



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Vliv opakované resmaltace na mechanické vlastnosti svarových spojů

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Štěpán Žáček**
Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



Technická univerzita v Liberci

Fakulta strojní

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Štěpán Žáček**

Osobní číslo: **S15000352**

Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**

Název tématu: **Vliv opakované resmaltace na mechanické vlastnosti svarových spojů**

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 metodou výroby smaltovaných nádrží ve firmě Tenez a.s.
2. Seznamte se s technologií svařování pod tavidlem a metodou tavného svařování v ochranném plynu MAG.
3. Provedte rešerši o problematice změn vlastností materiálu v TOO svarových spojů.
4. Navrhněte metodiku testování a způsob vyhodnocení výsledků.
5. Provedte vyhodnocení experimentů a zhodnoťte dosažené výsledky.

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


- [1] Interní směrnice pro výrobu smaltovaných povrchů ve firmě Tenez a.s.
- [2] Pluhař, J. a J. Koritta. *Strojírenské materiály*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1966.
- [3] Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN80-85771-63-2.
- [4] Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
- [5] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2006.
- [6] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkoušení tvrdosti - Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů - Zkouška rázem v ohybu - Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [8] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Iva Nováková, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. dubna 2018**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2016

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: 23.5.2017

Podpis:



Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá změnou mechanických vlastností svarových spojů po opakovaném tepelném namáhání, které vzniká při svařování, smaltování a následné resmaltaci. Práce je rozdělena na dvě hlavní části, teoretickou a experimentální. Teoretická část popisuje technologie výroby smaltových povlaků a charakteristiku materiálů pro smaltování, především ocel P265GH. Dále je zaměřena na svařovací metody nádrží. Následuje problematika teplotních a deformačních procesů při svařování, vznik a tvorba svaru a tepelně ovlivněná oblast při svařování. Experimentální část je zaměřena na sledování vlivu teplotních cyklů na mechanické vlastnosti svarových spojů. Pro posouzení změn mechanických vlastností svarových spojů byly provedeny zkoušky, zkouška rázem v ohybu metodou Charpy a zkouška tvrdosti dle Vickerse.

Klíčová slova

Smalt, svařování, svařování elektrickým obloukem pod tavidlem, MAG svařování, tepelně ovlivněná oblast (TOO), mechanické vlastnosti.

Abstract

This diploma thesis deals with changes of mechanical properties for weld joints during process enameling, welding and repeated enameling. Diploma thesis is divided into two chapters. In the theoretical background chapter, the author describes technology of making enamel ratings and introduces characteristic materials for enameling, primarily for steel P265GH. The theoretical part also deals with method of welding for tanks. The theoretical chapter also focuses and describes issues connected with heat and deformational processes during welding, including weld formation and heat-affected parts. In the second part of the thesis the author presents results of monitoring thermal cycles to mechanical properties of welded joints. In the experimental section were used Vicker's hardness test and Charpy's impact test to determine changes of mechanical properties for weld joints.

Keywords

Enamel, welding, submerged arc welding, MAG welding, heat-affected zone (HAZ), mechanical properties.

Poděkování

Rád bych tímto poděkoval vedoucí mé diplomové práce Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za naprostou ochotu a trpělivost během tvorby této diplomové práce.

Dále bych touto cestou poděkoval mému konzultantovi doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za cenné rady při vypracování této diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	9
2	Teoretická část	11
2.1	TECHNOLOGIE SMALTOVÁNÍ	11
2.2	PODKLADOVÉ KOVY PRO SMALTOVÁNÍ	14
2.2.1	<i>Charakteristika oceli P265GH</i>	17
2.3	VLIV TEPLOTNÍCH CYKLU NA MATERIÁL	18
2.4	SVAŘOVÁNÍ SMALTOVANÝCH NÁDRŽÍ	19
2.4.1	<i>Svařování metodou MAG</i>	20
2.4.2	<i>Svařování metodou elektrickým obloukem pod tavidlem</i>	22
2.4.3	<i>Teplotní a deformační procesy při svařování</i>	24
2.4.4	<i>Vznik a tvorba svaru</i>	29
2.4.5	<i>Tepelně ovlivněná oblast (TOO)</i>	30
3	Experimentální část	34
3.1	POPIS EXPERIMENTU	34
3.1.1	<i>Použité postupy svařování</i>	37
3.1.2	<i>Použité teplotní cykly</i>	39
3.2	MĚŘENÍ TVRDOSTI.....	40
3.2.1	<i>Měření tvrdosti u desek svařených metodou 1</i>	43
3.2.2	<i>Měření tvrdosti u desek svařených metodou 2</i>	48
3.3	MĚŘENÍ VRUBOVÉ HOUŽEVNATOSTI.....	53
4	Závěr	59
5	Seznam použité literatury	61
6	Seznam příloh	64

1 Úvod

Na celém světě se hledají materiály, které by vydržely vysokou chemickou a teplotní zátěž. Tyto materiály se využívají především v chemickém, farmaceutickém a potravinářském průmyslu. Materiály s vysokou chemickou odolností a odolností zvýšeným teplotám jsou drahé, a proto se nahrazují funkčními povlaky nanášenými na podkladový kovový materiál. Povlaky pak zajišťují dobrou chemickou odolnost a základní materiál dobré mechanické vlastnosti. Osvědčenou metodou tvorby funkčních povlaků je smaltování, při kterém je na kov nanášen skelný povlak.

Předložená diplomová práce vznikla ve spolupráci s tradičním výrobcem smaltových povlaků, firmou TENEZ Chotěboř, a. s. Mezi hlavní výrobky této firmy patří tlakové nádrže, rozebíratelné i svařované výměníky tepla a smaltové zařízení pro chemický, farmaceutický či potravinářský průmysl.

Při výrobě smaltovaných nádob dojde nejprve k jejímu svaření a následnému vyžihání svařence. Poté dochází k nanášení smaltu v několika vrstvách podle potřebné tloušťky a požadavků zákazníka. V krajním případě se může jednat o jednu vrstvu základního smaltu a maximálně osm vrstev krycího smaltu. Všechny vrstvy smaltu jsou následně vypalovány, při teplotách cca 800° až 900°C po dobu 5 až 30 minut. Poté je smaltovaná nádoba předána zákazníkovi k užívání.

V případě opotřebení smaltu v provozu, nebo při lokálním poškození většího rozsahu, již není možné smaltovaný povrch opravit a je třeba přistoupit k úplné resmaltaci. V takovém případě jsou duplikátor a vrchní víko nádrže odděleny v místě svaru vydrážkováním a smaltovaný povlak je kompletně otryskán. Následně je nádrž opět zkompletována, vyžihána a vytvořena nová vrstva smaltu za stejných podmínek jak bylo uvedeno výše. Dle interního předpisu firmy může být resmaltace provedena maximálně dvakrát. To znamená, že v krajním případě může být materiál vystaven až třem vícenásobným teplotním cyklům od svařování a

třem žihacím cyklům a následně až 27 teplotním cyklům při výrobě smaltu.

Tato diplomová práce je zaměřena do oblasti posouzení vlivu uvedených teplotních cyklů na degradaci základního materiálu. Tento vliv je posuzován pomocí zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy a změnou tvrdosti HV v oblasti svaru, TOO i základního materiálu.

Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21122 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2 Teoretická část

Výrobu smaltovaných nádrží lze rozdělit do následujících kroků, jak jdou za sebou ve výrobním procesu: technologie tváření desek, svařovací proces a proces smaltování. V rámci teoretické části práce je popsána technologie smaltování, podkladové materiály pro smaltování, vliv tepelných cyklů na jejich strukturu, technologie svařování používané pro výrobu smaltovaných nádrží a vliv parametrů svařování na charakter a rozsah změn v tepelně ovlivněné oblasti.

2.1 Technologie smaltování

Smalt má podobnou strukturu jako sklo. Hlavní funkcí smaltového povlaku je ochrana kovu proti korozi i za zvýšených teplot. Obvykle se nanáší nejdříve základní smalt, který zprostředkuje adhezi, a na něj smalt krycí, který má požadované vlastnosti. Technologii smaltování lze rozdělit do těchto hlavních úseků, jak jdou za sebou ve výrobním procesu: *výroba smaltových frit, úprava povrchu kovových materiálů, příprava smaltéřské suspenze (břečky) a práškových smaltů, nanášení smaltů, sušení smaltů a výpal smaltů*. [1, 2, 4]

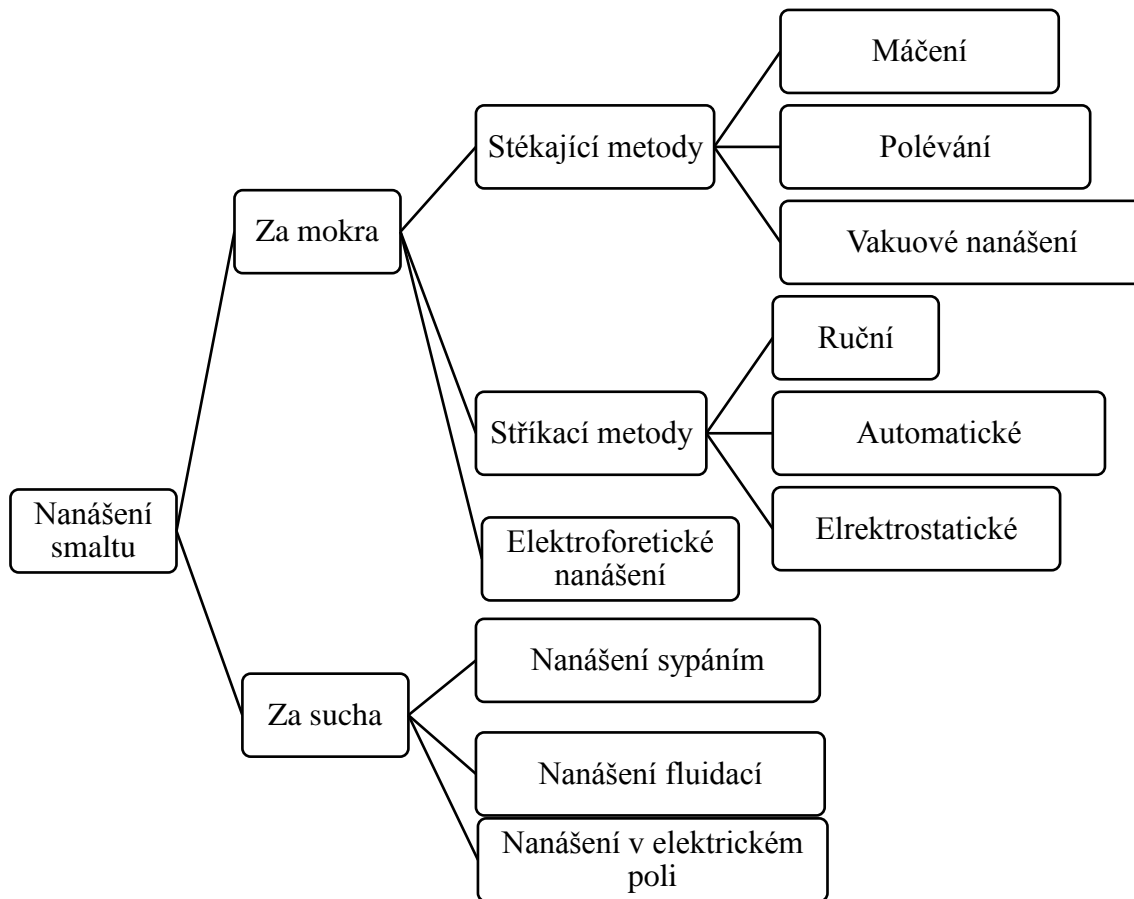
Výroba smaltových frit je podobná, jako tavení skla. Frity jsou ve své podstatě skla, které mají speciální vlastnosti. Tavicí zařízení je navrženo pro menší množství taveného materiálu, a nejsou zde tak přísné požadavky na homogenitu produktu jako u skel. Jedná se o anorganický produkt tavení, prudce zchlazený a granulovaný. U smaltových frit jsou kladeny nižší nároky na čistotu, než u skel. K tavení slouží plynové vanové pece s periodickým nebo kontinuálním provozem. Tavenina z pece vytéká mezi dva kovové válce chlazené zevnitř vodou, jimiž se formuje pásek o určité tloušťce. Ten se následně drtí na šupiny. V této podobě jsou frity dodávány smaltovnám. Výroba frit je zpravidla soustředěna mimo smaltovnu. [2, 3, 5]

K vytvoření smaltového povlaku předchází *úprava povrchu kovových materiálů*. Podmínkou kvality úpravy povrchu je spojení

dvou fází: kovu a smaltové vrstvy. Což učiní povlak celistvý. Úpravy povrchu se dělí na chemické a mechanické. Technologie chemické úpravy je charakterizovaná odmašťováním, mořením, niklováním a neutralizací. Mechanické úpravy se nejvíce využívají u litiny a tlustostěnných ocelových výrobků. Má stejnou funkci jako úprava chemická, čili povrch je zbavován mastných nečistot, okují, rzi a u litinových výrobků i zbytků formovacích hmot. Povrch se čistí abrazivním materiálem (písky, ocelový granulát, litinová drť, syntetický korund). Abrazivní materiály jsou voleny podle stupně znečištění dílu. Povrch dílu je otryskáván abrazivním materiálem na tryskacím stroji.[2,3]

Smaltéřská suspenze je z fyzikálního hlediska heterogenní, mnohosložkový systém tuhých částic rozptýlených ve vodě. **Při přípravě smaltéřské suspenze** se používá několik druhů surovin, které jsou po semletí v kulových mlýnech s vodou nositeli jejich vlastností. Tyto vlastnosti napomáhají k vytvoření rovnoměrné vrstvy heterogenní směsi, ze které po vysušení a vypálení vznikne požadovaný smaltový povlak. Hlavní surovinou pro přípravu smaltéřské suspenze je smaltéřská fritta. Dalšími přísadami jsou křemen, živec, MgO, barvicí a kalící látky, NaO₂ (aby se zamezilo rezivění kovu pod vlhkým nánosem), jílové zeminy a elektrolyty (slouží k ovlivnění vlastností suspenze). **Příprava práškových smaltů** se odlišuje, tím že mletí probíhá za sucha. [2, 3, 5]

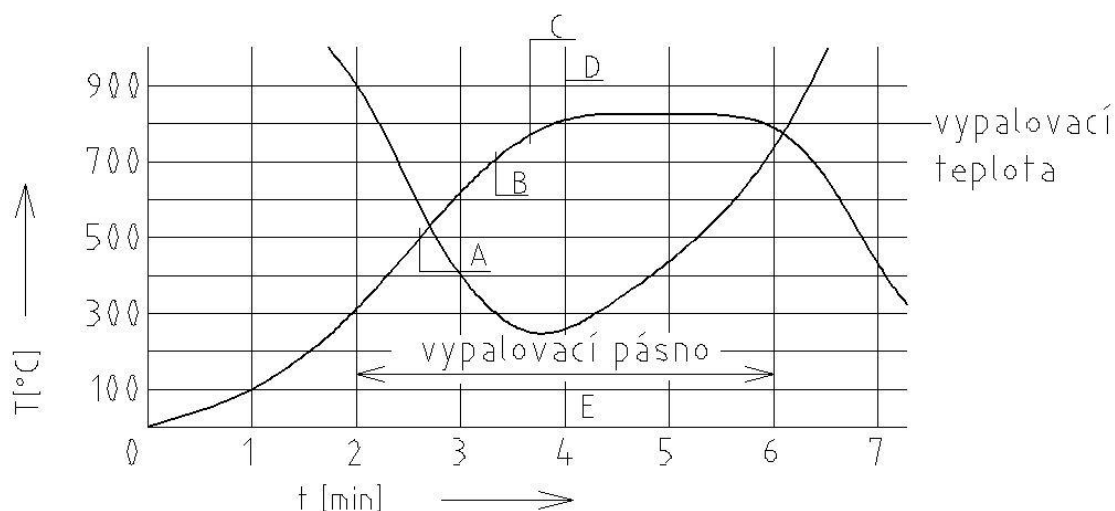
Nanášení vrstvy smaltu na povrch podkladového kovu se vytváří za různých technologických metod. Tyto metody se od sebe liší způsobem přípravy smaltovacích materiálů před nanášením, fyzikálním principem mechanismu vytváření smaltové vrstvy a dalšími charakteristickými znaky. Pro optimální volbu metody nanášení smaltu je dobré zvážit tato kritéria: tvar výrobku, funkční vlastnosti aplikovaného smaltu, sériovost výrobku, technická úroveň technologie smaltování. [2]



Obr. 2-1 Metody nanášení smaltu [2]

Před vypalováním se všechny smalty nanášené mokrým způsobem musí *sušit*. Účelem sušení je odstranit vodu z nanesené vrstvy, která by při vypalování narušila vrstvu a nepříznivě ovlivnila atmosféru v peci. Pevnost nánosu suspenze je citlivá na mechanické poškození, což nám ztěžuje manipulaci. Po vysušení suspenze vzniká vysušená suspenze (biskvit), která umožňuje běžnou manipulaci. Voda v suspenzi má podíl minimálně 30% z celkové hmotnosti suspenze. U sušení je důležité dát pozor, aby nedošlo k vnesení nečistot, které by znamenalo popraskání smaltu. [2, 6]

Závěrečná operace u smaltování je *vypalování*, které vede k vytvoření požadovaného sklovitého povlaku na kovovém podkladu. Tento děj probíhá ve vypalovacích pecích za teplot od 740 do 900°C. [2]



A-počátek tvorby oxidu železnatého, B-počátek tavení a fázové přeměny železa, C-počátek rozpouštění oxidu křemičitého a jílu, D-tvorba přídržné vrstvy, E-bod zvratu

Obr. 2-2 Průběh dějů při vypalování smaltu [2]

Vypalovací teplota a vypalovací interval závisí na vlastnostech smaltovaných materiálů. Vypalovací doba závisí na charakteru výrobku a na konstrukci vypalovací pece. [2, 7]

2.2 Podkladové kovy pro smaltování

Kovové materiály vhodné ke smaltování lze rozdělit do tří skupin, jsou to *ocelové plechy, litina, neželezné kovy* (Al, Cu, Ag, Au, Pt). [2,3]

U ocelových plechů záleží na složení, které ovlivňuje adhezi smaltovaného povlaku a průtažnost plechu, která je nezbytná pro tvarování výrobku lisováním. Používají se plechy z nízkouhlíkové oceli s maximálním procentem uhlíku do 0,1% C a s minimálním obsahem síry, křemíku, fosforu, hliníku a manganu. Nejběžněji je používán materiál s obsahem uhlíku okolo 0,04% C a trendem je stále snižovat procento uhlíku v materiálu. Plechy musí být dostatečně odolné proti deformaci za tepla a nesmí mít sklon k tvorbě vodíkových vad ve smaltu, zejména při oboustranném smaltování. Plechy musí být dobře mořitelné a svařitelné. Povrch plechu musí být hladký, bez zaválcovaných struskotvorných míst,

okují a jiných nečistot. Z hlediska struktury je nejvhodnější homogenní struktura. [2,5]

Z hlediska metalografické struktury můžeme rozdělit ocel pro smaltování podle obsahu uhlíku do tří skupin [2]:

- S obsahem uhlíku do 0,01% - čistě feritická struktura
- S obsahem uhlíku 0,01 až 0,04% - feritická struktura a terciální cementit (Fe_3C)
- S obsahem uhlíku nad 0,04% - feriticko-perlitická struktura a terciální cementit

Přítomnost větších krystalů cementitu (Fe_3C) je nežádoucí. Dochází k reakci s oxidovým povlakem a ke vzniku CO a CO_2 . Nežádoucí složky v ocelovém plechu zhoršují adhezi a způsobují při výpalu vznik plynů, který narušuje celistvost povlaku. [2,5]

Vliv jednotlivých prvků na smaltovatelnost oceli:

- **Uhlík** (C) – Nepříznivý vliv uhlíku na kvalitu smaltování, je v reakci uhlíku s kyslíkem při natavování smaltu, kdy vznikají plyny, které jsou zdrojem necelistvosti povlaku (póry, krátery). Takto vytvořené vady snižují funkční vlastnosti povlaku. Ocel s větším obsahem uhlíku je náchylnější na vodíkové vady (rybí šupiny). [2,1]
- **Mangan** (Mn) – Množství manganu, které je, obsaženo v oceli určené ke smaltování, neovlivňuje kvalitu smaltovaného povlaku. Při obsahu uhlíku nad 0,6 %, zmenšuje odolnost k deformacím a zvyšuje sklon k vodíkovým vadám. [2,1]
- **Křemík** (Si) – U ocelí určených ke smaltování, se uhlík vyskytuje pouze ve stopovém množství a nemá vliv na vlastnosti smaltované vrstvy. Při větším obsahu křemík, se zvyšuje křehkost feritické struktury oceli a tím se zhoršuje její mořitelnost a přídržnost smaltu. [2,1]
- **Síra** (S) – Pokud obsah síry převýší 0,05 %, tak se zhorší celistvost smaltovaného povlaků. [2,1]
- **Fosfor** (P) – Pokud obsah fosforu převýší 0,05 %, tak se zhorší mořitelnost oceli. [2]

- **Měď** (Cu) – U ocelí určených ke smaltování, se měď vyskytuje pouze ve stopovém množství a nemá téměř vliv na vlastnosti smaltové vrstvy. Při vyšším obsahu mědi se zhoršuje mořitelnost a přídržnost smaltových povlaků. V důsledku menší rozpustnosti vodíku ve směsných krystalech železa a mědi při běžné teplotě se v čistém feritu zvyšuje sklon k tvorbě vodíkových vad. [2]
- **Hliník** (Al) – Pokud je nerovnoměrně rozptýlen, může se podílet na tvorbě nekovových vměstků, které jako defekty ve feritické struktuře mohou být zdrojem kumulace vodíku. Při použití technologií deoxidace oceli se gradient obsahu hliníku zvětšuje od povrchu do středu plechu. [2]

Při **smaltování litiny** jsou využívány schopnosti zalévat smaltem nerovnosti povrchu vzniklé po mechanickém otryskávání. Vzhledem k tomu, že u litiny máme dostatečnou adhezi, není nutné používat přídržných oxidů. Litina se smaltuje konvenčním způsobem. Vodná suspenze smaltu se nanáší na předem upravený kov, následuje sušení a vypálení, přičemž funkční smalt se nanáší rovnou na litinu nebo na vypálený základní smalt metodou pudrováním. Pudrování znamená, že se na litinu, která je vyhřátá na smaltovací teplotu natavuje smaltovací prášek (pudr). Z hlediska chemického složení jsou smalty na litinu jednodušší a vypalovací teplota je v rozmezí 700 až 940°C. [2,3]

Z neželezných kovů se nejčastěji smaltuje hliník a jeho slitiny. Z důvodu velkého koeficientu teplotní roztažnosti hliníku je důležité volit složení smaltů tak, aby se dosáhlo podstatně většího koeficientu teplotní roztažnosti, a použít nižší teploty vypalování. Pro smaltování hliníku se nejčastěji používají tři druhy smaltů olovnaté, barnaté, fosfátové. Vypalovací teplota u hliníku a jeho slitin je 500 až 550°C a maximální tloušťka vypáleného smaltu je 0,1 mm. Smalty na měď, mosaz a bronz mají podobné vlastnosti jako smalty na hliník, také zde se musí přizpůsobit složení smaltu koeficientu teplotní roztažnosti podkladového kovu. Vypalovací teplota se pohybuje okolo 600°C. [2,3]

S ohledem na materiál používaný v rámci experimentu je v následující kapitole popsána charakteristika oceli P265GH.

2.2.1 Charakteristika oceli P265GH

Tato ocel podle normy ČSN EN 100027-1 je nelegovaná žáruvzdorná ocel pro tlakové nádoby a bezešvé trubky. Vyznačuje se dobrou svařitelností a je dobře tvárná za tepla i studena. Používá se především na výrobu kotlů, tlakových nádob a trubek pro přepravu horkých kapalin. Může být používána pro souvislé tepelné zatížení do 450°C. [16]

Tab. 2.1 Chemické složení ocele P265GH [16]

(Cr+Cu+Mo+Ni)≤0,700%		
Prvek	Minimální [%]	Maximální [%]
C		0,160
Si		0,350
Mn	0,600	1,120
P		0,025
S		0,150
N		0,012
Al	0,020	
Cu		0,300
Cr		0,300
Ni		0,300
Nb		0,020
V		0,020
Ti		0,300
Mo		0,080

Pro tloušťku plechů menší než 0,6 mm je povolen minimální obsah Mn o 0,2% menší, než je uvedeno. Poměr obsahu Al/N musí být roven nebo větší než 2. [16]

Hodnoty mechanických vlastností oceli P265GH jsou uvedeny v tab. 2.2.

Tab. 2.2 Mechanické vlastnosti ocele P265GH [16]

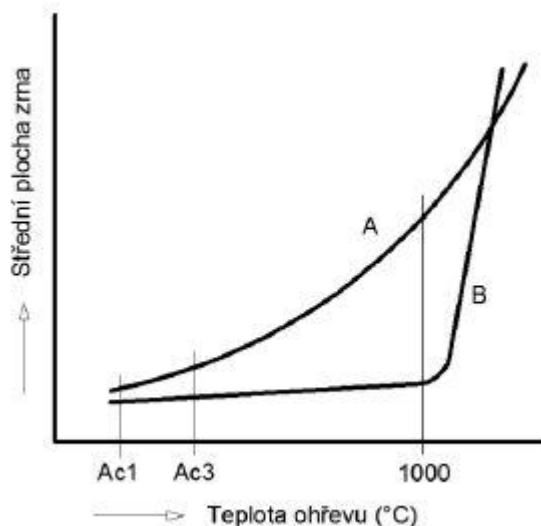
Stav materiálu	Tloušťka t [mm]	Mez kluzu R_{eH} [MPa] min.	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A [%] min.	Nárazová práce KV [J] min. při teplotě [°C]		
					-20	0	20
Normalizačně žiháno	$t \leq 16$	265	410 - 530	22	27	34	40
	$16 < t \leq 40$	255					
	$40 < t \leq 60$	245					
	$60 < t \leq 100$	215	400 - 530				
	$100 < t \leq 150$	200					
	$150 < t \leq 250$	185					

2.3 Vliv teplotního cyklu na materiál

Ve společnosti TENEZ Chotěboř, a. s. je po svařování nádoba vystavena žihacímu cyklu s rychlostí ohřevu $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$ na teplotu 930°C , výdrží na této teplotě a následným ochlazením v otevřené peci (obr. 3-4). Během žihání dojde ke zrovnoměnění struktury, snížení vnitřního napětí a vypálení zbytkových nečistot na povrchu. Dále se na nádobu nanese smalt a následuje cyklus jeho vypalování s ohřevem $1,7^\circ\text{C}/\text{min}$ na vypalovací teplotu 840°C , výdrží na této teplotě a následným ochlazením v otevřené peci (obr. 3-5). V případě resmaltace se vrstvy vypalují při stejném cyklu.

Vzhledem k tomu, že materiál P265GH má teplotu A_{C1} v rozmezí 710 až 720°C a teplotu A_{C3} v rozmezí 840 až 860°C , dostaneme se, při jeho vystavení výše uvedeným cyklům do oblasti austenitu. U podoitektoidní oceli při austenitizaci dochází k transformaci perlitu a feritu na austenit. Austenitizace má difúzní charakter, tj. probíhá vznikem zárodků a jejich dalším růstem. Vzniklá austenitická struktura je nehomogenní a k její homogenizaci dochází během výdrže na teplotě austenitizace. Rychlost austenitizace závisí na výchozí struktuře a chemickém složení oceli. Zrna austenitu jsou bezprostředně po ohřevu nad A_{c1} podstatně menší než byla velikost perlitických zrn. V jediném zrně perlitu vzniká více zárodků austenitu. Vzhledem k tomu, že má austenitizace difúzní charakter, je růst zrna významně ovlivněn i

hodnotou teploty. Při dalším zvyšování teploty v oblasti austenitu zrno postupně hrubne. V případě setrvání na konstantní teplotě je potom rozhodující i doba výdrže na této teplotě. Obecně lze tedy konstatovat, že s vyšší teplotou a delší dobou výdrže dochází ke hrubnutí zrna, viz obr. 2-3.



A-Hrubozrnná ocel, B- Jemnozrnná ocel

Obr. 2-3 Růst austenitického zrna v závislosti na teplotě ohřevu [18]

I když se austenit při následujícím ochlazení přemění na jiné strukturní složky, má velikost austenitického zrna rozhodující vliv na mechanické vlastnosti oceli. Čím jemnější austenitické zrno, tím je ocel houževnatější. [18]

2.4 Svařování smaltovaných nádrží

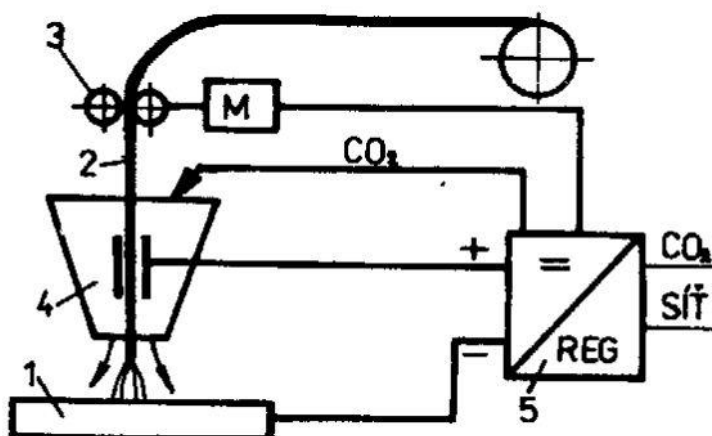
Pro výrobu smaltovaných nádob se v praxi používají metody tavného svařování, zejména metody svařování elektrickým obloukem (metody ČSN EN ISO 4063 - 111, 135, 121). Svařování plamenem není přípustné, může dojít k nauhličení a změně struktury v širokém pásu. [2,6]

Výsledný svar musí mít stejné chemické složení, jako svařovaný materiál. Stejně důležitý je požadavek na čistotu, hladkost a celistvost svaru. Nedodržení těchto požadavků znamená špatnou jakost smaltované vrstvy. [2,6]

Kvalita svaru je hodnocena podle ČSN EN ISO 6520-1 a třída jakosti svaru je stanovena podle ČSN EN ISO 5817.

2.4.1 Svařování metodou MAG

MAG (Metal Active Gas) je metoda, při které je elektroda přímo tavným materiálem. Elektroda je odvíjena ze svitku a podávacími kladkami přesouvána do svařovacího hořáku, kde je ochranná atmosféra. Oblouk tedy hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Teplota kapek je v rozmezí 1700 až 2500°C. Teplota tavné lázně v závislosti na parametrech svařování, technologii a vlastnostech materiálu se pohybuje v rozmezí 1600 až 2100°C. Nejběžnější uplatnění metody MAG je při ručním a mechanizovaném svařování nelegovaných a nízkolegovaných ocelí, při použití směsného plynu argonu s oxidem uhličitým. [11, 13, 14, 15]



1 – základní materiál, 2 – přídavný materiál, 3 – podávací kladky, 4 – svařovací hořák, 5 – zdroj svařovacího proudu, regulace a ovládací prvky

Obr. 2-4 Schéma svařování metodou MAG [14]

Výhodami této technologie je to, že [15]:

- svařování je možné ve všech polohách od tloušťky materiálu 0,8 mm,
- je možná přímá vizuální kontrola oblouku svarové lázně,
- je minimální tvorba strusky,
- vzniká velmi dobrý profil svaru a hluboký závar,

- vzniká malá tepelně ovlivněná oblast především u vysokých rychlostí svařování oproti svařování plamenem,
- lze použít široký proudový rozsah pro jeden průměr drátu,
- stabilní plynová ochrana v různých variantách umožňuje různé typy přenosu kovu a oblouku,
- vzniká nízká pórovitost,
- lze ji využít u robotizovaných a mechanizovaných systému svařování.

Naopak nevýhodami této technologie je to, že [14, 15]:

- plyn vstupuje do chemických reakcí svaru,
- je nutném zabezpečit nepřetržitý přívod atmosféry a věnovat zvýšenou pozornost tomu, aby nedošlo k od fouknutí atmosféry např. průvan, povětrnostní podmínky.

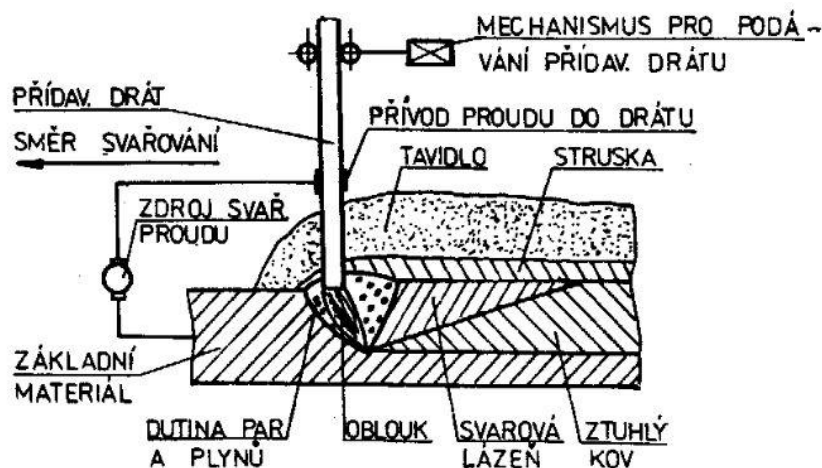
U metody svařování MAG svařování probíhá v ochranné atmosféře aktivního plynu (CO_2 , směsné atmosféry $\text{Ar}+\text{CO}_2$, $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{O}_2$, $\text{Ar}+\text{O}_2$). Tyto atmosféry mají oxidační účinek a v průběhu svařovacího procesu je nutno zajistit desoxidaci svarové lázně. Při svařování metodou MAG se mohou uplatnit i směsné atmosféry s nízkým podílem redukčního plynu (H_2). Tato atmosféra se aplikuje v některých případech při svařování korozivzdorných ocelí. [11, 15]

Mezi nejdůležitější metalurgické reakce patří oxidační a dezoxidační pochody, které probíhají v kapkách odtavující se elektrody a v roztaveném svarovém kovu. Na rozsah reakcí, které ovlivňují tvar oblouku, povrch svařované housenky a vnitřní čistotu svaru má především vliv množství disociovaného kyslíku, který je schopen slučovat se s prvky v tavenině. Zdrojem tohoto kyslíku v oblouku je podíl v ochranném plynu nebo disociace molekul CO_2 , které se rozpadají na CO a O . Disociace oxidu uhličitého je závislá na teplotě. Slučování oxidů FeO s C se tvoří bublinky CO , které mohou být za určitých podmínek příčinou pórovitosti, bublinatosti svarového kovu. Z tohoto důvodu musí být provedena dezoxidace svarového kovu, která se provádí přidáním dezoxidačních prvků do

přídavného materiálu. Dezoxidační prvky jsou Si, V, Cr, Mn. Tyto prvky vytvoří s kyslíkem oxidy a vyplavou na povrch lázně ve formě strusky. Vzniklou strusku je potřeba odstranit. [11, 13]

2.4.2 Svařování metodou elektrickým obloukem pod tavidlem

Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem je metoda, založena na hoření oblouku mezi elektrodou a svařovaným materiálem pod vrstvou sytkého tavidla. Přídavný materiál se vytavuje a rovnoměrně dodává do svaru i s tavidlem. Teplota tavné lázně je přibližně 1800°C a teplota kapek kovu odtavující se elektrody je přibližně 2300°C. Velká část tavidla se roztaví a vytvoří strusku, která plave na povrchu roztaveného kovu. Struska chrání a v některých případech i dolegovává svar. Díky procházejícímu proudu vzniká magnetické pole, které promíchává svarový kov a základní materiál. [11, 12]



Obr. 2-5 Schéma procesu svařování pod tavidlem [14]

Výhodami této technologie je [11,12]:

- vysoká produktivita svařování,
- velký průvar do základního materiálu,
- široká tepelně ovlivněná oblast,
- velká proudová hustota i při tenkých svařovacích drátech,
- vysoká kvalita svařování,
- nedochází k rozstříku svarového kovu.

Mezi nevýhody patří [11, 12]:

- zvýšené nároky na přípravu svarových ploch a jejich čistotu,
- obtížná kontrola zakrytého svařovacího procesu,
- možnost svařování pouze v polohách PA nebo PB podle ČSN EN ISO 6947.

Při svařování elektrickým obloukem pod tavidlem tvoří svařovací elektroda a tavidlo dva samostatné celky, které je možné navzájem kombinovat tak, aby bylo dosaženo požadovaného chemického složení a mechanických vlastností. Klasifikaci drátů a tavidel pro nelegované a jemnozrnné ocele udává norma ČSN EN ISO 14171. [11,12]

Tavidlo je prášek anorganického původu vhodné zrnitosti a chemického složení. Teplem oblouku se část tavidla taví. Tato roztavená část vytváří na svaru strusku, která se odstraňuje. Tavidlo plní funkci ochrany svarové lázně před okolním prostředím, zajišťuje klidné hoření elektrického oblouku vytvořením dokonale ionizované atmosféry plynové kapsy, ovlivňuje vytvoření a formování svaru. Tavidlo metalurgicky působí na chemické složení svarového kovu a to dobrou dezoxidací a zabezpečuje nízký obsah nečistot ve svarovém kovu. Dále zabezpečuje přechod legujících prvků do svarového kovu. Vlastnosti tavidel závisí na jejich chemickém složení. Tavidla se rozdělují podle stupně bazicity na kyselá (SiO_2 , P_2O_5), neutrální (Al_2O_3 , B_2O_3 , Cr_2O_3), bazická (CaO , MgO , FeO , MnO , CrO , NiO , Na_2O , K_2O). Na výrobu tavidel, se jako suroviny používají rudy, keramické materiály a ferolegury. Tyto suroviny se rozdrtí a namíchají v určitém poměru, a dále se zpracovávají tavením či spékáním. [11, 12]

Jako přídatné materiály se používají svařovací dráty, trubičky a pásy. Nejpoužívanější jsou dráty o průměru 1,5 až 5 mm. Dráty jsou vyrobené tažením za studena a v některých případech je drát povlakován měděnou vrstvou z důvodu koroze. Trubičkové elektrody jsou vytvořené svinutým pláštěm z měkké oceli a uvnitř mají prášek, kterým lze ovlivnit chemické složení svaru. [11, 12]

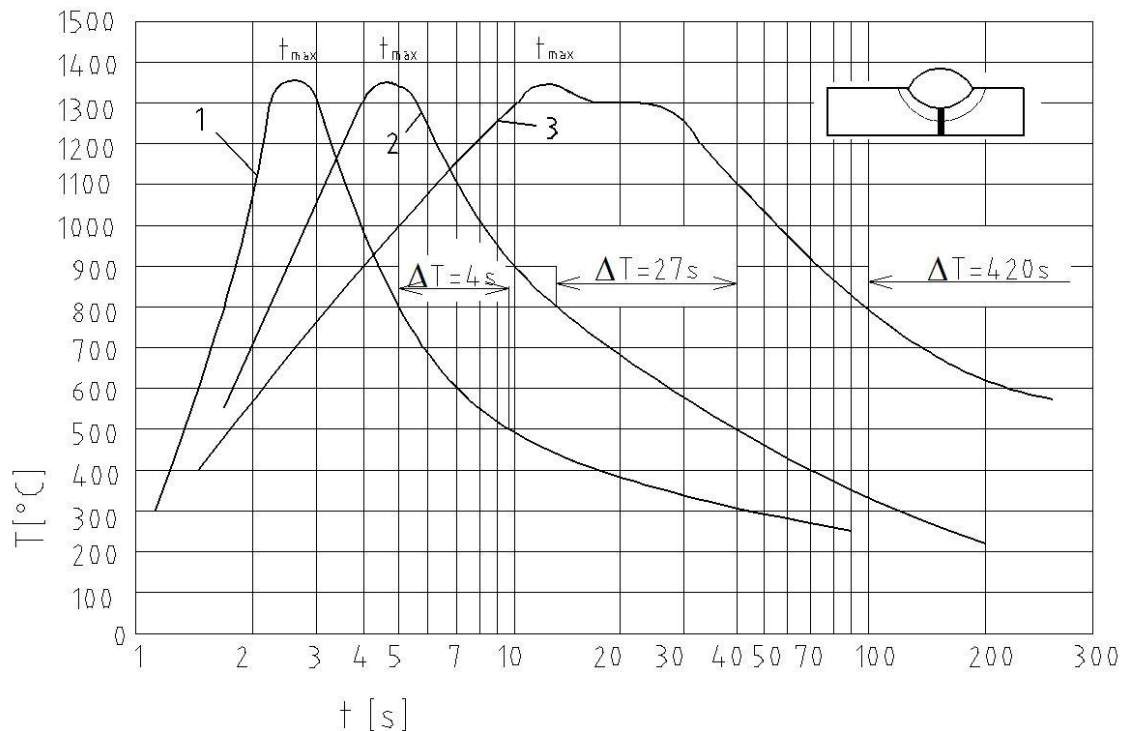
2.4.3 Teplotní a deformační procesy při svařování

Charakter a rozsah změn, probíhajících v TOO, jsou dány teplotním a deformačním účinkem svařovacího procesu. Účinek svařování nelze chápat odděleně jako teplotní a deformační cyklus, oba cykly se vzájemně podmiňují. Přitom je u tavných metod svařování jasná priorita teplotního cyklu, který je u většiny technologií zdrojem deformačního cyklu. Obecně lze říci, že při všech technologiích svařování, u kterých je oblast svarového spoje vystavena teplotně deformačnímu účinku, dochází k výraznému ovlivnění jejich mechanicko-fyzikálních vlastností. Svařováním se mění hlavně: struktura, pevnost a plasticita. Míra a rozsah uvedených změn závisí zejména na svařovaném základním materiálu (chemickém složení, fyzikálních vlastnostech, geometrických rozměrech), technologii svařování (způsob, parametry, postup) a množství tepla vneseném do svarového spoje na jednotku délky. [8, 9, 10, 17]

Při procesu svařování, působením soustředěného zdroje tepla, dochází krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Vneseným teplem se natavuje malý objem kovu, ale v důsledku tepelné vodivosti se ohřívá i okolní oblast základního materiálu. Při svařování se uplatňují všechny způsoby přenosu tepla: vedení, proudění a sálání. [10, 11]

U metod tavného svařování je teplo vyvinuté zdrojem tepla využito na tavení přídavného i základního materiálu a postupně se šíří do celého objemu svaru. [10]

Teplotní cyklus svařování udává změnu teploty v čase v daném bodě svarového spoje, především v tepelně ovlivněné oblasti. V důsledku působení teplotního cyklu na materiál se mění jeho struktura a vlastnosti. Velikost a charakter změn je možné hodnotit na základě charakteristik teplotního cyklu, které jsou: čas ohřevu na maximální teplotu, maximální teplota cyklu, doba výdrže na dané teplotě, rychlost ochlazování. [17]



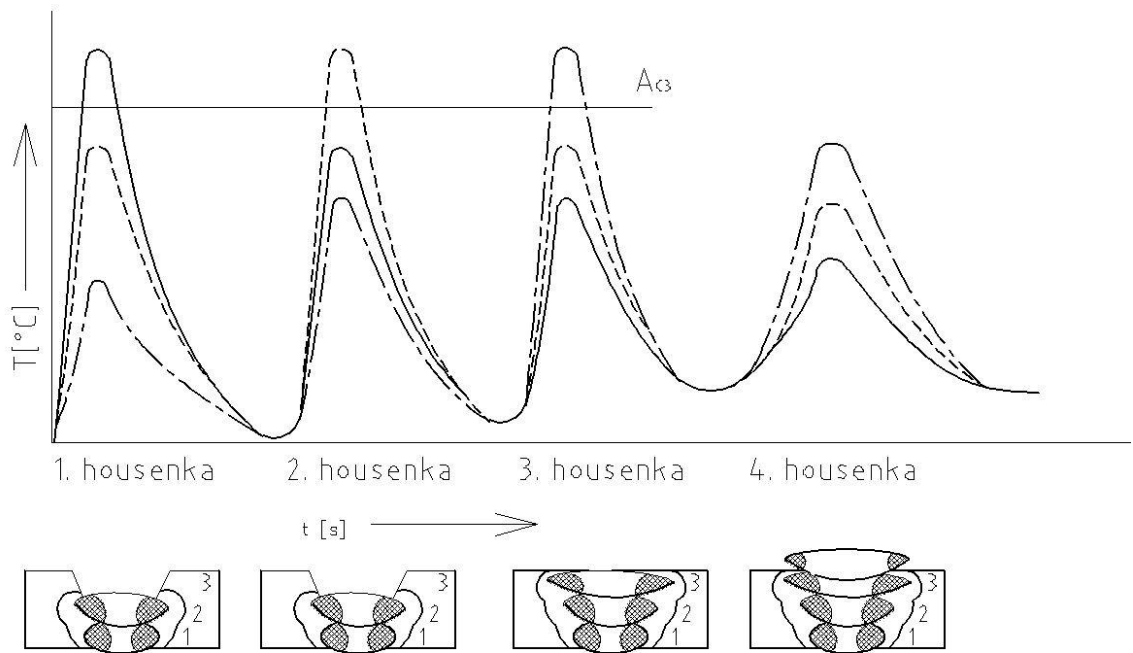
1-svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou, 2-svařování automatem pod tavidlem, 3-elektrostruskové svařování

Obr. 2-6 Teplotní cyklus podhousenkové oblasti [17]

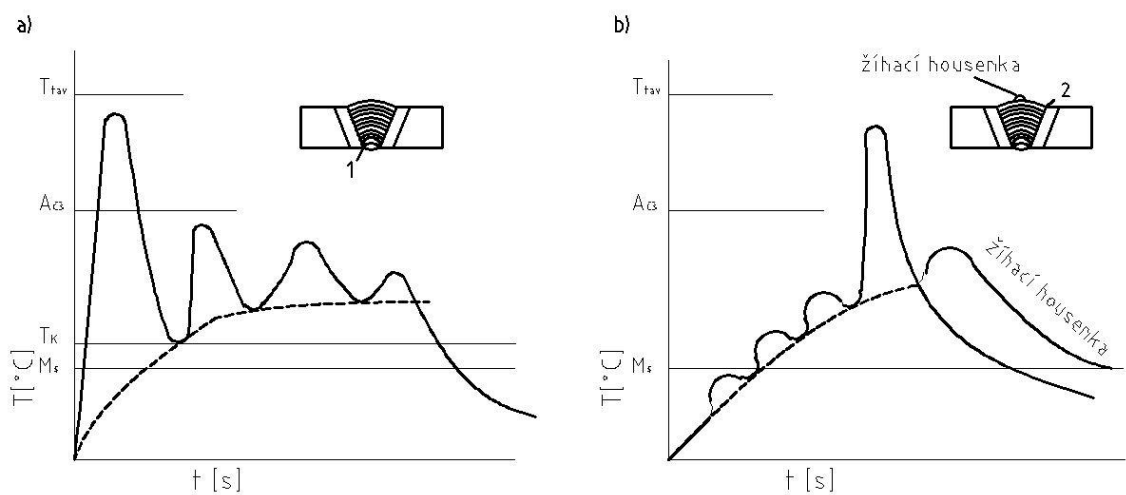
U většiny obloukových technologií svařování se rychlost ohřevu pohybuje v rozmezí 50-400°C/s. Vlivem vysoké rychlosti ohřevu se posouvají teploty A_1 a A_3 k vyšším teplotám o 50 až 300°C. Maximální teplota cyklu a doba setrvání na kritické teplotě, mají vliv na strukturální změny. Ochlazovací část teplotního cyklu má vliv na polymorfni přeměny a difuzi vodíku.

Při svařování oceli bez předehřevu jsou pro jednotlivé technologie charakteristické časy ochlazování mezi teplotami 800 až 500°C (označení $\Delta t_{8/5}$). Při ručním svařování obalenou elektrodou 1 až 10 sekund, v ochranných plynech 2 až 50 sekund, při svařování pod tavidlem 10 až 100 sekund a při elektrostruskovém svařování 60 až 1000 sekund. [17]

Při svařování jednovrstvého svaru je tvar teplotního cyklu shodný s obr. 2-6. Při svařování několikavrstvého svaru je tvar teplotního cyklu složitější podle obr. 2-7 a obr. 2-8.



Obr. 2-7 Průběh teplotních cyklů čtyřvrstvého svaru [17]

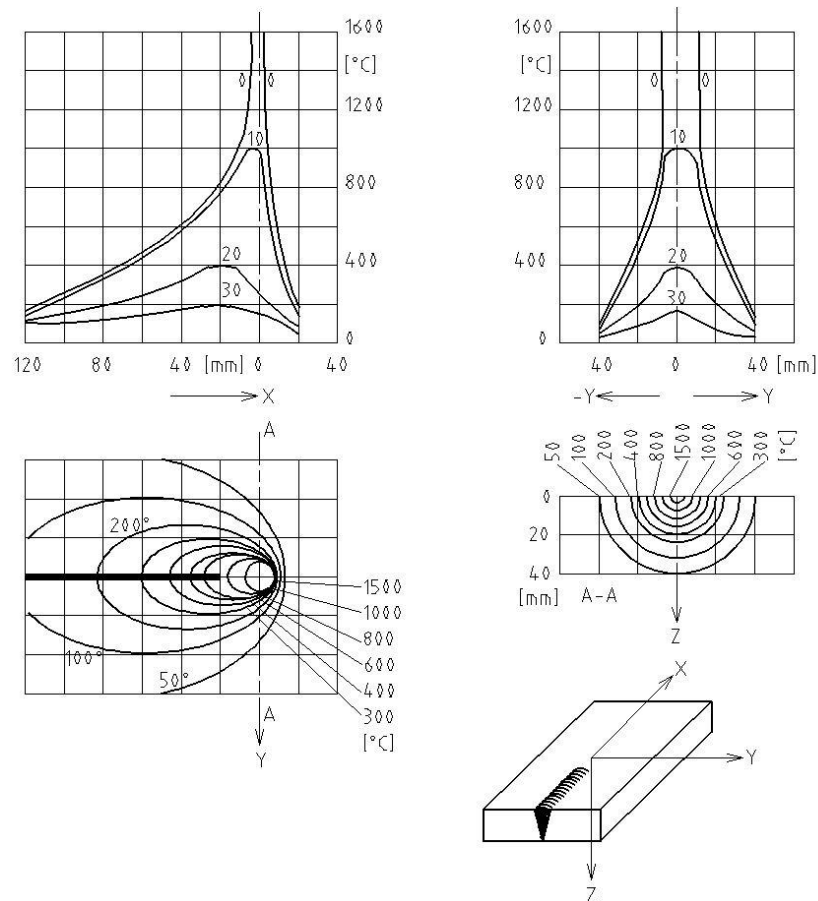


a - první poloha (bod 1), b - druhá poloha (bod 2)

Obr. 2-8 Teplotní cyklus v TOO při několikavrstvém svařování [17]

Stanovením teplotního pole svařovaného materiálu lze provádět buď měřením např. přivařenými termočlánky, termovizní nebo početním řešením rovnice vedení tepla. Teplotní pole představuje souhrn okamžitých hodnot teplot ve všech bodech sledovaného prostoru. Teplotní pole se zobrazují pomocí izotermických čar nebo izotermických ploch. Teplotní pole lze obecně formulovat jako funkci teploty T o souřadnicích x, y, z , v čase t . [9, 17]

Na obr. 2-9 je ukázka rozložení teplot třírozměrného teplotního pole, při svařování ocelové desky tloušťky 40 mm, tepelný příkon 4000 J.s⁻¹ a rychlost svařování 1 mm.s⁻¹. [9]



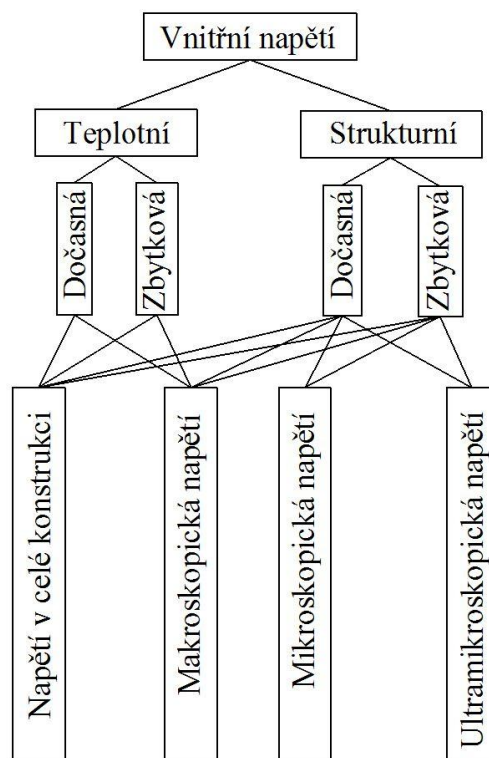
Obr. 2-9 Třírozměrné teplotní pole při svařování ocelové desky tloušťky 40 mm [9]

V důsledku přívodu energie do místa spoje a odvodu do základního materiálu vznikají ve svařovaných dílech napětí a deformace. Z fyzikální metalurgické podstaty jsou pro vznik, charakter a velikost napětí a deformace rozhodující [8, 10]:

- pohyblivý charakter teplotních polí v základním materiálu,
- množství vneseného tepla na jednotku délky svaru,
- velikost a tvar svarové lázně, tvar a umístění svaru,
- fyzikální a tepelně-fyzikální vlastnosti základního materiálu ovlivňující proces sdílení tepla,
- mechanické vlastnosti základního materiálu a jejich závislost na teplotě,

- objemové změny v důsledku strukturních změn v základním materiálu a ve svarovém kovu spoje,
- tuhost svaru.

Konstrukce a technologie výroby svařovaných dílů má vliv na celkový charakter a velikost napětí a deformací.



Obr. 2-10 Rozdělení vnitřních napětí [10]

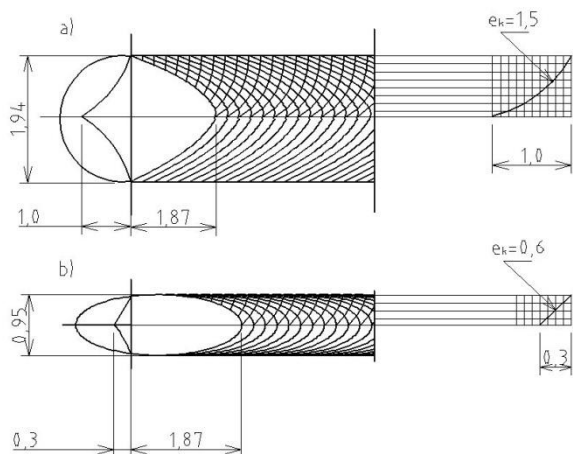
Teplotní napětí vznikají v důsledku nerovnovážného ohřevu a ochlazení materiálu. Strukturní napětí vzniká vlivem časového posunu fázových transformací v různých elementech, nebo napětím na rozhraní jednotlivých fází. Dočasná napětí působící v materiálu pouze po určitou dobu, kdy existuje příčina, která vedla k jejich vzniku. Zbytková napětí zůstávají v materiálu i po ukončení technologického procesu. Makroskopická napětí vznikají a vyrovnávají se v makroobjemech materiálu. Mikroskopická napětí vznikají a vyrovnávají se v mikroskopických objemech materiálu (oblast jednotlivých krystalů). Ultramikroskopická napětí vznikají a vyrovnávají se v ultramikroskopických objemech materiálu (oblast jednotlivých krystalů). Vzhledem k ose svaru mohou působit napětí podélná, příčná a napětí ve směru tloušťky. [10]

Na velikost vznikajících napětí a deformace má významný vliv především hodnota lineárního součinitele teplotní roztažnosti a teplotní závislost meze kluzu. [10]

2.4.4 Vznik a tvorba svaru

Svar vzniká tavením základního a přídavného materiálu, nebo pouze přetavením základního materiálu. Podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu spoje se nazývá promíšení. Při svařování kořene svaru je promíšení vyšší než při svařování výplňové části. Při ručním obloukovém svařování je stupeň promíšení od 10 až 40%, při svařování automatem pod tavidlem až do 85%. [17]

Velikost a tvar svarové lázně závisí na měrném příkonu svařování a tepelně-fyzikálních vlastnostech základního materiálu. Šířka a hloubka svaru jsou nejvýrazněji ovlivňovány intenzitou svařovacího proudu (hloubka) a svařovacím napětím (šířka). Tvar svarové lázně je nejvíce ovlivněn rychlostí svařování (obr. 2-11). [17]



a-malá rychlost svařování, b-velká rychlost svařování

Obr. 2-11 Tvar svarové lázně a směr růstu denritů [17]

Při poklesu teploty svarového kovu pod teplotu likvidu začíná krystalizace svaru. V průběhu tuhnutí probíhají likvační a segregační procesy. Svarový kov krystalizuje v důsledku heterogenní nukleace na svarových plochách. Růst pevné fáze je epitaxiální, to znamená, že krystalizující svarový kov dědí orientaci

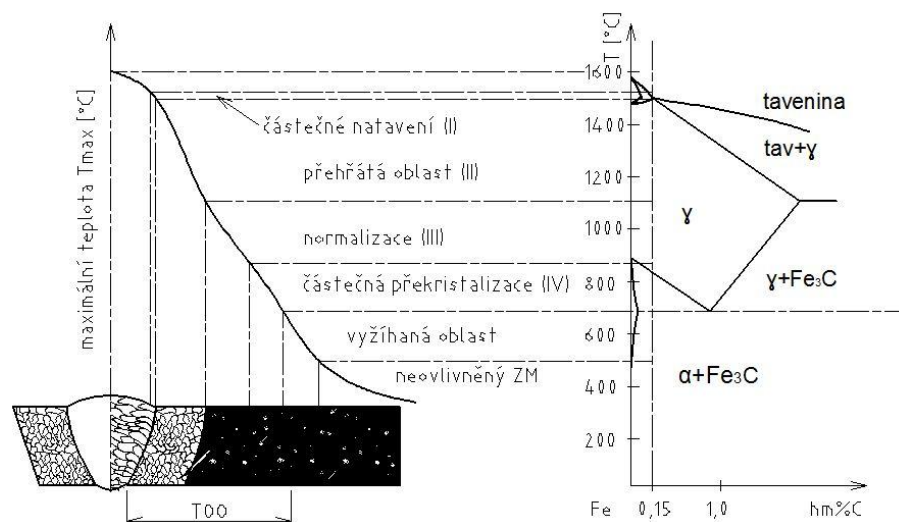
i velikost zrn přechodového pásma. Sloupcovitá zrna pevné fáze rostou kolmo na izotermu, což je ve směru gradientu teploty. V závislosti na chemickém složení svarového kovu a rychlosti svařování krystalizuje svarový kov buď celulárně, nebo dendriticky.

Celulární krystalizace nastává při menším podchlazení a nemá přednostní krystalickou orientaci. Dendritická krystalizace probíhá při větším podchlazení a dendrity rostou přednostně. U většiny svaru začíná krystalizace svarového kovu růstem dendritů a v určitém stadiu se mění na celulární. [17]

Mikrostruktura svarového kovu závisí zejména na jeho chemickém složení a svařovacích parametrech. Svarové kovy ve většině případů nedosahují houževnatosti základních materiálů. Vlastnosti svarových kovů výrazně ovlivňuje typ mikrostruktury, velikost zrn, precipitační procesy, stárnutí atd. Únavové vlastnosti svarových kovů jsou horší než odpovídajících základních materiálů. Tyto vlastnosti ovlivňuje zejména lící struktura svaru, povrchové defekty svaru, počet inkluzí, čistota svarového kovu. S ohledem na nižší obsah uhlíku ve svarových kovech jsou v porovnání se základním materiálem horší i žáropevné vlastnosti. Mez tečení svarových kovů je nižší. [17]

2.4.5 Tepelně ovlivněná oblast (TOO)

Tepelně ovlivněnou oblastí (TOO) nazýváme oblast svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla od svařování. Při svařování tavným způsobem dochází k nerovnoměrnému rozdělení tepla napříč svaru a tím i k velkým teplotním rozdílům. V oblasti svarového spoje vznikají rozdílné strukturní změny, které jsou dány průběhem, tvarem a vzdáleností teplotního cyklu od osy svaru. Výsledná struktura je závislá na chemickém složení základního materiálu a na jeho předchozím tepelném nebo mechanickém zpracování. Proto se v celé oblasti svarového spoje vytvoří jednotlivá pásma s různým charakterem změn struktury, mechanických vlastností, plasticity apod. [9, 10, 17]



I – částečné natavení, II – přehřátá oblast, III – normalizace, IV – částečná překrystalizace

Obr. 2-12 Vliv tepelného účinku svařovacího procesu na strukturu svarového spoje [9, 17]

V oblasti taveniny, kde došlo k roztavení přídavného materiálu a natavení svarových ploch, se svarový kov skládá z poměrně dlouhých krystalů (dendritů), které narůstají od svarových ploch do středu svaru. Zrna jsou hrubší, protože se tvořila z vysoké teploty. [9, 17]

Pásmo I – částečné natavení, je u většiny ocelí poměrně úzké, výraznější bývá u některých legovaných ocelí (např. astenických chromniklových). Nachází se na rozhraní svarový kov-základní materiál. V důsledku rychlého ochlazení nemůže dojít k pravidelnému rozdělení jednotlivých složek taveniny, která je bohatší na složky s nižší teplotou tavení. Vzniká zde značná chemická nestejnorodost a řada nečistot. Toto pásmo kriticky ovlivňuje jakost celého svarového spoje. [9, 17]

Pásmo II – vzniká přehřátím základního materiálu teplotami, které překračují teplotu intenzivního růstu primárních zrn (γ -zrn), dochází ke zvětšování zrna. V tomto pásmu je při svařování austenitická struktura. Na strukturu vzniklou po svařování má největší vliv tvar teplotního cyklu a rychlost ochlazování. Při malých rychlostech ochlazování vzniká feriticko-perlitická struktura

s widmannstättenovou texturou. Při vyšších rychlostech ochlazování vzniká feriticko-bainitická struktura. [9, 17]

Pásmo III – teplota dosahuje těsně nad A_3 a proběhne úplná transformace $\alpha \rightarrow \gamma$. Po ochlazení odpovídá struktura struktuře po normalizačním žihání. Zrno je jemnější a stejnoměrné, vzrůstá s rostoucí teplotou. Mechanické vlastnosti po svařování tohoto pásma jsou velice dobré. [9, 17]

Pásmo IV – Ohřátí při svařování mezi A_1 až A_3 je poměrně široké. Eutektoid (perlit) se u feriticko-perlitických ocelí při teplotách nad A_1 rozpouští a transformuje na austenit. Krátkodobým ovlivněním teplotami A_1 až A_3 vzniká nehomogenní feriticko-martenzitická struktura. Na jedné straně difúze uhlíku z transformovaného perlitu zjemňuje sekundární zrna, na druhé straně vznik většiny přechodových, přesycených struktur nepříznivě ovlivňuje plastické vlastnosti. [9, 10]

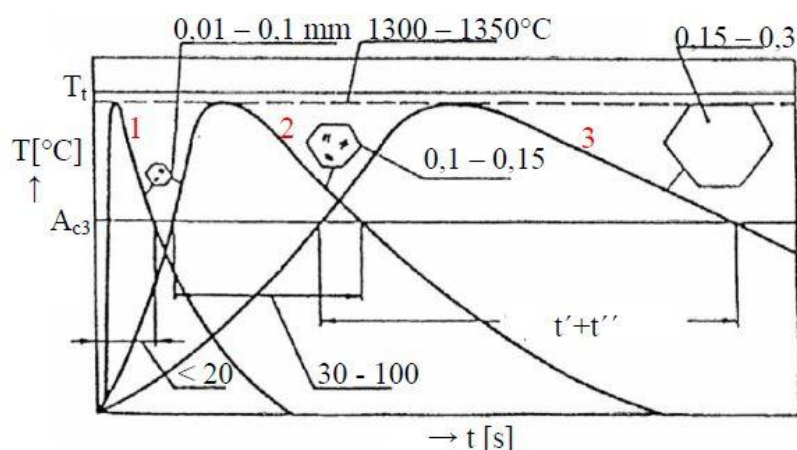
Šířka jednotlivých úseků tepelně ovlivněné oblasti (TOO) základního materiálu bude záviset na použitých technologiích, parametrech svařování, velikosti předehřevu, tloušťce svařované oceli a typu spoje. [9]

Tab. 2.3 Orientační šířky jednotlivých pásem TOO [17]

Technologie svařování	Šířka TOO [mm]		
	nad A_1	nad A_3	přehřátá oblast
Ruční obloukové svařování	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
MAG	3 až 8	0,3 až 1	0,1 až 0,3
Automatické svařování pod tavidlem	3 až 15	0,3 až 2	0,1 až 0,5
Elektrostruskové svařování	5 až 50	1 až 10	0,5 až 5
Svařování elektronovým paprskem	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1
Svařování plazmou	0,3 až 1	0,1 až 0,3	0 až 0,1

Z uvedeného je zřejmé, že struktury TOO mají velkou rozmanitost. Struktury vzniklé za teplot A_1 až A_3 nemají výrazný vliv na vlastnosti svarového spoje. Nepříznivé struktury jsou většinou kompenzované zjemněním zrn. [9, 10]

Pro vlastnosti svarového spoje jsou obvykle rozhodující vlastnosti jednotlivých pásem TOO. Nepříjemné je především zhrubnutí zrna blízko hranice ztavení. Zhrubnuté zrno výrazně zhoršuje plasticitu (vrubovou a lomovou houževnatost). Hrubé zrno brzdí kinetiku rozpadu austenitu, protože preferuje vylučování feritu ve štěpných rovinách austenitu za vzniku Widmannstättenovy struktury. Hrubé zrno zvyšuje náchylnost k prasklinám (likvacím, studeným, žíhacím). [9, 10, 17]



1-Ruční obloukové svařování, 2-Automatické svařování pod tavidlem, 3-Elektrostruskové svařování

Obr. 2-13 Růst zrna při svařování [17]

Kritická pásma svarového spoje jsou tedy: svarový kov ovlivněný metalurgickými reakcemi, pásmo částečného natavení, pásmo přehřátí základního materiálu a oblast kolem nebo pod A_1 , kde dochází ke zvýšení hustoty dislokací a přesycení intersticiemi, což vede ke stárnutí. Stárnutí je charakteristické pro nelegované ocele s nízkým obsahem uhlíku. [9]

Pro studium struktury v TOO nejsou vhodné klasické ARA diagramy používané pro účely tepelného zpracování. V reálných podmínkách se totiž liší hodnoty austenitizační teploty a velikosti zrn. Proto se pro účely svařování konstruuji tzv. „in-situ“ ARA diagramy, kde místo časové osy se používá hodnota $t_{8/5}$.

3 Experimentální část

Experimentální část vznikla na základě spolupráce se společností TENEZ Chotěboř, a. s. Cílem experimentální části bylo zjistit vliv teplotních cyklů, kterým je materiál vystaven při svařování a následném smaltování, na jeho degradaci. Tento vliv je posuzován pomocí zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy a změnou tvrdosti HV v oblasti svaru, TOO a základního materiálu.

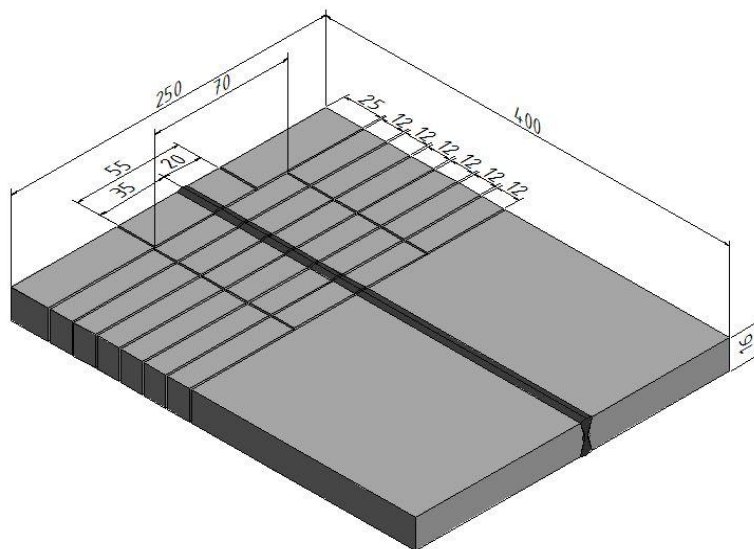
3.1 Popis experimentu

Pro experiment bylo společností TENEZ Chotěboř, a.s. dodáno 11 svařených desek o rozměrech 250 x 400 mm a tloušťce 16 mm z oceli P265GH, viz obr. 3-1. Jednotlivé desky byly svařeny ze dvou dílů čtyřvrstevným svarem X. Svar byl proveden metodou MAG a metodou svařování pod tavidlem. Podrobný popis postupu svařování, které probíhalo ve společnosti TENEZ Chotěboř, a.s. je uveden v kapitole 3.1.1.

Experiment byl rozdělen na dvě části. V rámci první části experimentu bylo cílem stanovit vliv způsobu svařování a následných teplotních cyklů na degradaci materiálu. Jedna deska byla ponechána bez dalšího tepelného zpracování za účelem stanovení výchozích vlastností materiálu po svaření. Ostatní desky (tj. 10) byly v laboratořích Katedry strojírenské technologie tepelně zpracovány žiháním podle diagramu, viz obr. 3-4. Jedna deska byla opět ponechána pro hodnocení vlivu tohoto žihání na mechanické vlastnosti svarového spoje. Ostatní desky (tj. 9) byly vystaveny teplotním cyklům podle diagramu na obr. 3-5. Jedná se o teplotní cykly používané pro vypalování smaltu. Počet cyklů se u jednotlivých desek lišil, tj. jedna deska byla vystavena 5, další deska 10 a 15 cyklům. Zbylé desky (tj. 6) byly vystaveny 20 uvedeným cyklům. V této fázi experimentu bylo tedy pro hodnocení vlivu svařování a následných tepelných cyklů připraveno 6 desek. Zbylých 5 desek, které byly vystaveny všem výše uvedeným teplotním cyklům, bylo určeno pro druhou fázi experimentu.

V rámci druhé části experimentu se simulovaly podmínky, kterým je materiál vystaven při tvz. resmaltaci. Tu je nutné provádět u smaltovaných nádrží tehdy, pokud u nich dojde k porušení smaltu ve větším rozsahu. V tomto případě je nejprve z důvodu přístupu odstraněn svar víka vydrážkováním, a následně je smaltovaný povrch kompletně otryskán. Poté je nádrž opět zkompletována svařením metodou MAG a proveden opakovaný smaltovací proces. Tento postup byl aplikován u zbylých 5 desek. To znamená, že svary u desek byly nejprve vydrážkovány a desky opět svařeny metodou MAG. Podmínky svařování jsou podrobněji popsány v kapitole 3.1.1. Desky byly žíhány podle diagramu na obr. 3-4 a následně byly vystaveny 5, 10 a 15 teplotním cyklům dle diagramu obr. 3-5.

V tab. 3.1 je uveden přehled způsobu značení jednotlivých desek, u kterých je v průběhu experimentální části práce hodnocena míra degradace mechanických vlastností. Vzorky jsou značeny následovně: metoda svařování – žíhání – počet cyklů. Např. označení 1-Ž-5 znamená, že vzorek je svařen metodou svařování 1, žíhaný a je zatížen 5 teplotními cykly, které se používají při vypalování smaltu.



Obr. 3-1 Schéma dělení svařené desky na vzorky

Tab. 3.1 Přehled značení jednotlivých desek

Metoda svařování	Žihání	Počet cyklů	Popis
1	0	0	Výchozí materiál svařený metodou svařování 1.
1	Ž	0	Materiál svařený metodou svařování 1 a žiháný dle teplotního cyklu na obr. 3-4.
1	Ž	5	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 5 teplotním cyklům dle obr. 3-5.
1	Ž	10	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 10 teplotním cyklům dle obr. 3-5.
1	Ž	15	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 15 teplotním cyklům dle obr. 3-5.
1	Ž	20	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5.
2	0	0	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5, u kterého byl vydrážkován svar. Potom byla deska svařena metodou svařování číslo 2.
2	Ž	0	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5, u kterého byl vydrážkován svar. Potom byla deska svařena metodou svařování číslo 2 a žihána dle obr. 3-4.
2	Ž	5	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5, u kterého byl vydrážkován svar. Potom byla deska svařena metodou svařování číslo 2 a žihána dle obr. 3-4 a vystavena 5 cyklům dle obr. 3-5.
2	Ž	10	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5, u kterého byl vydrážkován svar. Potom byla deska svařena metodou svařování číslo 2 a žihána dle obr. 3-4 a vystavena 10 cyklům dle obr. 3-5.
2	Ž	15	Materiál svařený metodou svařování 1, žiháný dle obr. 3-4 a vystaven 20 teplotním cyklům dle obr. 3-5, u kterého byl vydrážkován svar. Potom byla deska svařena metodou svařování číslo 2 a žihána dle obr. 3-4 a vystavena 15 cyklům dle obr. 3-5.

Z připravených desek byly odebírány vzorky pro hodnocení vlivu teplotních cyklů, kterým je materiál vystaven při svařování, žihání a vypalování jednotlivých vrstev smaltu na degradaci materiálu.

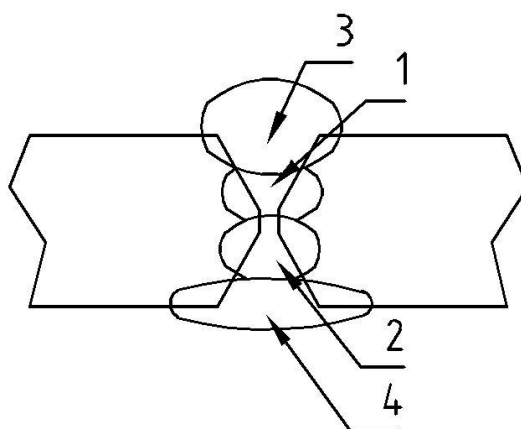
Způsob odebírání vzorků ze svařených desek je ukázán na obr. 3-1. Vzorek se šířkou 25 mm je určen pro měření tvrdosti a ostatní vzorky jsou pro zkoušku vrubové houževnatosti.

3.1.1 Použité postupy svařování

Jak již bylo uvedeno, svařování desek probíhalo ve firmě TENEZ a.s. ve dvou fázích.

V první fázi experimentu byly desky svařeny dle postupu označeného metoda svařování číslo 1.

Metodou svařování číslo 1 je zhotoven tavný tupý X svar. Jedná se o čtyřvrstvý svar, viz obr. 3-2. Svar je proveden dvěma metodami svařování.



Obr. 3-2 Čtyřvrstvý svar vytvořený metoda svařování číslo 1

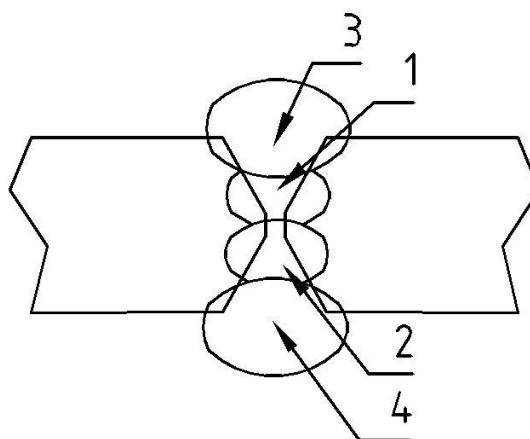
Jedná se o obloukové svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře ISO 4063-135 (MAG) a svařování autorem pod tavidlem ISO 4063-121 (SAW). Přídavným materiálem u metody MAG byl drát Böhler EMK 6 (dle ČSN EN ISO 14171 – G 42 4 M21 3 S1) o průměru 1,2 mm. Drát je dezoxidovaný, poměděný a je pro univerzální použití pro svařování v CO_2 a směsném plynu. Byla použita ochranná atmosféra s označením M31-ArC-40 dle EN ISO 14175. Jedná se o směs 40 % CO_2 +Ar. Průtok směsného plynu byl 12 l/min. Přídavným materiálem u metody SAW byl drát o průměru 4 mm od dodavatele Böhler EMS 2 (podle ČSN EN ISO 14171 - S 38 6 FB S2) a tavidlo BB 24 (podle ČSN EN ISO 14171 značeno SA FB 1 65 DC 8 H5). Svařovací parametry pro tento svar jsou uvedeny v tab. 3.2.

Tab. 3.2 Svařovací parametry metody číslo 1

Vrstva	Průměr přídavného materiálu [mm]	Metoda svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Rychlost svařování [cm/min]
1	1,2	135	260	27	6	35
2	1,2	135	260	27	6	35
3	1,2	135	290 - 300	28	7	30
4	4	121	620 - 650	33	-	28

V rámci druhé fáze experimentu byly desky po vydrážkování svaru svařeny metodou svařování číslo 2.

Metodou svařování číslo 2 byl zhotoven opět čtyřvrstvý X svar, viz obr. 3-3.



Obr. 3-3 Čtyřvrstvý svar vytvořený metoda svařování číslo 2

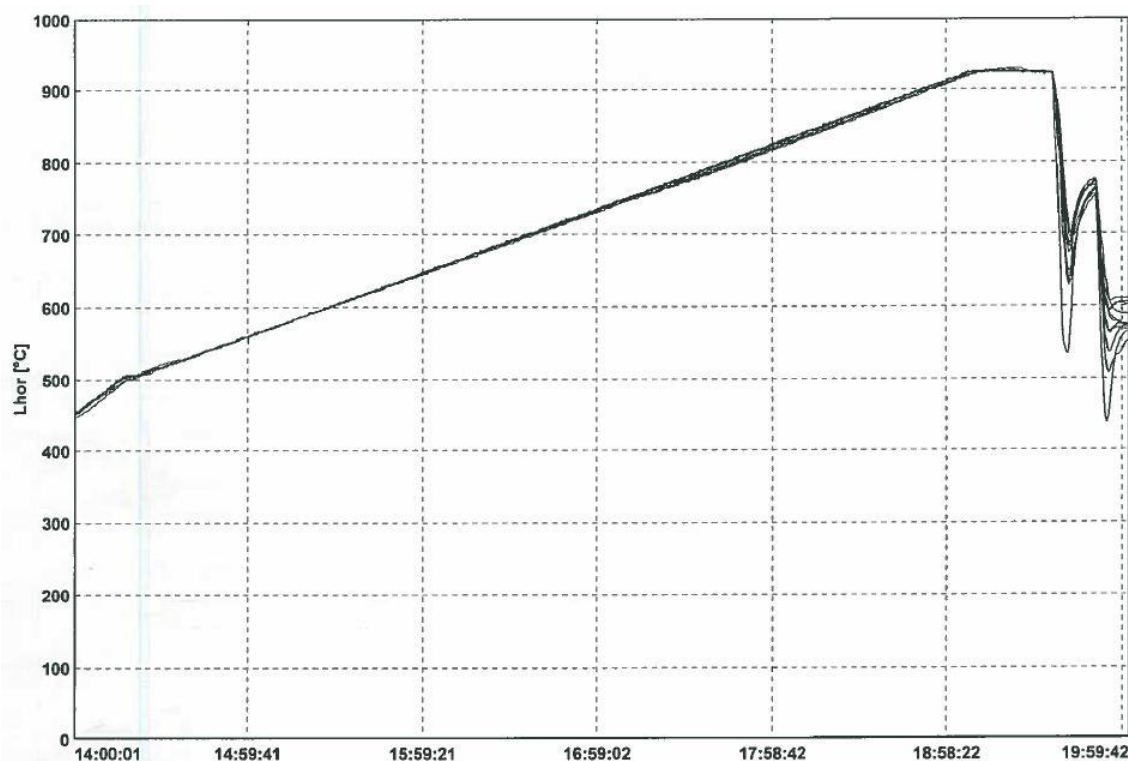
V tomto případě byl svar proveden tavící se elektrodou v ochranné atmosféře ISO 4063-135 (MAG). Přídavným materiálem byl, stejně jako v předchozím případě, drát od dodavatele Böhler EMK 6 o průměru 1,2 mm. Byla použita ochranná atmosféra s označením M31-ArC-40 dle EN ISO 14175, tj. 40 % CO₂+Ar. Průtok směsného plynu byl 20 l/min. Postup svařování je uveden v tabulce 3.3.

Tab. 3.3 Svařovací parametry metody číslo 2

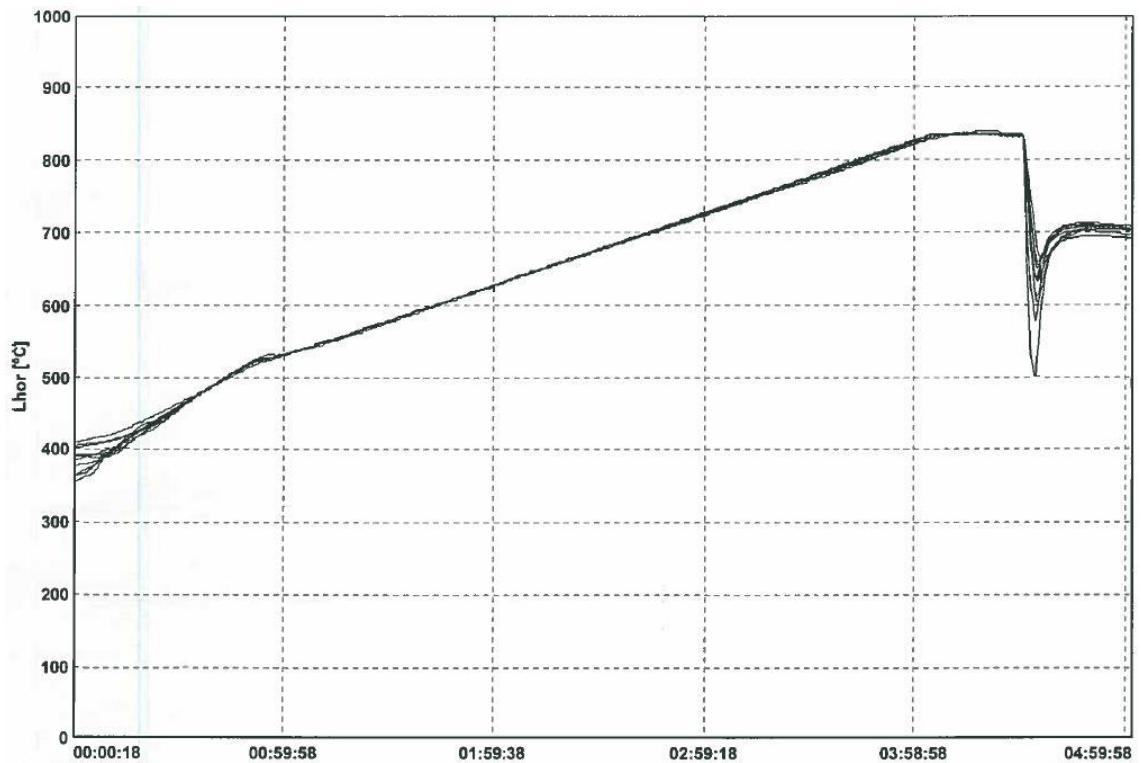
Vrstva	Průměr přídavného materiálu [mm]	Metoda svařování	Proud [A]	Napětí [V]	Rychlost podávání drátu [m/min]	Rychlost svařování [cm/min]
1	1,2	135	260	27	6	35
2	1,2	135	260	27	6	35
3	1,2	135	290 - 300	28	7	30
4	1,2	135	290 - 300	28	7	30

3.1.2 Použité teplotní cykly

Tepelné zpracování dodaných desek bylo provedeno v laboratořích Katedry strojírenské technologie. Pro tepelné zpracování byla použita elektrická odporová pec Classic. Svařené desky byly nejprve žihány podle diagramu na obr. 3-4, který odpovídá cyklu používanému k žihání svařených nádrží.



Obr. 3-4 Teplotní cyklus žihání



Obr. 3-5 Teplotní cyklus při vypalování jedné vrstvy smaltu

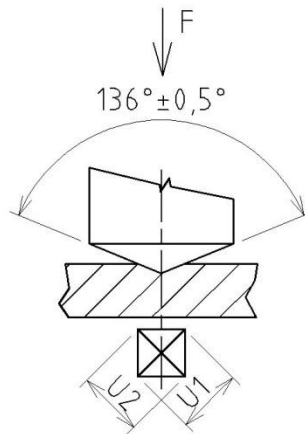
Poté byly desky vystavovány různému počtu teplotních cyklů dle obr. 3-5, které se používají při vypalování jednotlivých vrstev smaltu. V rámci první části experimentu desky prodělaly 5, 10, 15, a 20 těchto cyklů. Po vydrážkování a svaření desek metodou svařování číslo 2, desky prodělaly těchto cyklů 5, 10 a 15.

3.2 Měření tvrdosti

Pro zkoušku tvrdosti byla zvolena zkouška dle Vickerse (ČSN EN ISO 6507). Principem zkoušky je vtlačování indentoru, kterým je jehlan s vrcholovým úhlem $136 \pm 0,5^\circ$ do materiálu. Po odlehčení je v materiálu čtvercový vtisk, na kterém je změřena délka dvou úhlopříček, a je proveden aritmetický průměr těchto dvou hodnot. Podle aritmetického průměru délky úhlopříček je vypočtena tvrdost. Výpočet Vickersovy tvrdosti je dán vzorcem [17]:

$$HV = 0,189 * \frac{F}{u^2}, \quad (3.1)$$

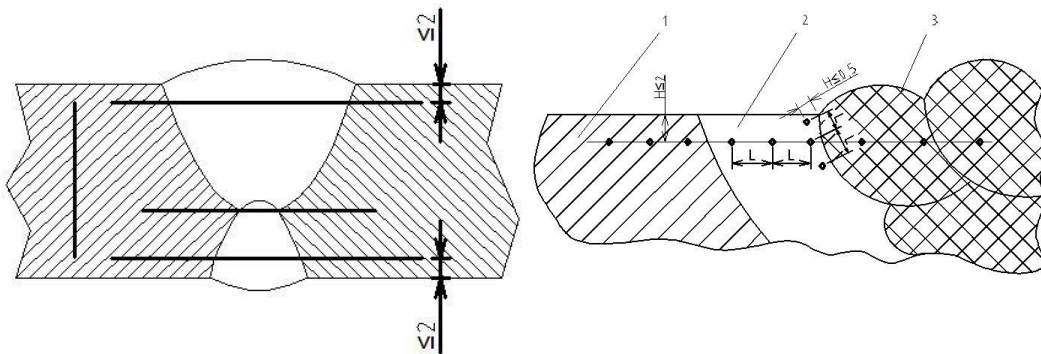
kde značí: F-zatěžující sílu [N],
u-aritmetický průměr délky úhlopříček [mm].



Obr. 3-6 Princip Vickersovy zkoušky [22]

Na normu ČSN EN ISO 6507 navazuje norma pro hodnocení tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním ČSN EN ISO 9015-1. Pro měření byla zvolena metoda HV10, tj. zkouška probíhala při zkušebním zatížení 98,07 N. Podle normy, musí být zkouška provedena při teplotě okolí $23 \pm 5^\circ\text{C}$, doporučená vzdálenost vtisků od sebe pro ocel v TOO metodu HV10 je $L=1$ mm.

Na obr. 3-7 je ukázán příklad vtisků u oboustranných, jedno či vícehousekových svarů a na obr. 3-8 umístění vtisku na tupých svarech v ZM, TOO, SK.



1-základní materiál, 2-tepelně ovlivněná oblast, 3-svarový kov

Obr. 3-7 Příklad řad vtisků u oceli s oboustranným, jedno či vícehousekovým svarem [20]

Obr. 3-8 Příklad umístění vtisků od okraje na tupých svarech železných kovů [20]

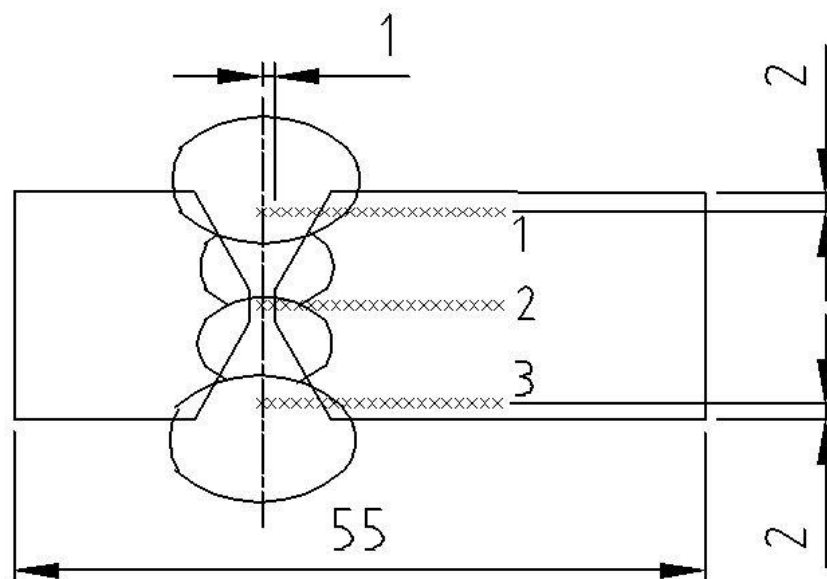
Zkouška probíhala na tvrdoměru Qness Q30A (obr. 3-9).



Obr. 3-9 Tvrdoměr Qness Q30A [21]

Vzorky pro měření tvrdosti byly odebrány z vybraných svařených desek s označením dle tab. 3.1: 1-0-0, 1-Ž-0, 1-Ž-20, 2-0-0, 2-Ž-0, 2-Ž-15.

Způsob odběru vzorků je ukázán na obr. 3-1. Z desky byl uříznut pás o tloušťce 25 mm, viz obr. 3-1 a zkrácen tak, aby bylo na metalografickém vzorku možné hodnotit svarový kov, TOO i základní materiál. Následně byl vzorek připraven běžným metalografickým postupem, tj. po zapouzdření byl broušen a leštěn. Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadlo 3% Nital. Na takto připraveném vzorku bylo provedeno měření tvrdosti HV10 ve svarovém kovu, TOO i v základním materiálu.



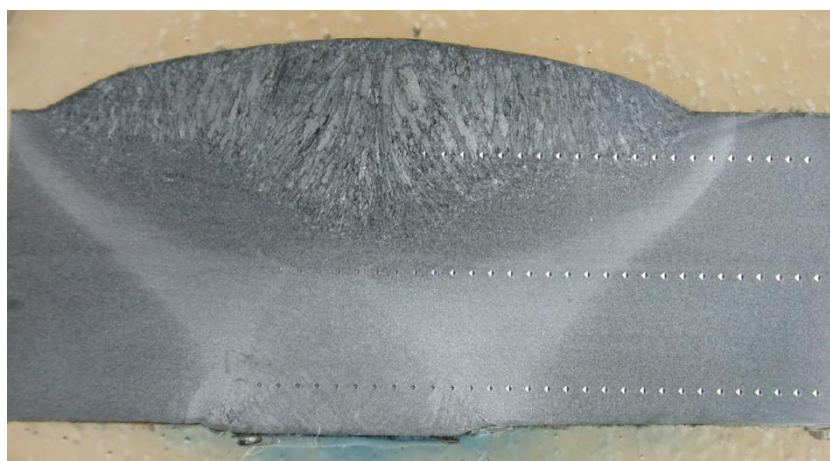
1, 2, 3-Řady měření

Obr. 3-10 Schéma předem nadefinovaných řad tvrdosti

Tvrdost byla měřena ve třech řadách. Řada číslo 1 a 3 byla umístěna 2 mm od okraje desky. Řada 2 je ve vzdálenosti 8 mm od vrchní hrany desky, viz obr. 3-10. Mezi jednotlivými vpichy je vzdálenost 1 mm.

3.2.1 Měření tvrdosti u desek svařených metodou 1

Na obr. 3-11 je ukázán metalografický výbrus svaru desky označené 1-0-0 včetně míst měření tvrdosti HV10.



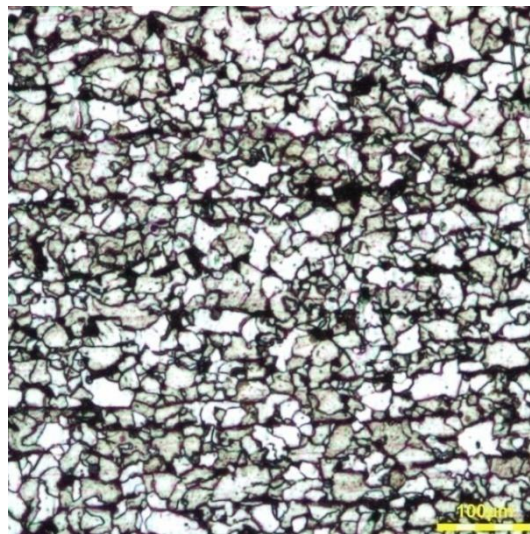
Obr. 3-11 Pohled na metalografický výbrus svaru desky 1-0-0

Na obr. 3-12 je ukázána část struktury svarového kovu, TOO a základního materiálu (metoda pod tavidlem) a na obr. 3-13 je

ukázána struktura základního materiálu svažené desky bez následného tepelného zpracování (1-0-0).



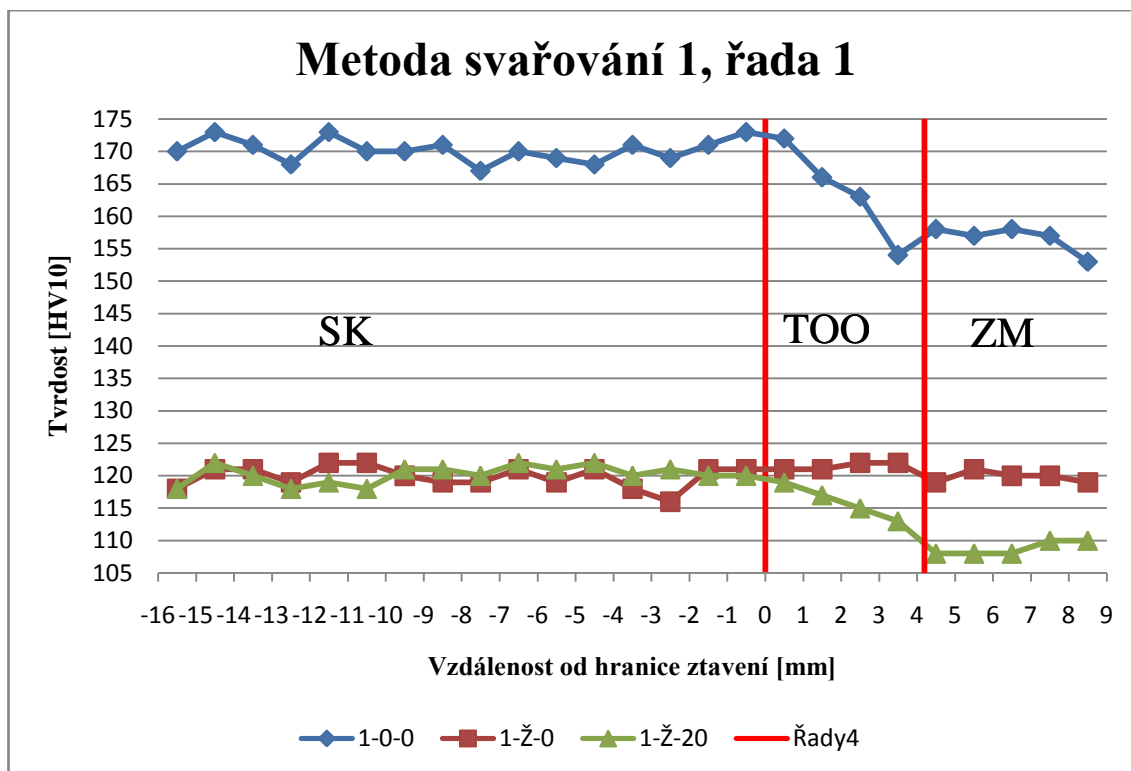
Obr. 3-12 Struktura SK, TOO, ZM (metoda pod tavidlem)



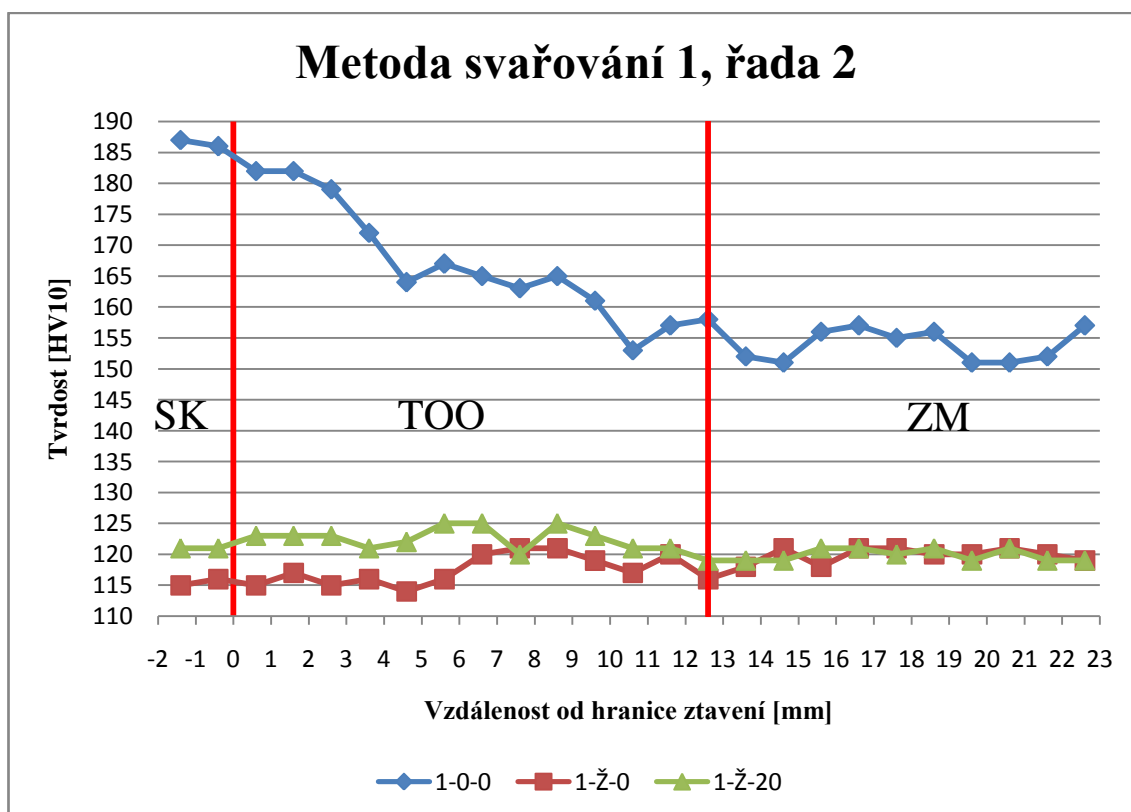
Obr.3-13 Struktura základního materiálu bez následného tepelného zpracování

Naměřené hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 1 – tj. desky označené 1-0-0, 1-Ž-0, 1-Ž-20 jsou uvedeny v tabulkách v příloze č. 1, 5, 9. V přílohách č. 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12 je uvedeno jejich grafické zpracování znázorňující průběh tvrdosti ve svarovém kovu (SK), tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a základním materiálu (ZM) v závislosti na vzdálenosti od středu svaru.

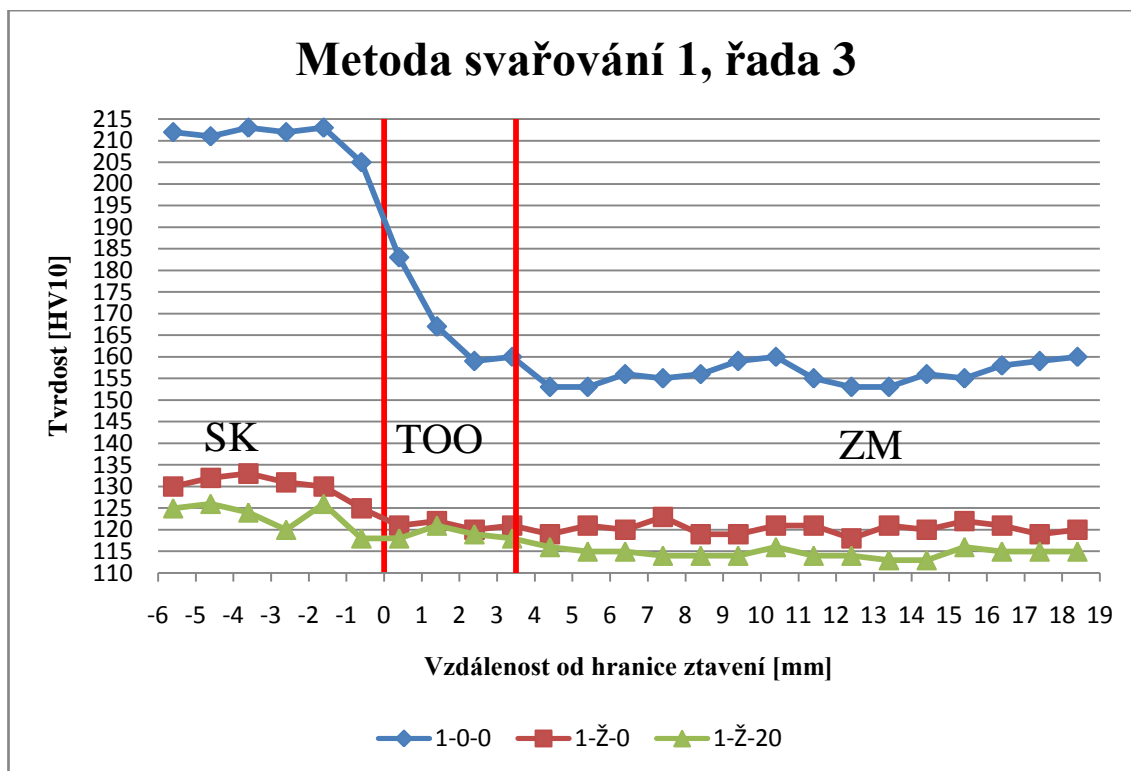
Na obr. 3-14 je uveden průběh tvrdosti řady č. 1 (2mm od vrchní hrany desky) pro vzorky odebrané z desek 1-0-0, 1-Ž-0, 1-Ž-20. Pro řadu číslo 2 a 3 je průběh tvrdosti u těchto vzorků znázorněn na obr. 3-15 a obr. 3-16.



Obr. 3-14 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 1 a řadu 1



Obr. 3-15 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 1 a řadu 2



Obr. 3-16 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 1 a řadu 3

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 1** podle obr. 3-14 lze konstatovat, že tvrdost v oblasti svarového kovu činila průměrně 170 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 167 – 173 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 4,2 mm. Průměrná tvrdost ZM je 157 HV (rozmezí hodnot naměřených tvrdostí 153 - 158).

Po vyžihání desky způsobem uvedeným v předchozí části, došlo k vyrovnání tvrdostí v jednotlivých oblastech svarové spoje a k výraznému poklesu tvrdosti na průměrnou hodnotu cca 120 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 116 – 122 HV10).

Po realizaci dvaceti teplotních cyklů zůstala tvrdost v oblasti SK prakticky beze změn. V TOO svarového spoje došlo k mírnému poklesu tvrdosti, přičemž tvrdost klesá od hranice ztavení směrem k neovlivněnému ZM. V oblasti základního materiálu činila naměřená tvrdost v průměru 109 HV10.

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 2** podle obr. 3-15 lze konstatovat, že tvrdost v oblasti svarového kovu činila průměrně

187 HV10. V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 12,6 mm. Tvrdost ZM je 154 HV10 (rozmezí hodnot naměřených tvrdostí 151 – 157 HV10).

U vyžíhané desky došlo k vyrovnání tvrdostí v jednotlivých oblastech svarové spoje a k výraznému poklesu tvrdosti. Průměrná hodnota tvrdosti v celé měřené oblasti činila 118 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 114 – 121 HV10).

Po realizaci dvaceti teplotních cyklů došlo k dalšímu zrovnoměření hodnot tvrdosti a k mírnému nárůstu hodnot tvrdosti ve SK a TOO až o 8 HV10. Průměrná tvrdost odpovídala 121 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 119 – 125 HV10).

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 3** podle obr. 3-16 lze konstatovat, že tvrdost v oblasti svarového kovu činila průměrně 211 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 205 – 213 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 3,5 mm. Tvrdost ZM je 156 HV10 (rozmezí hodnot naměřených tvrdostí 153 – 160 HV10).

Po vyžíhání desky došlo k vyrovnání tvrdostí v jednotlivých oblastech svarové spoje a k výraznému poklesu tvrdosti na průměrnou hodnotu cca 122 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 118 – 133 HV10). Tvrdost v oblasti SK je o cca 10 HV10 větší než v TOO a neovlivněném ZM.

Po realizaci dvaceti teplotních cyklů mírně klesla tvrdost ve všech oblastech spoje, ve srovnání s vyžíhaným stavem (1-Ž-0). Průměrná hodnota tvrdosti ve sledované oblasti činila 118 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 113 – 126 HV10).

Celkově lze konstatovat, že žíhací proces vedl k výraznému poklesu naměřených hodnot tvrdosti, a to ve všech oblastech svarového spoje, i v neovlivněném ZM.

3.2.2 Měření tvrdosti u desek svařených metodou 2

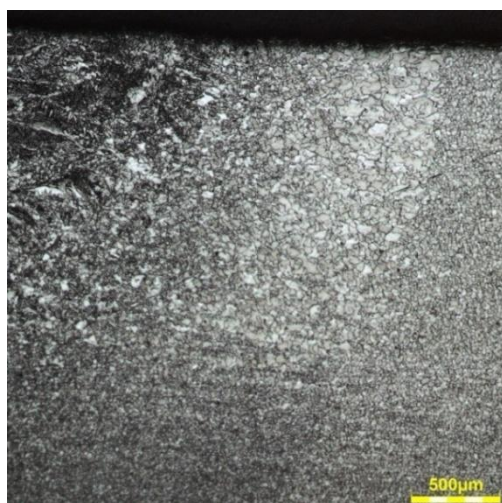
Stejným způsobem bylo postupováno při vyhodnocování tvrdosti ve svarovém kovu, TOO a základním materiálu v druhé části experimentu.

Na obr. 3-17 je ukázán metalografický výbrus vzorku ze svažené desky bez následného tepelného zpracování, tj. vzorek označen 2-0-0.

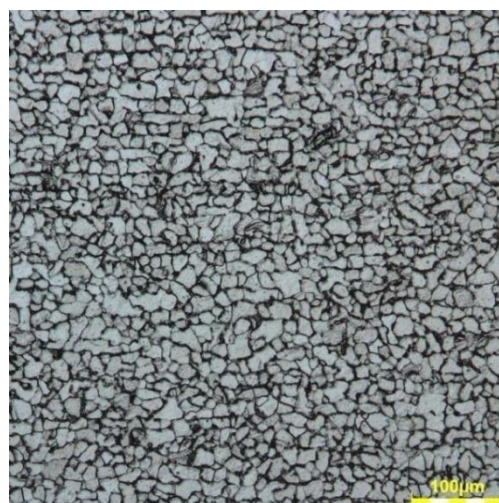


Obr. 3-17 Metalografický výbrus desky 2-0-0

Na obr. 3-18 je ukázána část struktury svarového kovu, TOO a základního materiálu (MAG). A obr. 3-19 zobrazuje strukturu základního materiálu svažené desky bez následného tepelného zpracování (2-0-0).



Obr. 3-18 Struktura SK, TOO, ZM (metoda MAG)

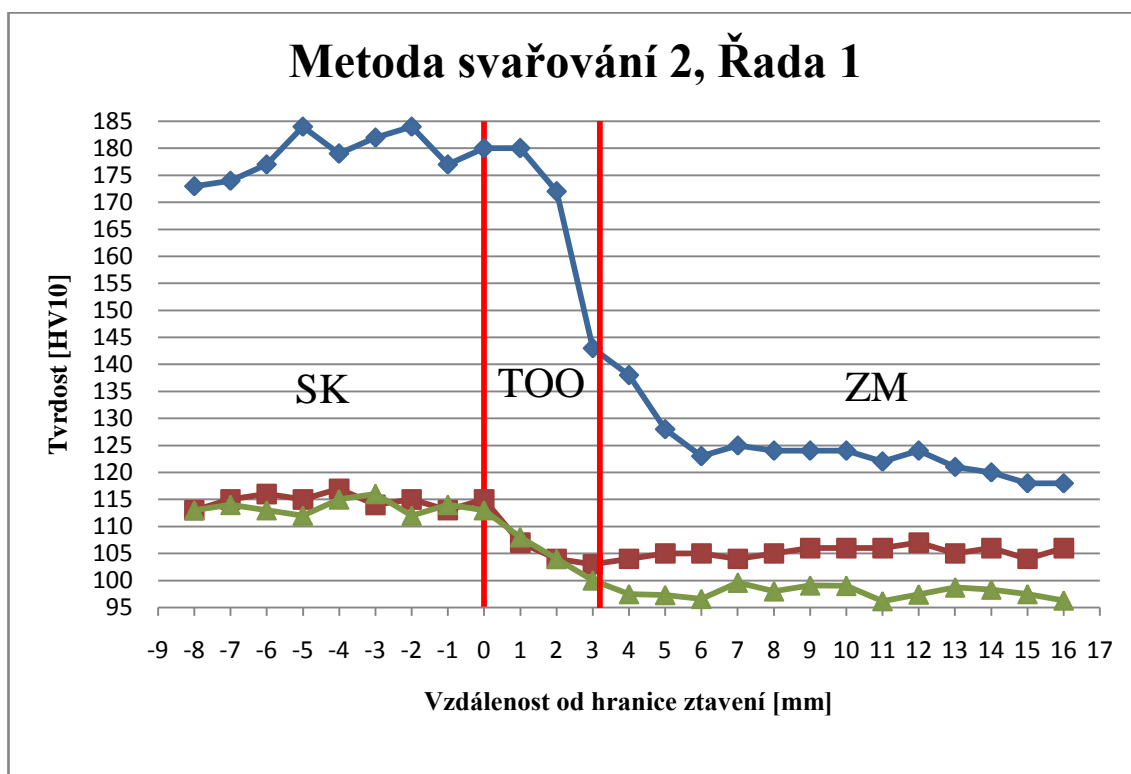


Obr. 3-19 Struktura základního materiálu u desky 2-0-0

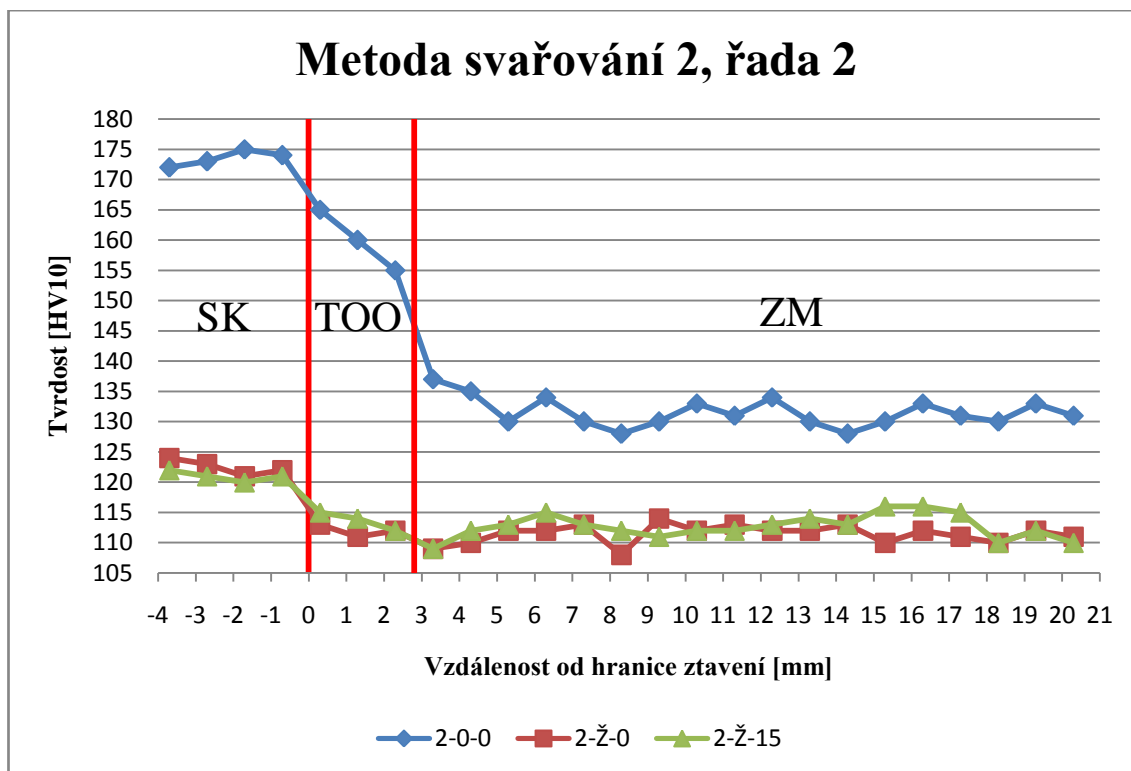
Tvrdość byla opět měřena ve třech řadách. Řada číslo 1 a 3 byla umístěna 2 mm od okraje desky. Řada 2 je ve vzdálenosti 8 mm od vrchní hrany desky, viz obr. 3-10. Mezi jednotlivými vpichy je vzdálenost 1 mm.

Pro metodu svařování 2 jsou naměřené hodnoty tvrdosti uvedeny v tabulkách v příloze č. 13,17,21 a grafické zpracování na obrázcích v přílohách č. 14, 15, 16, 18, 19, 20, 22, 23, 24.

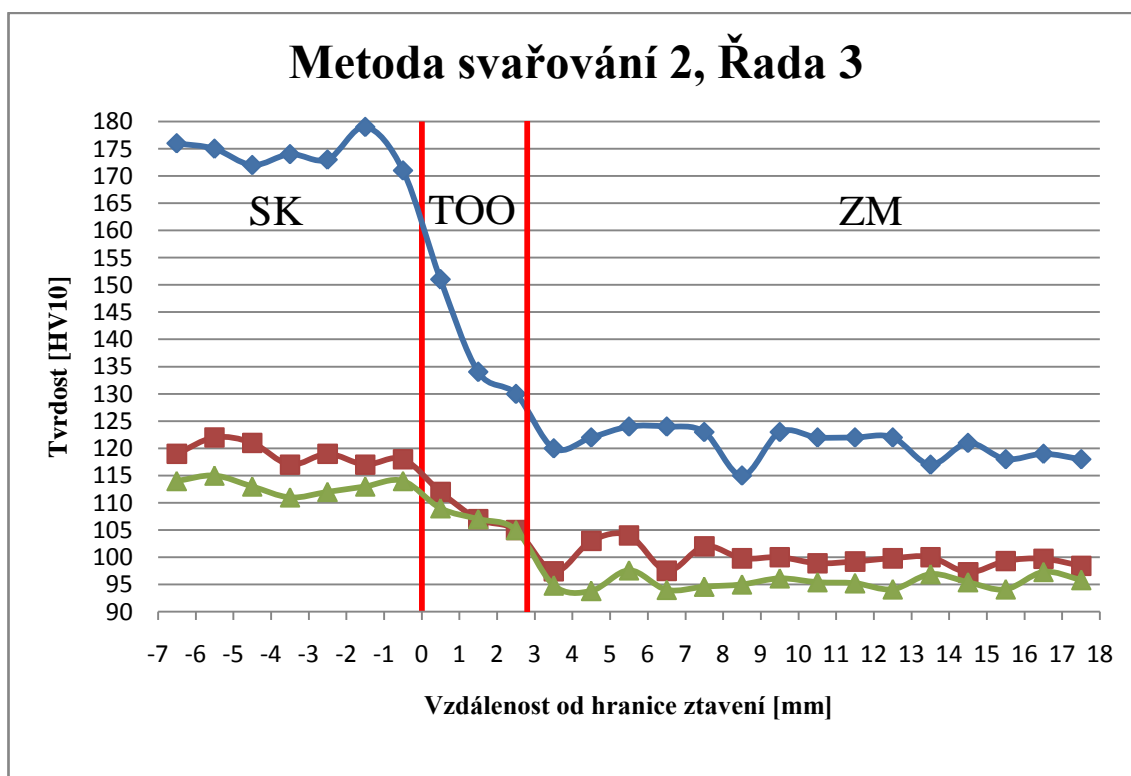
Na obr. 3-20 je uveden průběh tvrdosti ve svařovém kovu (SK), tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a základním materiálu (ZM) řady 1 (2 mm od vrchní hrany desky) pro vzorky odebrané z desek 2-0-0, 2-Ž-0, 2-Ž-20. Pro řadu číslo 2 a 3 je průběh tvrdosti u těchto vzorků znázorněn na obr. 3-21 a obr. 3-22.



Obr. 3-20 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 2 a řadu 1



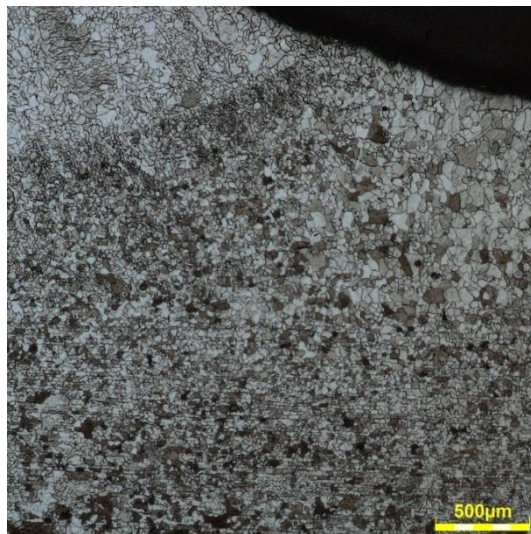
Obr. 3-21 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 2 a řadu 2



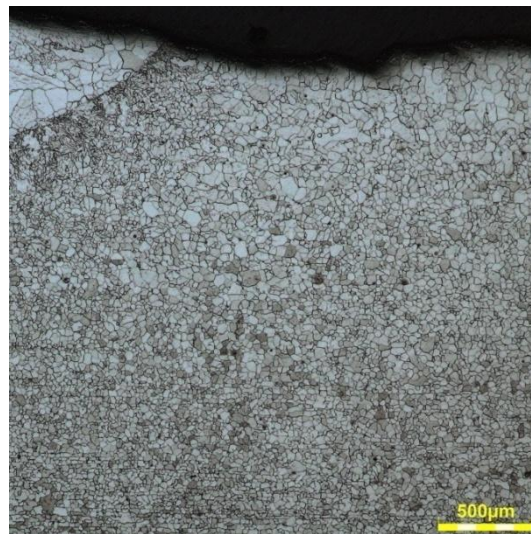
Obr. 3-22 Hodnoty tvrdosti pro metodu svařování 2 a řadu 3

Na obr. 3-23 je prezentována část struktury svarového kovu, TOO a základního materiálu desky 2-Ž-0 . Obr. 3-24 zachycuje část

struktury svarového kovu, TOO a základního materiálu desky 2-Ž-15.



Obr. 3-23 Deska 2-Ž-0



Obr. 3-24 Desky 2-Ž-15

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 1** podle obr. 3-20 lze konstatovat, že tvrdost v oblasti svarového kovu činila průměrně 179 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 173 – 184 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 3,2 mm. Průměrná hodnota tvrdosti ZM je 123 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 118 – 128 HV10).

Po vyžhání desky způsobem uvedeným v předchozí části došlo k výraznému snížení tvrdosti v jednotlivých oblastech svarového spoje. Ve svarovém kovu je průměrná hodnota tvrdosti 115 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 113 – 117 HV10). Tvrdost v oblasti SK je přibližně o 10 HV10 větší, než v TOO a neovlivněném ZM.

Po realizaci dalších patnácti teplotních cyklů zůstala tvrdost v oblasti SK prakticky beze změn. V TOO došlo k poklesu tvrdosti, přičemž tvrdost klesá od hranice ztavení směrem k neovlivněnému ZM. V oblasti ZM činila naměřená tvrdost průměrně 97,8 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 96,2 – 99,1 HV10).

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 2** podle obr. 3-21 je možné konstatovat, že tvrdost v oblasti svarového kovu činila

průměrně 174 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 172 – 175 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 2,8 mm. Tvrdost základního materiálu je 131 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 128 – 137 HV10).

U vyžíhané desky došlo k výraznému snížení tvrdosti ve všech oblastech svarového spoje. Ve svarovém kovu je průměrná hodnota tvrdosti 123 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 121 – 124 HV10). Průměrná hodnota tvrdosti v TOO a ZM je 112 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 108 – 114 HV10).

Po realizaci dalších patnácti teplotních cyklů zůstala tvrdost v oblasti SK prakticky beze změn. Průměrná hodnota tvrdosti v TOO a ZM je 113 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 109 – 116 HV10), což je velice podobné, jako u desky, která byla pouze žíhána.

Na základě výsledků měření tvrdosti v **řadě 3** podle obr. 3-22 lze tvrdit, že tvrdost v oblasti svarového kovu činí průměrně 174 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 171 – 176 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. Šířka TOO je ve sledovaném místě přibližně 2,8 mm. Tvrdost základního materiálu je 121 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 115 – 124 HV10).

U vyžíhané desky se výrazně snížila tvrdost ve všech oblastech svarového spoje. Ve svarovém kovu je průměrná hodnota tvrdosti 119 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 117 – 122 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. V oblasti základního materiálu je tvrdost průměrně 99,7 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 97,2 – 104 HV10).

Po realizaci dalších patnácti teplotních cyklů je průměrná tvrdost ve svarovém kovu 113 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 111 – 114 HV10). V TOO dochází k postupnému poklesu tvrdosti směrem do neovlivněného ZM. V oblasti základního materiálu je tvrdost průměrně 95,3 HV10 (rozmezí hodnot tvrdosti 93,8 – 97,6 HV10).

Realizace dalších patnácti teplotních cyklů vede k dalšímu zrovnoměření tvrdosti u jednotlivých oblastí svarového spoje. Celkový pokles tvrdosti v oblasti svaru i u neovlivněného ZM je

výrazný, a je nutno počítat se snížením pevnostních vlastností materiálu. Na základě normy ČSN EN ISO 18265 by hodnotě tvrdosti HV 150 HV10 odpovídala hodnota meze pevnosti cca 480 MPa a tvrdosti 100 HV hodnota meze pevnosti cca 320 MPa.

3.3 Měření vrubové houževnatosti

Vzorky pro měření vrubové houževnatosti byly nařezány ze všech dodaných desek. Z každé desky byly odebrány vzorky (viz obr. 3-1), které se musely dále opracovat obráběním na požadovaný rozměr, který udává norma ČSN EN ISO 148-1. Délka byla ponechána z důvodu pozdějšího leptání vzorku. Po naleptání se zvýraznila textura svaru a bylo naměřeno přesné místo pro vrub. Dále byl vzorek zakrácen na požadovanou délku a v TOO byl vyfrézován vrub ve tvaru V.

Zkouška vrubové houževnatosti (ČSN ISO 148-1) spočívá v přeražení zkušební tělesa s vrubem jedním rázem kyvadlového kladiva o určité hmotnosti. Po přeražení vzorku získáme dvě veličiny nárazovou práci a vrubovou houževnatost.

Nárazová práce je práce, která se spotřebuje na přeražení tyče, viz vztah (3.2). Vrubová houževnatost je podíl nárazové práce a počátečního průřezu zkušební tyče v místě vrubu, viz vztah (3.3). [22, 24]

$$K = G * (h_1 - h_2) [J] , \quad (3.2)$$

kde značí: G-gravitační sílu [N],

h_1 -výchozí výšku kladiva vzhledem ke vzorku [m],

h_2 -výšku kladiva po přeražení vzorku [m],

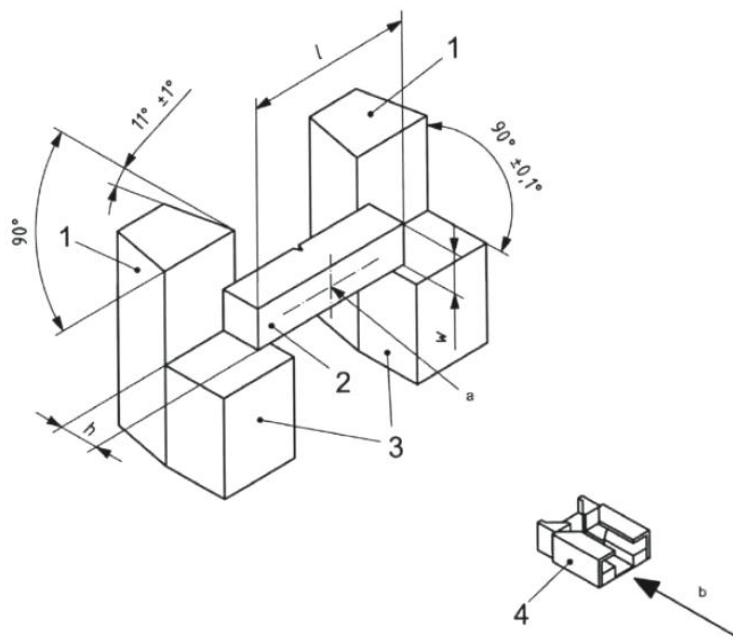
K-nárazovou práci [J].

$$KC = \frac{K}{S_{OV}} \left[\frac{J}{cm^2} \right] , \quad (3.3)$$

kde značí: K-nárazovou práci [J],

S_{OV} -počáteční průřez tyče v místě vrubu [cm^2],

KC-vrubovou houževnatost [J/cm^2].

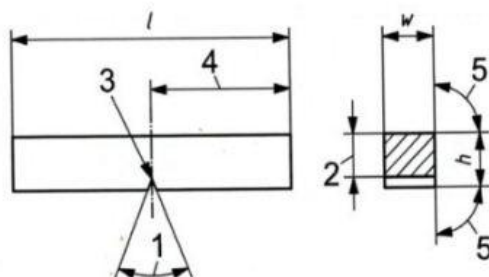


1-opěry, 2-standartní zkušební těleso, 3-podpory zkušebního tělesa, 4-kryt, h-výška zkušebního tělesa, l-délka zkušebního tělesa, w-šířka zkušebního tělesa, a-střed rázu, b-směr kyvu kyvadla

Obr. 3-25 Princip zkoušky vrubové houževnatosti Charpy [22]

Podmínkou zkoušky je, že drsnost povrchu zkušebního tělesa musí být lepší než $R_a = 5\mu\text{m}$ a okolní teplota $23\pm 5^\circ\text{C}$. Pokud je specifikována jiná teplota, musí být zkušební těleso temperováno při této teplotě s přesností $\pm 2^\circ\text{C}$. Doba vyjmutí z chladicího nebo ohřívacího media do úderu břitem kladiva na odvrácené straně vrubu. Zkušební těleso musí být udeřeno břitem kladiva na odvrácené straně vrubu. Zkušební těleso je středěno s maximální odchylkou 0,5 mm od osy vrubu do středové roviny opěr. [22]

Na obr. 3-26 je ukázána geometrie zkušebního vzorku a v tab. 3.4 jsou uvedeny jednotlivé rozměry.



Obr. 3-26 Geometrie zkušebního tělesa s V-vrubem [22]

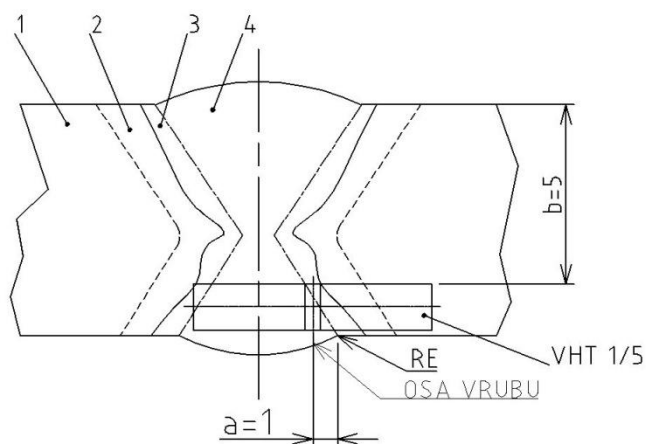
Tab. 3.4 Rozměry zkušebního tělesa uvedeném na obr. 3-26 [22]

Označení	Značka	Zkušební těleso s V-vrubem	
		Jmenovitý rozměr [mm]	Výrobní tolerance [mm]
Délka	l	55	±0,60
Výška	h	10	±0,075
Šířka	w	10	±0,11
Úhel vrubu	1		±2°
Výška pod vrubem (výška zkušebního tělesa minus hloubka vrubu)	2	8	±0,075
Poloměr zakřivení kořene vrubu	3	0,25	±0,025
Vzdálenost mezi rovinou symetrie vrubu od konců zkušebního tělesa	4	27,5	±0,42
Úhel mezi přilehlými podélnými povrchy zkušebního tělesa	5	90°	±2°
Úhel mezi rovinou simetrie vrubu a podélnou osou zkušebního tělesa		90°	±2°

Na normu ČSN ISO 148-1 navazuje norma ČSN EN ISO 9016, která je zaměřena na zkoušky svarů kovových materiálů, umístění zkušebních těles, orientaci vrubu. Umístění a orientace vrubu na svarovém spoji je uvedena znázorněna na obr. 3-27 a způsoby značení je uveden v tab. 3.5.

Tab. 3.5 Značení metody Charpy [23]

Písmeno	Označení	Popis
1	U	Charpy U-vrub
	V	Charpy V-vrub
2	W	Vrub ve svarovém kovu (referenční linie je ve středu svaru)
	H	Vrub v tepelně ovlivněné oblasti
3	S	Vrub je rovnoběžný s povrchem
	T	Vrub je kolmo k povrchu
4	a	Vzdálenost středu vrubu od referenční linie
5	b	Vzdálenost mezi horním povrchem svarového spoje a bližším povrchem vzorku



1-základní materiál, 2-tepelně ovlivněná oblast, 3-linie natavení, 4-svarový kov

Obr. 3-27 Umístění vzorku a orientace vrubu

Zkouška rázem v ohybu u svarových spojů byla provedena dle ČSN EN ISO 9016 v místě označeném VHT 1/5, tj. byla hodnocena nárazová práce a vrubová houževnatost v TOO svaru. Zkouška byla provedena na rázovém kladivu LabTest CHK 450J, viz obr. 3-28.

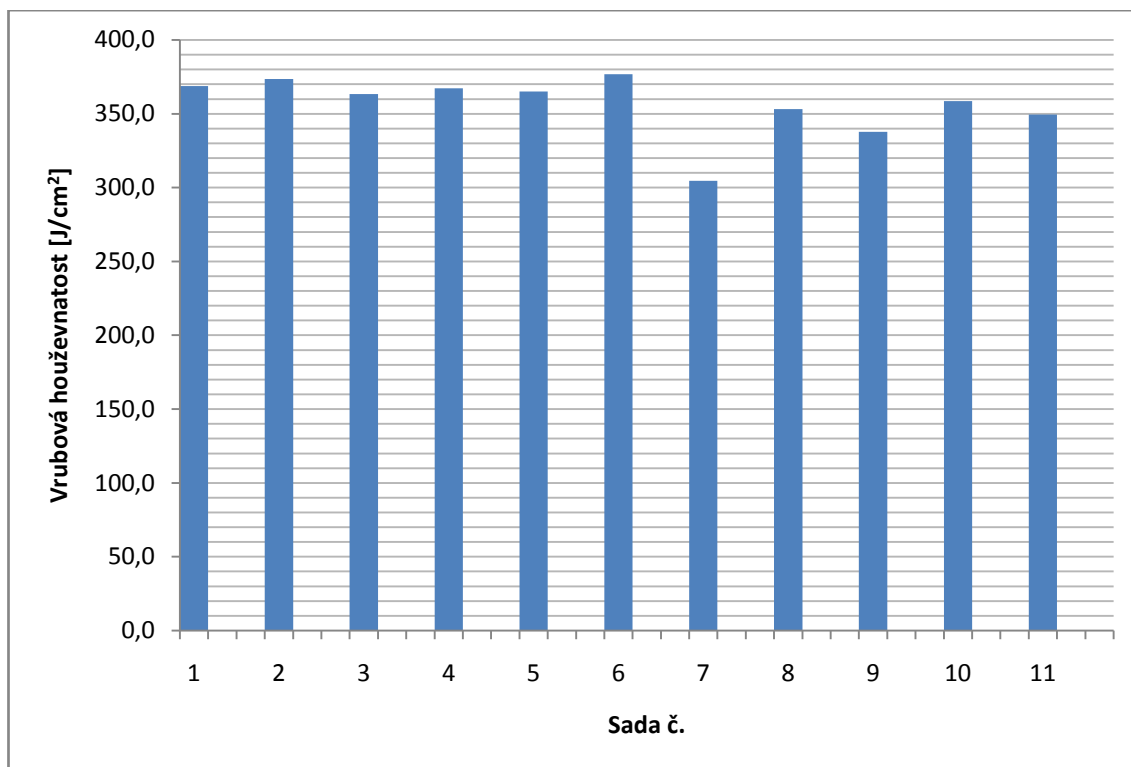


Obr. 3-28 Rázové kladivo LabTest CHK 450J

Naměřené hodnoty nárazové práce KV_2 , vrubové houževnatosti KCV_2 , umístění vzorku a orientace vrubu jsou uvedeny v tab. 3.6 a jejich grafické znázornění na obr. 3-29.

Tab. 3.6 Naměřené hodnoty nárazové práce a vrubové houževnatosti

Sada č.	Deska	Umístění vzorku	Vzorek č.	Teplota 20°C			
				KV ₂ [J]	KCV ₂ [J/cm ²]	Průměrná hodnota KV ₂ [J]	Průměrná hodnota KCV ₂ [J/cm ²]
1	1-0-0	VHT 1/5	1	299,8	374,7	295,1	368,8
			2	309,7	387,2		
			3	275,7	344,6		
2	1-Ž-0	VHT 1/5	1	302,6	378,2	298,8	373,5
			2	303,1	378,9		
			3	290,7	363,3		
3	1-Ž-5	VHT 1/5	1	295,9	369,9	290,7	363,4
			2	284,1	355,2		
			3	292,1	365,2		
4	1-Ž-10	VHT 1/5	1	295,4	369,2	293,8	367,2
			2	291,8	364,8		
			3	294,2	367,7		
5	1-Ž-15	VHT 1/5	1	291,4	364,3	292,0	365,0
			2	289,8	362,3		
			3	294,8	368,4		
6	1-Ž-20	VHT 1/5	1	291,4	364,2	301,5	376,8
			2	311,7	389,6		
			3	301,4	376,7		
7	2-0-0	VHT 1/5	1	205,6	257,0	243,7	304,6
			2	313,2	391,5		
			3	212,2	265,2		
8	2-Ž-0	VHT 1/5	1	279,6	349,5	282,5	353,1
			2	278,4	348,0		
			3	289,4	361,8		
9	2-Ž-5	VHT 1/5	1	286,3	357,9	270,3	337,8
			2	248,2	310,3		
			3	276,3	345,4		
10	2-Ž-10	VHT 1/5	1	277,4	346,7	287,0	358,7
			2	289,6	362,0		
			3	293,9	367,4		
11	2-Ž-15	VHT 1/5	1	280,1	350,1	279,7	349,6
			2	283,9	354,8		
			3	275,1	343,8		



Obr. 3-29 Grafické zpracování hodnot vrubové houževnatosti

U všech vzorků podrobených zkoušce rázem v ohybu nedošlo k úplnému přeražení. Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že teplotní cykly, kterým je materiál vystaven při svaření, žíhání a během vypalování smaltu, nemají výrazný vliv na vrubovou houževnatost v TOO svaru. Hodnoty vrubové houževnatosti se pohybují okolo cca 370 J/cm². Po vydrážkování svaru a opětovném svaření (série označená 2-0-0) dojde k poklesu nárazové práce v TOO na hodnotu cca 250 J/cm². Po opětovném vyžíhání je hodnota vrubové houževnatosti cca 350 J/cm² a ani následujících 15 teplotních cyklů tuto hodnotu výrazněji neovlivnilo.

4 Závěr

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv teplotních cyklů na mechanické vlastnosti svarového spoje. Při výrobě smaltovaných nádrží je materiál vystaven svařování, následnému žíhání a teplotním cyklům, které vyžaduje proces smaltování, případně následné resmaltace.

V teoretické části diplomové práce byla popsána technologie smaltování, vhodné podkladové kovy a metody svařování, které se využívají při výrobě smaltovaných nádrží. Hlavní pozornost je orientována na vznik svaru, vliv teplotních a deformačních účinků při svařování na charakter a rozsah změn v tepelně ovlivněné oblasti svaru.

Experimentální část práce byla provedena ve spolupráci s firmou TENEZ Chotěboř, a. s. V rámci experimentu byl posuzován vliv uvedených teplotních cyklů na mechanické vlastnosti v oblasti svaru. Mechanické vlastnosti byly hodnoceny nepřímo pomocí měření tvrdosti dle Vickerse a zkouškou rázem v ohybu, což je standardní metodika pro vyhodnocování svarových spojů ve firmě TENEZ Chotěboř, a. s.

Měřením tvrdosti podle Vickerse v oblasti svaru, TOO i základního materiálu, bylo prokázáno, že po vyžhání desky došlo k vyrovnání tvrdostí v jednotlivých oblastech svarové spoje a k výraznému poklesu tvrdosti. Změna tvrdosti ve svarovém kovu podle metody realizace svaru z původních 170 až 210 HV10 klesne po žíhání na 120 HV10, což je přibližně pokles tvrdosti o 30 až 43 %. U základního materiálu je tvrdost 157 HV10, po žíhání klesne na 120 HV10, což je přibližně pokles tvrdosti o 24 %. Po teplotních cyklech používaných při smaltování, už není tak výrazný rozdíl v poklesu tvrdosti. U desky, která byla vystavena po žíhání dalším 20 teplotním cyklům, došlo k poklesu tvrdosti přibližně o 9 %.

Desek, které byly vystaveny těmito teplotním cyklům a u kterých byl následně svar vydrážkován, byly opět svařeny, vyžhány a podrobeny dalším 15 teplotním cyklům. Došlo k poklesu tvrdosti

základního materiálu z průměrné hodnoty 114 HV10 (stav 1-Ž-20) na 101 HV10 (stav 2-Ž-15), což je přibližně pokles tvrdosti o 12 %.

Teplotní cykly sice mají příznivý vliv na zrovnoměnění tvrdosti u jednotlivých oblastí svarového spoje, nicméně dochází k výraznému celkovému pokles tvrdosti, jak v oblasti svaru, tak i u neovlivněného základního materiálu. Je tedy nutno počítat se snížením pevnostních vlastností materiálu. Je otázkou, zda tento jev nemůže mít nepříznivý dopad na užité vlastnosti smaltované nádoby. Bylo by vhodné realizovat u tepelně exponovaných vzorků také zkoušky tahem pro stanovení změn hodnoty meze kluzu.

Zkouškou rázem v ohybu metodou Charpy bylo prokázáno, že teplotní cykly, kterým je materiál vystaven při svaření, žihání a během vypalování smaltu, nemají výrazný vliv na vrubovou houževnatost v TOO svaru. Hodnoty nárazové práce před vydrážkováním svaru se pohybují okolo cca 295 J. Po vydrážkování svaru a opětovném svaření (série označená 2-0-0), dojde k poklesu hodnoty nárazové práce v TOO, na hodnotu cca 245 J. Po opětovném vyžihání je hodnota nárazové práce cca 280 J, a ani následujících 15 teplotních cyklů tuto hodnotu výrazněji neovlivnilo. Ve všech uvedených případech byla hodnota nárazové práce vyšší, než je předepsána dokumentem WPS.

5 Seznam použité literatury

- [1] BAŠUS, Z. *Příručka pro sklo, užitkovou keramiku a smalt*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [2] BOUŠE, Václav, Antonín KRAJINA a Alfonz MORAVČÍK. *Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [3] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [4] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000. ISBN 8070826681.
- [5] OVČAČÍKOVÁ, Hana a Jozef VLČEK. *Speciální keramické materiály*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2013. ISBN 978-80-248-3365-1.
- [6] TROJÁNEK, František. *Tepelné povrchové úpravy a smalty: Příručka pro povrchové úpravy IV. díl*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [7] PODJUKLOVÁ, Jitka, Kamila HRABOVSKÁ, Marcela FILIPOVÁ a René TRNKA. *Vliv stárnutí vstupních materiálu na vlastnosti sklovitého smaltového povlaku: Sborník abstraktů z mezinárodní konference Metal 2004*. Hradec nad Moravicí, 2004. ISBN 80-85988-95-X.
- [8] TMĚJ, Jaroslav, Heinz NEUMANN a Stanislav JENŠÍ. *Teorie svařování*. Liberec: Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, 1990.
- [9] KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [10] NEUMANN, Heinz. *Teorie svařování a pájení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN 9788074941719.
- [11] AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN 8085771810.
- [12] LUKOSZ, Ondřej. *Svařování žárupevných ocelí metodou 121 do úzké mezery*. Brno, 2010. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [13] NEJEDLÝ, Tomáš. *Porovnání svařování MAG a svařování plazmou*. Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
- [14] NOVOTNÝ, Jiljí. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 8001023516.
- [15] ŠPEJRA, Radek. *Vliv přenosu tepla ve svarové lázni při svařování MAG koutového svaru na efektivitu jeho provedení*. Liberec, 2006. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Doc. Ing. Heinz Neuman, CSc.
- [16] Dostupné z: <http://www.pdms.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/> [online]. [cit. 2017-05-01].
- [17] *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Druhé upravené vydání. Ostrava: Česká svářečská společnost ANB, 2001. ISBN 8085771853.
- [18] PLUHAR, Jaroslav a Josef KORITTA. *Strojírenské materiály*. 3. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1981.

- [19] MACHÁČ, Miroslav. *Měření tvrdosti materiálů a zpracování zjištěných hodnot*. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Milan Kalivoda.
- [20] ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů-zkoušení tvrdosti-Část 1: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. 2011.
- [21] Dostupné z: <https://qness.at/en/hardness-testing/contact/sales-partner/czech-republic.html> [online]. [cit. 2017-05-01].
- [22] ČSN ISO 148-1. *Kovové materiály-Zkouška rázem v ohybu-metodou Charpy-Část 1: Zkušební metoda*. Druhé. 2009.
- [23] ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů-Zkouška rázem v ohybu-Umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. 2013.
- [24] KOPECKÝ, Lukáš. *Destruktivní metody kontroly svarových spojů*. Brno, 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Mojmír Vaněk.

Přílohy

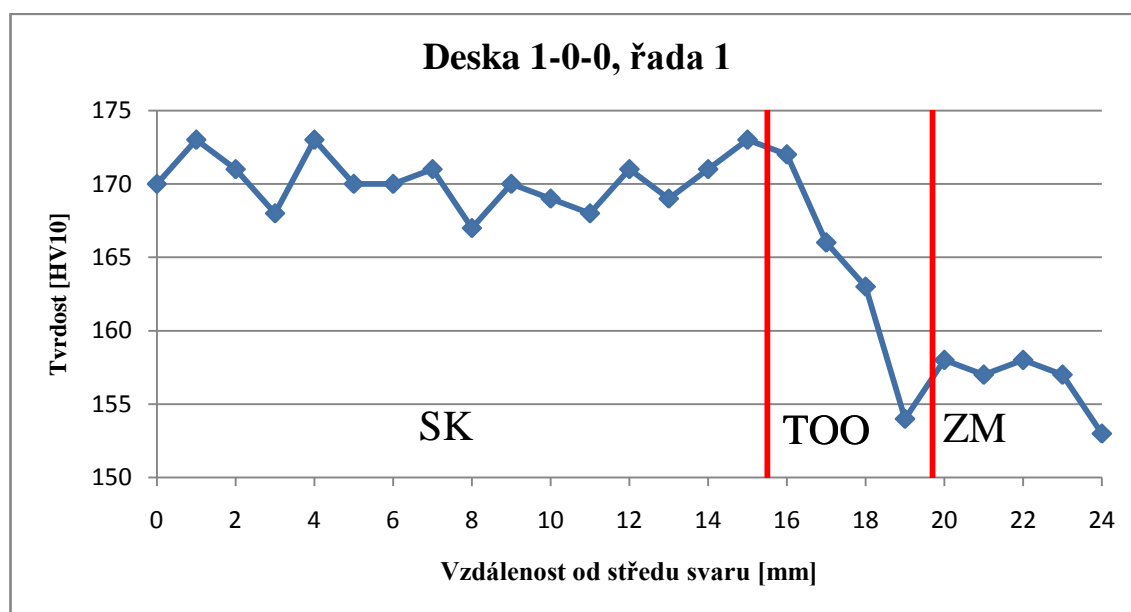
6 Seznam příloh

Příloha č. 1	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 1-0-0	65
Příloha č. 2	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-0-0, řada 1	65
Příloha č. 3	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-0-0, řada 2	66
Příloha č. 4	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-0-0, řada 3	66
Příloha č. 5	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 1-Ž-0.....	67
Příloha č. 6	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-0, řada 1	67
Příloha č. 7	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-0, řada 2	68
Příloha č. 8	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-0, řada 3	68
Příloha č. 9	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 1-Ž-20	69
Příloha č. 10	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-20, řada 1..	69
Příloha č. 11	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-20, řada 2..	70
Příloha č. 12	Grafické zpracování tvrdosti, deska 1-Ž-20, řada 3..	70
Příloha č. 13	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 2-0-0	71
Příloha č. 14	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-0-0, řada 1....	71
Příloha č. 15	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-0-0, řada 2....	72
Příloha č. 16	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-0-0, řada 3....	72
Příloha č. 17	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 2-Ž-0	73
Příloha č. 18	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-0, řada 1 ...	73
Příloha č. 19	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-0, řada 2 ...	74
Příloha č. 20	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-0, řada 3 ...	74
Příloha č. 21	Tabulka tvrdostí HV10 na desce 1-Ž-15	75
Příloha č. 22	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-15, řada 1..	75
Příloha č. 23	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-15, řada 2..	76
Příloha č. 24	Grafické zpracování tvrdosti, deska 2-Ž-15, řada 3..	76

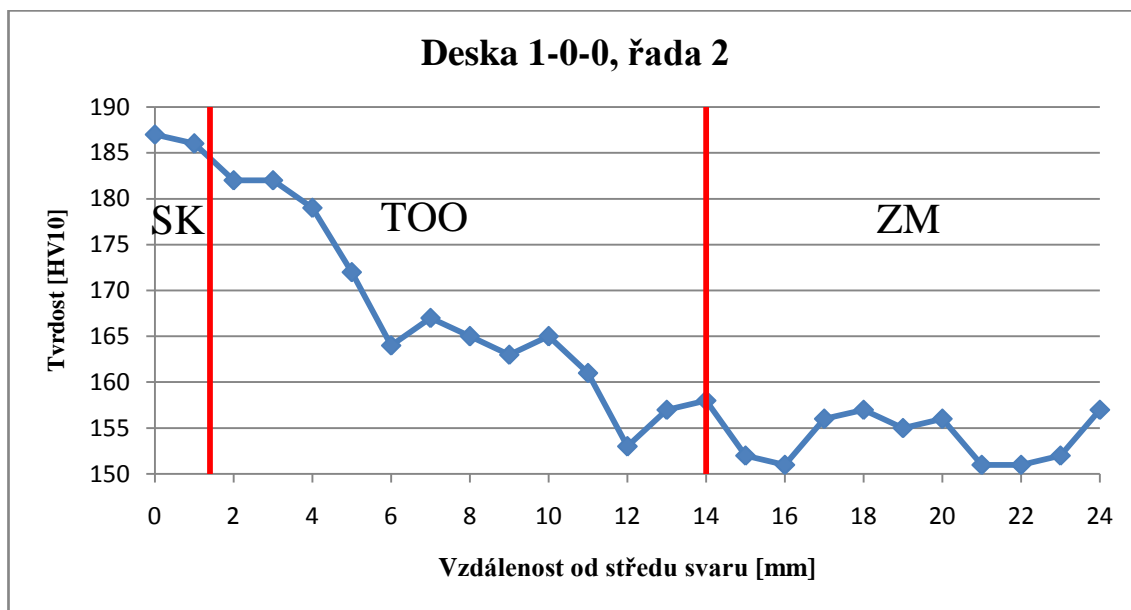
Příloha č. 1 Tabulka naměřených hodnot tvrdostí HV10 na desce 1-0-0

Označení desky 1-0-0						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	170	SK	187	SK	212
1	SK	173	SK	186	SK	211
2	SK	171	TOO	182	SK	213
3	SK	168	TOO	182	SK	212
4	SK	173	TOO	179	SK	213
5	SK	170	TOO	172	SK	205
6	SK	170	TOO	164	TOO	183
7	SK	171	TOO	167	TOO	167
8	SK	167	TOO	165	TOO	159
9	SK	170	TOO	163	TOO	160
10	SK	169	TOO	165	ZM	153
11	SK	168	TOO	161	ZM	153
12	SK	171	TOO	153	ZM	156
13	SK	169	TOO	157	ZM	155
14	SK	171	TOO	158	ZM	156
15	SK	173	ZM	152	ZM	159
16	TOO	172	ZM	151	ZM	160
17	TOO	166	ZM	156	ZM	155
18	TOO	163	ZM	157	ZM	153
19	TOO	154	ZM	155	ZM	153
20	ZM	158	ZM	156	ZM	156
21	ZM	157	ZM	151	ZM	155
22	ZM	158	ZM	151	ZM	158
23	ZM	157	ZM	152	ZM	159
24	ZM	153	ZM	157	ZM	160

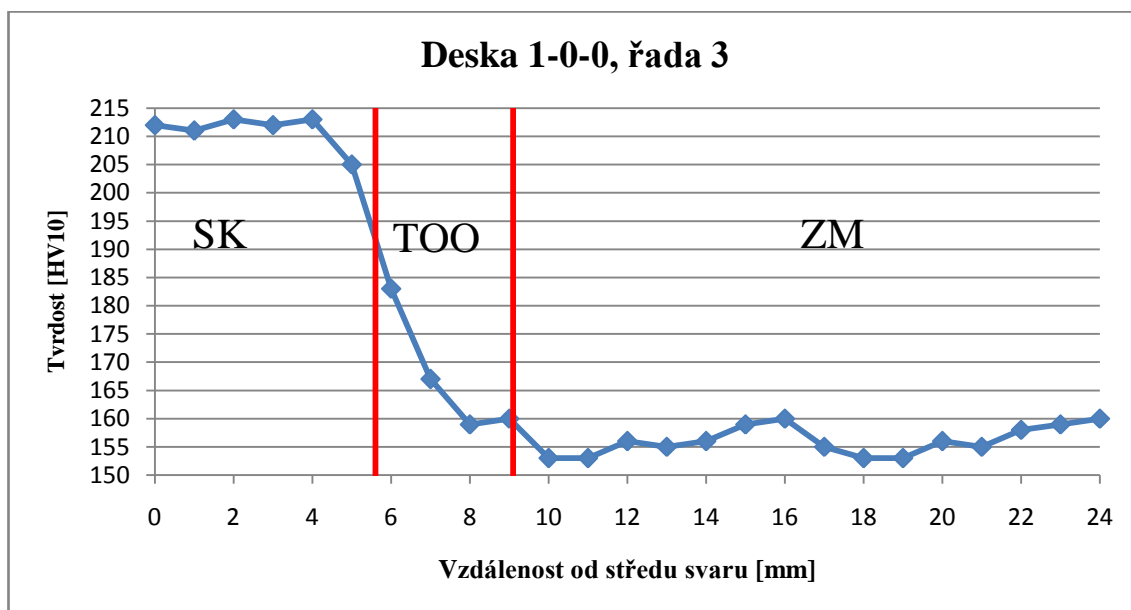
Příloha č. 2 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-0-0, řada 1



Příloha č. 3 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-0-0, řada 2



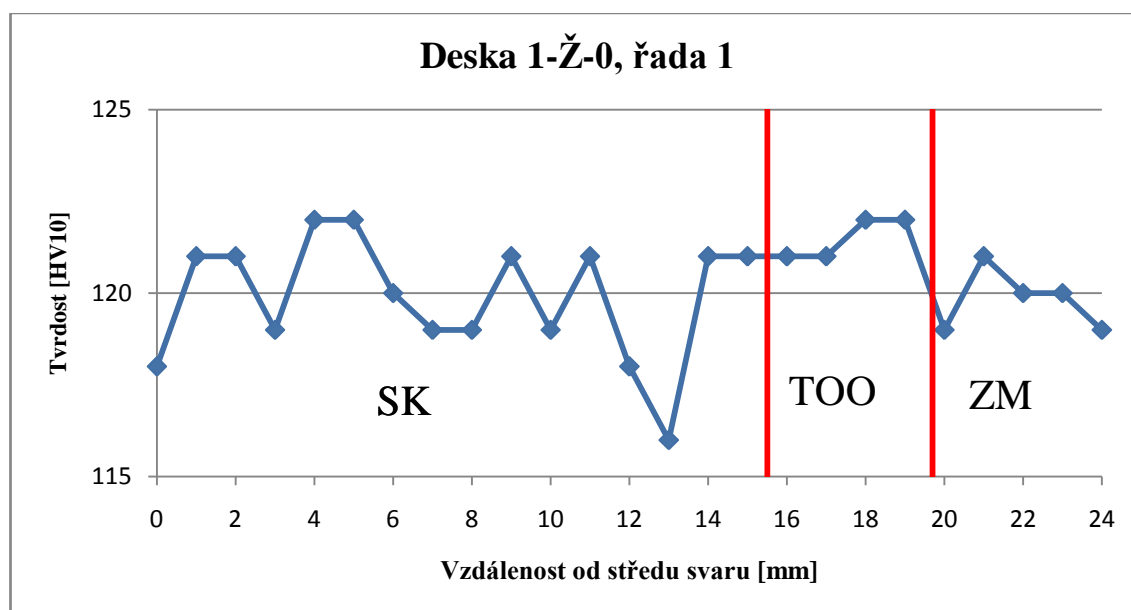
Příloha č. 4 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-0-0, řada 3



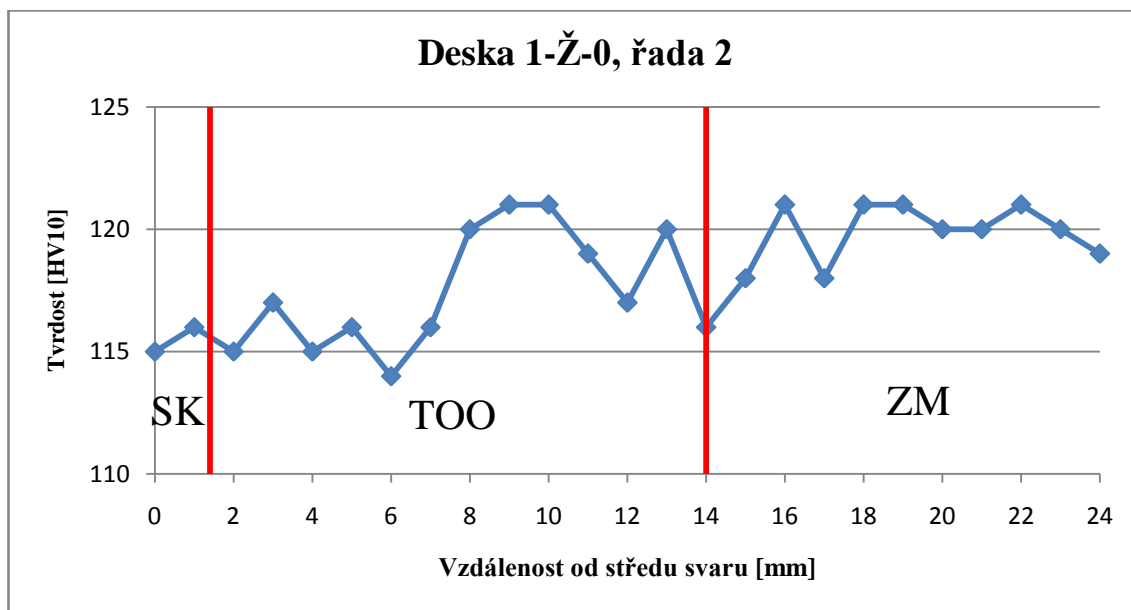
Příloha č. 5 Tabulka naměřených hodnot tvrdostí HV10 na desce 1-Ž-0

Označení desky 1-Ž-0						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	118	SK	115	SK	130
1	SK	121	SK	116	SK	132
2	SK	121	TOO	115	SK	133
3	SK	119	TOO	117	SK	131
4	SK	122	TOO	115	SK	130
5	SK	122	TOO	116	SK	125
6	SK	120	TOO	114	TOO	121
7	SK	119	TOO	116	TOO	122
8	SK	119	TOO	120	TOO	120
9	SK	121	TOO	121	TOO	121
10	SK	119	TOO	121	TOO	119
11	SK	121	TOO	119	TOO	121
12	SK	118	TOO	117	TOO	120
13	SK	116	TOO	120	TOO	123
14	SK	121	TOO	116	TOO	119
15	SK	121	ZM	118	ZM	119
16	TOO	121	ZM	121	ZM	121
17	TOO	121	ZM	118	ZM	121
18	TOO	122	ZM	121	ZM	118
19	TOO	122	ZM	121	ZM	121
20	ZM	119	ZM	120	ZM	120
21	ZM	121	ZM	120	ZM	122
22	ZM	120	ZM	121	ZM	121
23	ZM	120	ZM	120	ZM	119
24	ZM	119	ZM	119	ZM	120

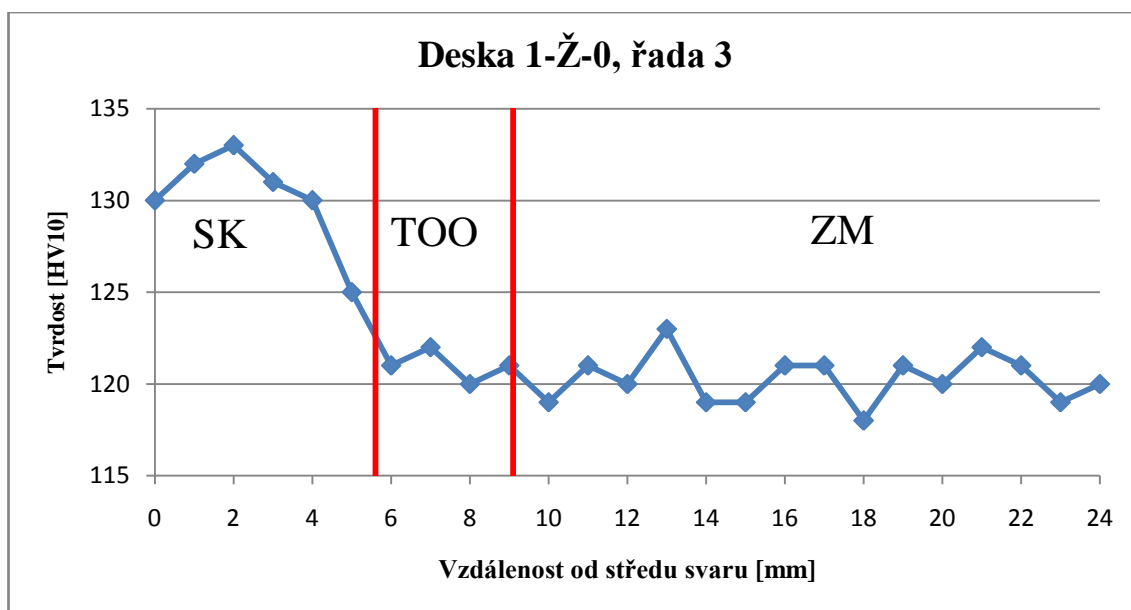
Příloha č. 6 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-0, řada 1



Příloha č. 7 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-0, řada 2



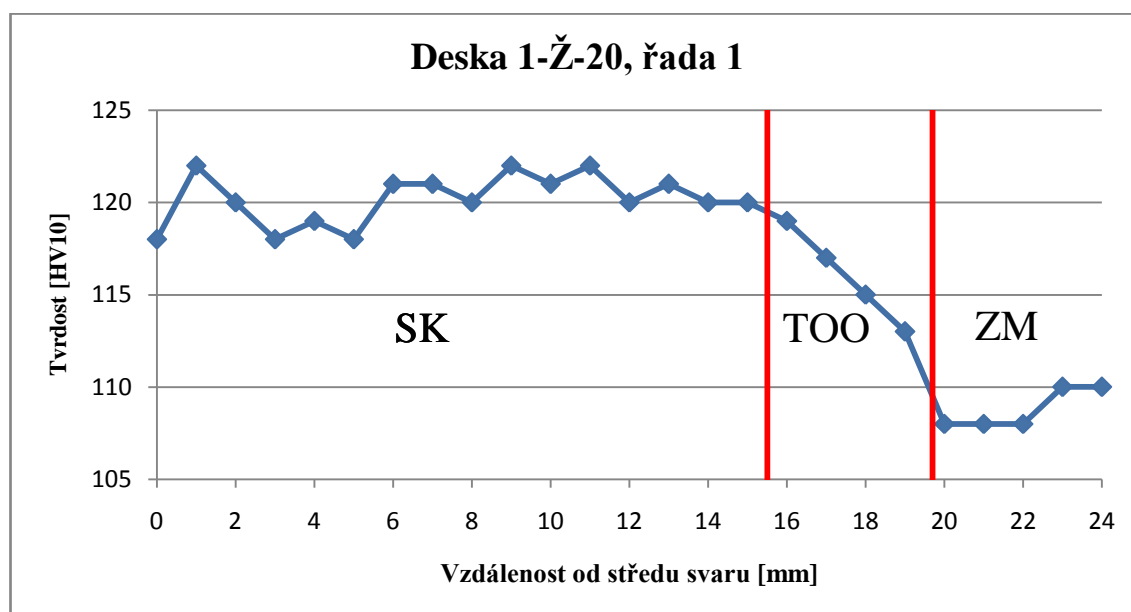
Příloha č. 8 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-0, řada 3



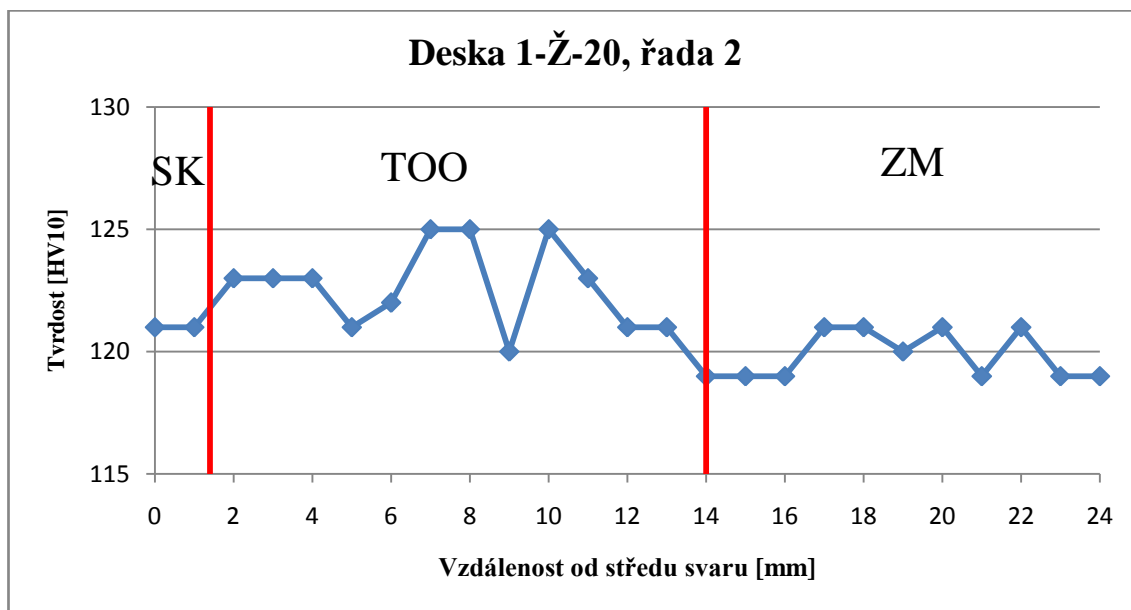
Příloha č. 9 Tabulka naměřených hodnot tvrdostí HV10 na desce 1-Ž-20

Označení desky 1-Ž-20						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	118	SK	121	SK	125
1	SK	122	SK	121	SK	126
2	SK	120	TOO	123	SK	124
3	SK	118	TOO	123	SK	120
4	SK	119	TOO	123	TOO	126
5	SK	118	TOO	121	TOO	118
6	SK	121	TOO	122	TOO	118
7	SK	121	TOO	125	TOO	121
8	SK	120	TOO	125	TOO	119
9	SK	122	TOO	120	TOO	118
10	SK	121	TOO	125	TOO	116
11	SK	122	TOO	123	ZM	115
12	SK	120	TOO	121	ZM	115
13	SK	121	TOO	121	ZM	114
14	SK	120	TOO	119	ZM	114
15	SK	120	ZM	119	ZM	114
16	TOO	119	ZM	119	ZM	116
17	TOO	117	ZM	121	ZM	114
18	TOO	115	ZM	121	ZM	114
19	TOO	113	ZM	120	ZM	113
20	ZM	108	ZM	121	ZM	113
21	ZM	108	ZM	119	ZM	116
22	ZM	108	ZM	121	ZM	115
23	ZM	110	ZM	119	ZM	115
24	ZM	110	ZM	119	ZM	115

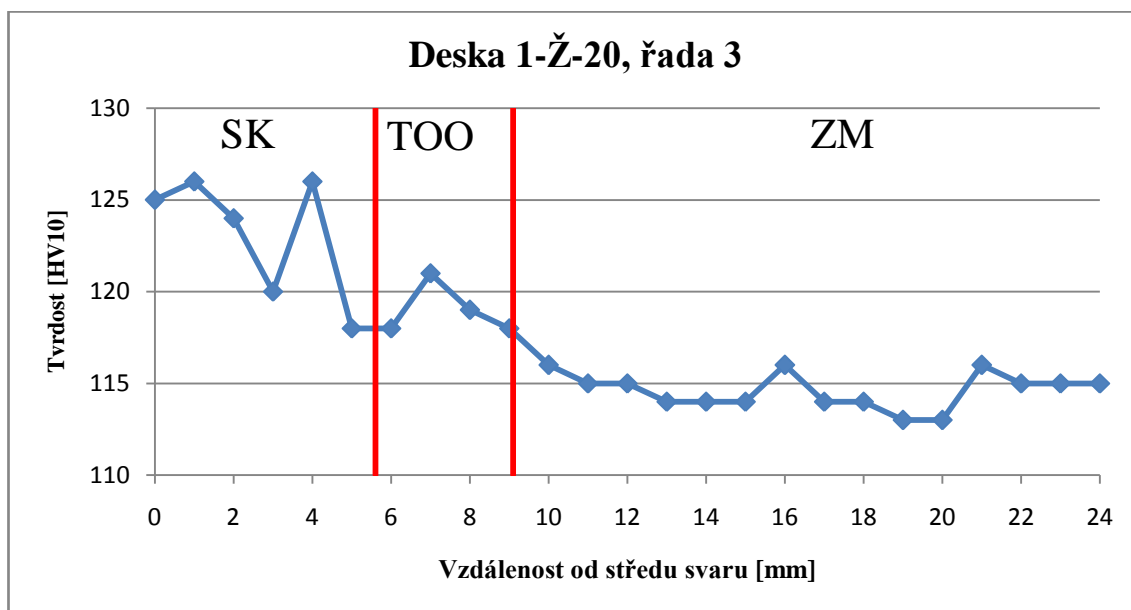
Příloha č. 10 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-20, řada 1



Příloha č. 11 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-20, řada 2



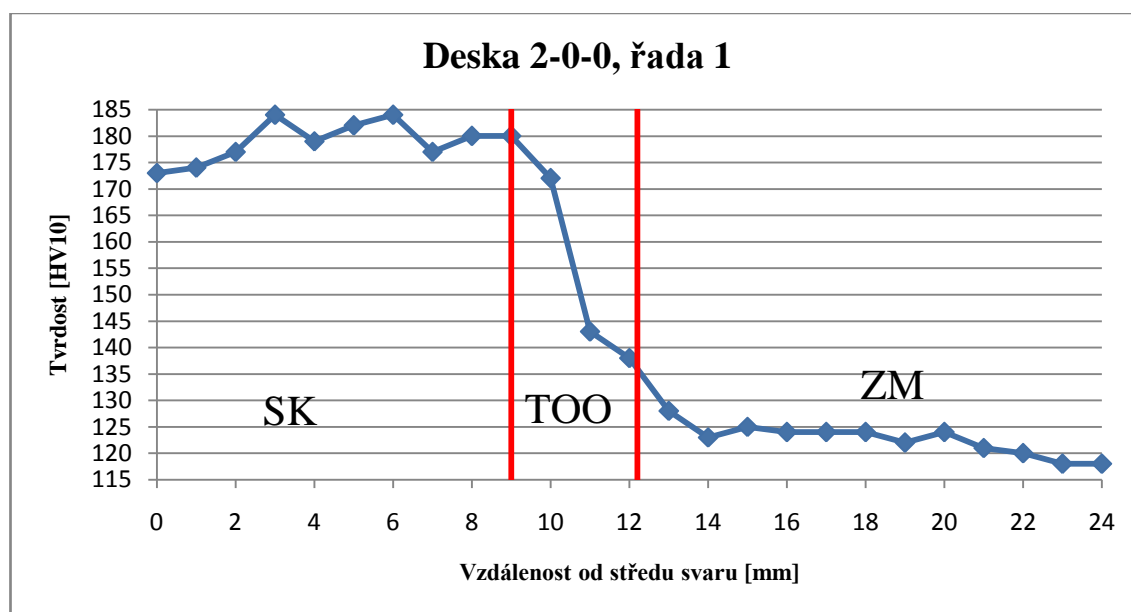
Příloha č. 12 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 1-Ž-20, řada 3



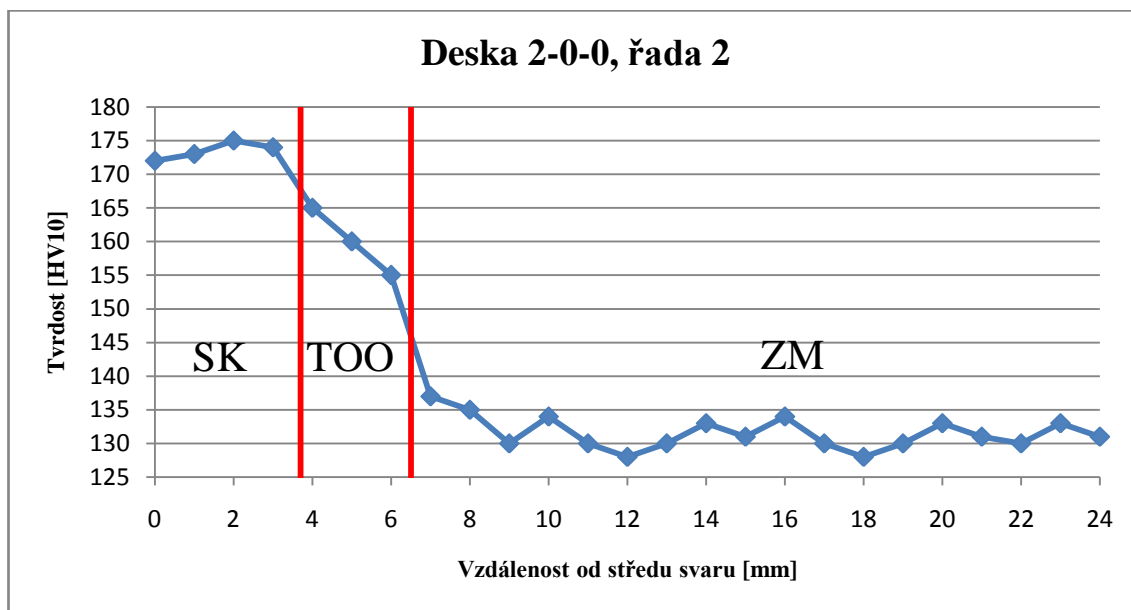
Příloha č. 13 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti HV10 na desce 2-0-0

Označení desky 2-0-0						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	173	SK	172	SK	176
1	SK	174	SK	173	SK	175
2	SK	177	SK	175	SK	172
3	SK	184	SK	174	SK	174
4	SK	179	TOO	165	SK	173
5	SK	182	TOO	160	SK	179
6	SK	184	TOO	155	SK	171
7	SK	177	ZM	137	TOO	151
8	SK	180	ZM	135	TOO	134
9	SK/TOO	180	ZM	130	TOO	130
10	TOO	172	ZM	134	ZM	120
11	TOO	143	ZM	130	ZM	122
12	TOO	138	ZM	128	ZM	124
13	ZM	128	ZM	130	ZM	124
14	ZM	123	ZM	133	ZM	123
15	ZM	125	ZM	131	ZM	115
16	ZM	124	ZM	134	ZM	123
17	ZM	124	ZM	130	ZM	122
18	ZM	124	ZM	128	ZM	122
19	ZM	122	ZM	130	ZM	122
20	ZM	124	ZM	133	ZM	117
21	ZM	121	ZM	131	ZM	121
22	ZM	120	ZM	130	ZM	118
23	ZM	118	ZM	133	ZM	119
24	ZM	118	ZM	131	ZM	118

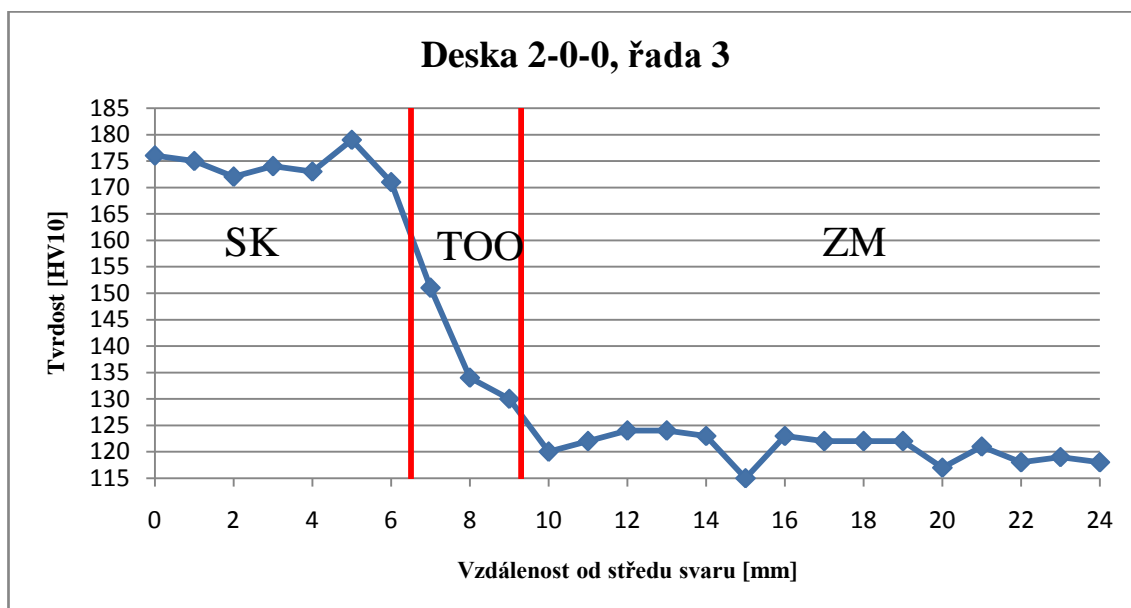
Příloha č. 14 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-0-0, řada 1



Příloha č. 15 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-0-0, řada 2



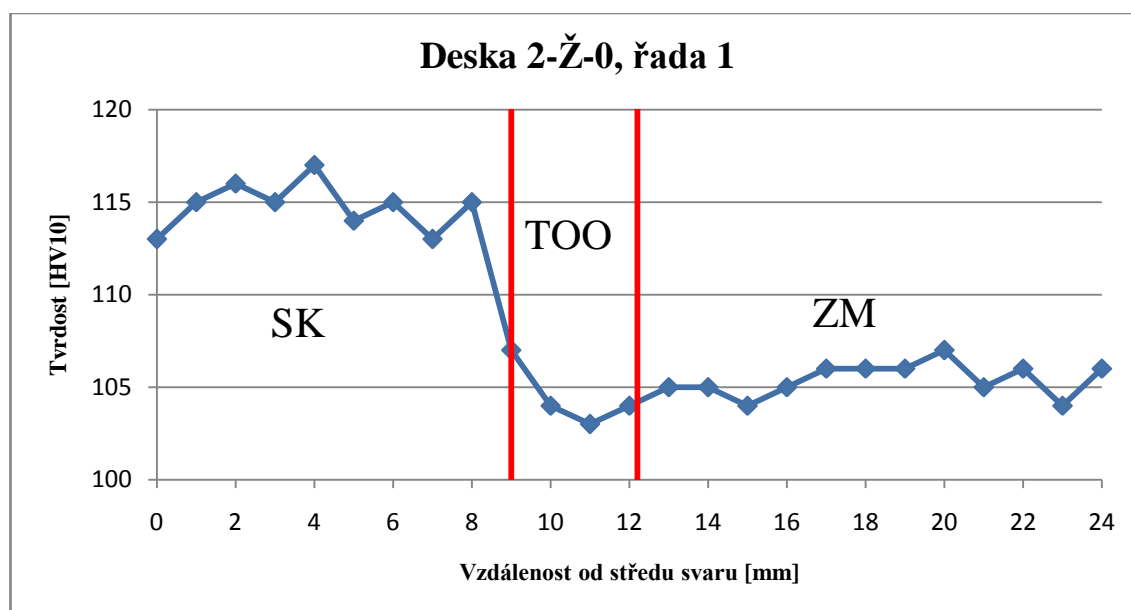
Příloha č. 16 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-0-0, řada 3



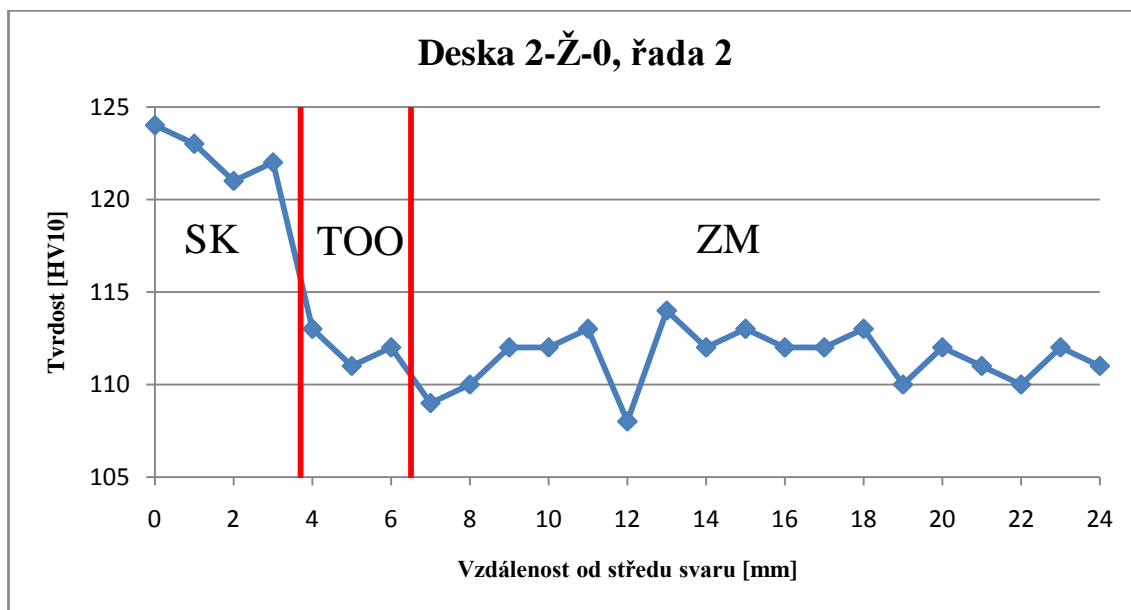
Příloha č. 17 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti HV10 na desce 2-Ž-0

Označení desky 2-Ž-0						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	113	SK	124	SK	119
1	SK	115	SK	123	SK	122
2	SK	116	SK	121	SK	121
3	SK	115	SK	122	SK	117
4	SK	117	TOO	113	SK	119
5	SK	114	TOO	111	SK	117
6	SK	115	TOO	112	SK	118
7	SK	113	ZM	109	TOO	112
8	SK	115	ZM	110	TOO	107
9	SK/TOO	107	ZM	112	TOO	105
10	TOO	104	ZM	112	ZM	97,4
11	TOO	103	ZM	113	ZM	103
12	TOO	104	ZM	108	ZM	104
13	ZM	105	ZM	114	ZM	97,5
14	ZM	105	ZM	112	ZM	102
15	ZM	104	ZM	113	ZM	99,8
16	ZM	105	ZM	112	ZM	100
17	ZM	106	ZM	112	ZM	98,9
18	ZM	106	ZM	113	ZM	99,2
19	ZM	106	ZM	110	ZM	99,8
20	ZM	107	ZM	112	ZM	100
21	ZM	105	ZM	111	ZM	97,2
22	ZM	106	ZM	110	ZM	99,3
23	ZM	104	ZM	112	ZM	99,7
24	ZM	106	ZM	111	ZM	98,4

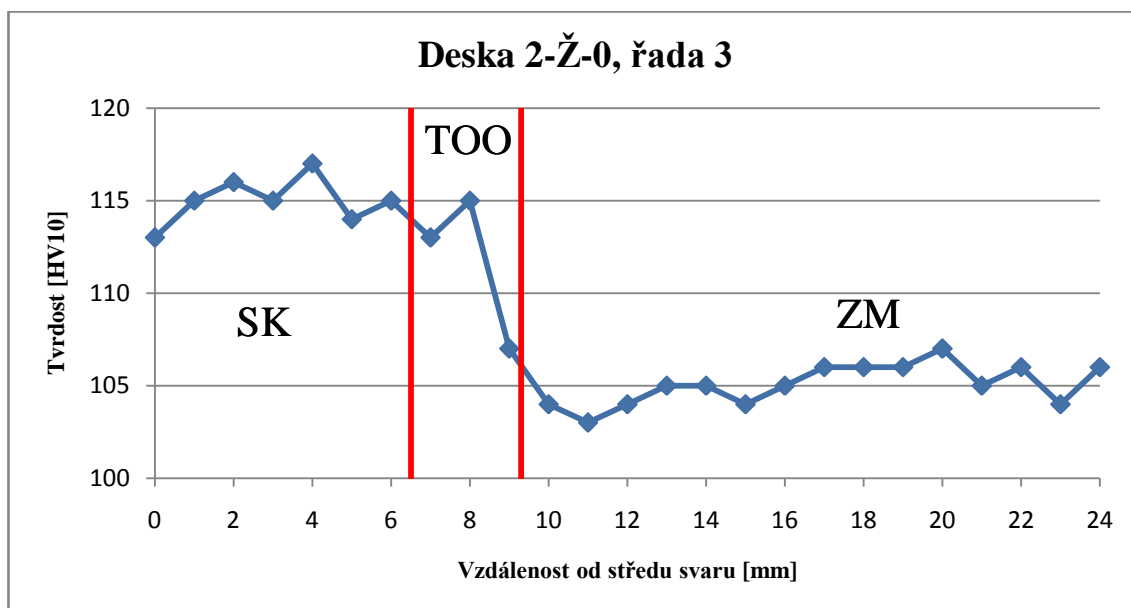
Příloha č. 18 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-0, řada 1



Příloha č. 19 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-0, řada 2



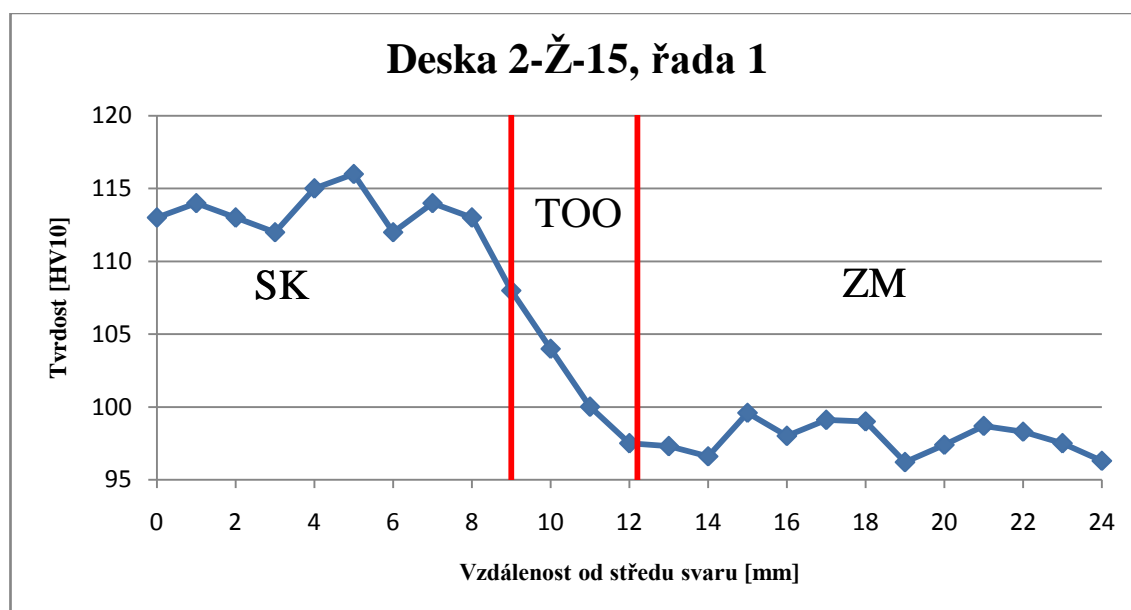
Příloha č. 20 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-0, řada 3



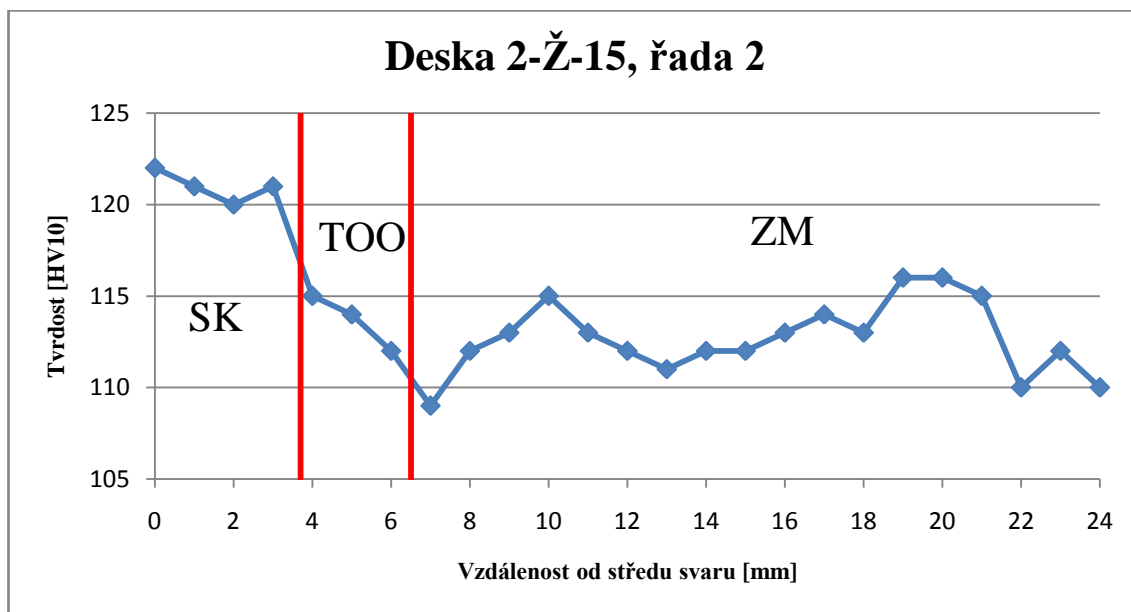
Příloha č. 21 Tabulka naměřených hodnot tvrdosti HV10 na desce 1-Ž-15

Označení desky 2-Ž-15						
Vzdálenost od středu svaru [mm]	Řada 1		Řada 2		Řada 3	
	Oblast	HV10	Oblast	HV10	Oblast	HV10
0	SK	113	SK	122	SK	114
1	SK	114	SK	121	SK	115
2	SK	113	SK	120	SK	113
3	SK	112	SK	121	SK	111
4	SK	115	TOO	115	SK	112
5	SK	116	TOO	114	SK	113
6	SK	112	TOO	112	SK	114
7	SK	114	ZM	109	TOO	109
8	SK	113	ZM	112	TOO	107
9	SK/TOO	108	ZM	113	TOO	105
10	TOO	104	ZM	115	ZM	94,8
11	TOO	100	ZM	113	ZM	93,8
12	TOO	97,5	ZM	112	ZM	97,6
13	ZM	97,3	ZM	111	ZM	94
14	ZM	96,6	ZM	112	ZM	94,6
15	ZM	99,6	ZM	112	ZM	95
16	ZM	98	ZM	113	ZM	96,1
17	ZM	99,1	ZM	114	ZM	95,4
18	ZM	99	ZM	113	ZM	95,2
19	ZM	96,2	ZM	116	ZM	94,1
20	ZM	97,4	ZM	116	ZM	96,9
21	ZM	98,7	ZM	115	ZM	95,4
22	ZM	98,3	ZM	110	ZM	94,1
23	ZM	97,5	ZM	112	ZM	97,3
24	ZM	96,3	ZM	110	ZM	95,8

Příloha č. 22 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-15, řada 1



Příloha č. 23 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-15, řada 2



Příloha č. 24 Grafické zpracování průběhu tvrdosti od středu svaru na desce 2-Ž-15, řada 3

