořila.

Velice důležitým vlivem je také sekvence bodů ohřevu. Výrobce tlakových lahví pro vypouklá pole plechů doporučuje použití jednoduchých ohřevů do spirály (viz kapitulu 2.3, *obr. 2.11a*). Tato sekvence ohřevu probíhá postupně od okraje pole do jeho středu. Po svaření bočnic ale nejsou pole plechů vypouklé, ale obvykle jsou zvlňené do obou stran. V tomto případě je nutno použít jiné sekvence bodového ohřevu. Nazvěme tuto metodu „Po řádcích“. Vzhledem k tomu, že tato metoda byla vytvořena zčásti samotnými rovnači, objevuje se v následujícím textu několik slangových výrazů, které



ale výstižně popisují postup sekvencí. Na následujících obrázcích je názorně zobrazen postup rovnání polí plechů na bočnicích. Rovnač nejdříve postupuje po řádcích s většími rozestupy mezi body směrem zleva doprava od horního okraje pole – tzv. rovnání do „Kostkových čtyřek“ (viz obr. 1a). Takto postupně ohřívá a palicí pěchuje celé pole bodů. Poté následuje proměření zbylých deformací. Pokud jsou deformace stále mimo tolerance definované zákazníkem, následuje ohřívání bodů do tzv. „Kostkových pětek“ (viz obr. 1b), dále do „H-ček“ (viz obr. 1c), a pokud ani potom nevyhovují deformace tolerancím, pole se ohřívá do tzv. „Plných“ (viz obr. 1d).



a) „Kostkové čtyřky“, b) „Kostkové pětky“, c) „H-čka“, d) „Plné“

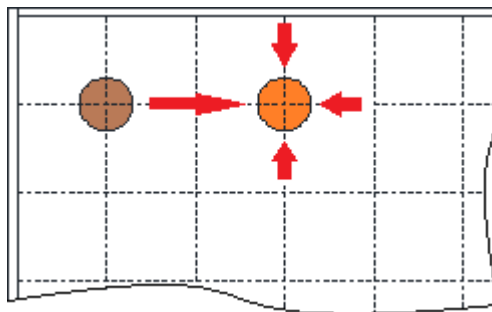
Obr.3.1: Vzory sekvencí bodového ohřevu „Po řádcích“

3.2 Předpoklad experimentu

Cílem této práce je zvýšit efektivnost rovnání ve firmě BT CZ a tím také snížit energetickou a časovou náročnost. Při zvážení jednotlivých vlivů na efektivnost rovnání, je vhodné se také zamyslet nad tím, zda záleží také na čase potřebném pro chladnutí jednotlivých bodů, tedy přesněji na mezičasech ohřevů jednotlivých bodů.

Při ohřívání jednotlivých bodů vstupuje do materiálu velké množství tepla, a tudíž je tepelně ovlivněno i okolí těchto bodů.

Po ohřátí a napěchování prvního bodu je bezprostředně poté ohříván druhý bod vedle. Při jeho ohřátí a napěchování se začíná smršťovat a stahuje k sobě okolní materiál. První bod a jeho okolí má ale stále vysokou teplotu a tudíž i sníženou mez kluzu (viz obr. 2.1). Druhý bod si tedy při chladnutí začne brát nejdříve materiál z místa s nižší mezí kluzu. To ale není tak efektivní, jako kdyby byl plech „natahován“ rovnoměrně ve všech směrech (viz obr. 3.2).

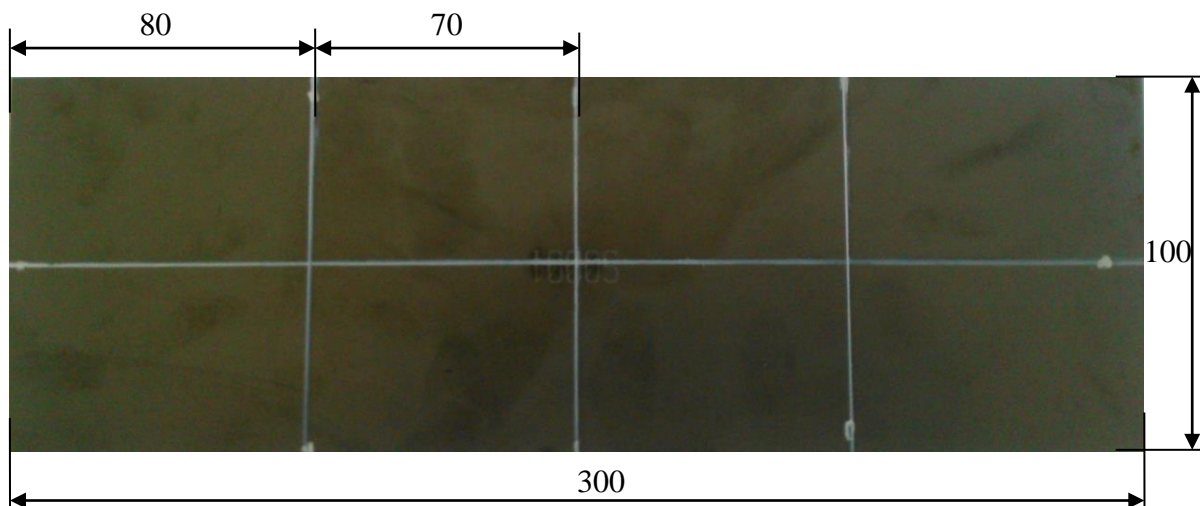


Obr.3.2: Neefektivní smršťování plechu

Touto teoretickou úvahou tedy vyvstala otázka, zda záleží při smršťování jednotlivých ohřátých bodů na aktuální teplotě okolí?

3.3 Ověření principu

Pro ověření uvedeného předpokladu byl navržen jednoduchý experiment. Bylo připraveno 10 vzorků plechu z materiálu S355J2C+N o rozměrech 300x100x2 mm s rastrem ohřívacích bodů (viz obr. 3.3). Každý z těchto vzorků byl ohřát kyslíko-acetylenovým plamenem ve třech bodech vzdálených od sebe 70 mm na teplotu přibližně 750°C. Na pěti vzorcích byly provedeny testy s časovou prodlevou mezi ohřevem jednotlivých bodů 5 vteřin. Na dalších pěti vzorcích byla vždy prodleva mezi body tak velká, aby před nahřátím dalšího bodu nebyla teplota okolí vyšší, než 60 °C. U takto ohřátých a následně vychlazených vzorků na volném vzduchu byla změřena smrštění ve směru délky.



Obr.3.3: Vzorky 300x100x2 mm s rastrem

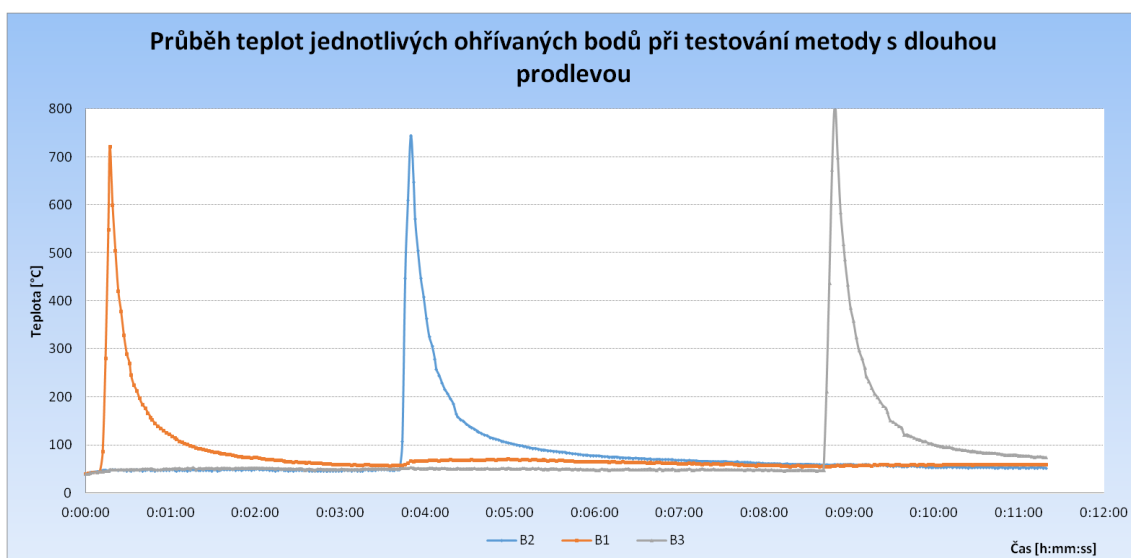
Do experimentu vstupuje mnoho proměnných a ty bylo potřeba co nejvíce eliminovat. Za prvé: zajištění stále stejného přísunu tepla do jednotlivých bodů ohřevu. S tím souvisí samozřejmě nastavení tlaků na redukčních ventilech (dále jen RV). Na RV acetylenu byl po celou dobu experimentu nastaven pracovní tlak 1 bar a na RV kyslíku pracovní tlak 5 barů. Byla použita velikost hořákového nástavce 1-2, aby byla více eliminována reakční doba člověka a bylo tak možné přesněji ohřát body na požadovanou teplotu. Množství průtoku plynu bylo seřízeno vždy podle předem určených rysek na ventilech hořáku a to v takovém poměru, aby byl nastaven neutrální druh plamene. Dále bylo potřeba zajistit stálou vzdálenost kyslíko-acetylenového plamene od povrchu vzorku. To bylo vyřešeno dorazem viditelným na obrázku 3.4. Po nastavení totožného vzdálenosti bylo nutno ohřívát body na stejnou teplotu. To bylo zajištěno sledováním času, který pro nahřátí bodu na 750 °C odpovídal 8,2 sekundám.



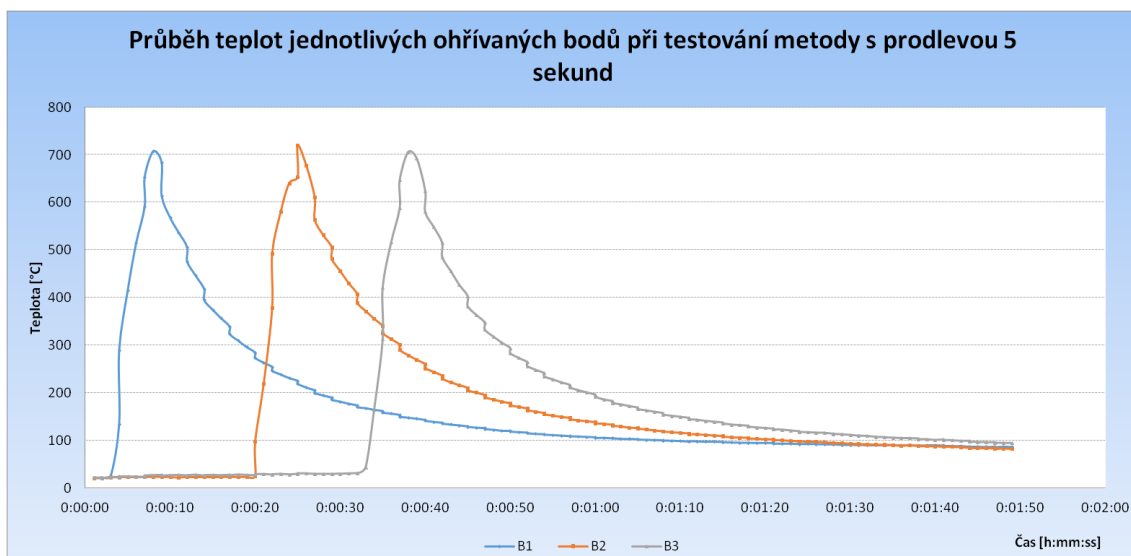


Obr.3.4: Nastavení dorazu pro plamenový hořák

Zároveň byl při tomto přípravném experimentu pořízen záznam termokamerou, ze kterého bylo možné zanalyzovat nasnímaná data. Ze získaných dat byly sestrojeny grafy průběhů teplot jednotlivých ohřivaných bodů tak, jak je viditelné na grafech 1 a 2.



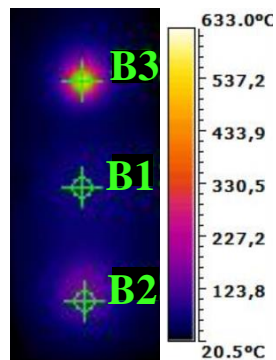
GRAF 1: Průběh teplot v závislosti na čase při ohřevu bodů s dlouhou prodlevou



GRAF 1: Průběh teplot v závislosti na čase při ohřevu bodů s prodlevou 5 sekund



Pro účely experimentu jsou důležité hodnoty v oblasti protnutí křivek. Z grafu metody s prodlevou 5 vteřin je zjevné, že při ohřevu druhého bodu (B2) na maximální teplotu je první bod (B1) stále ohřátý na teplotu přesahující 200°C. Při ohřevu třetího bodu (B3) na maximální teplotu má druhý bod (B2) dokonce stále teplotu přesahující 300°C. Pro názornost sekvence ohřevu je na obrázku 3.5 vložen snímek z termokamery s popisem ohříváných bodů.



Obr.3.5: Foto ohříváného vzorku pořízené termokamerou

Jak již bylo napsáno výše, na těchto ohřátých vzorcích byla změřena původní délka a následně délka po ohřevu. Z těchto hodnot bylo vypočteno smrštění uvedené v tabulce 2. Z tabulky je zřejmé, že metoda ohřevu s krátkou prodlevou vykazuje vyšší smrštění, než metoda ohřevu s prodlevou do vychladnutí, a to až o 20%.

Tabulka 2: Porovnání smrštěných vzorků ohříváných s dlouhou a krátkou prodlevou

	Číslo vzorku	L_0 [mm]	L_1 [mm]	$\Delta L = L_0 - L_1$ [mm]	průměr ΔL [mm]
S prodlevou (5 vteřin)	1	300,11	299,98	0,13	0,132
	2	300,05	299,91	0,14	
	3	300,09	299,95	0,14	
	4	300,08	299,96	0,12	
	5	300,05	299,92	0,13	
S prodlevou (do vychladnutí)	6	300,10	300,00	0,10	0,11
	7	300,05	299,95	0,10	
	8	300,12	300,01	0,11	
	9	300,08	299,96	0,12	
	10	300,08	299,96	0,12	



Kvůli jistějšímu rozhodnutí, zda byla efektivnější metoda s krátkou či dlouhou prodlevou byla použita další statistická metoda, a to maticové porovnání. V maticové tabulce 3 jsou porovnávána naměřená smrštění jednotlivých pěti vzorků ohříváných s prodlevou 5 vteřin proti jednotlivým pěti vzorkům ohříváných s prodlevou do vychladnutí. V matici 5x5 jsou obě metody vzájemně odečítány. Pokud je tedy výsledné číslo kladné, buňka je znázorněna červenou barvou a označuje, že je větší smrštění u vzorku s dlouhou prodlevou. Pokud je číslo záporné, buňka je označena zelenou barvou a znamená, že je větší smrštění u vzorku s krátkou prodlevou. Když je buňka žlutá, smrštění jsou totožná. V tabulce je 23 buněk vybarvených zeleně a 2 žlutě. Tedy i z této statistické metody vyplývá, že po ohřevu s krátkou prodlevou tyto vzorky podlehnou většímu smrštění.

Tabulka 3: Maticové porovnání vzorků s dlouhou a krátkou prodlevou

č.vzorku		S prodlevou (5 vteřin)				
		1	2	3	4	5
S prodlevou (do vychladnutí)	$\Delta L = L_0 - L_1$ [mm]	0,13	0,14	0,14	0,12	0,13
	6	-0,03	-0,04	-0,04	-0,02	-0,03
	7	-0,03	-0,04	-0,04	-0,02	-0,03
	8	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	-0,02
	9	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	-0,01
	10	-0,01	-0,02	-0,02	0,00	-0,01

Legenda:

Větší smrštění je S prodlevou (do vychladnutí)

Větší smrštění je S prodlevou (5 vteřin)

Obě smrštění jsou stejná

Tento experiment by tedy měl vyvrátit původní myšlenku, že při ohřevu bodů záleží na teplotě okolního plechu. V reálném stavu jsou ale plechy přivařeny ke vzpěrám a tím je rovnání celek tužší, než u vzorků o velikosti 300x100 mm nezpevněných po celém obvodu. Bylo tedy rozhodnuto o pozměnění experimentu. Pro větší podobnost reálné situaci při rovnání bočnic vagónu bylo provedeno testování na větších vzorcích přivařených k rámu. Realizaci tohoto experimentu bude věnována kapitola 3.6.



3.4 Analýza strukturní změny ohřivaných bodů

Při ohřevu bodů v praxi dochází v materiálu k dosažení teplot v intervalu 600 - 800°C. Pro ověření vlivu ohřevu na strukturní změny, byla provedena analýza strukturních změn při ohřevech na uvedené teploty. Při této analýze byl proveden makro-výbrus bodu ohřevu, dále byla provedena kontrola mikrostruktury a nakonec byla měřena tvrdost. Analýza těchto vzorků byla provedena v technické laboratoři BT CZ.

Ohřevy materiálu

Základním materiálem pro ohřevy bodů byl plech, který je používán v BT CZ k výrobě bočnic vagónů, a to materiál S355J2C+N o tloušťce 2 mm. K ohřevu plechu byl použit kyslíko-acetylenový plamen s hořákovým nastavcem 4-6 (viz tabulku na obr. 2.23), který doporučuje výrobce hořákových souprav. Na RV acetylenové lahve byl nastaven 1 bar a na RV kyslíkové lahve bylo nastaveno 5 barů. Pro přesné určení maximální dosažené teploty při ohřevu byl použit laserový termometr Optris LaserSight viditelný na obrázku 3.6.

Před měřením bylo třeba na termometru nastavit emisivitu ohřivaného povrchu. Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa k intenzitě vyzařování absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Emisivita tak určuje schopnost tělesa vyzařovat teplo. [16] Jednou z možností, jak zjistit emisivitu povrchu, bylo použití dvou termometrů zároveň, a to přímo termometru Optris LaserSight pomocí laseru a pomocí přípojného dotykového teplotního čidla, u kterého není třeba nastavovat emisivitu, protože se na něj přenáší teplo kondukcí. Při sejmutí teploty zahřátého předmětu (pro vyšší přesnost jsou lepší vyšší teploty, např. okolo 500°C) oběma termometry byl naměřen rozdíl. Tento rozdíl byl seřízen na laserovém termometru pomocí změny emisivity na hodnotu 0,85.



Obr.3.6: termometr Optris LaserSight (vlevo) a přípojně dotykové teplotní čidlo(vpravo)

Při rovnání plamenem se pro napěchování ohřátého bodu používá mechanický úder plastovou palicí. Pro analýzu změny struktury byly zvoleny tři různé maximální teploty ohřevu bodu bez použití úderu. Kvůli porovnání s realitou byly naměřeny ještě další tři body s identickým ohřevem, po kterém následoval úder palicí a tím způsobeným napěchováním bodu. Teplota v místě ohřívání bodů byla měřena tak, že z jedné strany plechu působil tepelný zdroj (plamen) a z druhé strany plechu byla snímána teplota termometrem Optris LaserSight. Konkrétní maximální naměřené teploty ohřátých bodů jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4.: Maximální teploty ohřátého bodu

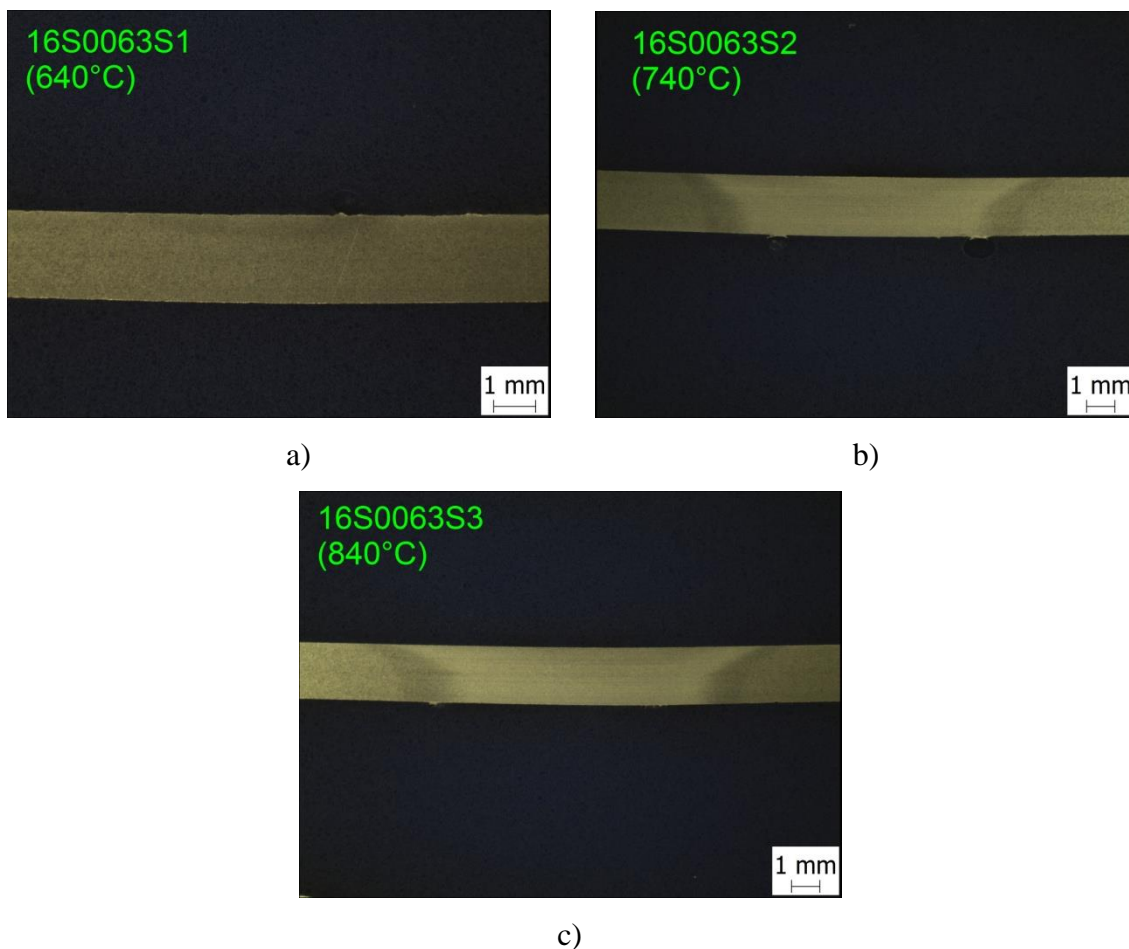
č. vzorku	T_{\max} [°C]	S úderem/ bez úderu
S1	640	Bez úderu palicí
S2	740	
S3	840	
S4	653	S úderem palicí
S5	740	
S6	850	



Měření makrostruktury materiálu

Výbrusy vzorků byly zpracovány v technické laboratoři BT CZ. Ohřáté body byly vypreparovány od okolního základního materiálu. Následně byl proveden řez v polovině místa ohřevu. Tyto vzorky byly vloženy do dvou forem o velikosti 60 mm. Do jedné formy byly vloženy vzorky, u nichž po ohřevu následoval úder plastovou palicí, a do druhé formy byly vloženy vzorky ohřevů bez vnesené deformace. Na okraje formiček byl vložen tzv. podpůrný materiál, který eliminuje zaoblení vzorků při zpracování výbrusu. Formy byly zality akrylátovou pryskyřicí Varidur 200 a jako výplňová hmota sloužící k umístění identifikačního štítku pro označení vzorku byla použita transparentní zalévací hmota Technovit 4006. Po zalití byly vzorky vybroušeny a následně naleptány 1% Nitalem, což je jednaprocentní roztok kyseliny dusičné v alkoholu.

K vyhodnocení makro-výbrusu byl použit stereomikroskop Olympus SZ61. Na následujících obrázcích jsou ukázány snímky vzorků ohříváných bez následného úderu. Teplota byla měřena přes tloušťku materiálu (2 mm), proto v místě ohřevu byla teplota přibližně o 80 až 100°C vyšší. Z obrázku 3.7a je patrné, že při zahřátí plechu na 640°C téměř k žádnému zasažení do struktury nedochází. Při ohřevu materiálu na 740°C, který je znázorněn na obrázku 3.7b už k mírné austenitizaci dochází. Jsou zde viditelné tři oblasti. Světlá oblast znázorňuje ohřev nad teplotou A_1 . Dále jsou zde vidět tmavé části, znázorňující teplem ovlivněnou oblast přechodu, ve které bylo dosaženo teploty okolo A_1 . Třetí oblast je teplem neovlivněná struktura základního materiálu. Makro-výbrus třetího vzorku (viz obr. 3.7c) zahřátého na 840 °C je podobná druhému vzorku s tím rozdílem, že je teplem zasažená oblast větší. Blíže napoví mikrostruktura, která je popsána v další podkapitole.

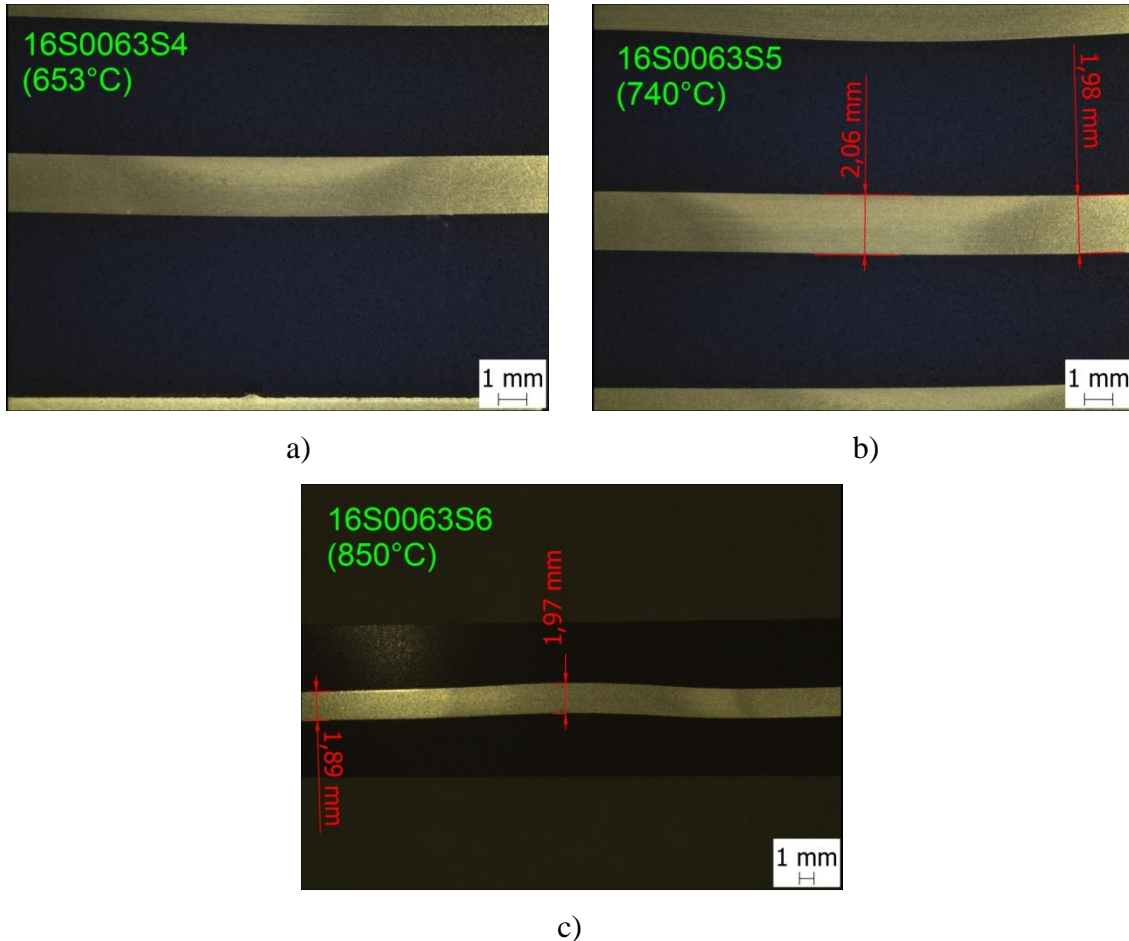


*16S0063S1 – vzorek S1 ohřátý na $T_{max} = 640^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 10x
16S0063S2 – vzorek S2 ohřátý na $T_{max} = 740^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 6,7x
16S0063S2 – vzorek S3 ohřátý na $T_{max} = 840^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 6,7x
Obr.3.7: Makro-výbrus vzorků ohříváných bez následného úderu*

Na obrázcích níže jsou makro-výbrusy vzorků ohříváných s následným použitím úderu plastovou palicí. Makrostruktura vzorku ohřátého na teplotu 653°C a následným použitím úderu (viz obr. 3.8a) má mírně zasaženou strukturu, ovšem ne v celé tloušťce, ale jen ze strany působení kyslíko-acetylenového plamene. Čtvrtý vzorek (740°C s úderem, viz obr. 3.8b) je makrostrukturou velice podobný vzorku č. S2 (740°C bez úderu). Na tomto vzorku je také znázorněna změna tloušťky mezi neovlivněnou částí materiálu (1,98mm) a bodem ohřevu, který byl navíc napěchován úderem (2,06mm). Změna tloušťky byla naměřena okolo 8 setin milimetru. Struktura posledního vzorku S6 (850°C s úderem, viz obr. 3.8c) je podobná struktuře vzorku S3 (840°C bez úderu) až na vzniklé deformace samotného bodu ohřevu způsobené úderem plastovou palicí. Změna



tloušťky mezi neovlivněnou částí materiálu (1,89mm) a bodem ohřevu (1,97mm) u vzorku č.S6 byla naměřena také na 8 setin milimetru stejně jako u vzorku S5.



16S0063S4 – vzorek S4 ohřátý na $T_{max} = 653^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 6,7x

16S0063S5 – vzorek S5 ohřátý na $T_{max} = 740^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 6,7x

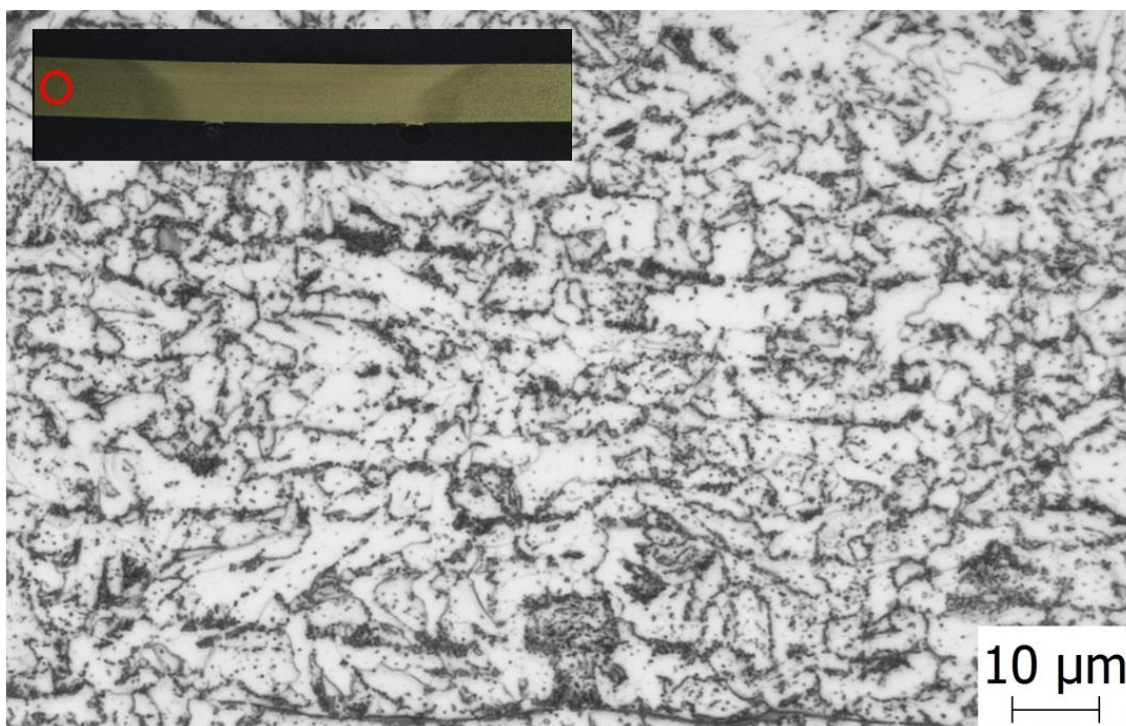
16S0063S6 – vzorek S6 ohřátý na $T_{max} = 850^{\circ}\text{C}$ – zvětšeno 3,6x

Obr.3.8: Makrostruktura vzorků ohříváných s následným úderem plastovou palicí



Mikrostruktura materiálu

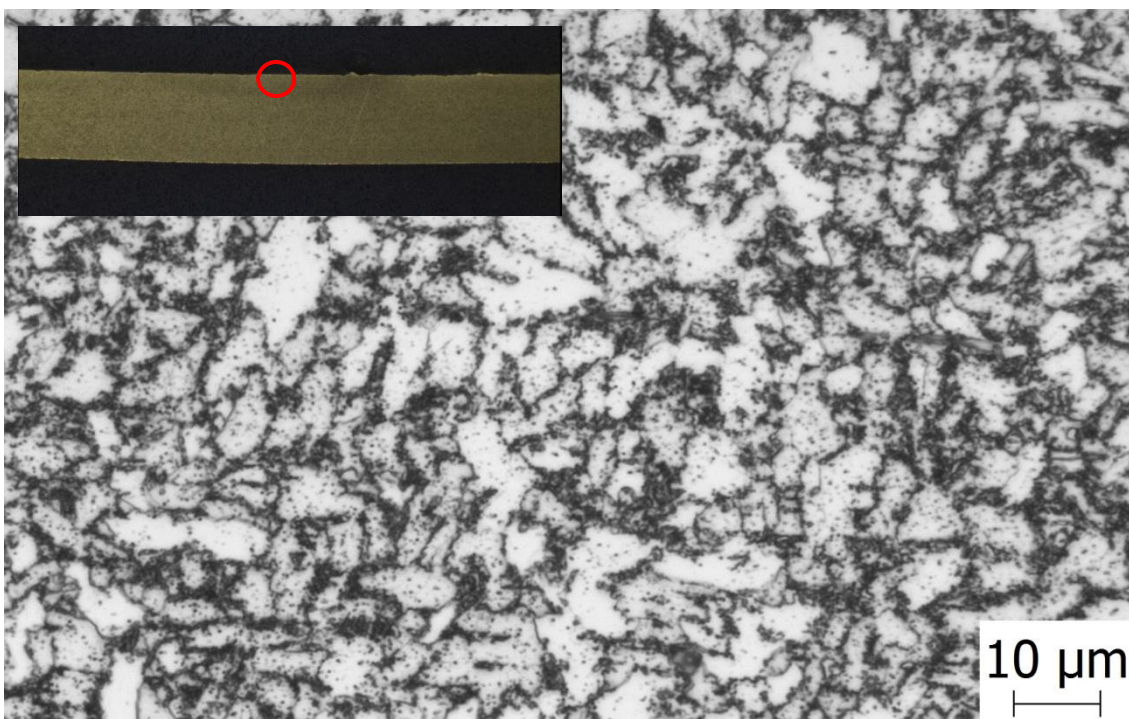
Na vzorcích byla dále vyhodnocena mikrostruktura materiálu. Nasnímání mikrostruktury bylo provedeno na mikroskopu Olympus BX51M s optickým zvětšením 1000x. Na vzorku S2 byla nasnímana mikrostruktura materiálu neovlivněné části (viz obr. 3.9) s označením místa snímání.



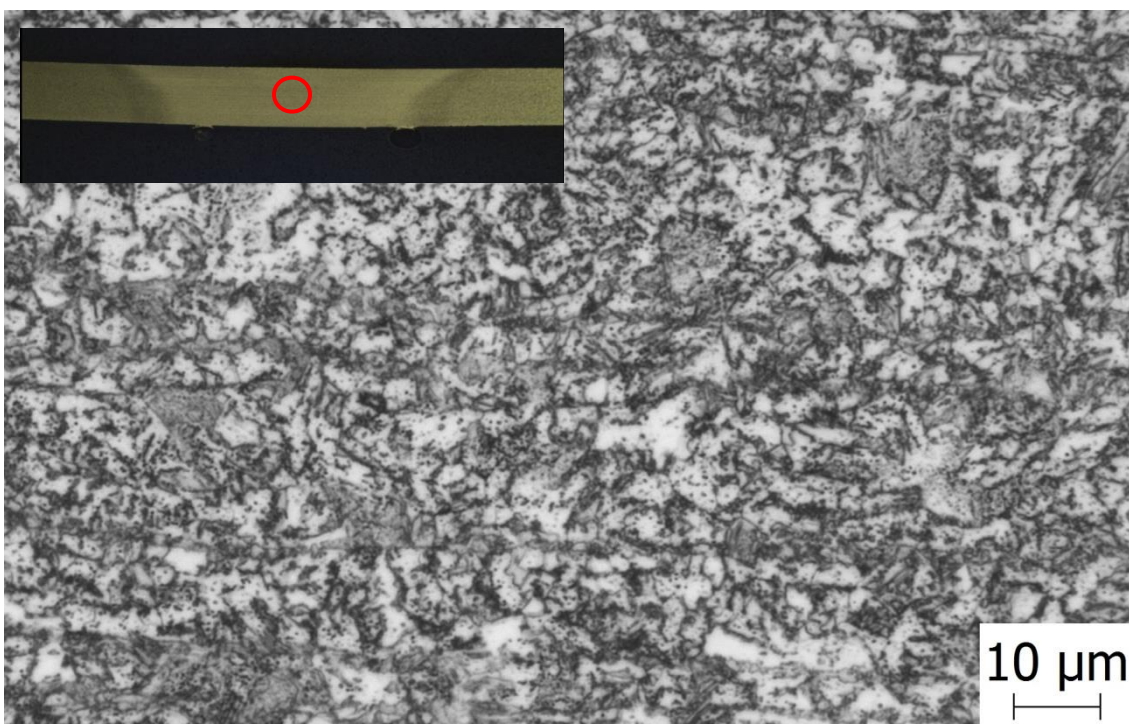
Obr.3.9: Mikrostruktura neovlivněného materiálu S355J2C+N (zvětšeno 1000x)
s označením místa snímání (levý horní roh)

Neovlivněný materiál S355J2C+N má feriticko-perlitickou strukturu. Bílé části znázorňují ferit a tmavé části perlit. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny snímky z mikrostruktur jednotlivých vzorků. Na obrázcích 3.10 až 3.15 je znázorněna mikrostruktura vzorku č. S1.



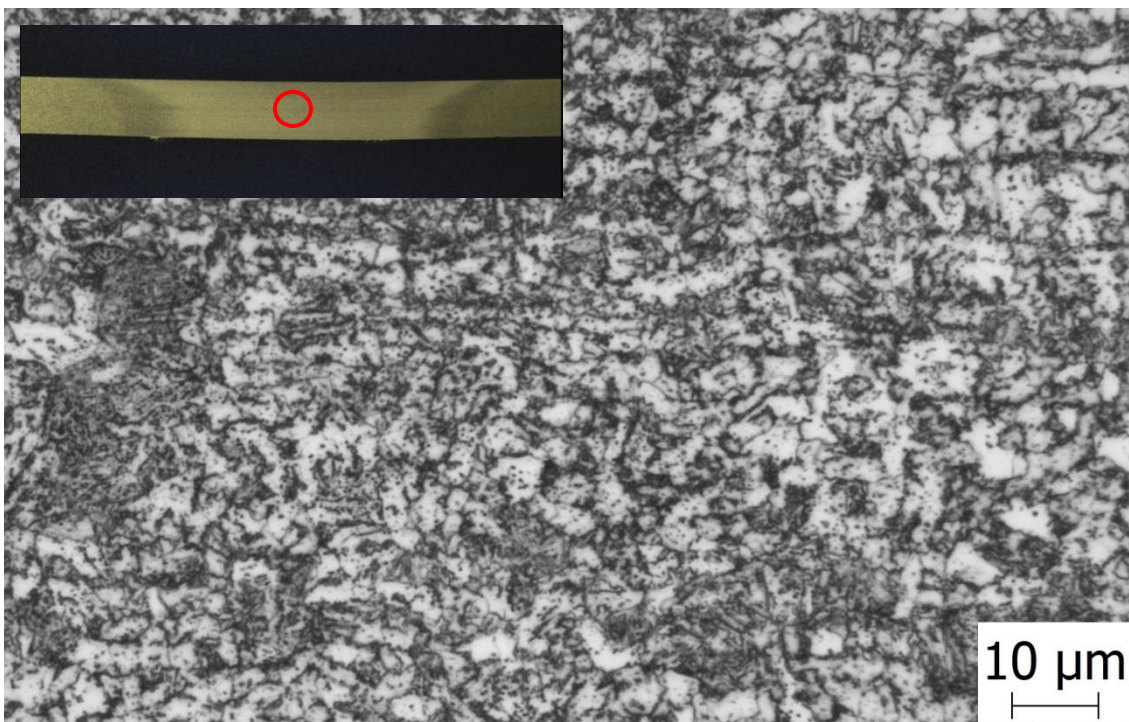


*Obr.3.10: Mikrostruktura vzorku č. S1 (640°C bez úderu) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*

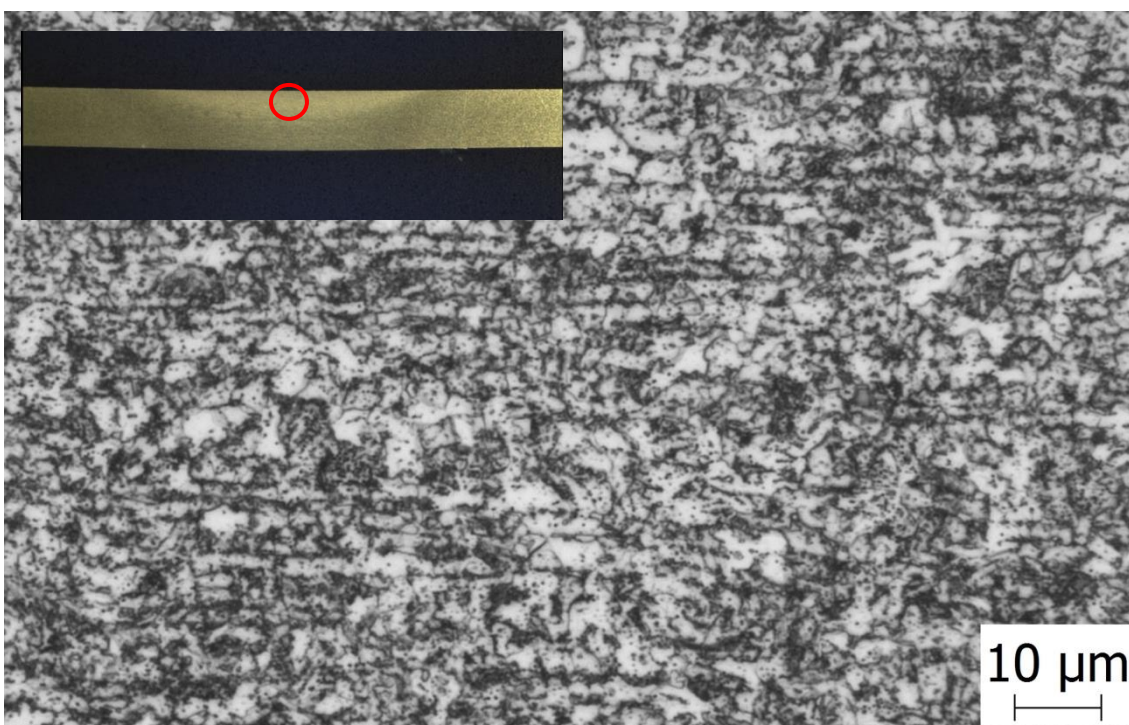


*Obr.3.11: Mikrostruktura vzorku č. S2 (740°C bez úderu) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*



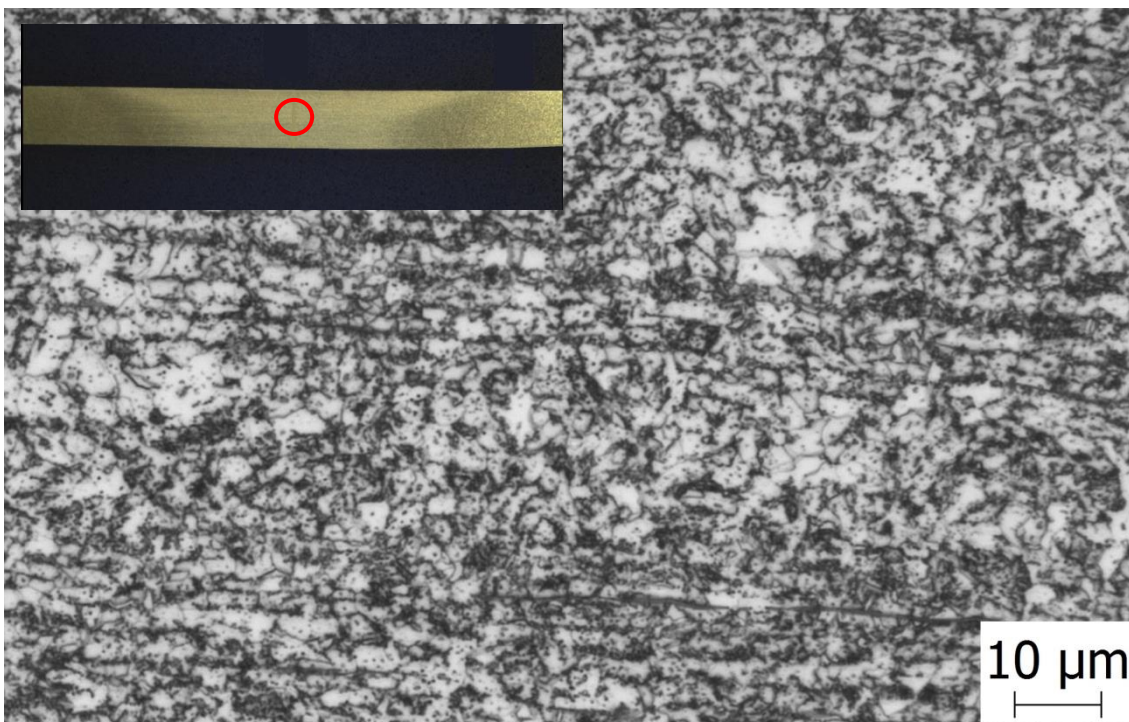


*Obr.3.12: Mikrostruktura vzorku č. S3 (840°C bez úderu) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*

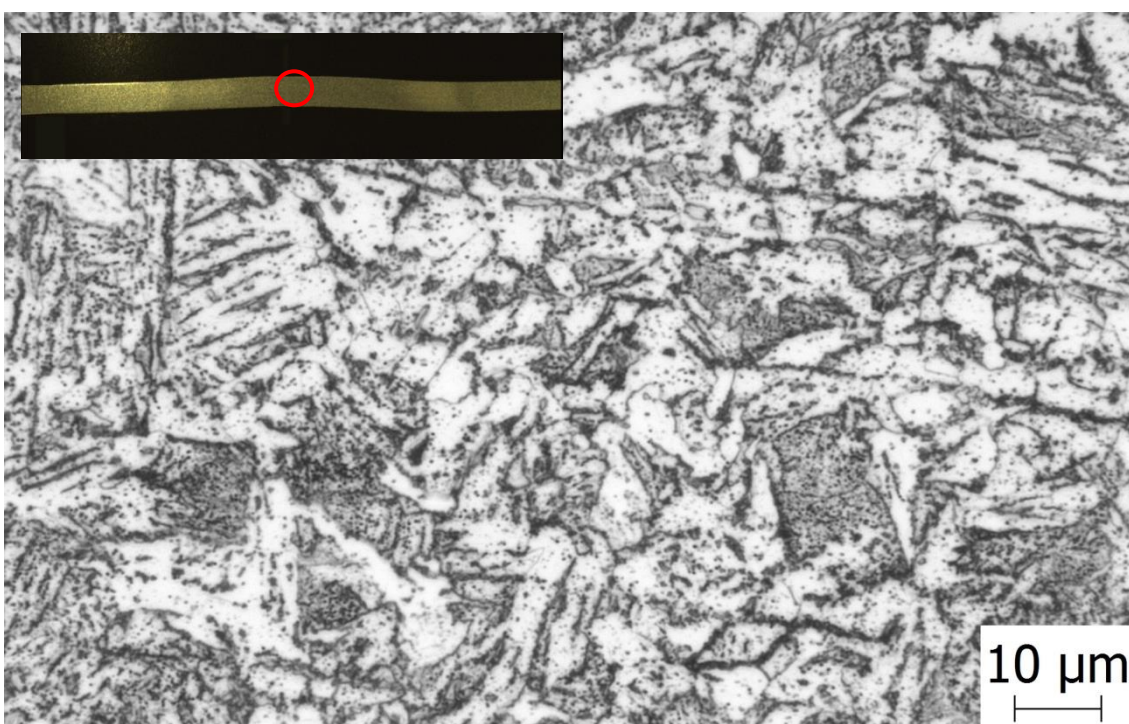


*Obr.3.13: Mikrostruktura vzorku č. S4 (653°C s úderem) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*





*Obr.3.14: Mikrostruktura vzorku č. S5 (740°C s úderem) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*



*Obr.3.15: Mikrostruktura vzorku č. S6 (850°C s úderem) v bodě ohřevu
(zvětšeno 1000x) + místo snímání (levý horní roh)*



Vlivem ohřevu došlo k částečné austenitizaci a pomalým ochlazováním na vzduchu se austenit rozpadl na strukturu feriticko-perlitickou. V některých místech se objevují bainitické ostrůvky. Obsah bainitických ostrůvků je však natolik nízký, že výrazně neovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu. Lze tedy říci, že po ohřevu materiálu na vysoké teploty a následném ochlazení nedošlo k výrazné degradaci materiálu.





Tvrдост

Na vzorcích S1 až S6 byla dále testována tvrdost podle Vickerse (dle ČSN EN ISO 6507-1) na zařízení Future Tech FV-300 se zatížením 10HV, která by měla určit, zda nedošlo k vysokému nárůstu tvrdosti po ohřevu vzorků, a potvrdit, zda nedošlo k nežádoucím fázovým transformacím. Do výbrusů je vtlačován diamantový pravidelný čtyřboký jehlan o vrcholovém úhlu 136° silou 98,07 N po dobu 10 s. Poté jsou z výbrusu odečteny úhlopříčky vtisku. Podle vztahu (7) je vypočtena velikost tvrdosti HV 10 v daném místě. Na grafech 4 a 5 jsou znázorněny průběhy tvrdosti ve směru délky vzorků.

$$HV = C \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \left(\sin \frac{\beta}{2} \right)}{d^2} \quad (7)$$

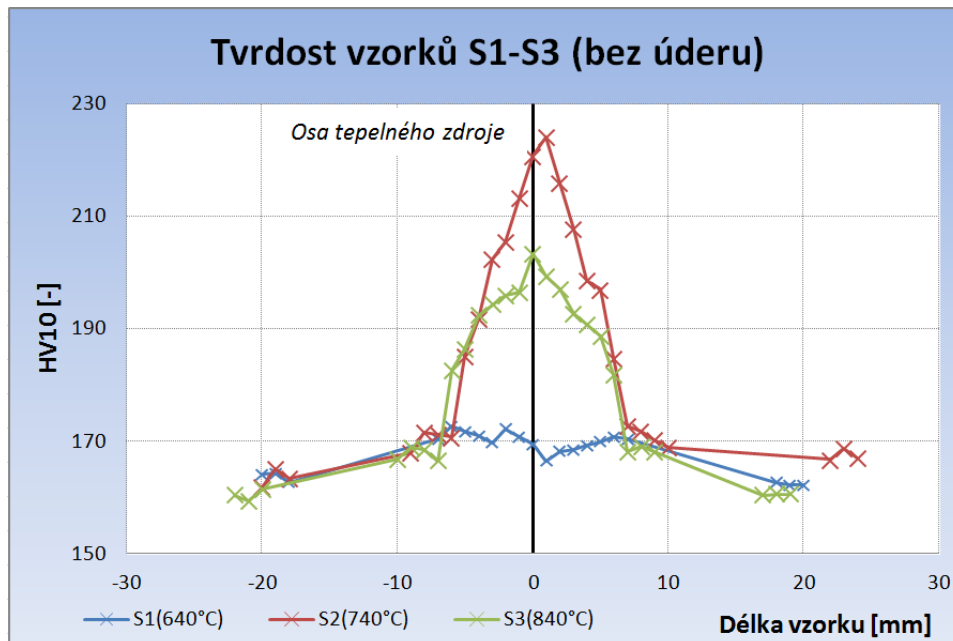
C ... konstanta [-]

F ... zatěžovací síla [N]

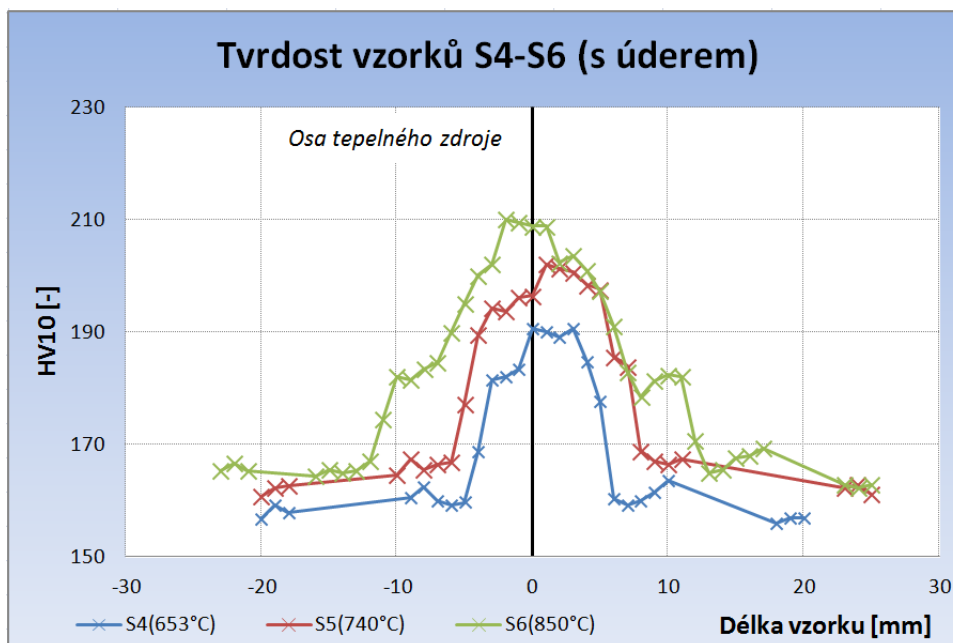
β ... vrcholový úhel [°]

d ... úhlopříčka vtisku [μm]



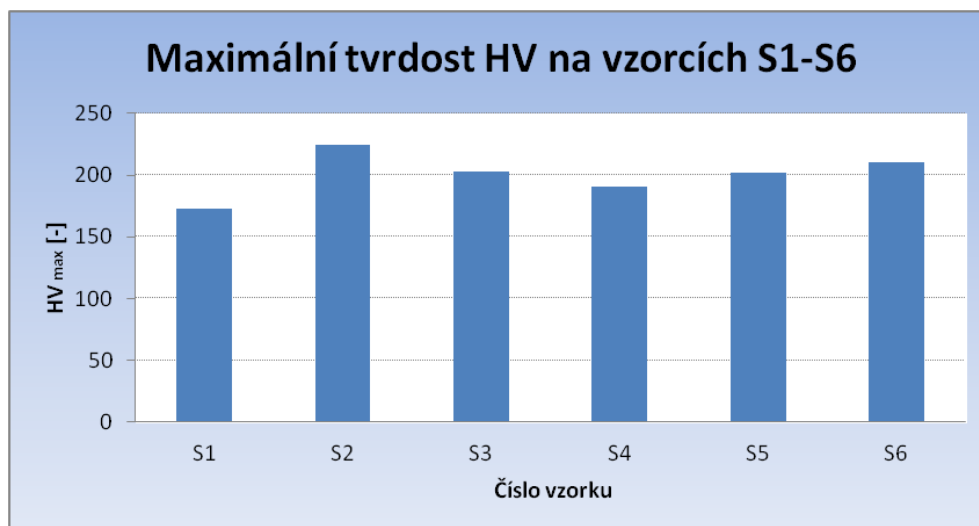


GRAF 4: Průběh tvrdosti HV10 po délce vzorků bez úderu (S1, S2 a S3)



GRAF 5: Průběh tvrdosti HV10 po délce vzorků s úderem (S4, S5 a S6)

Tvrdotost neovlivněného materiálu S355J2C+N se pohybovala okolo 160 HV. Vlivem ohřevu na vyšší teploty dochází k fázovým transformacím a ke vzniku bainitických ostrůvků ve struktuře, způsobujících mírný nárůst tvrdosti. Z grafů uvedených výše lze vyzorovat prudký nárůst tvrdosti hlavně u přechodu z neovlivněného materiálu na materiál ovlivněný vyšší teplotou, než 727°C , a to přibližně na 200 HV. Na vzorcích s úderem byly naměřeny spíše vyšší hodnoty tvrdosti. To je způsobené mechanickým zpevněním materiálu. Na grafu 6 jsou znázorněny maximální naměřené tvrdosti testovaných vzorků S1-S6. V příloze č.1 se nacházejí záznamy z měření tvrdosti na jednotlivých vzorcích spolu s fotografiemi umístění vpichů.



GRAF 6: Maximální naměřená tvrdost na jednotlivých vzorcích S1-S6

3.5 Nastavení plamene

Při ohřívání bodů kyslíko-acetylenovým plamenem je nutné správně seřídit plamen, a to tak, aby nedocházelo k nauhličování acetylenem nebo naopak ke spálení základního materiálu. Proto je nutné seřídit plamen jako neutrální. Pro dosažení nejlepšího napěchování ohřátého bodu je nutné ohřát bod v co možná nejkratším možném čase. Proto je potřeba zajistit co možná nejvyšší výkon plamene. Výkon plamene je závislý na průtoku obou plynů, jak kyslíku, tak i acetylenu. Průtok plynů je dále odvozen z pracovních tlaků plynů a z nastavení ventilů na držáku hořáku. Kyslíkový ventil je proto nutné plně otevřít. Pracovní tlaky plynů k rovnání plamenem jsou od výrobců tlakových lahví doporučeny pro C_2H_2 – 0,5 až 1 bar; pro O_2 – 3 až 7 bar. Pro zjištění přibližné doby ohřevu byly v rámci této práce testovány tři různé pracovní tlaky kyslíku (3, 5 a 7 barů). Pracovní tlak acetylenu byl nastaven jako neměnný, a to na 1 bar. Při nastavování plamene na neutrální se běžně postupuje tak, že je zapálen plamen, jsou doregulovány pracovní tlaky na požadované hodnoty, ventil kyslíku na držáku je uvolněn na maximum, otáčením acetylenového ventilu je nastaven lehce nauhličující plamen a následným mírným přiškrcením acetylenového ventilu začne docházet k ubývání acetylenového závoje až k nulovému přebytku acetylenu (viz obr. 3.16). Zároveň ale zůstává stejná délka vnějšího kužele (viz obr. 2.25). Po zapálení plamene byla nastavena špička primárního plamene od povrchu materiálu na 2 mm (zajištěna dorazem - viz obr. 3.4). Při nastavení určitého pracovního tlaku na redukčním ventilu dochází směrem k hořáku k mírnému úbytku tlaku v závislosti na délce hadic a dalších tlakových ztrátách. Dřívější návštěva BT CZ firmou Linde ovšem prokázala, že účinnost přenosu tlaku od redukčního ventilu k hořáku je 97.6% při délce hadic 25 m a vnitřního průměru kyslíkové hadice 6,3 mm, což lze při nastavování plamene zanedbat.



Obr.3.16: Neutrální seřízení plamene [5]

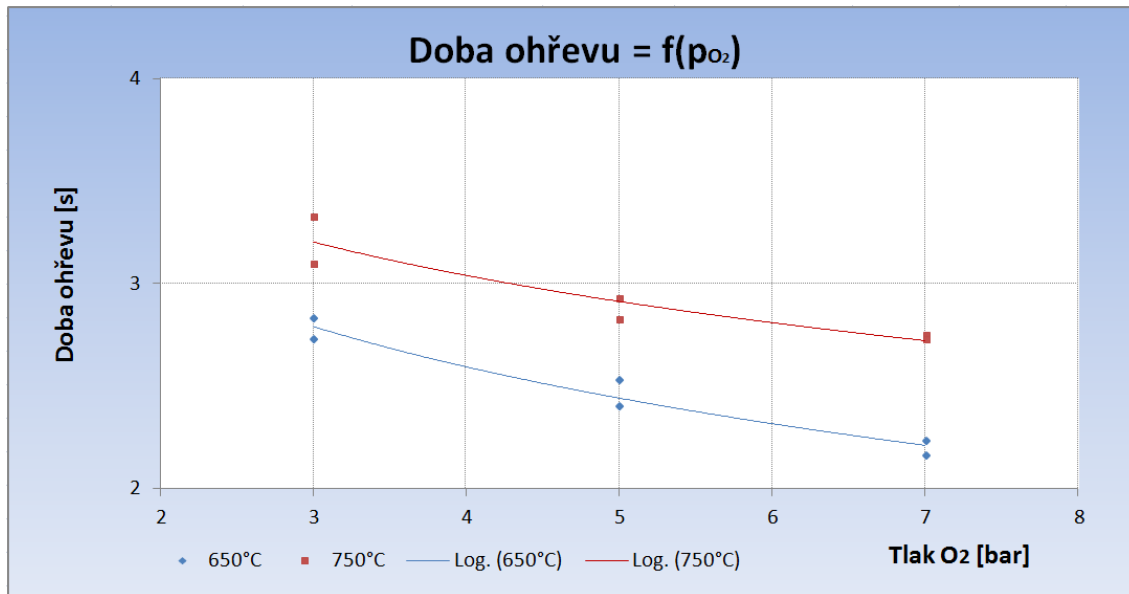
Při experimentu byla zároveň měřena délka primárního kužele, díky které se rovnač může orientovat při správném seřízení plamene na neutrální. V tabulce 5 jsou naměřené hodnoty z experimentu.

Tabulka 5: Hodnoty z experimentu závislosti doby ohřevu na pracovním tlaku O_2

Č. měření	$p_{C_2H_2}$ [bar]	p_{O_2} [bar]	Délka primárního kužele [mm]	Ohřev na teplotu [°C]	Doba ohřevu [s]
1.	1	3	10,5	650	2,83
					2,73
				750	3,10
					3,33
2.	1	5	12,4	650	2,53
					2,40
				750	2,83
					2,93
3.	1	7	14,2	650	2,16
					2,23
				750	2,75
					2,73

Graf závislosti doby ohřevu na pracovním tlaku kyslíku je uveden níže (viz GRAF 7). Doba ohřevu na teplotu 650°C je na grafu znázorněna modrou logaritmickou křivkou a doba ohřevu na teplotu 750°C červenou logaritmickou křivkou. Graf by měl sloužit ke stanovení přibližné doby ohřevu při experimentech v této práci a zároveň jako pomůcka při zacvičování nových rovnačů ve firmě BT CZ. Při nastaveném pracovním tlaku kyslíku na určitou hodnotu je vhodné ohřívat daná místa po dobu odpovídající intervalu mezi těmito dvěma křivkami nebo v jejich blízkém okolí. V případě nízké teploty nahřátí nedochází k takovému lokálnímu snížení meze kluzu materiálu, a není tak plně využita metoda bodového rovnání. V opačném případě, kdy teplota ohřátého bodu vysoko přesáhne definovanou horní hodnotu a může dojít až k natavení materiálu nebo, k nežádoucímu zvýšení hodnot tvrdosti.





GRAF 7: Závislost doby ohřevu na nastaveném pracovním tlaku kyslíku

3.6 Porovnání sekvencí bodových ohřevů

Při testování velikosti smrštění po ohřevu na vzorcích materiálu S355J2C+N o rozměrech 300x100x2 mm nebylo dosaženo dostatečně prokazatelných výsledků. Oproti reálnému stavu rovnání vzorkům chybělo pevné upnutí a tím je zdůvodněno i menší napěchování a následné smrštění. Bylo tedy rozhodnuto o testování na větších vzorcích totožného materiálu, z důvodu tuhosti odpovídající výrobě přivařených k rámu. Na vzorcích byla, po přivaření k rámu, měřena výchozí prostorová deformace. Po následném rovnání byla naměřena finální deformace, která byla porovnána s deformací výchozí.

Experiment byl proveden na třech svařencích s tím, že pro každý vzorek byla k rovnání použita jiná sekvence bodového ohřevu. První vzorek byl vyrovnán sekvencí, která je v BT CZ aktuálně používaná, a to metodou „Po řádcích“ (viz kap. 3.1), tedy nejdříve do „Kostkových čtyřek“, a následně do „Kostkových pětěk“. Druhý vzorek byl rovnán sekvencí do tvaru spirály, která je popisována v kapitole 2.3 (viz obr. 2.11a). Poslední, třetí vzorek byl rovnán metodou navrženou při řešení této diplomové práce. Metoda dostala pracovní název „Od rohů“ (viz obr. 3.25). Tato metoda simuluje ohřevy

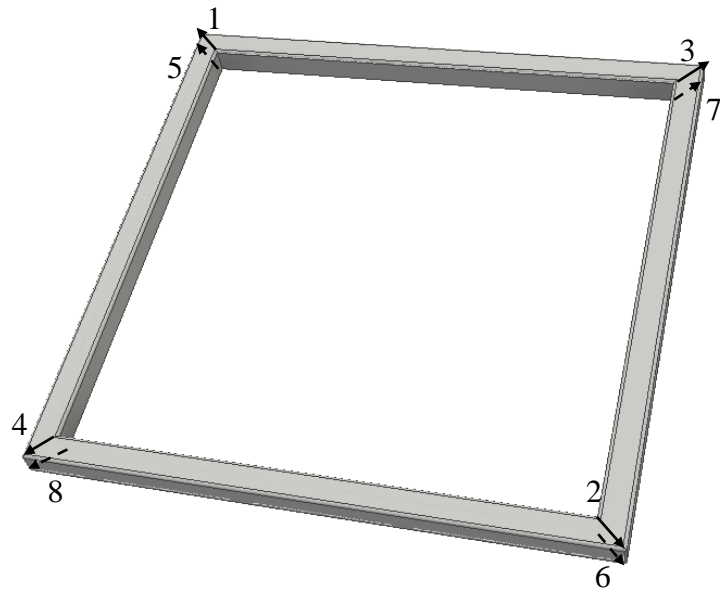
bodů s delšími prodlevami. Protože jsou body umístovány daleko od sebe, tak v okolí ohřivaného bodu zůstává relativně chladný materiál oproti ostatním sekvencím bodových ohřevů.

Kvůli určitému zjednodušení byly použity plechy o rozměrech 1x1m a pro dostatečnou tuhost byly použity rámy z materiálu S235JR, sestavené ze čtyřhranných profilů o průřezu 50x50x4 mm a o délce 1 m s úkosem 45° na obou stranách. Tyto plechy a rámy byly svařeny metodou 135 (dle EN ISO 4063). Po svaření rámu a plechů bylo nutno vyrovnat rámy vzorků pro získání referenční roviny nutné k provedení následného přesného záznamu z měření deformace. Následovalo měření deformace vzorků pomocí laserového 3D scanneru. Poté byly deformace vzniklé svařováním rovnány pomocí tří různých již zmíněných sekvencí bodových ohřevů. Po rovnání bylo opět provedeno finální 3D skenování výsledných deformací.

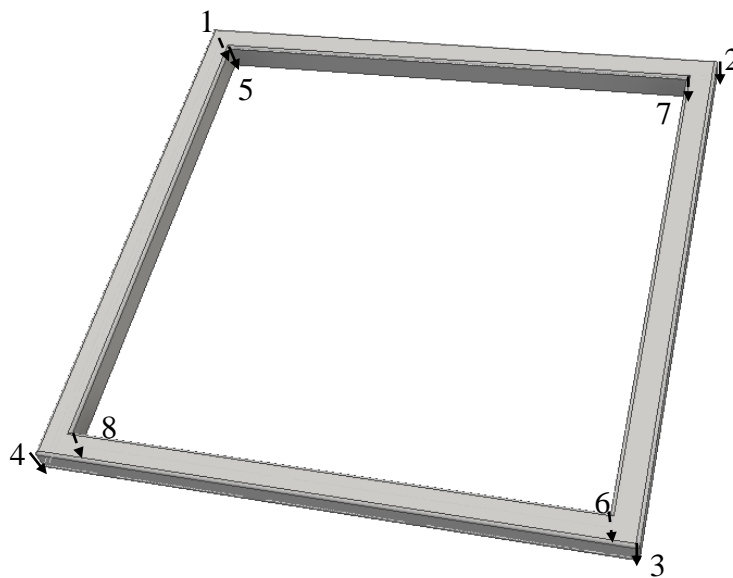
Svaření rámu a plechů

Pro vytvoření co nejpodobnějších deformací plechů na všech třech svařencích bylo nutné dodržení stejných sekvencí a parametrů svařování. Nejprve bylo třeba svařit rámy tak, aby nebyly po svaření zdeformované. Volila se tedy taková sekvence svařování, aby se deformacím zabránilo. Profily k sobě byly nejdříve nastehovány a teprve poté svařeny plným svarem. Rámy byly svařovány sekvencemi zobrazenými na obrázcích 3.17 a 3.18, podle pWPS 1 až 3 uvedených v přílohách 5, 6 a 7.





Obr.3.17: CAD model rámu 1x1m s označením sekvence svařování svaru I4



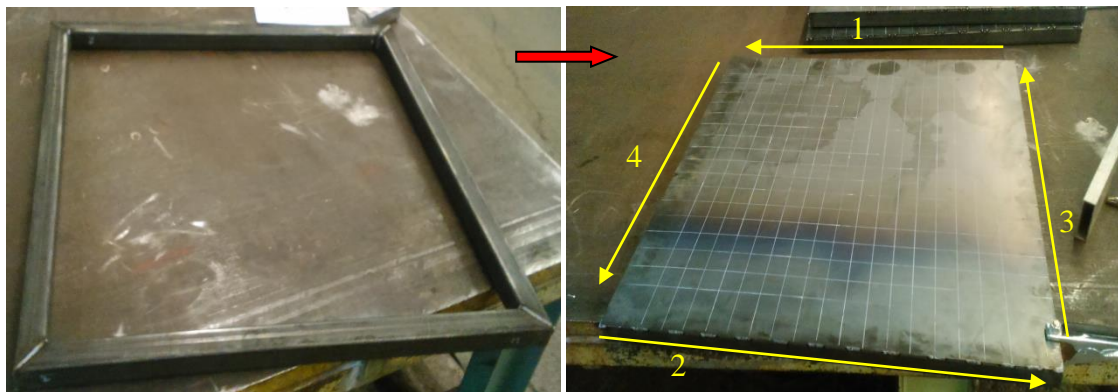
Svar I6 : 1 až 4; svar a3 : 5 až 8

Obr.3.18: CAD model rámu 1x1m s označením sekvence svařování svaru I6 a a3

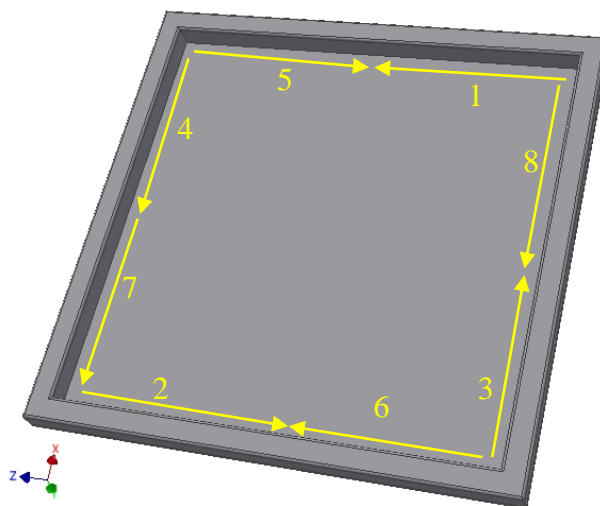




Po přebroušení povrchu svarů byly k rámu přivařeny plechy o rozměrech 1000x1000x2 mm, jak je zřejmé z obrázku 3.19. Pro přivaření plechů ke kontuře byly použity takové sekvence svařování, aby došlo k co největším deformacím přivařovaného plechu. Vnější tupý půl-oblý spoj byl svařen stehy Tl 2 o délkách 35 mm pravidelně rozložených po délce spoje. Vnitřní tupý půl-oblý spoj, který po svaření způsobil značné deformace plechu, byl nejdříve nastehován, a až poté byl svařen svary po celé délce. A to proto, aby se v průběhu svařování neměnila svarová mezera. Sekvence svařování plechu ke kontuře je znázorněna na obrázcích 3.19 a 3.20. Svařování vnitřního a vnějšího půl oblého spoje probíhalo podle pWPS 4 a 5 uvedených v přílohách 8 a 9.



Obr.3.19: Sekvence svařování vnějších stehů Tl 2



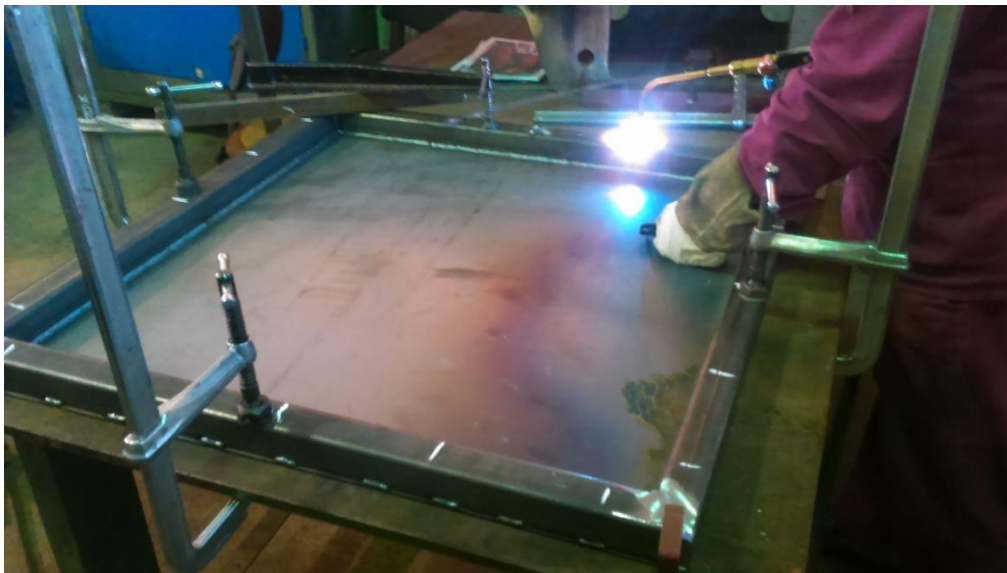
Obr.3.20: CAD model vzorků 1x1m s označením sekvencí svařování vnitřního svaru Tl 2



Rovnění rámu

Při svařování bylo do rámu nerovnoměrně vneseno velké množství tepla, zejména při svařování vnitřního spoje T1/2. Došlo tím k mírnému prohnutí rámu. Kvůli získání referenční roviny pro následný 3D scan vzorků bylo nutné rámy vyrovnat. Rámy byly rovnány bodovým plamenovým ohřevem ze strany, kde není plech, tak, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění a k dalšímu vnesení napětí do plechu. Na obrázku 3.21 je snímek pořízený při rovnání rámu.

Rámy byly podloženy v rozích a upnuty ke stolu pomocí stolařských svěrek. Rovnač hliníkovým pravítkem proměřil velikost deformace a označil místa ohřevu. Poté kyslíko-acetylenovým plamenem označená místa ohřál na teplotu cca 700°C. Svěrky znemožnili roztažení ohřáté části rámu a tím byly ohřáté body pēchovány. Po vychladnutí byly svěrky povoleny a byla proměřena rovinnost rámu pomocí hliníkového pravítka.



Obr.3.21: Rovnění rámu bodovými ohřevy

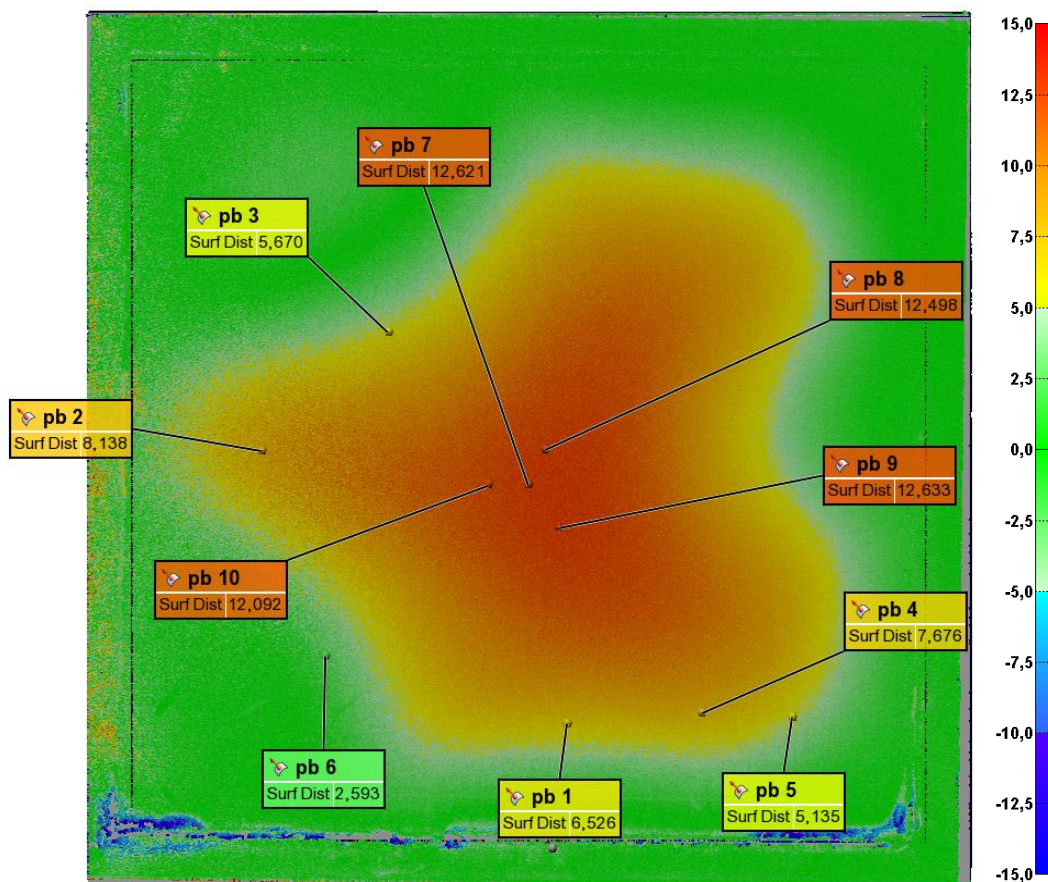
3D scan – před rovnáním

Po vyrovnání rámu teprve bylo možno změřit výchozí deformace plechu. Tyto deformace byly měřeny laserovým 3D scannerem FARO Focus-X130. Systém pracuje na bázi vyzařování bodového laserového paprsku. Paprsek dopadá na otáčející se kosé zrcadlo, které jej láme pod úhlem 90°. Tímto je zajištěno scanování prostoru ve vertikálním směru. Aby bylo možno snímat prostor také v horizontálním směru, otáčí se celý scanner na podstavci kolem vlastní svislé osy.

Na obrázku 3.22 je znázorněna naměřená deformace vzorku č. 1 před rovnáním. Výsledky měření všech vzorků jsou uvedeny v přílohách 2, 3 a 4. Vedle obrázku po pravé straně je umístěna barevná škála s přiřazenými velikostmi deformací. Modré části v oblastech svaru jsou způsobeny nesprávným snímáním hodnot, zapříčiněných výrazným odleskem přebroušených svarů. Na obrázku je znázorněno několik bodů s odpovídající místní deformací. Maximální deformace ze všech tří vzorků jsou shrnuty v následující tabulce 6.

Tabulka 6: Maximální deformace před rovnáním

č. vzorku	Max. def. před rovnáním [mm]
1	12,6
2	13,3
3	14,5

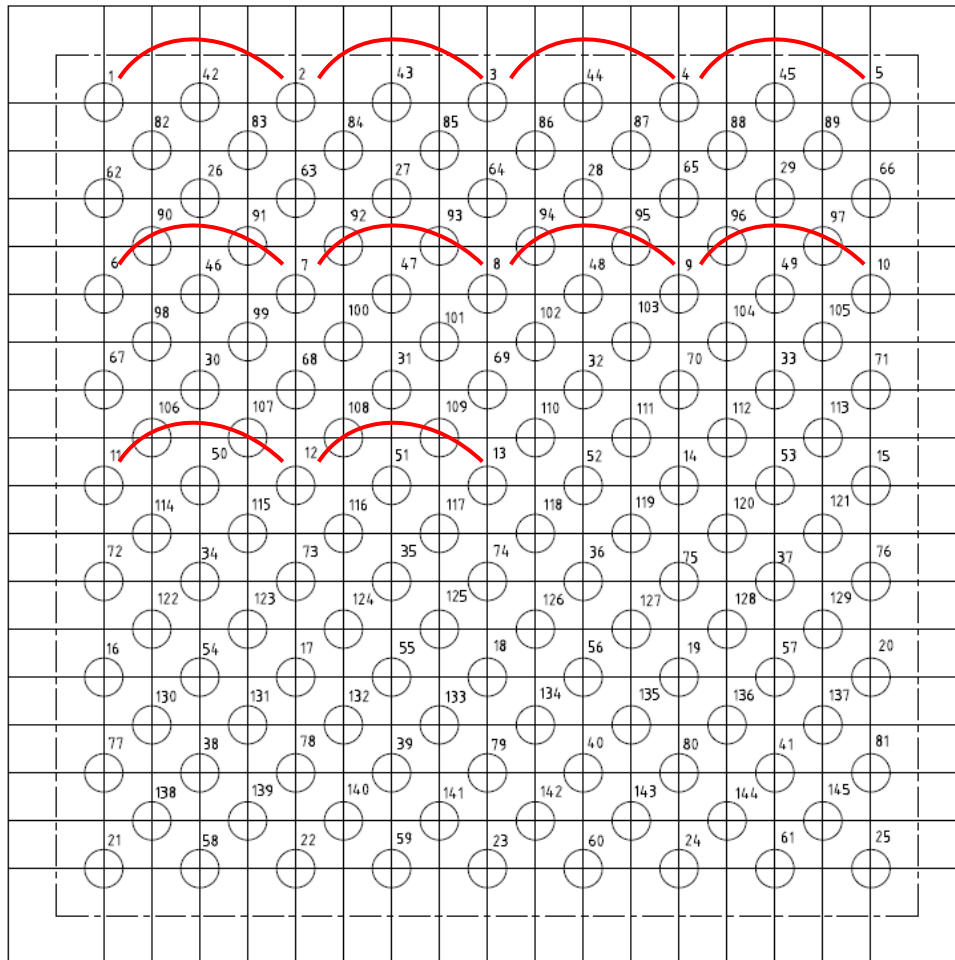


Obr.3.22: Mapa deformací vzorku č. 1 před rovnáním

Rovnění plechů

Kvůli ohřevu bodů při rovnání na přesně definovaných místech byl ještě před přivařením rámu k plechům na povrchu nakreslen rastr s krokem 50 mm. K rovnání plechů byly použity 3 různé sekvence ohřevu. První vzorek byl rovnán metodou „Po řádcích“. Na obrázku 3.23 je vidět přesná sekvence ohřívání bodů vzorku č. 1. K ohřevu bodů byl použit hořákový nástavec o velikosti 4-6. Také byla sledována doba ohřevu každého bodu. Pracovní tlak kyslíku byl nastaven na 5 bar a pracovní tlak acetyleny na 1 bar. Plamen byl nastaven dle kapitoly 3.5. Po ohřátí každého bodu byl proveden úder plastovou palicí do konkrétního bodu takovou silou, aby nebyl bod oproti okolí plechu vystouplý. Na všechny 3 vzorky byl aplikovaný stejný počet ohřevových bodů, a to 145.

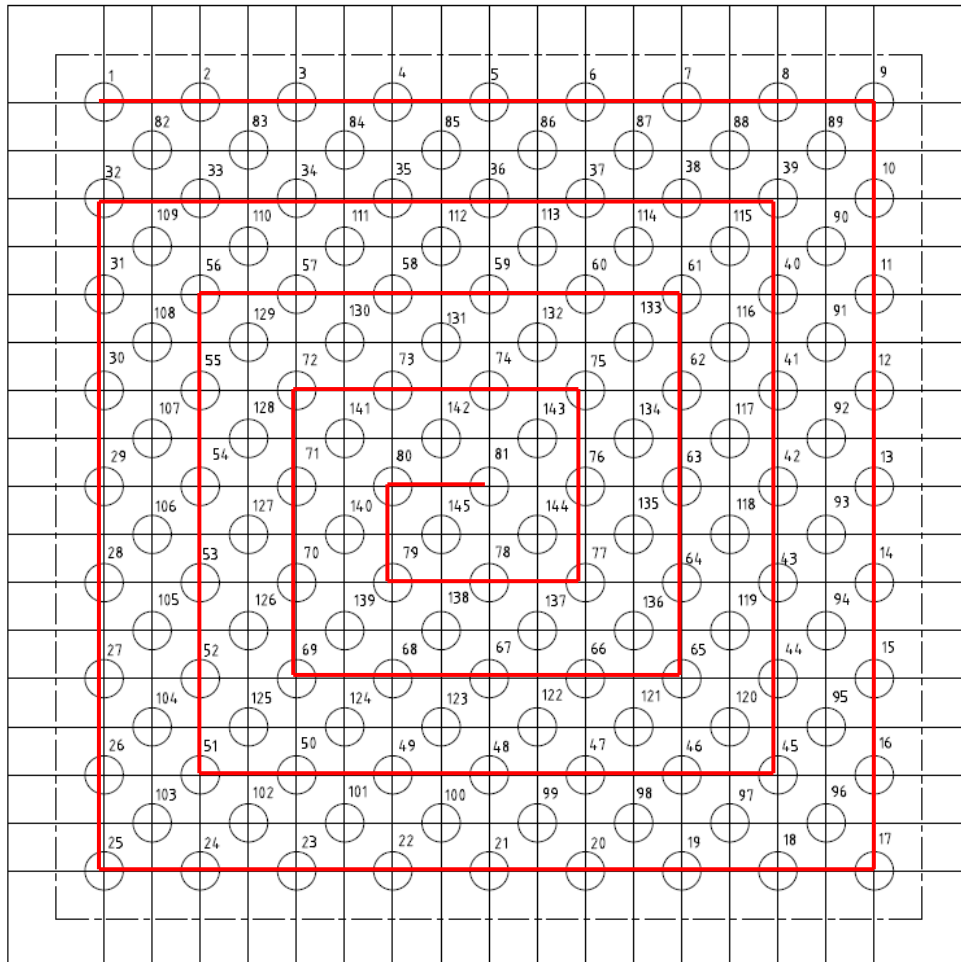




Obr.3.23: Sekvence ohřevů vzorku č.1

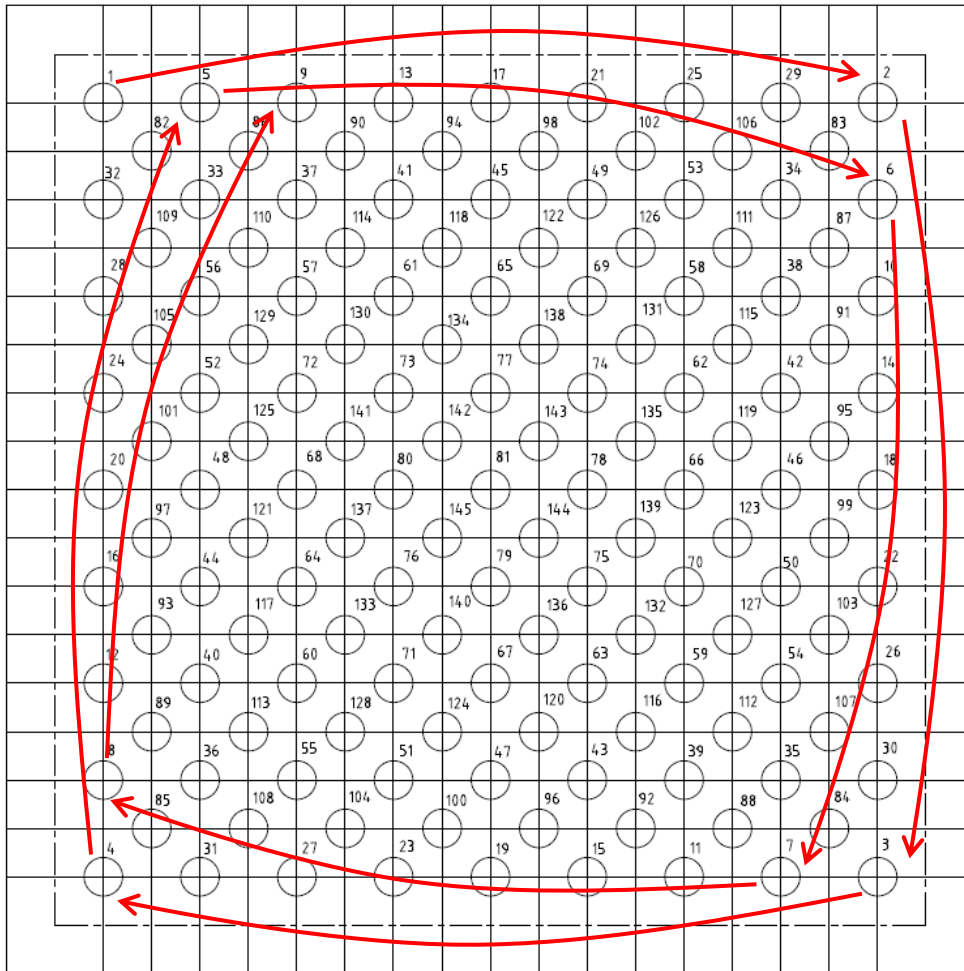


Vzorek č. 2 byl rovnán sekvencí bodového ohřevu zvanou „Do spirály“. Na obrázku 3.24 je vidět sekvence ohřívání bodů vzorku č. 2.



Obr.3.24: Sekvence ohřevů vzorku č.2

Vzorek č. 3 byl rovnán nově vytvořenou sekvencí bodového ohřevu pojmenovanou „Od rohů“. Na obrázku 3.25 je vidět přesná sekvence ohřívání bodů vzorku č. 3



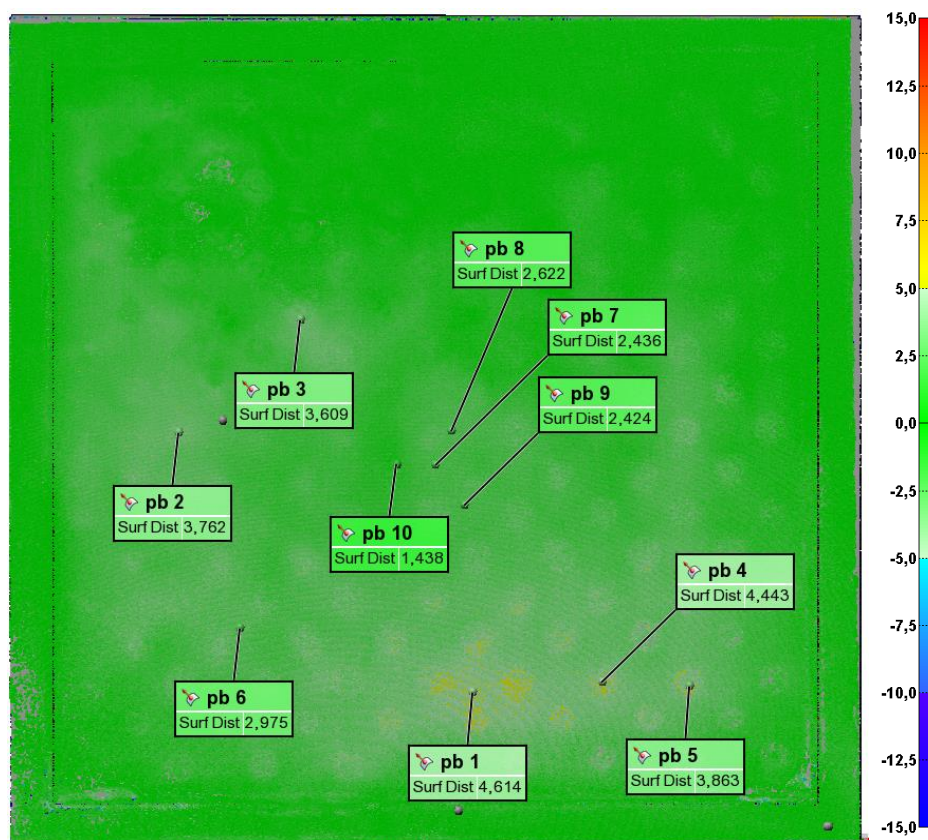
Obr.3.25: Sekvence ohřevů vzorku č.2

Po srovnání deformací jednotlivých vzorků bodovými ohřevy se na rámech opět objevily mírné deformace. Z důvodu relevantních výsledků z měření 3D scannerem bylo nutné rámy opět vyrovnat. Postupovalo se stejným způsobem jako při rovnání rámu ihned po svařování.

Po srovnání rámu následovalo prostorové měření deformací 3D scannerem. Na obrázku 3.26 je znázorněna naměřená deformace vzorku č. 1 po bodovém rovnání. Výsledky měření ostatních vzorků jsou uvedeny v přílohách 2, 3 a 4. Vedle obrázku po pravé straně je umístěna barevná škála s přiřazenými velikostmi deformací. V tabulce 7 jsou uvedeny maximální hodnoty deformací zjištěných po rovnání na jednotlivých vzorcích.

Tabulka 7: Maximální deformace po rovnání

č. vzorku	Max. def. po rovnání [mm]
1	4,614
2	12,827
3	5,733



Obr.3.26: Mapa deformací vzorku č. 2 po rovnání

3.7 Zpracování výsledků

Po svaření všech tří vzorků bylo na pleších dosaženo rozdílných hodnot maximální deformace. To je způsobeno hlavně lidským faktorem. Bylo sice postupováno dle předem určených pWPS, ale člověk bohužel není schopen udržet parametry svařování na všech vzorcích na 100% stejné. Proto vyhodnocení jednotlivých sekvencí vychází z porovnání maximálních deformací získaných pro hodnocený vzorek před a po rovnání. Rozdíly těchto maximálních naměřených hodnot spolu se shrnutím výsledků z měření 3D scannerem jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Maximální deformace před rovnáním

číslo vzorku	Max. def. před rovnáním [mm]	Max. def. po rovnání [mm]	Vyrovnání [mm]
1	12,6	4,614	7,986
2	13,3	12,827	0,473
3	14,5	5,733	8,767

Z tabulky 8 lze určit, že nejvyšší hodnoty maximální deformace po svařování dosáhl vzorek č. 3. Naopak nejnižší deformace dosáhl vzorek č. 1.

Dále lze s jistotou říci, že po rovnání byla naměřena nejnižší hodnota maximální deformace na vzorku č. 1 a to 4,6 mm. Nejvyšší hodnota po rovnání byla naměřena dokonce 12,8 mm, a to na vzorku č. 2. Tyto hodnoty maximálních deformací po rovnání sice nevyhovují toleranci dle interní směrnice firmy BT CZ, která je 1 mm / 1 m, ale pro určení výkonnější sekvence rovnání tyto hodnoty zcela postačí. Takto vysokých deformací je docíleno hlavně kvůli velkým rozměrům vzorků. Při rovnání bočnic ve firmě BT CZ se neobjevuje žádné pole takovýchto rozměrů. Reálné deformace plechů po svařování bočnic kolejových vozidel sice dosahují obdobných hodnot jako na těchto zkušebních vzorcích, ale při rovnání menších ploch se body lépe pěchují a o to je zapotřebí menšího počtu ohřátých bodů.

Nakonec se dostáváme k hodnotám rozdílu deformací před a po rovnání plechů, viditelné ve třetím sloupci. K nejmenšímu vyrovnání došlo u vzorku č. 2, který byl rovnáný metodou „Do spirály“. Maximální deformace se snížila o pouhých 0,5 mm. U ostatních dvou zkoumaných metod byla změna maximální deformace obdobná. U vzorku č. 1, rovnaného „Po řádcích“, byla naměřena změna deformace přibližně 8 mm.



Vzorek č. 3, při němž byla použita metoda „Od rohů“, byla změna deformace dokonce 8,8 mm.

4. Aplikace ve výrobě a doporučení pro další výzkum

Výsledky experimentu prokázaly, že sekvence rovnání zvaná „Po řádcích“, tedy ta sekvence, která je používána ve firmě BT CZ doposud, je velice účinná. I tento fakt je pro tuto práci velice důležitý, protože jen na málo místech v České Republice jsou přivařovány takto tenké plechy ke kontuře a následně rovnány bodovým ohřevem. Firma BT CZ je v tomto ohledu hodně specifická a nejspíše v této oblasti v ČR nemá konkurenci. Nicméně nově vzniklá sekvence ohřevu nazvaná „Od rohů“ bude doporučena jako nová sekvence pro bodové rovnání v BT CZ a bude prověřena její možná aplikace při rovnání bočnic kolejových vozidel. Tato práce bude pro tuto aplikaci sloužit jako podkladový materiál.

Pro další výzkum by bylo vhodné porovnání plamenového a indukčního ohřevu. Dále také prozkoumání jiných sekvencí ohřevu. Bylo by vhodné do tohoto výzkumu zapojit zkušené rovnače. Jako další bych doporučil testovat pomocí těchto sekvencí také jiné materiály využívané na jiných projektech v BT CZ a prověřit jestli výsledek tohoto experimentu obecně platný i pro ně. Též by bylo vhodné prověřit, zda jsou výsledky obdobné, když nejsou plechy jen vypouklé, ale zvlněné do obou stran. Toho by bylo docíleno například přivařením žeber mezi rám na vzorku 1x1 m. Je také na zvážení, zda záleží na tloušťce rovnaného plechu. Bylo by tedy vhodné pokračovat ve výzkumu porovnáváním různých tlouštěk plechu.

V případě rovnání kyslíko-acetylenovým plamenem do procesu vstupuje mnoho proměnných. V první řadě lze doporučit, aby se navazující výzkum ubíral směrem k eliminaci možných proměnných. Využijí-li se výhody indukčního ohřevu, jako je nastavitelný výkon a čas ohřevu, a aplikují-li se na plamen, neměla by mít tato metoda ohřevu konkurenci. Bylo by ale nutné zajistit automaticky nastavitelné seřízení plamene. Mechanismus, který by toto umožňoval, by ale nesměl být součástí držáku, kvůli případné obtížné manipulaci. Dále by bylo vhodné zajistit čas ohřevu, nebo spíše integrovat senzor snímající teplotu materiálu ze strany hořáku.





5. Závěr

Předložená diplomová práce byla zaměřena do oblasti rovnání deformací po svařování pomocí kyslíko-acetylenového plamene. Jedná se o oblast, která je velice specifická a proto je obtížné najít obdobné studie, či výsledky k porovnání. Cílem práce bylo nalézt (případně optimalizovat) takový postup rovnání, který by snížil časovou náročnost a hodnoty vneseného tepla do materiálu. Zároveň bylo snahou analyzovat a popsat celý proces rovnání tak, aby bylo zřejmé, jaké jsou hlavní proměnné, v jakých mezích je lze korigovat a jaký je celkový vliv na rovnaný materiál a jeho strukturu.

V experimentální části práce bylo provedeno několik dílčích experimentů. Nejprve byla prověřována myšlenka, zda smrštění ohřátých a napěchovaných bodů závisí na teplotě okolí materiálu. Při ohřevu totiž dochází ke snížení meze kluzu materiálu, a při chladnutí bodu umístěného vedle jiného ohřátého bodu dochází k tomu, že si chladnoucí bod bere materiál z teplejší části plechu, tedy z nejbližší vedle ohřátého bodu. Pro zjištění pravdivosti této úvahy byl navržen jednoduchý experiment na vzorcích materiálu S355J2C+N o rozměrech 300x100x2 mm. Na každém z pěti vzorků byly ohřáty 3 body vedle sebe nejdříve s krátkou prodlevou pěti vteřin a na dalších pěti vzorcích s dlouhou prodlevou až do vychladnutí. Poté bylo u těchto obou způsobů provedeno porovnání změny délky před a po ohřevu (smrštění). Lze konstatovat, že u materiálu s krátkou prodlevou ohřevu bylo docíleno většího smrštění. Bylo ale rozhodnuto o aplikaci této myšlenky na větších vzorcích s tuhým upnutím po obvodu.

Dále byla provedena analýza vlivu ohřevu na strukturní vlastnosti rovnaného materiálu. Byly testovány 3 různé teploty (640°C, 740°C a 840°C) nejdříve bez použití dynamické síly a další s použitím následného úderu po ohřevu, sloužícího k napěchování ohřátého bodu. Po uvedených testech byla provedena metalografická strukturní analýza a měření tvrdosti od tepelné osy bodu směrem do základního materiálu. Touto analýzou bylo potvrzeno, že pro testovanou výši teplot nedochází v ohříváních místech k neakceptovatelné degradaci materiálu.

Dále byla kvůli eliminaci lidského faktoru testována doba ohřevu na hodnoty teplot 650°C a 750°C, mezi nimiž by se měl operátor pohybovat při ohřevu bodů. Tato doba byla měřena v závislosti na intenzitě ohřevu plamene při různě nastavených



pracovních tlacích plynů. Tento experiment sloužil k definování okrajových podmínek při experimentu rovnání velkých vzorků ukotvených v tuhých rámech.

Jednalo se o vzorky o rozměrech 1x1 m, u kterých vznikly po svařování deformace přesahující 12 mm. Tyto deformace byly změřeny laserovým 3D scannerem. Poté byla na každý ze vzorků aplikována rozdílná sekvence bodového rovnání. Na vzorku č. 1 byla použita sekvence rovnání používaná doposud ve firmě BT CZ. Na vzorku č. 2 byla aplikována sekvence ohřevů doporučená výrobcem tlakových lahví. Na třetím vzorku, byla testována sekvence ohřevů, která vznikla na základě již zmíněné myšlenky, že závisí na teplotě okolního materiálu. Pro každý z uvedených vzorků byl použit stejný počet ohřevových bodů, a to 145.

Při porovnání těchto vzorků bylo dokázáno, že nejefektivnější způsob rovnání zdeformovaných polí plechů materiálu S355J2C+N o tloušťce 2 mm je nová sekvence ohřevu nazvaná „Od rohů“. Tímto byl tedy potvrzen fakt, že výhodnější ohřev bodů je do vychlazených míst. Přestože se nově navržená metodika rovnání prokázala jako nejefektivnější, stávající metoda „Po řádcích“ vykazovala obdobné výsledky. Je tedy na zvážení zda a případně v jakém rozsahu zavést tuto novou metodiku do výroby v BT CZ. Práce však jednoznačně pomohla definovat a popsat vliv nejdůležitějších veličin vstupujících do procesu rovnání plamenem a lze tak tyto podklady využít v rámci dalšího výzkumu a vývoje v této oblasti.





Seznam literatury

- [1] NEUMANN, H.: Teorie svařování a pájení. Část 1: Tavné svařování. Liberec: TU v Liberci, 2001. 167 s.
- [2] MÜNCNER, L., IŽDINSKÝ, O., RUŽA, S. Deformácie a napätia při zvaraní. Bratislava: SVTL, 1964. 76 s.
- [3] Vysoká škola báňská – Fakulta strojní. *Vlastnosti a zkoušení materiálů – Plasticita a creep* [online]. [cit. 16.2.16]. Dostupné z: http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/VZM9_creep.pdf
- [4] KOU ,S. Welding metalurgy. 2nd edition, John Willey and Sons, Inc., USA, 2003. 461 s.
- [5] BOC. *Fundamentals of Flame Straightening*. [online]. [cit. 22.2.2016]. Dostupné z: https://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/-Fundamentals-of-Flame-Straightening410_113398.pdf
- [6] BOC. *Flame solutions*. [online]. [cit. 22.2.2016]. Dostupné z: http://www.boconline.co.uk/internet.lg.lg.gbr/en/images/lindoflamm-flame-solutions410_39434.pdf
- [7] Kubiček, J. *Technologie svařování*. [online]. [cit. 22.2.2016]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_svarovani__5te_etv_etv-k__kubicek.pdf
- [8] GCE. *Safety Equipment* [online]. [cit. 23.2.2016]. Dostupné z: <http://czech.gcegroup.com>
- [9] Wikipedie. *Svařování plamenem* [online]. [cit. 23.2.2016]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_plamenem
- [10] Svarinfo.cz. *Svařování metodou 311 – plamenem* [online]. [cit. 23.2.2016]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz>
- [11] DOM –ZO 13, s.r.o.. *Svařování plamenem* [online]. [cit. 8.3.2016]. Dostupné z: http://www.domzo13.cz/dokumenty/vyuka/svar_skoly/technologie_plamen.ppt
- [12] ČSN EN 10027-1. *Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2006.





- [13] Mendelova univerzita v Brně. *Projektování servisních provozů* [online]. [cit. 16.4.2016]. Dostupné z: http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/print.php?page=5778&typ=html
- [14] GMS. *Hadice pro každé použití* [online]. [cit 18.4.2016]. Dostupné z: <http://www.gms.cz/cz/vyrobek/10069-twin-welding-en-559>
- [15] Vildman. *Tipy pro praktiky – Rovnání plamenem* [online]. [cit 18.4.2016]. Dostupné z: <http://www.vildman.eu/getattachment/9740220f-ff3d-44d1-b3c6-42882e2649bc/Tpp-Rovnani-plamenem.aspx>
- [16] Wikipedie. *Emisivita* [online]. [cit. 28.4.2016]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Emisivita>
- [17] KMT TU v Liberci. *Popouštění ocelí* [online]. [cit 1.5.2016]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/ttz%20Dad/-popoceli.pdf
- [18] PRIMA BILAVČÍK, s.r.o.. *Přístroje pro měření a metrologii* [online]. [cit 4.5.2016]. Dostupné z: <http://www.merici-pristroje.cz/>

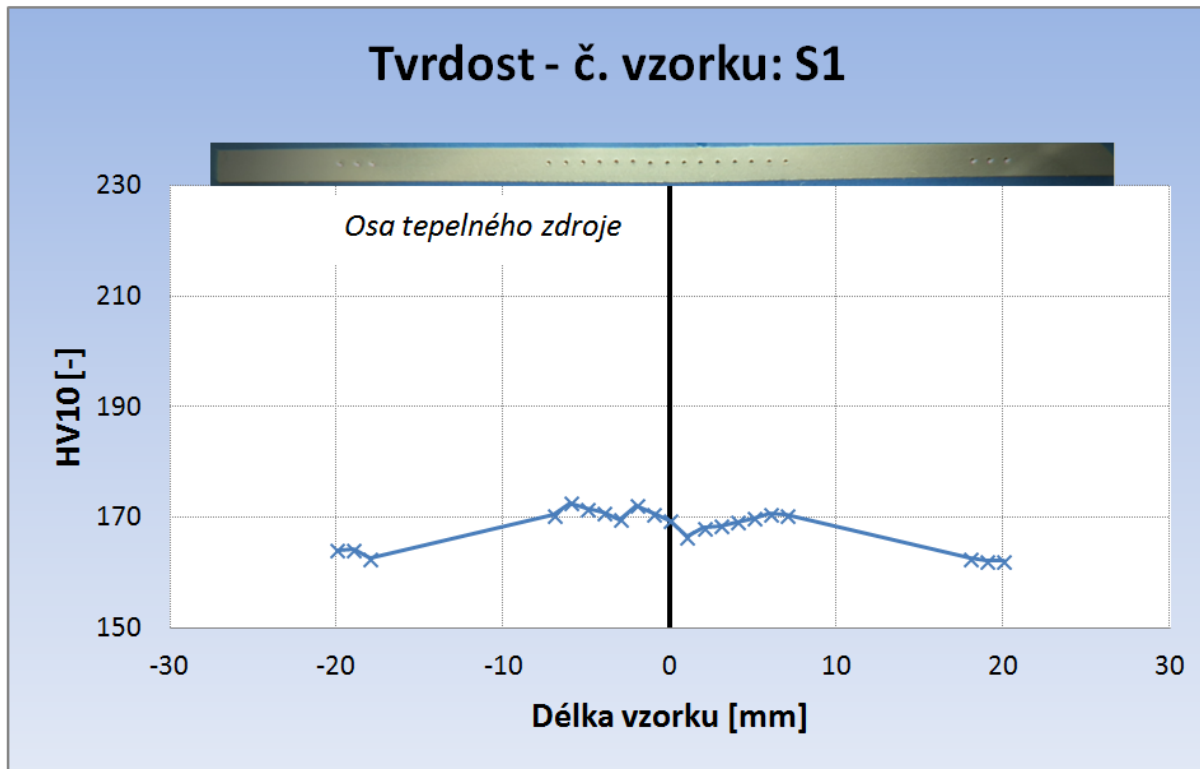


Seznam příloh

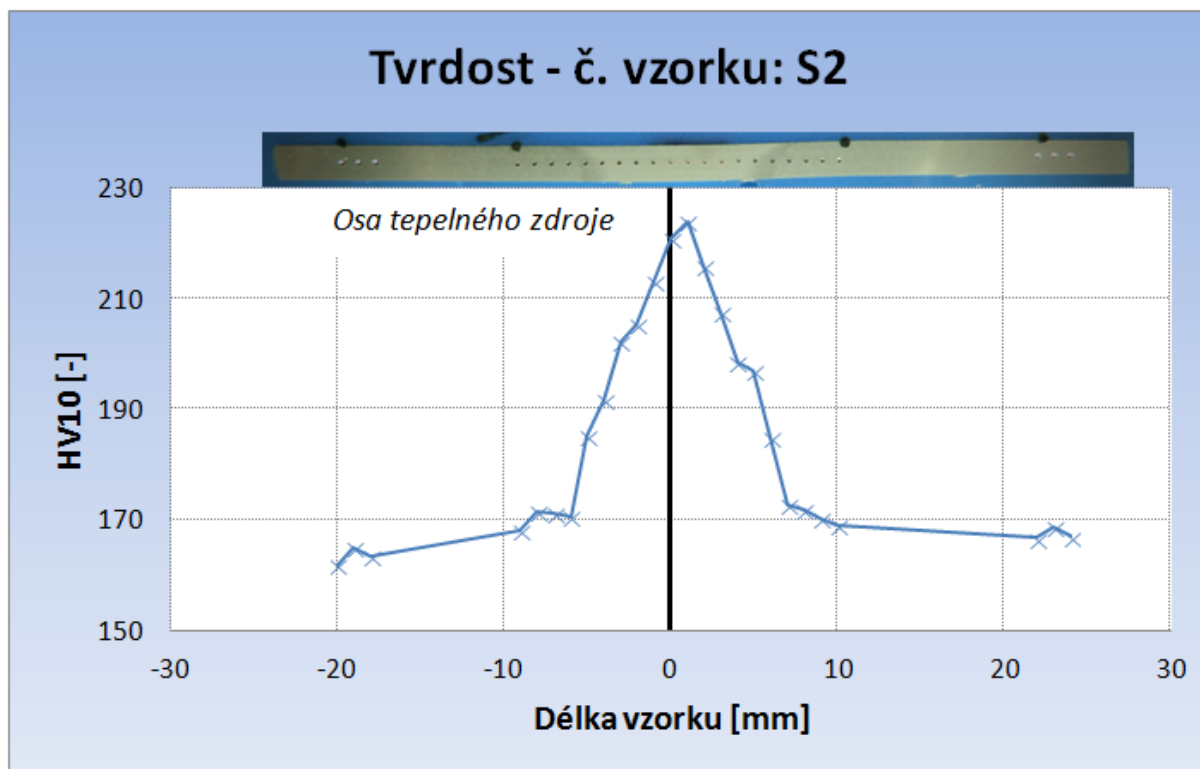
Příloha č.1. – 1. část	Záznam měření tvrdosti Vickersem vzorků S1 a S2
Příloha č.1. – 2. část	Záznam měření tvrdosti Vickersem vzorků S3 a S4
Příloha č.1. – 3. část	Záznam měření tvrdosti Vickersem vzorků S5 a S6
Příloha č.2	Mapa deformací vzorku č. 1 před rovnáním a po rovnání
Příloha č.3	Mapa deformací vzorku č. 2 před rovnáním a po rovnání
Příloha č.4	Mapa deformací vzorku č. 3 před rovnáním a po rovnání
Příloha č.5	pWPS 1
Příloha č.6	pWPS 2
Příloha č.7	pWPS 3
Příloha č.8	pWPS 4
Příloha č.9	pWPS 5

Příloha č.1 – 1. část

Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S1 (640°C bez úderu):

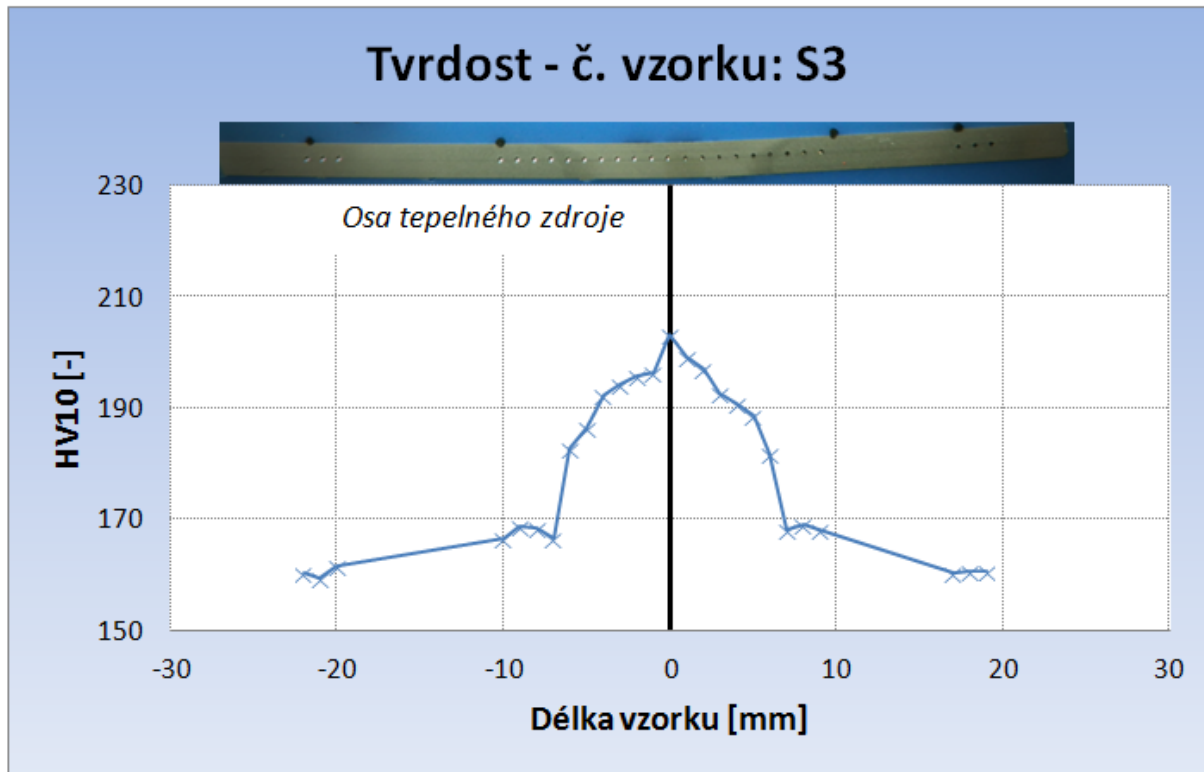


Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S2 (740°C bez úderu):

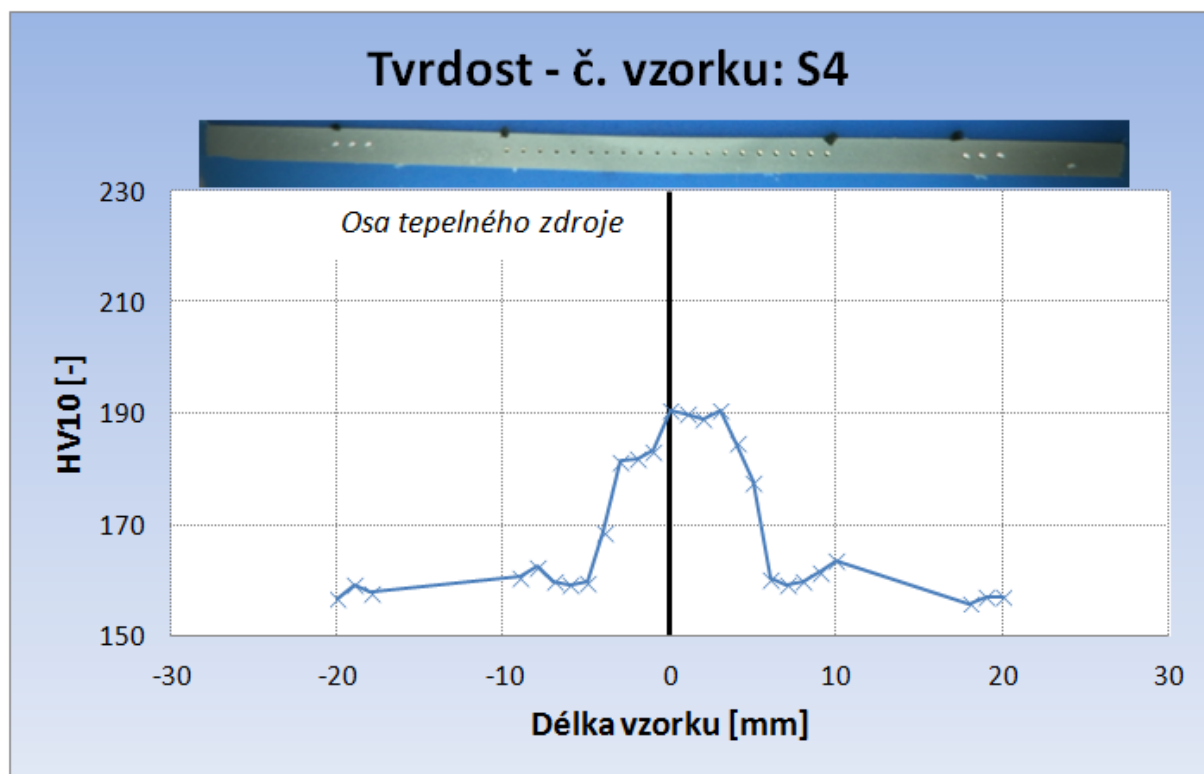


Příloha č.1 – 2. část

Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S3 (840°C bez úderu)

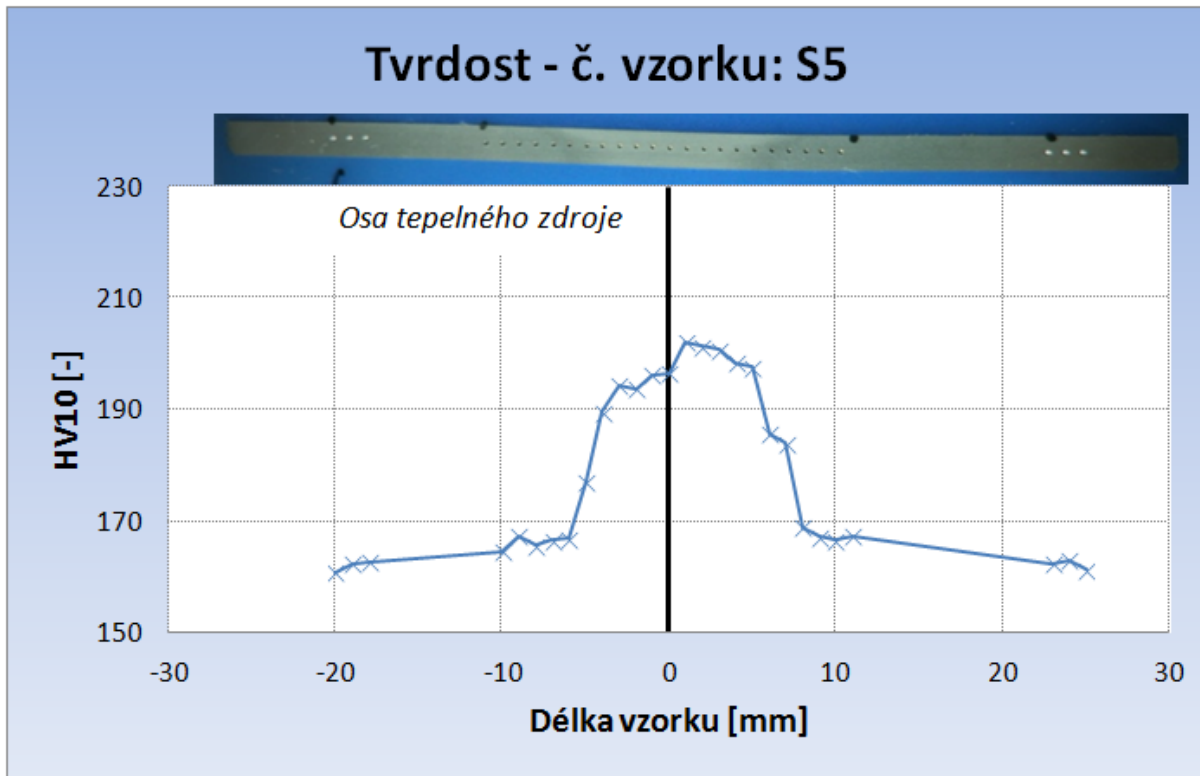


Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S4 (653°C s úderem)

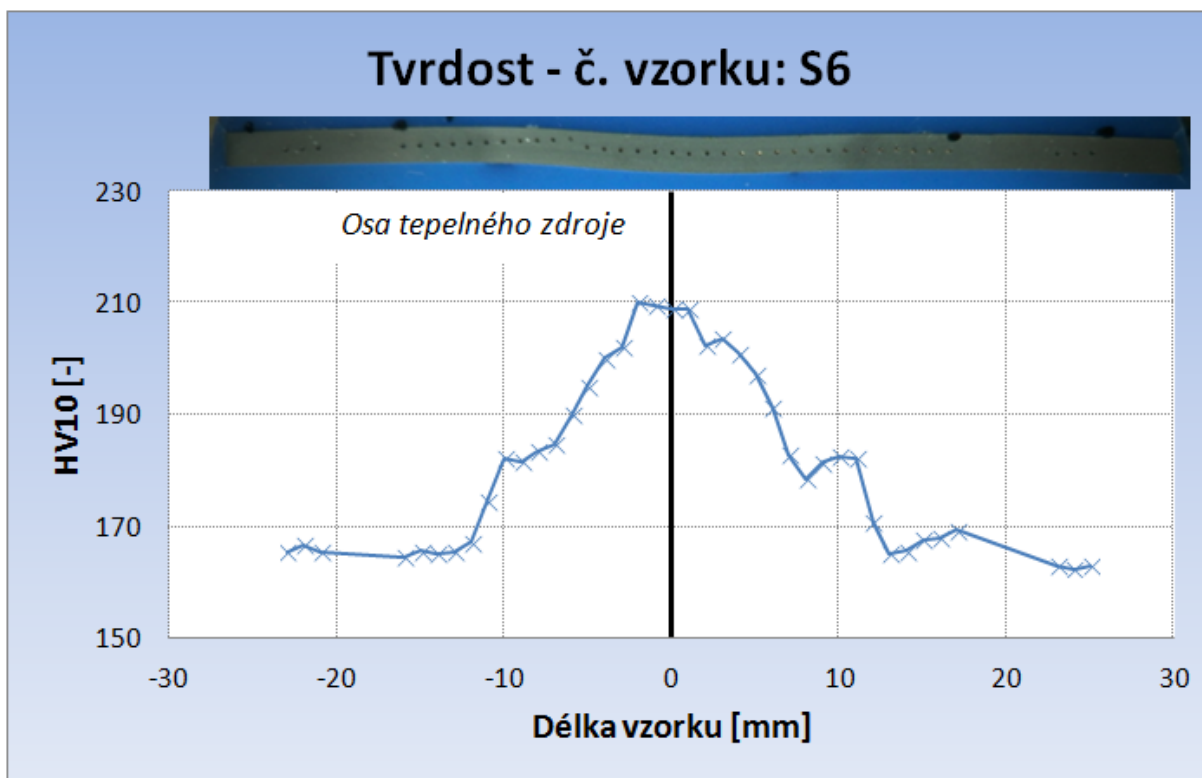


Příloha č.1 – 3. Část

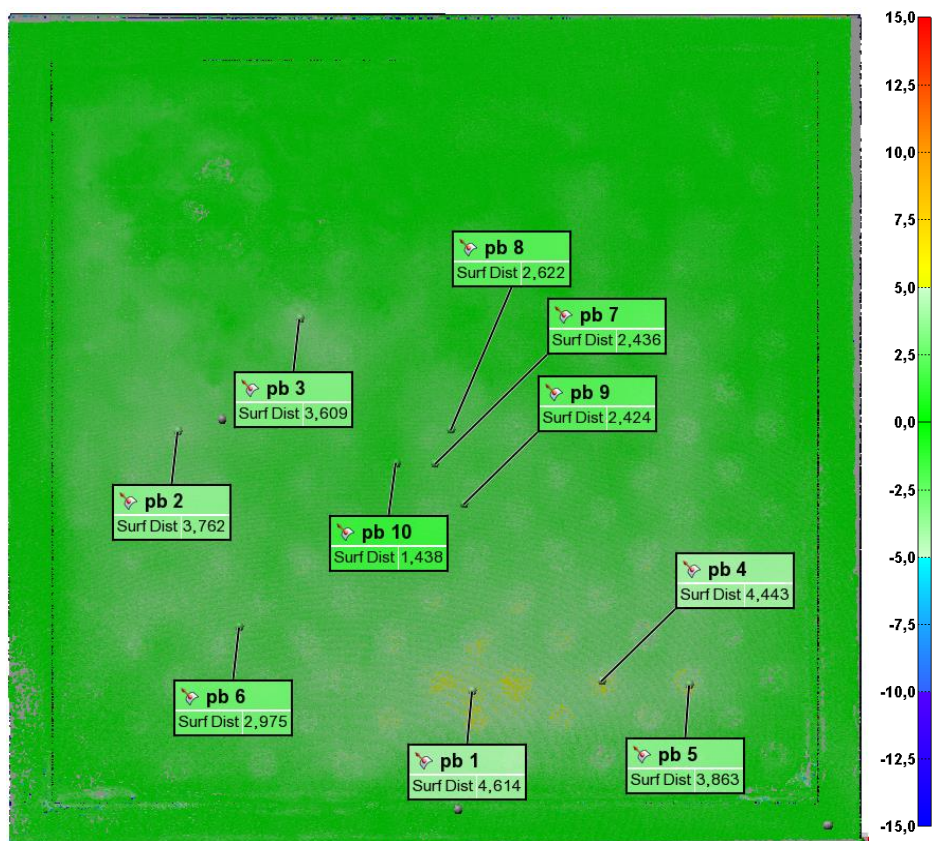
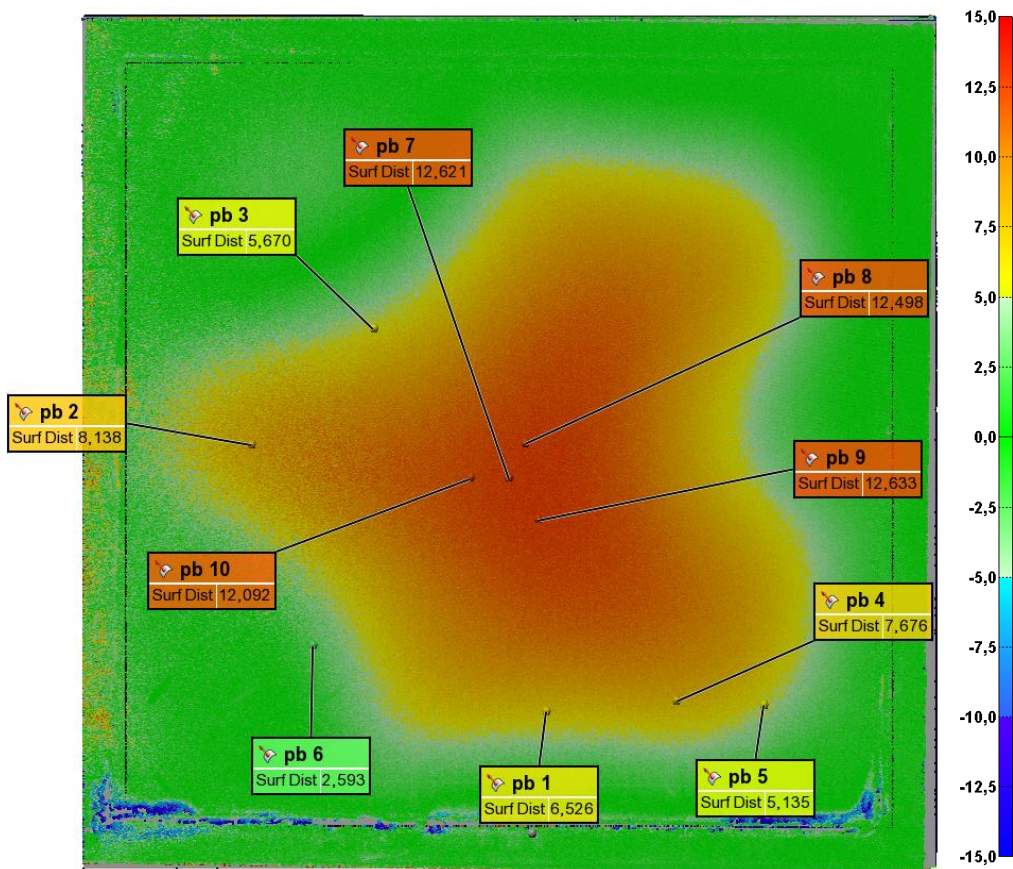
Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S5 (740°C s úderem)



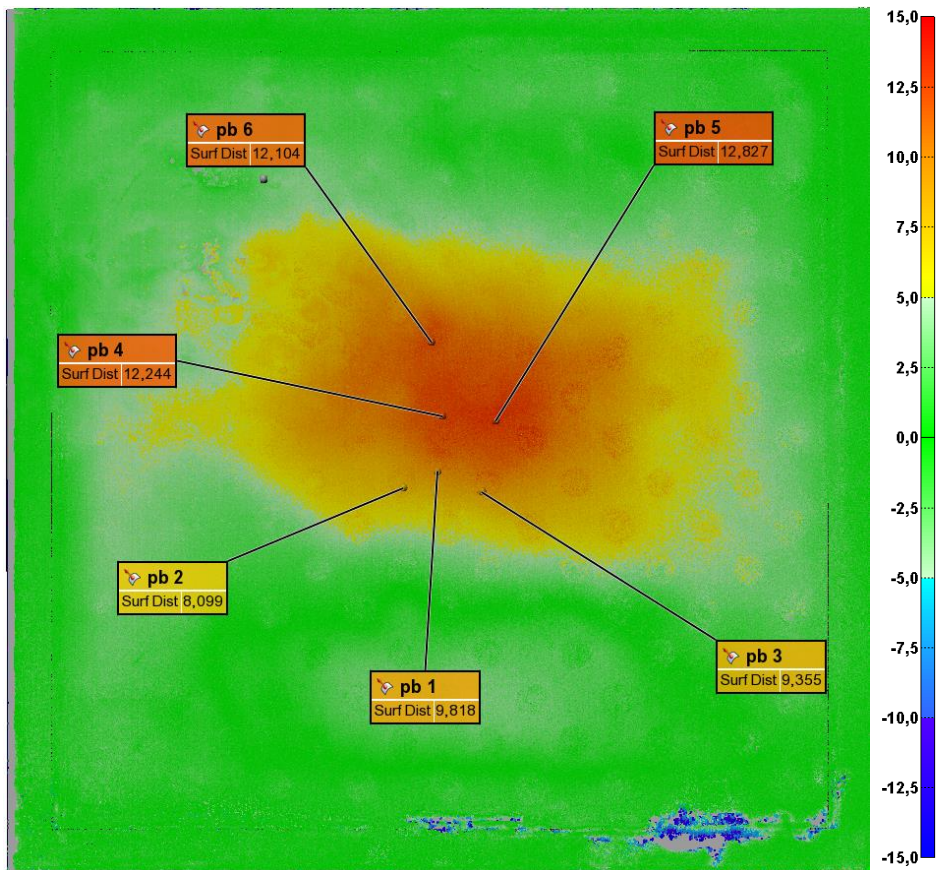
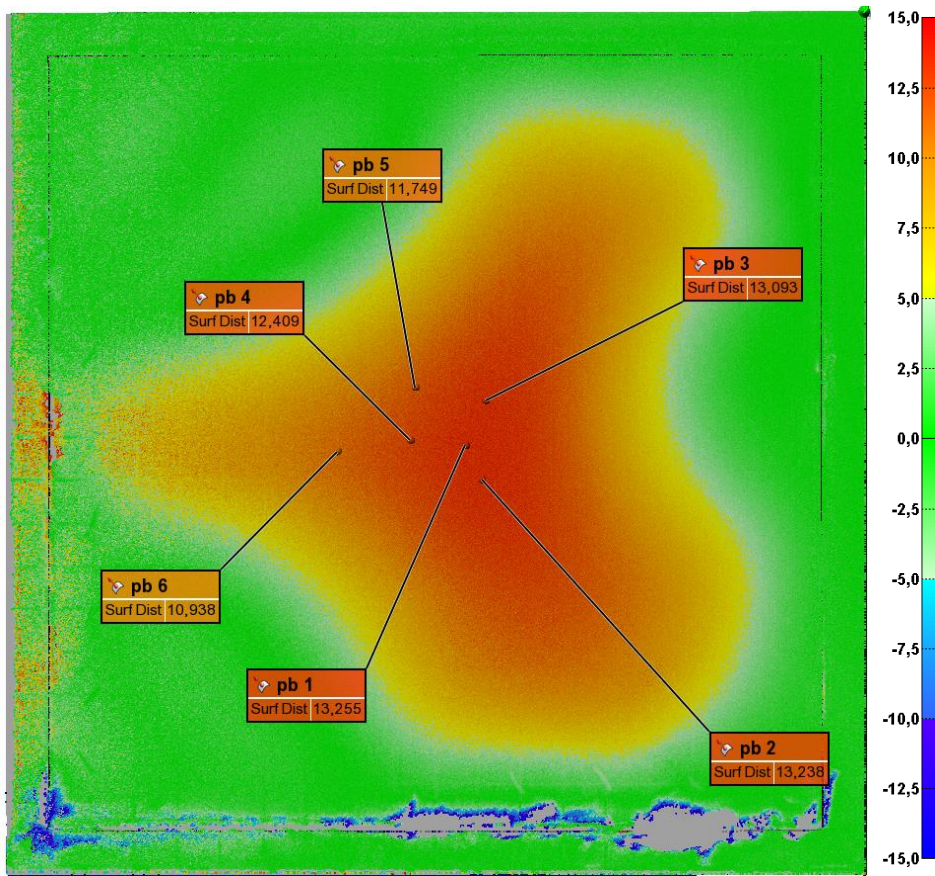
Průběh tvrdosti HV po délce vzorku S6 (850°C s úderem)



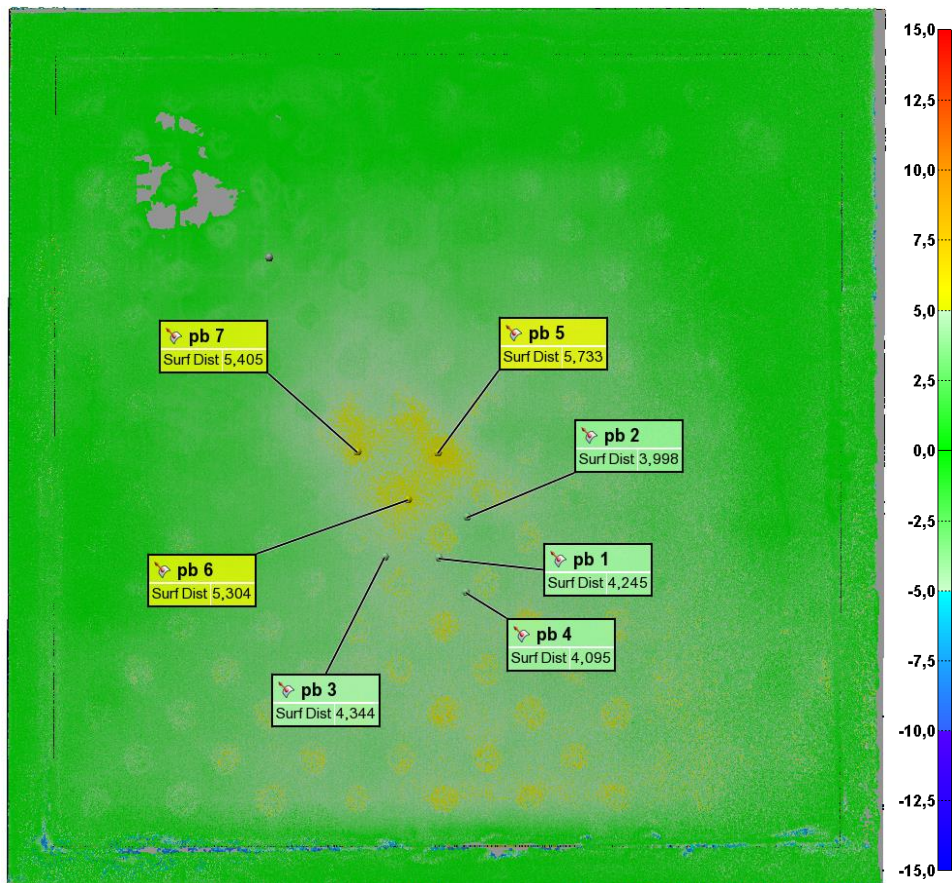
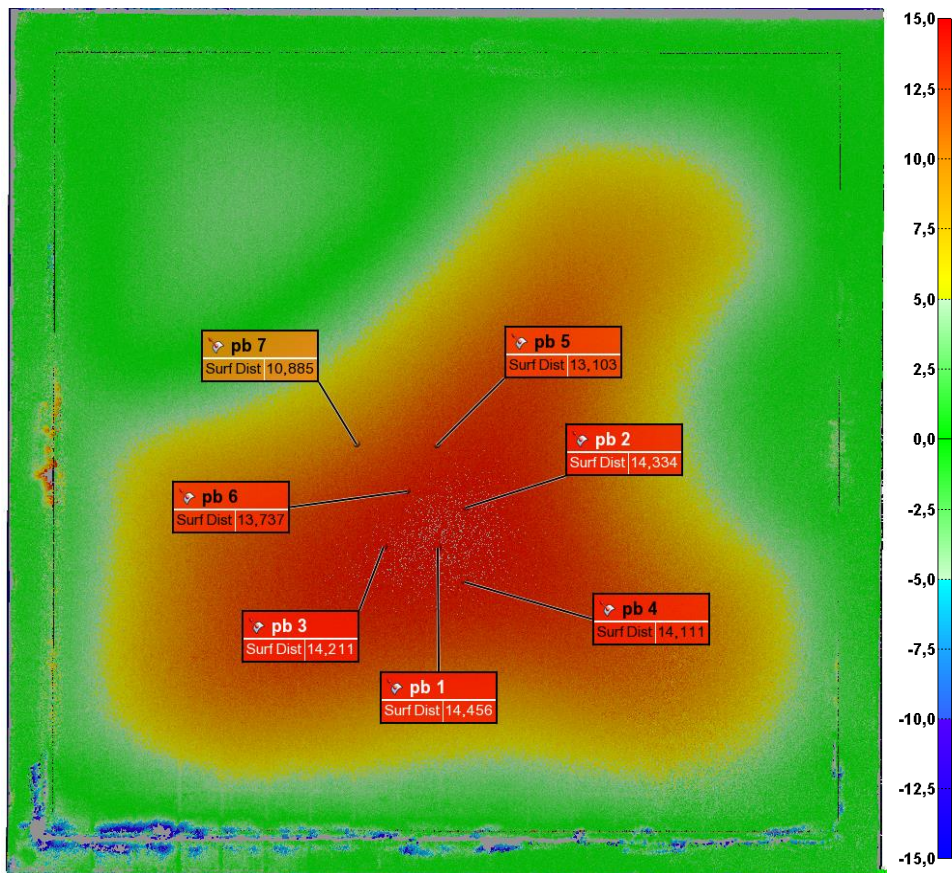
Příloha č.2



Příloha č.3



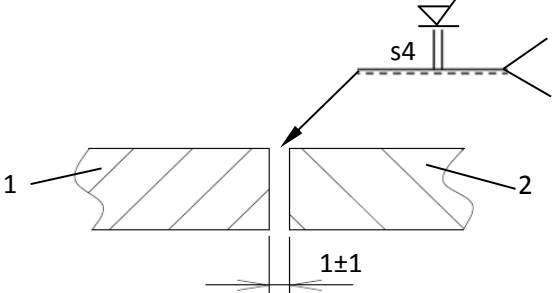
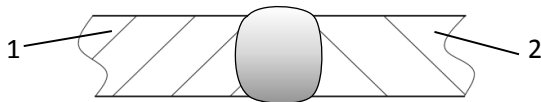
Příloha č.4



PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS)

WPS č.:

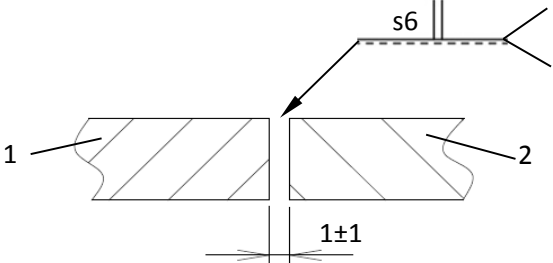
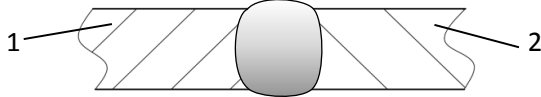
1

Druh svaru:	I-svar	Metoda svařování:	135 - MAG (EN ISO 4063)						
Velikost svaru:	4 [mm]	Provedení dle:	EN ISO 15613						
Tvar spoje		Postup svařování - kladení housenek							
Podrobnosti o přípravě a provedení svaru - náčrt: 									
Materiál 1		Materiál 2							
Skupina materiálu:	1.1 (CEN ISO/TR 15608)	Skupina materiálu:	1.1 (CEN ISO/TR 15608)						
Materiál:	S235JR (EN 10025-2)	Materiál:	S235JR (EN 10025-2)						
Rozsah tloušťky:	4 [mm]	Rozsah tloušťky:	4 [mm]						
Pořadí housenek	Poloha	Job	Proud [A]	Napětí [V]	Postupová rychlost [cm/min]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Druh proudu	Tepelný příkon dle WPQR [J/cm]	Další údaje
1	PA		190 ± 20	19,5 ± 2	45 ± 4	7,9 ± 1	DC/nepulz	4940	
Přídavný materiál:		Ø 1,0 mm (SANOX 29) (EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo)							
Ochranný plyn:		82%Ar + 18%CO2 (EN ISO 14175 - M21)			Průtok plynu: 15 ± 3 [l/min]				
Teplota před svařováním:		min. 5°C							
Teplota interpass:									
Další údaje o svařování:									
Výlet drátu:		15 ± 5 mm		Úprava svarových ploch:		mechanické opracování			
Způsob přenosu kovu:		zkratový		Nátěr:		ne			
Polarita:		nepřímá (+)							
Poznámky:									
Index revize:	A	B	C	D	E				
Schválil:									
Datum:						Zpracoval: Jan Krejčí			
Podpis:									

PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS)

WPS č.:

2

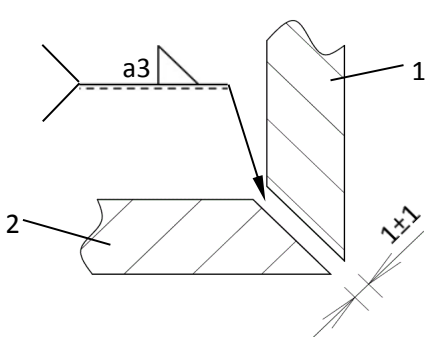
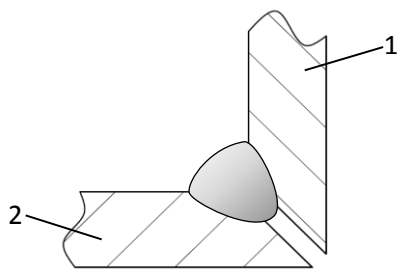
Druh svaru:	I-svar	Metoda svařování:	135 - MAG (EN ISO 4063)						
Velikost svaru:	6 [mm]	Provedení dle:	EN ISO 15613						
Tvar spoje		Postup svařování - kladení housenek							
Podrobnosti o přípravě a provedení svaru - náčrt: 									
Materiál 1		Materiál 2							
Skupina materiálu:	1.1 (CEN ISO/TR 15608)	Skupina materiálu:	1.1 (CEN ISO/TR 15608)						
Materiál:	S235JR (EN 10025-2)	Materiál:	S235JR (EN 10025-2)						
Rozsah tloušťky:	6 [mm]	Rozsah tloušťky:	6 [mm]						
Pořadí housenek	Poloha	Job	Proud [A]	Napětí [V]	Postupová rychlost [cm/min]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Druh proudu	Tepelný příkon dle WPQR [J/cm]	Další údaje
1	PB		130 ± 20	18 ± 2	40 ± 4	4,5 ± 1	DC/nepulz	3510	
Přídavný materiál:		Ø 1,0 mm (SANOX 29) (EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo)							
Ochranný plyn:		82%Ar + 18%CO2 (EN ISO 14175 - M21)			Průtok plynu: 15 ± 3 [l/min]				
Teplota před svařováním:		min. 5°C							
Teplota interpass:									
Další údaje o svařování:									
Výlet drátu:		15 ± 5 mm		Úprava svarových ploch:		ne			
Způsob přenosu kovu:		zkratový		Nátěr:		ne			
Polarita:		nepřímá (+)							
Poznámky:									
Index revize:	A	B	C	D	E				
Schválil:									
Datum:						Zpracoval: Jan Krejčí			
Podpis:									

PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS)

WPS č.:

3

Druh svaru:	Koutový svar	Metoda svařování:	135 - MAG (EN ISO 4063)
Velikost svaru:	3 [mm]	Provedení dle:	EN ISO 15613

Tvar spoje	Postup svařování - kladení housenek
<p style="text-align: center;">Podrobnosti o přípravě a provedení svaru - náčrt:</p> 	

Materiál 1			Materiál 2		
Skupina materiálu:	1.1	(CEN ISO/TR 15608)	Skupina materiálu:	1.1	(CEN ISO/TR 15608)
Materiál:	S235JR	(EN 10025-2)	Materiál:	S235JR	(EN 10025-2)
Rozsah tloušťky:	4	[mm]	Rozsah tloušťky:	4	[mm]

Pořadí housenek	Poloha	Job	Proud [A]	Napětí [V]	Postupová rychlost [cm/min]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Druh proudu	Tepelný příkon dle WPQR [J/cm]	Další údaje
1	PB		170 ± 20	19 ± 2	30 ± 4	6,5 ± 1	DC/Nepulz	6460	

Přídavný materiál:	Ø 1,0 mm (SANOX 29)	(EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo)
Ochranný plyn:	82%Ar + 18%CO2	(EN ISO 14175 - M21) Průtok plynu: 15 ± 3 [l/min]

Teplota před svařováním: **min. 5°C**

Teplota interpass:

Další údaje o svařování:

Výlet drátu:	15 ± 5 mm	Úprava svarových ploch:	ne
Způsob přenosu kovu:	zkratový	Nátěr:	ne
Polarita:	nepřímá (+)		

Poznámky:

Index revize:	A	B	C	D	E
Schválil:					
Datum:					
Podpis:					

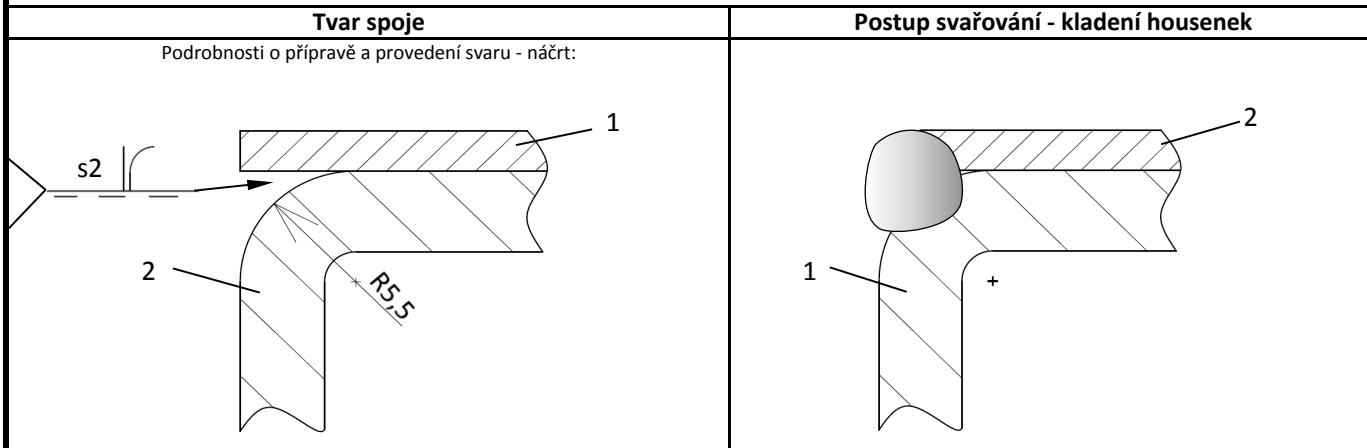
Zpracoval: Jan Krejčí

PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS)

WPS č.:

4

Druh svaru:	T - 1/2 oblý	Metoda svařování:	135 - MAG (EN ISO 4063)
Velikost svaru:	2 [mm]	Provedení dle:	EN ISO 15613



Materiál 1			Materiál 2		
Skupina materiálů:	1.1	(CEN ISO/TR 15608)	Skupina materiálů:	1.2	(CEN ISO/TR 15608)
Materiál:	S235JR	(EN 10025-2)	Materiál:	S355J2C	(EN 10025-2)
Rozsah tloušťky:	4	[mm]	Rozsah tloušťky:	2	[mm]

Pořadí housenek	Poloha	Job	Proud [A]	Napětí [V]	Postupová rychlost [cm/min]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Druh proudu	Tepelný příkon dle WPQR [J/cm]	Další údaje
1	PC		150 ± 20	19,5 ± 2	30 ± 4	5,3 ± 1	DC/Nepulz	5850	

Přídavný materiál:	Ø 1,0 mm (SANOX 29)	(EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo)
Ochranný plyn:	82%Ar + 18%CO2	(EN ISO 14175 - M21) Průtok plynu: 15 ± 3 [l/min]

Teplota před svařováním:	min. 5°C		
Teplota interpass:			
Další údaje o svařování:			
Výlet drátu:	15 ± 5 mm	Úprava svarových ploch:	ne
Způsob přenosu kovu:	zkratový	Nátěr:	ne
Polarita:	nepřímá (+)		

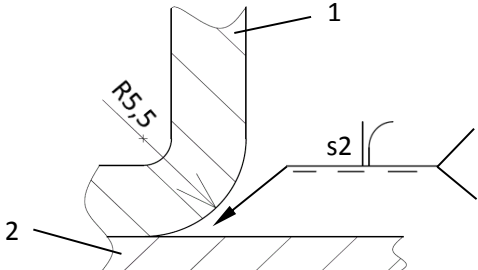
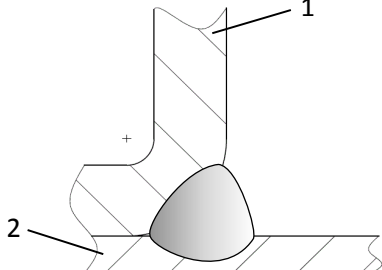
Poznámky:

Index revize:	A	B	C	D	E	Zpracoval: Jan Krejčí
Schválil:						
Datum:						
Podpis:						

PŘEDBĚŽNÁ SPECIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ (pWPS)

WPS č.:

5

Druh svaru:	T - 1/2 oblý	Metoda svařování:	135 - MAG (EN ISO 4063)						
Velikost svaru:	2 [mm]	Provedení dle:	EN ISO 15613						
Tvar spoje		Postup svařování - kladení housenek							
Podrobnosti o přípravě a provedení svaru - náčrt:									
									
Materiál 1		Materiál 2							
Skupina materiálu:	1.1 (CEN ISO/TR 15608)	Skupina materiálu:	1.2 (CEN ISO/TR 15608)						
Materiál:	S235JR (EN 10025-2)	Materiál:	S355J2C (EN 10025-2)						
Rozsah tloušťky:	4 [mm]	Rozsah tloušťky:	2 [mm]						
Pořadí housenek	Poloha	Job	Proud [A]	Napětí [V]	Postupová rychlost [cm/min]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Druh proudu	Tepelný příkon dle WPQR [J/cm]	Další údaje
1	PB		135 ± 20	19,5 ± 2	20 ± 4	4,6 ± 1	DC/Nepulz	7898	
Přídavný materiál:		Ø 1,0 mm (SANOX 29) (EN ISO 16834-A: G Mn3Ni1CrMo)							
Ochranný plyn:		82%Ar + 18%CO2 (EN ISO 14175 - M21)			Průtok plynu: 15 ± 3 [l/min]				
Teplota před svařováním:		min. 5°C							
Teplota interpass:									
Další údaje o svařování:									
Výlet drátu:		15 ± 5 mm		Úprava svarových ploch:		ne			
Způsob přenosu kovů:		zkratový		Nátěr:		ne			
Polarita:		nepřímá (+)							
Poznámky:									
Index revize:	A	B	C	D	E				
Schválil:									
Datum:						Zpracoval: Jan Krejčí			
Podpis:									