



Vliv opakované resmaltace na mechanické vlastnosti a celkovou degradaci oceli P265GH

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály

Autor práce: Bc. Tomáš Adolf

Vedoucí práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Tomáš Adolf
Osobní číslo: S13000797
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Název tématu: Vliv opakované resmaltace na mechanické vlastnosti a celkovou degradaci oceli P265GH
Zadávající 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. Proveďte rešerši o problematice smaltování a opakovaných resmaltací s ohledem na základní materiály nádrží.
3. Navrhněte metodiku testování a způsob vyhodnocení výsledků.
4. Proveďte vyhodnocení experimentů a zhodnoťte využitelnost navržené metodiky.

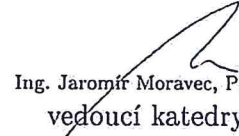
Rozsah grafických prací: grafy, tabulky
Rozsah pracovní zprávy: cca 50
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

- [1] Interní směrnice pro výrobu smaltovaných povrchů ve firmě Tenez a.s.
- [2] Technické normy.
- [3] BOUŠE, V., A. KRAJINA a A. MORAVČÍK. *Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně*. Praha: SNTL, 1986.
- [4] PLUHAŘ, J. a J. KORRITA. *Strojírenské materiály*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1966.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Iva Nováková, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie
Datum zadání diplomové práce: 2. března 2015
Termín odevzdání diplomové práce: 2. června 2016


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vzta-huje 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 tom-to 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 elek-tronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 27.5.2016

Podpis:



VLIV OPAKOVANÉ RESMALTACE NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI A CELKOVOU DEGRADACI OCELI P265GH

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá změnou mechanických vlastností ocele P265GH po opakovaném tepelném namáhání, které vzniká v důsledku resmaltace. Práce obsahuje dvě části, a to teoretickou a experimentální.

V teoretické části je stručně popsáno vytváření smaltovaných povrchů. Následuje popsání materiálů používaných pro výrobu tlakových nádob. Zvláštní část je věnována sledované nelegované oceli pro tlakové nádoby a bezešvé trubky P265GH, zejména jejím mechanickým vlastnostem a chemickému složení. Experimentální část popisuje vliv jejího opakovaného zahřívání na mechanické vlastnosti, strukturu a chemické složení. Pro posouzení změn vlastností materiálu jsou provedeny tahové zkoušky, zkoušky rázem v ohybu, zkouška tvrdosti, metalografický rozbor struktury a chemického složení.

Klíčová slova:

Úprava povrchu smaltováním, ocel P265GH, mechanické vlastnosti ocelí, tepelné zpracování.

THE EFFECT OF REPEATED RE-ENAMELLING ON STEEL P265GH MECHANICAL PROPERTIES AND ITS OVERAL DEGRADATION

Annotation:

This thesis deals with variations of mechanical properties of steel P265GH in case of recurring heat stress. The heat stress has been created in help with resmaltation. There are two parts of this thesis. The first one is the theoretical part, the other one is the experimental part.

Creation of enameled surfaces has been concisely described in the theoretical part. Describing of materials used for pressure vessels is following. A special part has been dedicated to tracked alloy steel for pressure vessels and seamless pipes P265GH. It has been dedicated mainly to its mechanical properties and chemical composition. The experimental part describes an influence of recurring heating for mechanical properties, structure and chemical composition. Tensile, impact bending and hardness trials have been done to evaluate variations of material. There have been also made metallurgical analysis of the structure and chemical composition.

Keywords:

Surface treatment enamelling, steel P265GH, the mechanical properties of steels, heat treatment.

Poděkování

Mé díky patří Ing. Ivě Novákové Ph.D. za naprostou ochotu a trpělivost během tvorby této diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval celé své rodině a přátelům za jejich podporu a trpělivost, kterých se mi dostávalo po celou dobu mého studia na TU v Liberci.

OBSAH

OBSAH	6
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	7
1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1 SMALTY	9
2.2 TECHNOLOGIE SMALTOVÁNÍ	11
2.3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO SMALTOVÁNÍ	13
2.3.1 CHARATERISTIKA OCELE P265GH	21
2.4 VLIV TEPLOTNÍ EXPOZICE PŘI SMALTOVÁNÍ NA ZMĚNY STRUKTURY A VLASTNOSTÍ MATERIÁLU	23
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 HODNOCENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ	31
3.2 PEVNOST V TAHU	32
3.3 TVRDOST	36
3.4 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST	38
3.5 METALOGRAFIE	41
4. DISKUZE	46
5. ZÁVĚR	48
6. LITERATURA	50
7. SEZNAM PŘÍLOH	52
8. PŘÍLOHY	53

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka:	Popis:	Jednotka:
$R_{eh...}$	Horní mez kluzu	[MPa]
$R_m...$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2...}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
$R_{el...}$	Dolní mez kluzu	[MPa]
$A_g...$	Plastické prodloužení při maximálním zatížení	[%]
$A_5...$	Celková tažnost	[%]
$KV...$	Absorbovaná energie	[J]
$KCV...$	Vrubová houževnatost	[J/cm ²]
$L_0...$	Počáteční měřená délka při zkoušce tahem	[mm]
$D_0...$	Počáteční měřený průměr při zkoušce tahem	[mm]

1 ÚVOD

Jedním z mnoha typů povrchových úprav kovů je smaltování, při kterém se na jejich povrch nanáší sklovitý povlak, který zabraňuje působení vnějších vlivů. Účelem smaltování je ochrana proti korozi, chemikáliím, a částečně i mechanickému opotřebení. Smaltované povrchy jsou pevné, tvrdé, mají lesklý vzhled s možností zbarvení a jsou dobře čistitelné.

Smaltované výrobky jsou všude kolem nás, ať už jako výrobky pro denní potřebu, tak výrobky technické. Dříve to byly zejména předměty, jako jsou vany, umyvadla, hrnce, trouby a nádoby. Dnes jsou smalty využívány v elektrotechnickém, chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu nebo v dekorativní architektuře.

Vlastnosti smaltovaného povrchu jsou závislé na složení smaltéřské frity, počtu vrstev a následném tepelném zpracování. Při smaltování se zpravidla vytváří základní a krycí vrstva smaltu. Všechny nanesené vrstvy smaltu se následně suší a vypalují. Během vypalování smaltu dochází také k teplotnímu namáhání základního materiálu. Počet nanášených vrstev závisí jednak na požadované tloušťce výsledného smaltu a jednak na požadavcích zákazníka. Vypalovací teplota pro základní vrstvu je v rozmezí 800°C až 900°C. Vrstva krycího smaltu se vypaluje v rozmezí mezi 700°C až 1000°C. Doba výdrže na vypalovacích teplotách se pohybuje v rozmezí 5 až 30 minut. Tímto způsobem se vypaluje jedna vrstva základního smaltu a maximálně až osm vrstev smaltu krycího.

Vzhledem ke vzniku vad smaltu jednak při výrobě a jednak při provozu je nutné provádět také jeho opravy. Dle interního předpisu firmy TENEZ a.s. je možné provádět opravu smaltu pouze 2-krát. Z tohoto vyplývá, že základní materiál může být v krajním případě ohřátý až 27-krát do výše uvedeného teplotního intervalu.

Předložená diplomová práce je zaměřena na sledování vlivu teplotních cyklů na změny chemického složení, mechanických vlastností a struktury základního materiálu P265GH. Získané výsledky experimentů poslouží jako podklad firmě TENEZ a.s, která patří k největším výrobcům smaltovaných povrchů.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 SMALTY

Smalt je výsledný produkt fyzikálně chemických reakcí v procesu tepelného zpracování skla komplikovaného chemického složení, s dalšími složkami anorganického charakteru, spojující v sobě vlastnosti skla a keramiky se schopností adheze ke kovu. Technologie smaltování je výrobní proces, kterým se zhotovuje smaltový povlak na podkladový kov. [1]

Přesto, že se smaltované výrobky velmi liší tvarem, rozměry a technickými požadavky na ně kladenými, jsou stanoveny všeobecné podmínky, kterým musí vrstva smaltu vyhovovat u všech výrobků bez zřetele na jejich určení a tvar. Smalt se musí pevně spojit s povrchem kovu, musí snášet výkyvy teplot, nepraskat, neodprýskávat se od kovu, musí být hladký, lesklý, snadno čistitelný, bez pórů a trhlin, nesmí se rozrušovat vlivem plynů a roztoků, se kterými přijde do styku a obsahovat sloučeniny, které by kazily barvu nebo chuť potravin. [4, 5]

Tvrдость smaltu se pohybuje mezi apatitem a křemenem, tj. 5. a 7. stupeň Mohsovy stupnice tvrdosti. Stupeň tvrdosti závisí na obsahu oxidu křemičitého. Smalt je 5x tvrdší než běžná ocel. Smalt je nejen 5x tvrdší než ocel, ale má i vyšší odolnost proti abrazi. Stupeň abraze povlaku závisí na chemickém složení smaltu, na tloušťce povlaku, stupni jeho vypálení, druhu abrazivních látek a na druhu jejich působení. Odolnost proti abrazi se zkouší pomocí zkoušky oděru smaltu dle ČSN ISO 6370. [9]

Smaltové povlaky dělíme podle materiálu, na který je aplikován smalt. Smalty se proto dělí na smalty pro *ocel, litinu a neželezné kovy* (hliník, měď, mosaz). Podrobný popis materiálu pro smaltování je popsán v kap. 2. 3. Na materiál můžou být vytvořeny dva druhy smaltu, a to *základní a krycí smalt*. [4]

Základní smalt slouží k vytvoření přídržné vrstvy mezi podkladovým materiálem a krycím smaltem. Jedná se o smalty málo odolné, které by nezaručily požadované vlastnosti. Smí se použít pouze v případech, kde by nebyly kladeny požadavky na mechanické vlastnosti a protikorozi a tepelnou ochranu. [4, 10]

Krycí smalt je vlastním funkčním povlakem a jeho složení je dáno vlastnostmi, které od vrstvy smaltu požadujeme, a zároveň tyto vlastnosti základní smalt neposkytuje. Krycí smalt chrání proti korozi, chemickému prostředí, tepelnému namáhání, atd. [4, 5, 10]

Kombinací základního a krycího smaltu je *smalt jednovrstvý*. Jedná se o vrstvu, která zaručuje dobrou přídržnost a zároveň funkčnost. Spojuje vlastnosti obou druhů smaltu. Jednovrstvý smalt se dá nanášet i ve více vrstvách. [4]

Základní složkou pro přípravu smaltu je **smaltéřská fritta**. Smaltéřská fritta je anorganický materiál, který vznikl tavením smaltéřských surovin. Směsi těchto surovin se říká **kmen** a popis jeho jednotlivých složek je uveden v odstavcích níže. [4, 5]

Kmen je sypký prášek, který se pomocí vysokých teplot taví a při následném tuhnutí vytváří na podkladu vysoce odolný skelný povrch - smalt. Podobně jako sklo se smalt vyrábí tavením z hornin a látek snižujících teplotu bodu tání nazývanými taviva. [4, 5]

Základní složka pro výrobu kmenu je oxid křemičitý. Ten získáváme z křemičitého písku, živce a pegmatitu. Jedná se o jednu z nejzákladnějších surovin, která zaujímá až 70% směsi.

Obsah oxidů železa v oxidu křemičitém je důležitý pro výrobu bílého smaltu. Při jeho zvýšeném obsahu je bílý smalt zbarvený. Pro základní a barevné smalty může být jejich obsah větší. Křemičitý písek ovlivňuje odolnost vůči kyselinám, pevnost a odolnost vůči vrypům. [4]

V důsledku vysoké teploty tání právě křemičitého písku se do směsi přidávají **tavidla** jako je soda, borax, uhličitan draselný, dusičnan sodný a další látky snižující teplotu tavení. Soda tvoří spolu s oxidem křemičitým složku každého smaltu. S obsahem uhličitanu sodného stoupá součinitel teplotní roztažnosti a klesá chemická odolnost. Spolu s oxidem křemičitým tvoří až 85% z celkové váhy směsi. Zbytek je tvořen **pomocnými látkami**. [5]

Pomocné látky se přidávají do smaltu s cílem získat jejich specifické vlastnosti, jako jsou mechanické, optické, chemické, tepelné atd. Používají se **okysličovadla** (dusičnan sodný, dusičnan draselný), **kaliva** (kryolit, kazivec) a **barviva** (sloučeniny manganu, kobaltu, chromu, niklu, železa atd.). [9]

Okysličovadla slouží ke spálení organických sloučenin z přísad, které obsahují oxid železnatý. Ten způsobuje zbarvení smaltu do zelených odstínů. Kaliva jsou látky, které nám ze smaltu dělají zakalený smalt. Částičky kaliva musí mít jiný index lomu než základní smalt, pak jsou dopadající paprsky lámány, odráženy a ohýbány. Jako kaliva se používá oxid cíničitý, zirkoničitý, antimonitý, ceričitý a fluorové sloučeniny. Barviva jsou látky dávající smaltu jeho barevný odstín. Široká škála barev je získána jejich mísením. Přidávají se do kmene při tavení smaltu nebo při mletí frity. Většinou se přidávají do bezbarvého smaltu při jeho mletí. [5]

Je nutné podotknout, že všechny látky, ať to jsou látky základní nebo pomocné, více či méně ovlivňují vlastnosti povlaku. Všechny látky, které vstupují do směsi, tvoří charakteristické vlastnosti smaltu.

Výroba smaltéřské frity se dá rozdělit do několika základních kroků. Jsou to **výpočet množství surovin, mísení směsi, tavení směsi, ochlazování směsi a mletí**.

Při **výpočtu správného množství** surovin se vychází z požadovaných vlastností vytvořené vrstvy. Velikost jeho součinitele roztažnosti, barvě, lesku, odolnost vůči kyselinám, použití atd. Podle určujících vlastností provedeme předběžné určení složení a převedeme ho na složení surovinové. Pro ověření skutečných vlastností je ovšem potřeba provést zkoušky smaltu. Při výpočtu složení je třeba brát v úvahu propal látek, které ze smaltu během tavení vytěkají z původních surovin. U běžných smaltů to bývá 20-30% z původní hmotnosti kmene. Celkové množství musí být zvýšeno o tuto hodnotu. [5]

Navážené suroviny je potřeba co nejdůkladněji **promíchat**. Pokud se tak neučiní, fritta je nehomogenní a potřebuje delší dobu k tavení.

Po mísení směsi následuje operace **tavení**. Tavení závisí na vzájemném působení surovin, ze kterých se kmen skládá. Tímto působením je myšlen souhrn složitých fyzikálních a technologických pochodů. K fyzikálním pochodům patří především zahřívání směsi a vypařování vody v ní obsažené. Při zvýšení teploty se taví jednotlivé složky kmene, mění se struktura materiálu a některé z nich přecházejí do stavu kapalného nebo plynného. Chemické pochody probíhají při vyšších teplotách. Patří k nim vypaření krystalové vody z boraxu, rozklad uhličitánů (sody, křídly, uhličitánu draselného), dusičnanů (dusičnanu sodného), síranů a vzájemné reakce jednotlivých látek, při kterých vznikají nové chemické sloučeniny. Při tavení je hlavní čas. Je předem daný. Rychlost tavení nesmí probíhat příliš rychle, jinak se snadno tavitelné suroviny neoddělí od ostatních. Pokud naopak reakce probíhá příliš pomalu, fritta se špatně nanáší na povrch a povrch není lesklý. Rychlost reakce je závislá na velikosti zrn. To platí pouze do mezní hodnoty. Pokud by došlo k dalšímu mletí na ještě menší velikost zrn, rychlost by to nezvýšilo. [4, 6]

Vytavený smalt se vypouští do studené vody, kde se prudkým **ochlazením** roztrhá na křehké kusy. Z vody se tyto kusy vyjímají ještě teplé a vkládají do pece tak, aby došlo k co nejrychlejšímu vysušení a rozemletí. Velikost roztrhaných kusů závisí na množství a teplotě vody. [3, 4]

2.2 TECHNOLOGIE SMALTOVÁNÍ

V technické praxi je smaltování složeno z jednotlivých operací, jako je **příprava povrchu, nanášení smaltové směsi, sušení a vypalování smaltu**.

Podkladový materiál připravený pro smaltování není ideální. Povrch je pokrytý rzí, tuky, olejem, minerálními nečistotami, prachem atd. To vše ovlivní kvalitu smaltu (odprýskával by se a vznikaly by vady). Je nezbytností povrch náležitě připravit a zaručit soudržnost mezi vrstvou smaltu a povrchem kovu. Podcenění těchto operací vede ke vzniku dalších problémů

během procesu. Mezi jednotlivé procesy **přípravy povrchu** patří odmašťování, moření, neutralizace a pasivace, niklování a žihání.

Pro odstranění zbytků konzervačních nebo mazacích olejů, které vznikají při zpracování ocele se provádí odmašťování. Provádí se ve více fázích, kde první ponoření má za úkol odstranit hrubé nečistoty, druhá je odmašťovací a ve třetí se čistí v horké vodě. Odmašťovací lázeň má teplotu 90°C. Provádí se např. hydroxidem sodným.

Žihání, jako úprava povrchu před smaltováním, se používá ze dvou důvodů. Prvním je vyrovnání napětí, které vzniklo při zpracování a druhým je vypálení nečistot, které jsou tak hluboko v pórech, že odmaštění k jejich odstranění nestačí. Při nesprávném žihání, s omezeným přístupem vzduchu nebo nízké teplotě, nečistoty zcela neshoří a na povrchu vytvoří těžko odstranitelné vrstvičky. Po žihání se povrch namáčí do zředěné kyseliny solné, [4, 8, 12].

Pro odstranění rzí, okují a vytvoření vhodné drsnosti povrchu se provádí moření, např. v 10% - 15% roztoku kyseliny solné zahřáté asi na 30°C.

Jako konečnou úpravu povrchu před smaltováním lze povrch napasivovat. Vytvořená vrstva chrání povrch při mezioperační dopravě nebo skladování. Jako pasivační médium se používají sloučeniny šestimocného chromu, kyseliny fosforečné, dusičnanu sodného. [5]

O způsobu **nanášení smaltu** rozhoduje několik faktorů. Mezi tyto faktory patří tvarová složitost výrobku, vlastnosti smaltu, sériovost a v neposlední řadě také celková úroveň smaltovacího procesu na všech úrovních zajišťujících, aby byl celý proces co nejefektivnější. Nanášení smaltu se provádí různými technologickými postupy, které se liší přípravou smaltu. Smalt se připravuje mletím, a to buď suchým, nebo mokřým. Při mokřém mletí vzniká hmota, které se říká smaltěřská břечka. V opačném případě pudr.

Metody nanášení smaltu se dělí na [4, 2]:

- *Mokrý nanášení* (polévání, vakuové nanášení, stříkání, elektrostatické stříkání);
- *Suchý nanášení* (sypáním v elektrickém poli).

Po nanesení smaltu a před vlastním vypalováním se provádí operace **sušení**. Kdyby ihned došlo k vypalování, voda by se z taveniny vypařila a pára by smalt roztrhala nebo by vznikly bubliny a snadněji by smalt oprýskal. Ideální teplota sušení je mezi 50 - 130°C. Při sušení přebírá vlhkost smaltu teplý vzduch. Množství přijaté vlhkosti závisí na jeho teplotě a původní vlhkosti. [4]

Sušení probíhá v sušárnách pomocí horkého vzduchu nebo infračerveného záření. V prvním případě trvá sušení okolo 15 min., u druhého 5 min. Provádí se proto, aby

nedocházelo během vypalování k bouřlivému odpařování a tím k tvorbě puchýřů. [4]

Po vysušení následuje **vypalování smaltu**. **Vzniká** sklovitá vrstva s lesklým a hladkým povrchem. Teplota vypalování závisí na tavitelnosti smaltu a je v rozmezí mezi 700°C - 1000°C. Vypalovací teplota základního smaltu je vždy vyšší než teplota krycího. Doba vypalování závisí na tvaru, tloušťce, mezní teplotě vypalování, přípravcích v peci atd. [4]

Při vypalování naneseného smaltu se vytváří vrstva, která je pevně spojena s povrchem materiálu. K vytvoření přídržné síly pozitivně působí oxidy kobaltu a niklu ve smaltu, které s povrchem reagují, železo se okysličuje a kobalt s niklem zůstávají na povrchu. Tím se povrch zdrsňuje a usnadní přídržení vrstvy. Spojení mezi jednotlivými vrstvami smaltu se děje natavením jejich styčných ploch. Vzniká vrstva, jejíž chemické složení je přechodem mezi jednotlivými vrstvami. [3, 4]

2.3 MATERIÁLY VHODNÉ PRO SMALTOVÁNÍ

Sklovitý povlak smaltu lze vytvořit na různých druzích kovů. Nejčastěji se smalt nanáší na nelegovanou ocel a litinu. Své uplatnění má i vytváření smaltu na neželezných kovech.

Podkladový materiál vhodný pro smaltování musí splňovat požadavky pro vytvoření vrstvy smaltu. Smaltované materiály musí mít homogenní strukturu, hladký povrch bez okují, vměstků a vad, být odolné vůči deformaci za tepla, nesmí mít sklon k tvorbě vodíkových vad, musí být dobře mořitelné atd.

Na obr. 2-1 je uvedeno podrobné rozdělení smaltů z hlediska použití.



Obr. 2-1 Rozdělení smaltů [4]

Z **neželezných kovů** se nejčastěji smaltuje **hliník a jeho slitiny, měď, mosaz a bronz**. Složení smaltu bývá přizpůsobeno teplotní roztažnosti podkladového materiálu. Vypalování

probíhá za nižších teplot než u smaltování oceli. [7]

Z neželezných kovů se pro smaltování používá hliník o čistotě min. 99,5 %. Příprava hliníkových plechů se provádí chemicky a to v roztoku hydroxidů alkalických kovů odmašťováním a mořením, nebo fosfátováním. Obdobným způsobem se připravují plechy ze slitin hliníku a manganu. Tavní teplota smaltu je s ohledem na nízký bod tání hliníku a jeho slitin v rozmezí 500°C - 660°C. Slitiny hliníku 3003 při smaltování zůstávají při zahřátí světlé a bílé, což je žádoucí při použití průhledných smaltů. Slitina hliníku 1100 zůstává také světlá a bílá při zahřátí, ale je měkčí a má tendenci se během zahřívání více deformovat. Slitina hliníku 6061 při zahřátí ztmavne a ovlivňuje průhledné barvy smaltu. V případě, že slitina obsahuje nadměrné množství hořčíku, často dochází k odlupování vrstvy smaltu. Všechny z výše uvedených slitin vyžadují předehřev po dobu 5-10 minut. [6, 9]

Při smaltování *litin* se využívá schopnosti smaltu zakrývat nerovnoměrnosti povrchu. Při smaltování litin musí být stejně čistý povrch, jako pro smaltování ostatních materiálů. Nejlépe pískovaný. Nicméně ve většině případů postačí použít elektrickou brusku, která odstraní nepravidelnosti na povrchu, jako jsou různé nerovnosti, rez, nečistoty atd. [6]

Litina se smaltuje konvenčním způsobem. Nejlepších výsledků smaltování se obvykle dosáhne v případě, že teplota vypalování je tak nízká, jak jen to je možné. Zpravidla při teplotách 700°C - 750°C po dobu 20 minut a více. Při těchto nízkých teplotách se jednotlivá zrna frity špatně taví v důsledku jejich nerovnoměrné velikosti. V případě, že tyto zrna nejsou dostatečně rozemletá, ale přesto dojde k nanesení na povrch litiny, materiál bude oxidovat během dlouhého vypalovacího cyklu, právě v důsledku mezery mezi zrny. Během vypalování druhé vrstvy může smalt zakrýt celý povrch, to ale nevylučuje možnost, že takto zoxidovaný povrch nezpůsobí puchýře ve smaltu. Nejlepší je proto použít mokré nanášení smaltu i pro první vrstvu. [6]

Nejběžnější podkladový materiál pro smaltování je *ocel*. Zpravidla se jedná o ocel tř. 11, která má předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S i dalších prvků, [4, 7]. Pro korozivzdorné smalty vystavené agresivnímu prostředí se používají korozivzdorné a žárovevné oceli tř. 17, [4].

V tabulce 2-1 je uveden obsah základních prvků ocele tř. 11 vhodné pro smaltování. Pro smaltování jsou vhodné oceli s obsahem uhlíku max. 0,20 %. Při jeho zvýšeném obsahu reaguje s kyslíkem a vznikají plyny, které způsobují nehomogenitu povlaku. Nejenom obsah uhlíku, ale i obsah dalších prvků ovlivňují jakost vytvořeného smaltu. Obsah manganu nad 0,2% zhoršuje mořitelnost ocelového materiálu a snižuje rychlost oxidace při vysokých teplotách. Křemík při větším obsahu zvyšuje křehkost feritické struktury oceli, zhoršuje její

mořitelnost a přídržnost smaltu. Síra nesmí překročit hodnotu 0,03 % až 0,04 %, jinak se zhoršuje celistvost smaltovaných povlaků. Fosfor působí negativně na mořitelnost oceli do obsahu 0,05 %. [4]

Tabulka 2-1 Chemické složení ocele tř. 11 vhodné pro smaltování. [2]

Označení	Chemické složení (%)								
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	P	S	Al _{min}
11364	0,20	max. 0,60	0,35	0,30	0,30	0,30	0,045	0,045	-
11366	0,15	min. 0,40	0,35	0,30	0,30	0,30	0,040	0,040	-
11368	0,15	min. 0,40	0,35	0,30	0,30	0,04	0,040	0,040	0,015
11376	0,20	-	-	-	-	0,05	0,050	-	-
11378	0,16	-	0,35	-	-	-	0,045	0,015	0,020
11416	0,20	min. 0,50	-	0,30	0,30	0,30	0,040	0,040	-

Materiál pro smaltování se nejčastěji dodává ve formě tenkých nebo tlustých plechů. Tenké plechy do tloušťky 2 mm jsou dodány dle normy ČSN EN 10209. Jedná se o ploché výrobky válcované za studena z hlubokotažných ocelí určených ke smaltování. Tlusté plechy přes 3 mm jsou dodány dle normy ČSN 42 0209. Jedná se o plechy tlusté z ocelí tříd 10 až 16 válcované za tepla.

Mezi plechy válcované za studena určené pro smaltování se dle normy ČSN EN 10209 řadí materiály 1.0390, 1.0392, 1.0386, 1.0869, 1.0399, 1.0394, 1.0872. Jsou to materiály určené pro smaltování běžnými i speciálními postupy bez deformací, obsah uhlíku nepřesahuje 0,08% a mez pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 270 MPa - 390 MPa.

Pro výrobu tlakových nádob vhodných pro smaltování se používají plechy z nelegovaných i legovaných ocelí třídy 11, 13, 15, 16 a 17. Plechy se používají ve stavu normalizačně žíhaném.

Plech z jemnozrnných ocelí mají jemnozrnnou strukturu s nízkým uhlíkovým ekvivalentem, které zaručují vysoké mechanické vlastnosti v rozmezí teplot od -50°C až do +400°C. Pro nízké teploty jsou pak u jednotlivých druhů oceli zaručovány nejnižší hodnoty nárazové práce, které se pohybují od 27 J do 30 J pro teploty -20°C až +50°C. [18, 19]

Materiály použité k výrobě tlakových nádob musí mít vhodné vlastnosti po celou dobu předpokládané životnosti, musí být dostatečně tažné a houževnaté. Dostatečně tažný je materiál, který má při zkoušce tahem větší tažnost než 14 % a jeho nárazová práce na zkušební tyči s V-vrubem není menší než 27 J při teplotě, která není větší než 20°C. Materiály musí být odolné proti křehkému lomu a musí mít chemickou odolnost v prostředí proudícího

média v tlakovém zařízení. Oceli s výjimkou korozivzdorných musí být zcela uklidněny. [18, 19, 20, 21]

V tab. 2-2 je uveden seznam ocelí a jejich chemické složení rozboru tavby pro tlakové nádoby uvedených v normě ČSN EN 10028-2, která je zaměřena na ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty.

Tabulka 2-2 Chemické složení oceli pro tlakové nádoby [15]

Označení oceli	Chemické složení (%)									
	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	N	Al _{celk.}	Cu	Cr	Ni
P235GH	≤ 0,12	≤ 0,35	0,60 - 1,20	0,03	0,01	≤ 0,012	≥ 0,020	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
P295GH	0,08 - 0,20	≤ 0,40	0,90 - 1,50	0,03	0,01	≤ 0,012	≥ 0,020	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
P355GH	0,10 - 0,22	≤ 0,60	1,10 - 1,70	0,03	0,01	≤ 0,012	≥ 0,020	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
16Mo3	0,12 - 0,20	≤ 0,35	0,40 - 0,90	0,03	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
18MnMo4-5	≤ 0,20	≤ 0,40	0,90 - 1,50	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	≤ 0,30	≤ 0,30
20MnMoNi4-5	0,15 - 0,23	≤ 0,40	1,00 - 1,50	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,20	≤ 0,20	0,4 - 0,8
15NiCuMoNb5-6-4	≤ 0,17	0,25 - 0,50	0,80 - 1,20	0,03	0,01	≤ 0,020	≥ 0,015	0,50 - 0,80	≤ 0,30	1,00 - 1,30
13CrMo4-5	0,08 - 0,18	≤ 0,35	0,40 - 1,00	0,03	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	0,70 - 1,15	-
13CrMoSi5-5	≤ 0,17	0,50 - 0,80	0,40 - 0,65	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	1,00 - 1,50	≤ 0,30
10CrMo9-10	0,08 - 0,14	≤ 0,50	0,40 - 0,80	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	2,00 - 2,50	-
12CrMo9-10	0,10 - 0,15	≤ 0,30	0,30 - 0,80	0,02	0,01 - 0,005	≤ 0,012	0,010 - 0,040	≤ 0,25	2,00 - 2,50	≤ 0,30
X12CrMo5	0,10 - 0,15	≤ 0,50	0,30 - 0,60	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,30	4,0 - 6,0	≤ 0,30
13CrMoV9-10	0,11 - 0,15	≤ 0,10	0,30 - 0,60	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,20	2,00 - 2,50	≤ 0,25
12CrMoV12+10	0,10 - 0,15	≤ 0,15	0,30 - 0,60	0,02	0,01	≤ 0,012	a)	≤ 0,25	2,75 - 3,25	≤ 0,25
X10CrMoVNb9-1	0,08 - 0,12	≤ 0,50	0,30 - 0,60	0,02	0,01	0,030 - 0,070	≤ 0,040	≤ 0,30	8,0 - 9,5	≤ 0,30

Poznámka: a) Obsah hliníku v tavbě musí být stanoven a uveden v dokumentu kontroly.

V normě ČSN EN 10028-2 jsou též uvedeny hodnoty mechanických vlastností. Pro srovnání jsou uvedeny v tab. 2-3. Vlastnosti zjištěné zkouškou tahem byly provedeny při pokojové teplotě. [15]

Tabulka 2-3 Mechanické vlastnosti oceli pro tlakové nádoby [15]

Označení oceli	Tloušťka výrobku t (mm)	Vlastnosti při zkoušce tahem při pokojové teplotě			Nárazová práce KV (J) min. při teplotě ve °C		
		Horní mez kluzu Reh (MPa) min.	Pevnost v tahu Rm (MPa)	Tažnost A (%) min.	-20	0	20
P235GH	≤ 16	235	360 - 480	24	27 b)	34 b)	40
	16 < t ≤ 40	225					
	40 < t ≤ 60	215					
	60 < t ≤ 100	200	350 - 480				
	100 < t ≤ 150	184					
	150 < t ≤ 250	170					
P295GH	≤ 16	295	460 - 580	21	27 b)	34 b)	40
	16 < t ≤ 40	290					
	40 < t ≤ 60	285					
	60 < t ≤ 100	260	440 - 570				
	100 < t ≤ 150	235					
	150 < t ≤ 250	220					
P355GH	≤ 16	355	610 - 650	20	27 b)	34 b)	40
	16 < t ≤ 40	345					
	40 < t ≤ 60	335					
	60 < t ≤ 100	15	490 - 630				
	100 < t ≤ 150	295	480 - 630				
	150 < t ≤ 250	380	470 - 630				
16Mo3	≤ 16	270	440 - 590	22	a)	a)	31 b)
	16 < t ≤ 40	270					
	40 < t ≤ 60	260					
	60 < t ≤ 100	240	430 - 580				
	100 < t ≤ 150	220	420 - 570				
	150 < t ≤ 250	210	410 - 570				
18MnMo4-5	≤ 60	345	610 - 650	20	27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 150	325					
	150 < t ≤ 250	310	480 - 620				
20MnMoNi4-5	≤ 40	470	590 - 750	18	27 b)	40	50
	40 < t ≤ 60	460					
	60 < t ≤ 100	450	570 - 710				
	100 < t ≤ 150	440					

Označení oceli	Tloušťka výrobku t (mm)	Vlastnosti při zkoušce tahem při pokojové teplotě			Nárazová práce KV (J) min. při teplotě ve °C		
Značka		Horní mez kluzu Reh (MPa) min.	Pevnost v tahu Rm (MPa)	Tažnost A (%) min.	-20	0	20
20MnMoNi4-5	150 < t ≤ 250	400	550 - 700	18	27 b)	40	50
15NiCuMoNb 5-6-4	≤ 40	460	610 - 780	16	27 b)	34 b)	40
	40 < t ≤ 60	440					
	60 < t ≤ 100	430	600 - 760				
	100 < t ≤ 150	420	590 - 740				
	150 < t ≤ 250	410	580 - 740				
13CrMo4-5	≤ 16	300	450 - 600	19	a)	a)	31 b)
	16 < t ≤ 60	290					
	60 < t ≤ 100	270	440 - 590				27 b)
	100 < t ≤ 150	255	430 - 580				
	150 < t ≤ 250	245	420 - 570				
13CRMoS5-5	≤ 60	310	510 - 690	20	a)	27 b)	34 b)
	60 < t ≤ 100	360	480 - 660				
	≤ 60	400	510 - 690		27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 100	390	500 - 680				
	100 < t ≤ 150	380	490 - 670				
10CrMo9-10	≤ 16	310	480 - 630	18	a)	a)	31 b)
	16 < t ≤ 40	300					
	40 < t ≤ 60	290					
	60 < t ≤ 100	280	470 - 620	17	a)	a)	27 b)
	100 < t ≤ 150	260	460 - 610				
	150 < t ≤ 250	250	460 - 600				
12CrMo9-10	≤ 250	355	540 - 690	18	27 b)	40	70
X12CrMo5	≤ 60	32	510 - 690	20	27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 150	300	480 - 660				
	150 < t ≤ 250	300	450 - 630				
1CrMoV9-10	≤ 60	455	600 - 780	18	27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 150	435	590 - 770				
	150 < t ≤ 250	415	580 - 760				
12CrMoV12-10	≤ 60	455	600 - 780	18	27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 150	435	690 - 770				
	150 < t ≤ 250	415	580 - 760				
X10CrMoVNb9-1	≤ 60	445	580 - 760	18	27 b)	34 b)	40
	60 < t ≤ 150	435	650 - 730				
	150 < t ≤ 250	435	520 - 700				

Poznámka: a) Hodnoty se mohou dohodnout při objednání.

b) Minimální hodnota nárazové práce 40J se může dohodnout při objednání.

Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na teplotě je možno pro oceli určené pro tlakové nádoby sledovat v tabulce 2-4.

Tabulka 2-4 Minimální hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách [15]

Označení oceli		Tloušťka výrobku t_{\min} (mm)	Minimální hodnota smluvní meze kluzu 0,2%, $R_{p0,2}$ (MPa)									
Značka	Číselné označení		Při teplotě (°C)									
			50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
P235GH	1.0345	≤ 16	227	214	198	182	167	153	142	133	-	-
		$16 < t \leq 40$	218	205	190	174	160	147	136	128	-	-
		$40 < t \leq 60$	208	196	181	167	153	140	130	122	-	-
		$60 < t \leq 100$	193	182	169	155	142	130	121	114	-	-
		$100 < t \leq 150$	179	168	156	143	131	121	112	105	-	-
		$150 < t \leq 250$	164	155	143	132	121	111	103	97	-	-
P295GH	1.0481	≤ 16	285	268	249	228	209	192	178	167	-	-
		$16 < t \leq 40$	280	264	244	225	206	189	175	165	-	-
		$40 < t \leq 60$	276	259	240	221	202	186	172	162	-	-
		$60 < t \leq 100$	251	237	219	201	184	170	157	148	-	-
		$100 < t \leq 150$	227	214	198	182	167	153	142	133	-	-
		$150 < t \leq 250$	213	200	186	170	156	144	133	125	-	-
P355GH	1.0473	≤ 16	343	323	299	275	252	232	214	202	-	-
		$16 < t \leq 40$	334	314	291	267	245	225	208	196	-	-
		$40 < t \leq 60$	324	305	282	259	238	219	202	130	-	-
		$60 < t \leq 100$	305	287	265	244	224	206	190	179	-	-
		$100 < t \leq 150$	285	268	249	228	209	192	178	167	-	-
		$150 < t \leq 250$	271	255	230	217	199	183	169	159	-	-
16Mo3	1.5415	≤ 16	273	264	250	233	213	194	175	159	147	141
		$16 < t \leq 40$	268	259	245	228	209	190	172	156	145	139
		$40 < t \leq 60$	258	250	230	220	202	183	165	150	139	134
		$60 < t \leq 100$	238	230	218	203	186	169	153	139	129	123
		$100 < t \leq 150$	218	211	200	186	171	155	140	127	118	113
		$150 < t \leq 250$	208	202	191	178	163	148	134	121	113	108
18MnMo4-5	1.5414	≤ 60	330	320	315	215	295	285	265	235	215	-
		$60 < t \leq 150$	320	310	305	300	285	275	255	225	205	-
		$150 < t \leq 250$	310	300	295	290	275	265	245	220	200	-
20MnMoNi4-5	1.6311	≤ 40	460	448	439	432	424	415	402	384	-	-
		$40 < t \leq 60$	450	436	430	423	415	406	394	375	-	-
		$60 < t \leq 100$	441	429	420	413	400	398	385	367	-	-
		$100 < t \leq 150$	431	419	411	404	397	389	377	359	-	-
		$150 < t \leq 250$	392	381	374	357	361	353	342	327	-	-

Označení oceli		Tloušťka výrobku t_{min} (mm)	Minimální hodnota smluvní meze kluzu 0,2%, Rp0,2 (MPa)									
Značka	Číselné označení		Při teplotě (°C)									
			50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
15NiCuMonB5-6-4	I.6368	≤ 40	447	429	415	403	391	380	366	351	331	-
		$40 < t \leq 60$	427	410	397	385	374	363	350	335	317	-
		$60 < t \leq 100$	418	401	388	377	366	355	342	328	309	-
		$100 < t \leq 150$	408	392	379	368	357	347	335	320	302	-
		$150 < t \leq 250$	398	382	370	359	349	338	327	313	295	-
13CrMo4-5	I.7335	≤ 16	294	285	269	252	234	216	200	186	175	164
		$16 < t \leq 60$	285	275	260	243	226	209	194	189	169	159
		$60 < t \leq 100$	265	256	242	227	210	195	180	168	157	148
		$100 < t \leq 150$	250	242	229	214	199	184	170	159	148	139
		$150 < t \leq 250$	235	223	215	211	199	184	170	159	148	139
13CrMoSi5-5+NT	1.7336+NT	≤ 60	299	283	268	255	244	233	223	218	206	-
		$60 < t \leq 100$	289	274	260	247	236	225	215	211	199	-
13CRMoS5-5+QT	1.7336+QT	≤ 60	384	364	352	344	339	335	330	322	309	-
		$60 < t \leq 100$	375	355	343	335	330	327	22	314	301	-
		$100 < t \leq 250$	365	345	334	325	322	315	314	306	293	-
10CrMo9-10	I.7380	≤ 16	288	266	254	248	243	236	225	212	197	185
		$16 < t \leq 40$	279	257	246	240	235	223	218	205	191	179
		$40 < t \leq 60$	270	249	238	232	227	221	211	198	185	173
		$60 < t \leq 100$	260	240	230	224	220	213	204	191	178	167
		$100 < t \leq 150$	250	237	228	222	219	213	204	191	178	167
		$150 < t \leq 250$	240	227	219	213	210	208	204	191	178	167
12CrMo9-10	I.7375	≤ 250	341	323	311	303	298	295	292	287	279	-
X12CrMo5	I.7362	≤ 60	310	299	295	294	293	291	285	273	253	222
		$60 < t \leq 250$	290	281	277	275	275	273	267	256	237	208
13CrMoV9-10	I.7703	≤ 60	410	395	380	375	370	365	352	360	350	-
		$60 < t \leq 250$	405	390	370	365	360	355	352	350	340	-
12CrMoV12-10	I.7767	≤ 60	410	395	380	375	370	365	32	350	350	-
		$60 < t \leq 250$	405	390	370	365	360	355	352	350	340	-
X10CrMoVNb-1	I.4903	≤ 60	432	415	401	392	385	379	373	364	349	324
		$60 < t \leq 250$	423	406	392	383	376	371	365	356	341	316

Vzhledem k tomu, že v rámci experimentální části práce bude jako základní materiál použita ocel P265GH, je v následující kapitole popsána její základní charakteristika.

2.3.1 CHARAKTERISTIKA OCELI P265GH

Tato ocel se používá na výrobu kotlů, tlakových nádob, výměníků tepla a trubek pro přepravu horkých kapalin, pro souvislé tepelné zatížení do 450°C. Vyznačuje se dobrou svařitelností, je dobře tvárná za tepla i za studena. Doporučená teplota pro normalizační žíhání je v rozmezí 890°C až 950 °C. [13]

Označení P265GH vychází z normy ČSN EN 10027-1 a pro názornost je na obr. 2-2 uvedeno vysvětlení jednotlivých znaků. Dle této normy je ocel určena pro výrobu tlakových nádob s mezí kluzu 265 MPa, pracujících za vysokých teplot. [16]



Obr. 2-2 Popis značení ocele dle ČSN EN 10027

Chemické složení oceli P265GH je uvedeno v tabulce 2-5. Hodnoty uvedené v této tabulce platí pro chemické složení rozboru tavby. Pokud je chemický rozbor hotového výrobku v nesouladu, nesmí tyto hodnoty přesáhnout více, než je uvedeno v pravé části této tabulky. [15]

Tabulka 2-5 Chemické složení oceli P265GH a její dovolené odchylky [15]

Chemické složení (rozbor tavby)		Dovolené mezní úchytky chemického rozboru výrobku	
Prvek	Hodnota (%)	Specifikovaná mezní hodnota rozboru tavby (%)	Dovolená mezní odchylka pro rozbor v hotovém výrobku (%)
C	≤ 0,20	≤ 0,23	± 0,02
Si	≤ 0,40	≤ 0,35	± 0,05
		≥ 0,35 ≤ 1,0	± 0,05
Mn	0,8 - 1,4	≤ 1,0	± 0,05
		≥ 1,0 ≤ 1,7	± 0,1
P _{max}	0,025	≤ 0,015	± 0,003
		≥ 0,015 ≤ 0,025	± 0,005
S _{max}	0,01	≤ 0,01	± 0,003
N	≤ 0,012	≤ 0,02	± 0,002
		≥ 0,02 ≤ 0,07	± 0,005

Chemické složení (rozbor tavby)		Dovolené mezní úchytky chemického rozboru výrobku	
Prvek	Hodnota (%)	Specifikovaná mezní hodnota rozboru tavby (%)	Dovolená mezní odchylka pro rozbor v hotovém výrobku (%)
Al _{celkový}	≥ 0,02	≥ 0,01	± 0,005
Cu	≤ 0,3	≤ 0,3	± 0,05
		≥ 0,3 ≤ 0,8	± 0,1
Cr	≤ 0,3	≤ 2	± 0,05
		≥ 2 ≤ 10	± 0,1
Ni	≤ 0,3	≤ 0,3	± 0,05
		≥ 0,3 ≤ 3	± 0,1
Nb	≤ 0,02	≤ 0,1	± 0,01
V	≤ 0,02	≤ 0,05	± 0,01
		≥ 0,3 ≤ 1,3	± 0,03
Ti _{max}	0,03	≤ 0,03	± 0,01
Mo	≤ 0,08	≤ 0,35	± 0,03
		≥ 0,35 ≤ 1,1	± 0,04
Cr+Cu+Mo+Ni	≤ 0,7	≤ 0,7	± 0,05
B		≤ 0,003	± 0,005

Maximální obsah mědi nebo maximální součet obsahu mědi a cínu nesmí překročit 0,3%. Pro tloušťky výrobku menší než 6 mm, je povolený nižší obsah manganu o 0,2%, než je předepsaný. [15]

Hodnoty mechanických vlastností oceli P265GH jsou uvedeny v tabulce 2-6 a jsou platné pro příčný směr. Vlastnosti zjištěné zkouškou tahem byly provedeny při pokojové teplotě. Tažnost pro všechny zmíněné tloušťky je min. 22%. [15]

Tabulka 2-6 Mechanické vlastnosti ocele P265GH [15]

Nominální tloušťka (mm)	Horní mez kluzu Re (MPa)	Mez pevnosti Rm (MPa)
≤ 16	265	410 - 530
16 - 40	255	410 - 530
40 - 60	245	410 - 530
60 - 100	215	410 - 530
100 - 150	200	410 - 530
150 - 250	185	390 - 530

V případě, že zatěžovací síly nedosahují statické pevnosti a přesto při dynamickém zatěžování dochází k porušení, znamená to, že se zatěžovací rychlostí roste i odpor kovu proti

přetvoření. Tím se mez kluzu a mez pevnosti zvyšují. Mez kluzu přitom stoupá rychleji než mez pevnosti a při velké rychlosti deformace se pak může materiál, který se chová jako houževnatý porušit bez předchozí deformace. [10]

Z tohoto důvodu se provádí zkouška rázem v ohybu. Cílem je pak určit vlastnosti materiálu za působení dynamických sil. Výsledné hodnoty této zkoušky oceli P265GH pro nominální tloušťky jsou dle normy ČSN EN 10028-2 pro teplotu 20°C 40 J, pro 0°C je to 34 J a pro mínus 20°C je to 27 J. Zkoušky, které probíhaly při nižší teplotě, se vyznačují i nižší hodnotou vrubové houževnatosti a práce potřebná k přeražení vzorku je nižší. Minimální hodnota nárazové práce je určena pro vzorek šířky 6-10 mm.

Při sledování závislosti smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na teplotě zatěžovaného vzorku je patrné, že při vzrůstající teplotě, napětí, které je zkušební vzorek schopen unést před tím, než dojde k trvalé deformaci, klesá. Tato vlastnost významně ovlivňuje použití této ocele pro oblast, kde jsou tlakové nádoby vystaveny vyšším teplotám. Závislost smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ na teplotě je možno sledovat v tabulce 2-7.

Tabulka 2-7 Minimální hodnoty smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$ při zvýšených teplotách [15]

Označení oceli		Tloušťka výrobku t_{min} (mm)	Minimální hodnota smluvní meze kluzu 0,2% (MPa)							
			Při teplotě (°C)							
značka	číselné označení		50	100	150	200	250	300	350	400
P265GH	1.0425	≤ 16	227	214	198	182	167	153	142	133
		$16 < t \leq 40$	218	205	190	174	160	147	136	128
		$40 < t \leq 60$	208	196	181	167	153	140	130	122
		$60 < t \leq 100$	193	182	169	155	142	130	121	114
		$100 < t \leq 150$	179	168	156	143	131	121	112	105
		$150 < t \leq 250$	164	155	143	132	121	111	103	97

2.4 VLIV TEPLITNÍ EXPOZICE PŘI SMALTOVÁNÍ NA ZMĚNY STRUKTURY A VLASTNOSTÍ MATERIÁLU

Ve společnosti TENEZ a.s. je po svaření nádoba nejprve vyžihána. Žihací cyklus je složen z pomalého ohřevu (rychlost 1,5 °C/min) na teplotu 930°C, následuje výdrž na této teplotě a potom ochlazení v otevřené peci. Během tohoto cyklu dojde ke zrovnoměrnění struktury, snížení vnitřního pnutí, popř. k vypálení zbytkových nečistot na povrchu. V druhé fázi probíhá vlastní smaltování. Po nanesení smaltéřské frity je tlaková nádoba ohřívána na vypalovací teplotu 840°C (rychlost ohřevu 1,7°C/min), následuje výdrž na této teplotě a

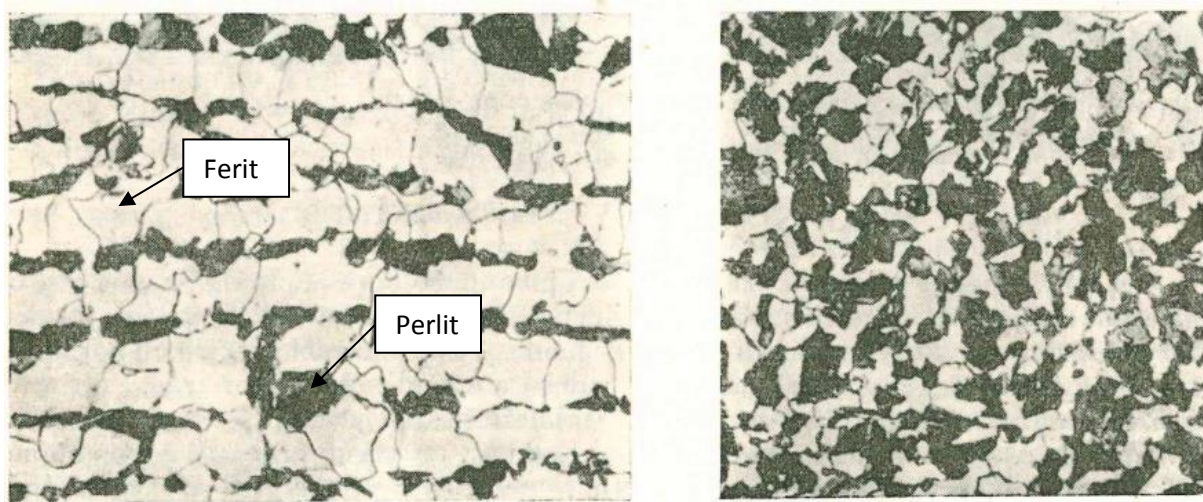
ochlazování v otevřené peci. V případě provedení opravy smaltu, tj. resmaltace jsou nové vrstvy smaltu vypalovány při stejném teplotním cyklu. Vzhledem k tomu, že pro materiál P265GH je teplota A_{c1} v rozmezí 710 až 720°C a teplota A_{c3} v rozmezí 840 až 860°C odpovídají teploty použité při výrobě smaltovaných nádob přibližně teplotám normalizačního žíhání. Doporučená teplota pro normalizační žíhání je 50 až 80°C nad teplotu A_{c3} , tj. pro tento materiál je to 890°C až 950 °C. Doporučená doba výdrže u normalizačního žíhání je 1 až 4 hodiny. Při výrobě smaltovaných nádob jsou však použité výdrže na teplotě podstatně kratší, tj. cca 30 minut.

Žíhání je obecně takové tepelné zpracování, při kterém se struktura uvádí do termodynamicky stabilnějšího stavu. Společným znakem žíhacích metod je malá rychlost ochlazování, která umožňuje obvykle vznik rovnovážných struktur. Žíhání lze rozdělit na tepelné zpracování **bez překrystalizace** (pod teplotou A_{c1} , 727°C v diagramu Fe-Fe₃C) a s **překrystalizací** (nad teplotou A_{c3} v diagramu Fe-Fe₃C). [10]

Všechny typy žíhání pod teplotou A_{c1} se odehrávají bez změn struktury. Vzhledem k tomu, že tyto žíhací metody probíhají při nízkých teplotách, musí být žíhací cykly dostatečně dlouhé. Rychlost ochlazování neovlivňuje strukturu, ale pouze vnitřní pnutí v materiálu. Patří mezi ně **žíhání ke snížení vnitřního pnutí, rekrytalizační, na měkko, k odstranění křehkosti po moření a protivločkové**. Mezi žíhání s překrystalizací patří **normalizační, izotermické a homogenační žíhání**. [10, 17, 24, 25, 26]

Cílem **normalizačního žíhání** je zjemnění zrna austenitu a vytvoření jemné rovnoměrné struktury (obvykle směsi feritu a perlitu). Jak již bylo uvedeno, doporučená teplota pro normalizační žíhání je 50 až 80°C nad teplotu A_{c3} , výdrž bývá 1 až 4 hodiny. Ochlazování z normalizační teploty se provádí u konstrukčních ocelí na klidném vzduchu a výsledná struktura je feriticko - perlitická. U ocelí s vyšší prokalitelností v tenkých stěnách může vznikat bainit, popř. malé množství martenzitu. V tom případě je nutné ještě popouštění. Výsledná struktura po tomto žíhání je závislá na chemickém složení oceli a velikosti žíhaného dílu. Při normalizačním žíhání složitých dílů se využívá postup, kdy místo ochlazování na vzduchu se žíhaný díl ochlazuje v peci (tzv. úplné žíhání), což omezuje vznik tepelných pnutí a u slitinových ocelí vznik tvrdších strukturních složek, zlepši se obrobiteľnosť. Často je využíván i postup, při kterém se díl ze žíhací teploty ochladí rychleji (např. otevřením pece) na teplotu 650 - 500°C a potom se ochlazování dokončí v otevřené peci. Vznikne jemná, houževnatá struktura s nízkým vnitřním pnutím. [10]

Na obr. 2-3 vlevo je uvedena 500-krát zvětšená hrubá, feriticko-perlitická struktura před normalizačním žiháním. V pravé části je 500-krát zvětšena jemná a rovnoměrná struktura po normalizačním žihání.



Obr. 2-3 Struktura podeutektoidní oceli před a po normalizačním žihání [10]

V následujících odstavcích jsou popsány struktury, které mohou vznikat v oceli při výrobě smaltovaných nádob. K ověření těchto předpokladů dojde v experimentální části.

Pokud je podeutektoidní ocel P265GH ohřívána na teplotu do oblasti austenitu, tj. nad teplotu A_{c3} a následnému ochlazení, vznikají ve fázi ochlazení při překrytalizaci na hranicích původních austenitických zrn zárodky feritu, které difúzně rostou. Množství feritu se během ochlazení zvyšuje a s ohledem na nízkou rozpustnost uhlíku ve feritu se zbylý austenit obohacuje uhlíkem. Zbytek austenitu, který dosáhl eutektoidního složení se při eutektoidní teplotě přemění na lamelární eutektoid - perlit. Je to směs lamel (destiček) feritu a cementitu, které se střídavě vylučují z austenitu. Za určitých podmínek (např. při žihání naměkko) se destičky cementitu sbalují. Perlit je pak tvořen směsí zrn cementitu ve feritické hmotě - tzv. globulární perlit. [10]

Při rychlém ochlazení z teplot nad teplotami přeměn může vznikat bainitická nebo martenzitická struktura. Pod teplotou 500°C a zároveň nad teplotou počátku martenzitické přeměny z austenitu vzniká feriticko - karbidická směs, bainit. Na rozdíl od perlitu se přeměňuje intenzivněji a ke konci se zpomaluje. Proto není přeměna často úplná a ve struktuře zůstává zbytkový austenit. Pokud dojde k rychlému ochlazení materiálu, zpravidla na teplotu nižší než 350°C , z austenitu vznikne martenzit. Tato struktura se při vyšších teplotách rozpadá na ferit a karbid. Na rozdíl od perlitické a feritické přeměny je tato přeměna

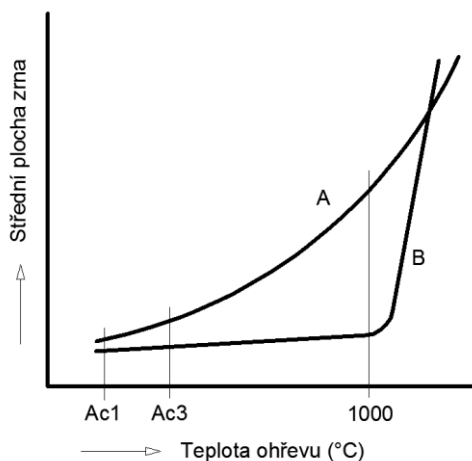
bezdifúzní, neboť austenit je zde podchlazen tak, že difuze uhlíku téměř ustává. [17, 24, 25, 26, 27]

Teplota ohřevu (austenitizace) má zásadní vliv na hodnotu výsledných pevnostních vlastností a kvality výrobků. Při dostatečně pomalém ohřevu podeutektoidní oceli se při teplotě těsně nad A_{c1} začíná transformace na austenit. Transformace začíná v místě se zrny perlitu a při vyšší teplotě i v místech feritu. Proces austenitizace má difúzní charakter. Probíhá vznikem zárodků a jejich dalším růstem. Zárodky austenitu vznikají přednostně v místě strukturních poruch, tj. na hranicích fází ferit - cementit nebo strukturních součástí perlit - perlit, ferit - perlit. Při vzniku má zárodek austenitu nízký obsah uhlíku (stejný jako je ve feritu) a roste difúzním posunem mezifázového rozhraní austenit - ferit ve směru do feritické lamely i podél hranice ferit - cementit, při tom se obohacuje uhlíkem z rozpouštějící se lamely cementitu. Rychlost posunu rozhraní austenit - ferit je vyšší než rozhraní austenit - cementit. V určitém stádiu přeměny je proto feritická hmota přeměněna v austenit, ale z původních lamel cementitu zůstávají dosud nerozpuštěné zbytky. Při pokračování přeměny se částice cementitu rozpouštějí, až je dosaženo austenitické struktury. Ta je chemicky nehomogenní. V místech austenitu, kde se vyskytovaly lamely feritu je nižší obsah uhlíku než v místech, kde se vyskytovaly lamely cementitu. Proto dalším stádiem přeměny je postupná homogenizace austenitu. [10]

Rychlost austenitizace je závislá na výchozí struktuře a chemickém složení oceli. Protože, jak již bylo uvedeno, zárodky austenitu vznikají přednostně na mezifázovém rozhraní ferit - cementit, rychlost tvorby zárodků vzrůstá se zvětšující se plochou tohoto rozhraní. Nejrychleji proto probíhá austenitizace u ocelí zušlechtěných s jemnou, sorbitickou strukturou, menší rychlostí se přeměňuje jemný lamelární perlit, pomaleji hrubý lamelární perlit a nejmenší rychlostí hrubý zrnitý perlit. Vznikající obsah uhlíku v oceli se projeví urychlením pochodu při austenitizaci. [30]

Po ohřevu ocelí nad teplotu A_{c1} , popř. A_{cm} se vytvoří nová, tzv. sekundární zrna austenitu. Jejich velikost je dána teplotou a dobou výdrže v austenitické oblasti. Zrna austenitu jsou bezprostředně po překrytí za teploty A_1 podstatně menší, než velikost výchozích zrn perlitu. To souvisí s mechanismem vzniku zárodka austenitu. V jediném zrnu perlitu totiž vzniká více zárodků austenitu. Při dalším zvyšování teploty v oblasti austenitu zrno postupně hrubne. Protože je růst zrna difúzním pochodem, je významně ovlivněn výškou teploty. V případě konstantní teploty, je potom ovlivněn dobou výdrže na teplotě. Různé oceli se v oblasti austenitu chovají různě, některé hrubnou velmi snadno, jen při malém přehřátí nad kritickou teplotu a jiné si zachovávají jemné zrno austenitu i při vyšších teplotách. Obecně ale

platí, že s vyšší teplotou a delší dobou výdrže na této teplotě dochází ke zvětšování, resp. hrubnutí zrna, viz obr. 2-4. I přesto, že se austenit při následném ochlazování přemění na jiné strukturní složky, má velikost austenitického zrna rozhodující vliv na mechanické vlastnosti. [30]

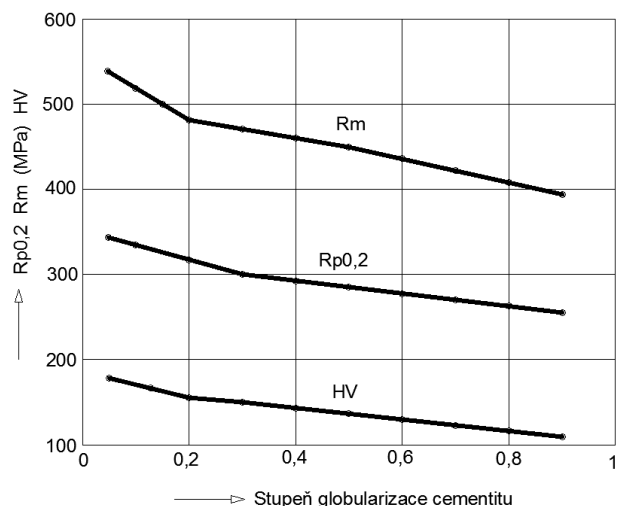


Poznámka: A) hrubozrnná ocel, B) jemnozrnná ocel

Obr. 2-4 Schéma růstu austenitického zrna v závislosti na teplotě ohřevu [10]

Ocel smaltovaných nádob musí odolávat nejenom teplotnímu namáhání při výrobě smaltovaných povrchů, ale i zvýšeným teplotám při provozu. U ocelí, pracujících za zvýšených teplot, probíhají děje, které vedou ke změnám původních vlastností. Životnost těchto ocelí je silně závislá na teplotě, při kterých pracují. V průběhu dlouhodobého vystavení dílů vysokým teplotám pohybujícím se okolo 400°C, je postupná degradace vlastností úzce spojena s pomalými změnami mikrostruktury a mechanických vlastností. [30]

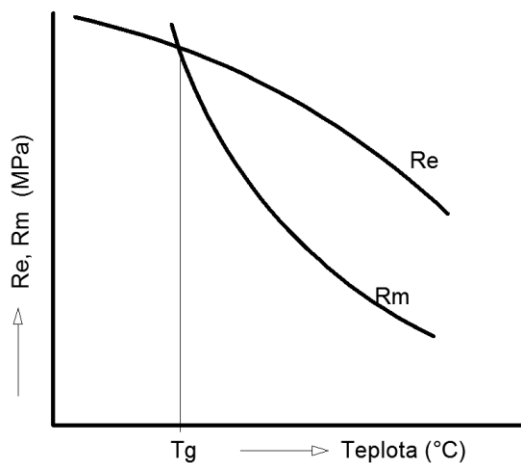
U uhlíkových ocelí se dlouhodobý vliv teploty projevuje globularizací cementitických lamel perlitu. Jedná se o difúzní děj. Postupující globularizace je hodnocena poměrem šířky a tloušťky cementitické desky. S rostoucím rozpadem se tento poměr blíží jedné. Na obr. 2-5 je ukázána závislost poměru tloušťky a délky lamely cementitu v perlitických zrnech na teplotě a době žíhání pro ocel 12022, která má přibližně obdobné chemické složení jako ocel P265GH, která je použita v rámci experimentu. [28]



Obr. 2-5 Změna pevnostních vlastností v závislosti na stupni globularizace cementitu [28]

Kromě změn mikrostruktury a mechanických vlastností dochází v důsledku teploty a okolního prostředí i k poškození povrchů, zejména v důsledku korozních dějů. U silnostěnných dílů, jako např. parovodů, pracujících v málo agresivním prostředí, jsou vlivy tohoto poškození vzhledem k tloušťce stěny velmi malé a zanedbatelné. Jiná situace je u kotlových trubek, kde při malých tloušťkách stěny může docházet k oxidaci a oduhlíčení na vnějších stěnách, případně se může uplatnit i koroze vnitřních povrchů. Vznikají tak poškozené povrchové vrstvy, jejichž pevnost je snížena. [28]

Maximální teplota oceli, při které může pracovat, je omezena hodnotou meze tečení. V oblasti teplot, ve které dochází k uplatnění tečení, jsou hodnoty meze pevnosti při tečení vždy nižší než mez kluzu materiálu, viz obr. 2-6. Mez tečení se mění v závislosti na napětí. Například u nelegovaných ocelí je při napětí 160 MPa teplota, při které se začíná projevovat tečení, 80°C a se snižujícím se napětím, roste. [29] Mezní teplota T_g je teplota, nad kterou je nutné uvažovat tečení (creep) jako jeden z hlavních degračních mechanismů.



Obr. 2-6 Schéma stanovení Mezní teploty T_g [31]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

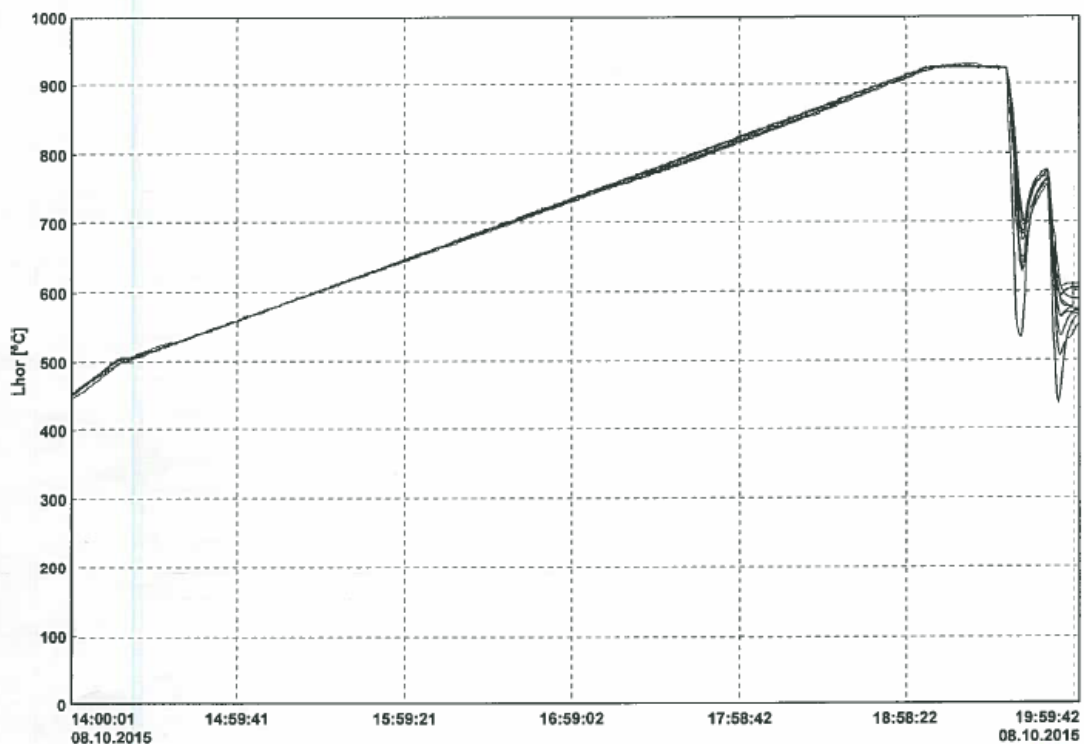
Experimentální část diplomové práce navazuje na část teoretickou a je vytvořena na základě požadavků společnosti TENEZ a.s., ve spolupráci s níž je tato práce řešena. Společnost TENEZ a.s. je výrobcem nerezových nádrží, rozebíratelných i svařovaných výměníků tepla a smaltovaných zařízení pro chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl.

Jednotlivá zařízení pracují za různých provozních podmínek, přičemž jedním z nejdůležitějších kritérií je jejich spolehlivost a bezporuchovost. Tato zařízení jsou namáhána nejen chemicky aktivním prostředím, ale také změnami teploty a tlaku. Tepelné namáhání probíhá nejen při vlastním provozu, ale také při výrobě a opravách (resmaltacích) těchto zařízení.

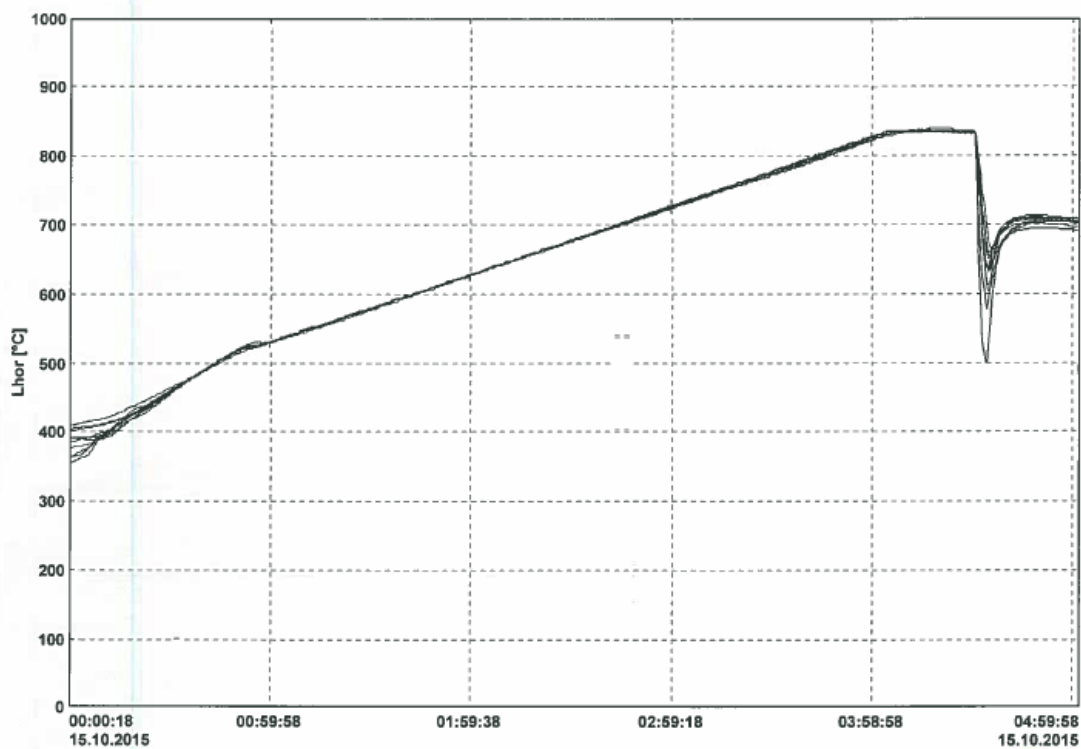
Cílem experimentální části práce je stanovení vlivu teplotní expozice při smaltování, resp. opakování teplotních cyklů používaných při smaltování na změny vlastností a struktury podkladového materiálu vzhledem k jeho výchozím vlastnostem.

Pro experimenty byla společností TENEZ a.s. dodána plochá ocel pro tlakové nádoby P265GH. Bylo dodáno 8 plechů čtvercového tvaru o velikosti 300 x 300 mm a tloušťky 16 mm. Jednotlivé plechy se lišily počtem teplotních cyklů, kterým byly vystaveny a byly označeny vzestupnými číslicemi, které byly charakteristické zvyšujícím se počtem tepelných cyklů. Označení jednotlivých plechů bylo následující:

- Sada č. 1:** Výchozí materiál dodaný od výrobce pro výrobu tlakových nádob (výchozí stav).
- Sada č. 2:** Materiál, který byl žíhán dle obr. 3-1. Tento teplotní cyklus je charakterizován vložením dílu do pece, která je předehřátá na teplotu 460°C. Poté dochází ke zvyšování teploty o 1,5°C.min⁻¹ na teplotu 930°C. Doba výdrže na této teplotě je 30 min. Dveře od pece jsou poté otevřeny a díl je ochlazován.
- Sada č. 3:** Materiál, který prodělal 5 teplotních cyklů dle obr. 3-2. Teplotní cyklus je charakterizován vložením dílu do pece předehřáté na teplotu 400°C. Poté dochází ke zvyšování teploty o 1,7°C.min⁻¹ na teplotu 840°C. Doba výdrže na této teplotě je 30 min. Dveře od pece jsou poté otevřeny a díl je ochlazován.
- Sada č. 4:** Materiál, který prodělal 10 teplotních cyklů dle obr. 3-2.
- Sada č. 5:** Materiál, který prodělal 15 teplotních cyklů dle obr. 3-2.
- Sada č. 6:** Materiál, který prodělal 20 teplotních cyklů dle obr. 3-2.
- Sada č. 7:** Materiál, který prodělal 25 teplotních cyklů dle obr. 3-2.
- Sada č. 8:** Materiál, který prodělal 30 teplotních cyklů dle obr. 3-2.



Obr. 3-1 Teplotní cyklus žhání svařené nádoby



Obr. 3-2 Teplotní cyklus používaný při vypalování jednotlivých vrstev smaltu

S ohledem na cíl diplomové práce byl v rámci experimentu u dodaných plechů sledován vliv teplotních cyklů na chemické složení, mechanické vlastnosti a strukturu. Z každého plechu byly vytvořeny zkušební vzorky pro provedení jednotlivých zkoušek.

3.1 HODNOCENÍ CHEMICKÉHO SLOŽENÍ

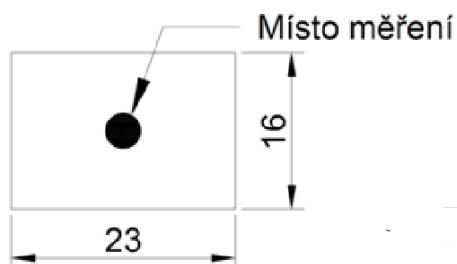
Měření chemického složení bylo provedeno na zařízení Spektrometr Q4 TASMAN, viz obr. 3-3, který umožňuje zkoumat prvkové chemické složení látky na bázi měření vlnové délky světla vzniklého umělou excitací mezi dvěma elektrodami (jiskrový výboj). Jedná se o velmi přesný multi-bázový optický přístroj pracující v ochranné atmosféře argonu. Zařízení je možno vybavit až 10 bázemi / matricemi (Fe, Cu, Al, Ni, Zn, Pb, Sn, Ti, Co a Mg). Pro testované vzorky byla vybrána kalibrace železné báze s označením Fe110, jejíž specifikace je nejbližší oceli P265GH. Pomocí této báze jsou pak dle vlnového rozsahu kalibrovány jednotlivé chemické prvky.



Obr. 3-3 Spektrometr Q4 Tasman

Pro vytvoření jiskry mezi elektrodou a vzorkem je nutné, aby styčná plocha byla rovinná, suchá, bez nečistot a mastnot. Proto je nutné před vlastním měřením chemického složení styčnou plochu, na které dochází k měření vybrousit. V opačném případě dojde ke zkreslení výsledků nebo k vytvoření samotné jiskry nedojde vůbec. Pro vybroušení je nutné použít kotouč na železné vzorky, aby nedošlo ke kontaminaci cizími prvky.

Analýza chemického složení byla provedena u každé dodané sady, resp. plechu, vždy na středu vzorku tvaru hranolu, v rovině tloušťky plechu, viz obr. 3-4. U každého vzorku byla provedena 3 měření a hodnoty byly statisticky zpracovány. Před každým měřením byl měřený povrch přebroušen.



Obr. 3-4 Tvar a rozměr vzorku pro analýzu chemického složení

V tab. 3-1 jsou zaznamenány výsledky měření spolu s obsahem prvků dle normy ČSN EN 10028-2. Výsledky měření jsou zaokrouhleny na počet desetinných míst uvedených v této normě.

Tab. 3-1 Chemické složení jednotlivých sad

Chemické složení (%)									
Prvek	sada 1	sada 2	sada 3	sada 4	sada 5	sada 6	sada 7	sada 8	Norma ČSN EN 10028-2
C	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	≤ 0,20
Si	0,29	0,27	0,27	0,28	0,27	0,26	0,26	0,26	≤ 0,40
Mn	0,95	0,88	0,89	0,90	0,88	0,91	0,91	0,92	0,8 - 1,4
P	0,010	0,007	0,004	0,006	0,003	0,009	0,009	0,009	max 0,025
S	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	max 0,01
N	0,003	0,012	0,012	0,008	0,007	0,003	0,003	0,003	≤ 0,012
Al	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	≥ 0,02
Cu	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	≤ 0,3
Cr	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	≤ 0,3
Ni	0,14	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	≤ 0,3
Nb	0,022	0,017	0,017	0,018	0,017	0,020	0,021	0,020	≤ 0,02
V	0	0	0	0	0	0	0	0	≤ 0,02
Ti	0	0	0	0	0	0	0	0	max 0,03
Mo	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	≤ 0,08
Cr+Cu+Mo+Ni	0,195	0,167	0,167	0,172	0,167	0,169	0,168	0,174	≤ 0,7
B	0	0	0	0	0	0	0	0	0

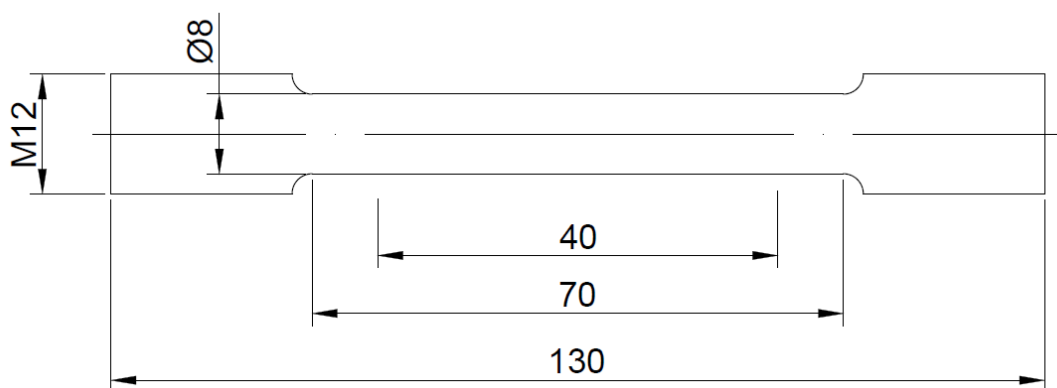
Z naměřených hodnot je patrné, že obsah prvků odpovídá rozsahu prvků uvedených v normě ČSN EN 10028-2. Při porovnání změn obsahu jednotlivých prvků mezi sadami je patrné, že vlivem aplikované teplotní expozice nedochází ke změně obsahu chemického složení.

3.2 PEVNOST V TAHU

Zkouška tahem byla provedena na zkušebním zařízení použitým TIRA test 2300 řízený počítačem, viz obr. 3-5, který slouží k měření mechanických vlastností materiálů při jednoosém namáhání v tahu nebo tlaku. Zkouška v tahu spočívá v deformování zkušebního vzorku o standardizovaných rozměrech daných normou ČSN EN ISO 6892 v trhacím stroji. Zkoušený vzorek je upevněn mezi čelisti a zkouška je ukončena ve chvíli, kdy dojde k jeho přetržení.



Obr. 3-5 Trhací zařízení TIRA test 2300



Obr. 3-6 Zkušební vzorek pro statickou zkoušku tahem

Od sady číslo 1 až 7 byly vyrobeny 3 zkušební vzorky, od sady číslo 8 (nejvyšší počet teplotních cyklů) byly vytvořeny 4 vzorky. Rozměry použitých zkušebních vzorků jsou uvedeny na obr. 3-6.

Naměřené hodnoty dolní meze kluzu R_{el} , horní meze kluzu R_{eh} , meze pevnosti R_m , tažnosti při maximálním zatížení A_g a celkové tažnosti A_5 jsou uvedeny v tabulce 3-2 a 3-3. V těchto tabulkách jsou též uvedeny jejich průměrné hodnoty a směrodatné odchylky. Jejich grafické zpracování je uvedeno na obr. 3-7 a 3-8.

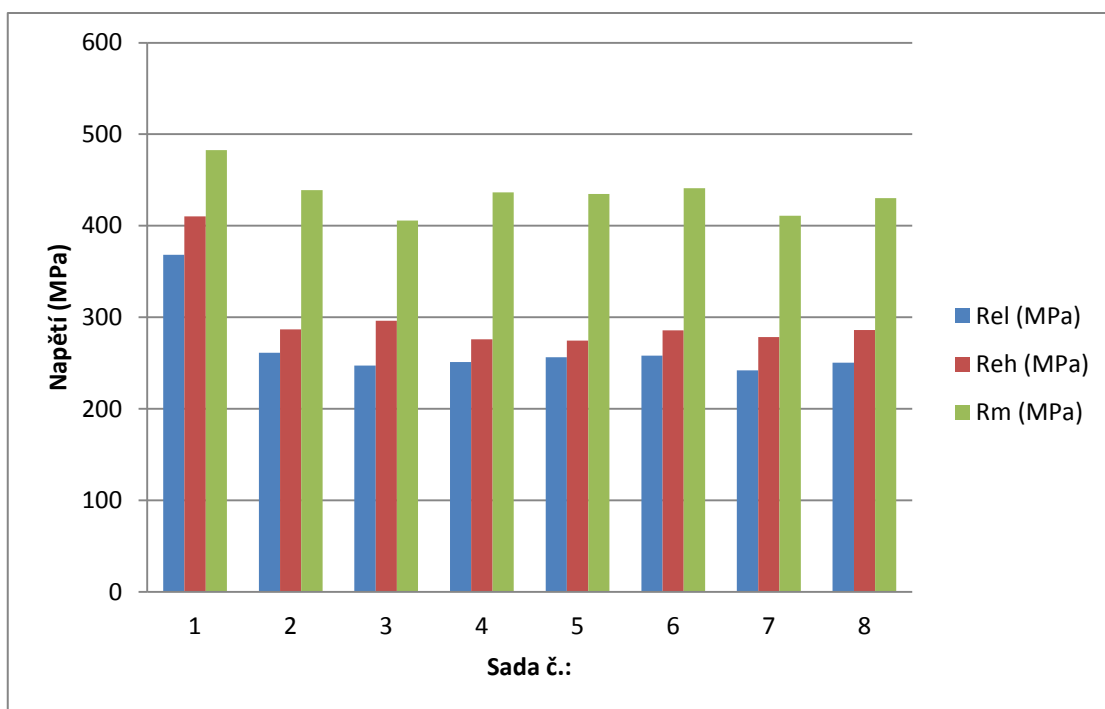
Tabulka 3-2 Naměřené hodnoty Rel, Reh a Rm

Sada č.	Rel (MPa)	Reh (MPa)	Rm (MPa)	Průměrná hodnota Rel (MPa)	Průměrná hodnota Reh (MPa)	Průměrná hodnota Rm (MPa)	Směrodatná odchylka σ pro Rel (MPa)	Směrodatná odchylka σ pro Reh (MPa)	Směrodatná odchylka σ pro Rm (MPa)
1	368,8	431	483	369	408	483	0,4	21,2	0,5
	368,1	389,3	482,7						
	368,6	403,2	483,6						
2	260,7	286,6	439,1	260	285	437	0,6	1,2	2,4
	259,5	284,3	434,4						
	260,2	285,3	437,5						
3	249,1	294,6	428,6	248	297	422	1,2	1,9	12,8
	246,7	298,3	407,3						
	248,1	296,8	430,1						
4	251,8	269,3	437,7	251	275	436	0,7	6,6	1,3
	250,4	282,4	435,3						
	251,3	274,6	435,8						
5	256,3	287,6	435,2	257	272	435	1,0	13,6	0,4
	256,6	261,4	434,4						
	258,1	268	434,8						
6	258,7	295,1	441,3	258	286	441	0,5	9,4	0,7
	257,9	276,4	440,8						
	257,9	285,8	442,1						
7	243,7	269	412,1	242	279	420	1,1	9,5	8,4
	241,7	287,9	419,8						
	241,8	278,9	428,9						
8	252,4	281,2	432,6	250	286	430	2,0	4,3	2,3
	251,9	291,5	430,3						
	249,3	285,1	430,5						
	248,3	287,6	427						

Tabulka 3-3 Naměřené hodnoty Ag a A₅

Sada č.	Ag (%)	A ₅ (%)	Průměrná hodnota Ag (%)	Průměrná hodnota A ₅ (%)	Směrodatná odchylka σ pro Ag (%)	Směrodatná odchylka σ pro A ₅ (%)
1	16,5	31,3	17,2	32	0,8	0,9
	18,1	33				
	17,1	31,8				
2	16,7	33,3	16,8	34,8	0,1	1,4
	16,8	36,1				
	16,9	35,1				
3	19,7	39	19,7	38,7	0,1	0,4
	19,8	38,9				
	19,7	38,2				

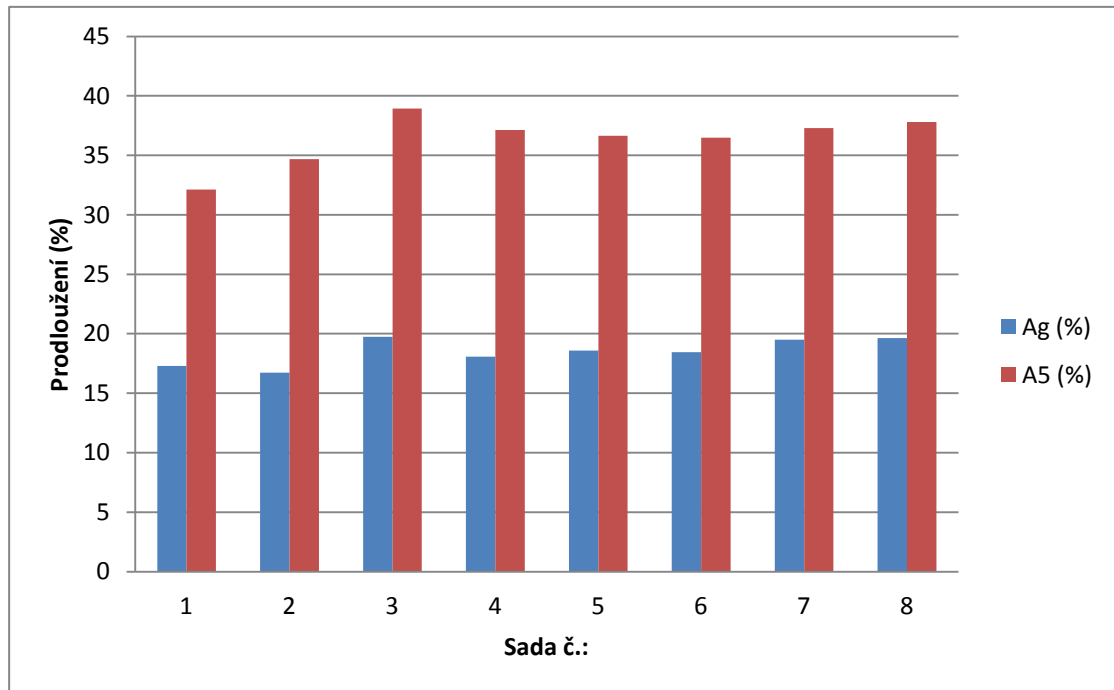
Sada č.	Ag (%)	A ₅ (%)	Průměrná hodnota Ag (%)	Průměrná hodnota A ₅ (%)	Směrodatná odchylka σ pro Ag (%)	Směrodatná odchylka σ pro A ₅ (%)
4	18,2	37,7	18,1	37,1	0,2	0,6
	17,9	36,6				
	18,1	36,9				
5	18,5	35,6	18,6	36,8	0,1	1,1
	18,6	37,7				
	18,6	37,2				
6	19	37,7	18,4	36,3	0,6	1,2
	17,9	35,3				
	18,4	35,9				
7	19,8	37,9	19,6	37,3	0,3	0,6
	19,3	36,7				
	19,6	37,2				
8	19,4	36,6	19,7	37,8	0,6	1,9
	20,6	40,3				
	19,4	36,2				
	19,4	38,1				



Obr. 3-7 Grafické znázornění Rel, Reh a Rm

Dle naměřených hodnot má materiál dodaný od výrobce dolní mez kluzu R_{el} , horní mez kluzu R_{eh} a mez pevnosti R_m nejvyšší. Po žihání nádoby, dochází u tohoto materiálu k poklesu pevnosti z původní hodnoty 483 MPa na 437 MPa. Mez pevnosti se během teplotních cyklů

použitých při resmaltaci pohybuje v rozmezí 431 ± 8 MPa. S poklesem pevnosti, dochází k růstu tažnosti. Po žihání nádoby dochází k růstu z původní hodnoty 32 % na 34,8 % Celková tažnost se během teplotních cyklů použitých při resmaltaci pohybuje v rozmezí $37,3 \pm 0,8$ %.



Obr. 3-8 Grafické znázornění A_g a A_5

3.3 TVRDOST

Tvrdomost byla měřena na tvrdoměr Q30A, viz obr. 3-9, který umožňuje automatické měření a vyhodnocování tvrdosti na předem definovaném místě. Toho bylo využito pro předem naprogramování dráhy prováděných zkoušek.



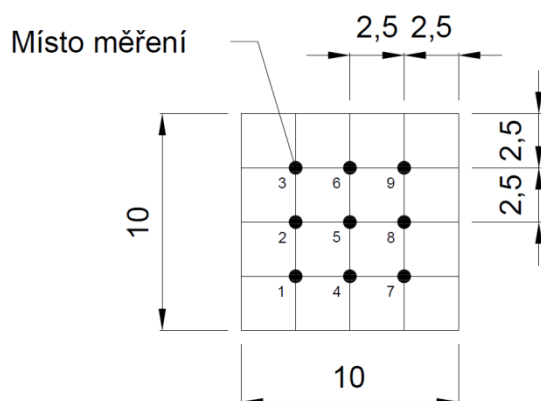
Obr. 3-9 Mikrotvrdoměr Qness

Pro zkoušku tvrdosti byla zvolena zkouška dle Vickerse (ČSN EN ISO 6507). Při této zkoušce dochází k plastické deformaci zkoušeného materiálu se staticky působící silou na

zkušební těleso. Jako indentor se používá pravidelný diamantový čtyřboký jehlan, s vrcholovým úhlem $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Měřítkem tvrdosti materiálu je průměr délky dvou úhlopříček vtisknutého jehlanu [23].

Vlastní zkouška probíhala při zkušebním zatížení 98,07 N, tj. byla použita zkouška HV 10. Hodnota zkušebního zatížení byla volena dle zkušeností v závislosti na daném materiálu.

Tvrdot HV 10 byla měřena na metalografických vzorcích. Na každém vzorku bylo provedeno měření v 9 bodech, rovnoměrně rozložených po celém povrchu. Jejich rozložení je ukázáno na obr. 3-10.

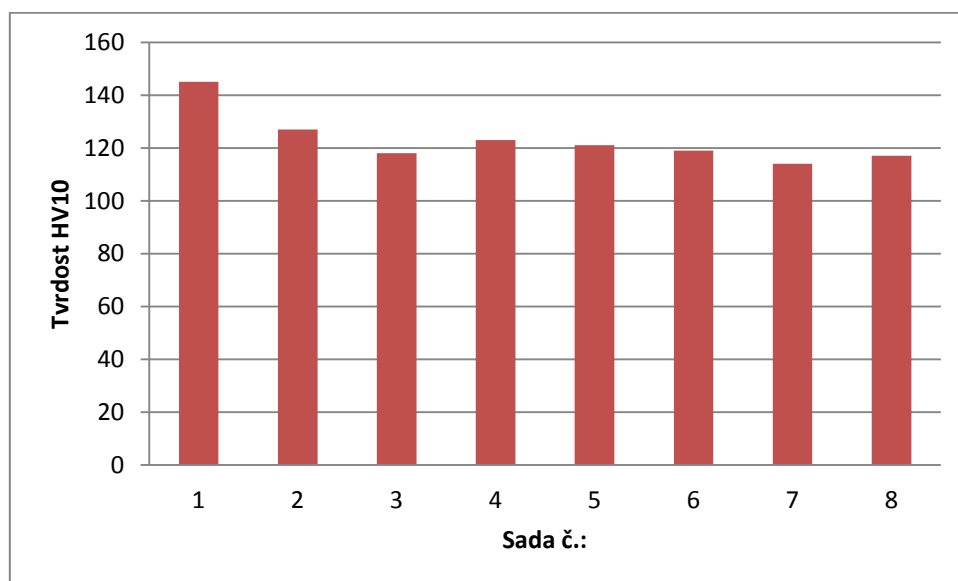


Obr. 3-10 Jednotlivá místa vpichů na vzorku

Naměřené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé sady měření jsou uvedeny v tabulce 3-4 a jejich grafické zpracování na obr. 3-11.

Tabulka 3-4 Naměřené hodnoty tvrdosti HV 10

Místo vpichu na vzorku	Sada č.:							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	143	128	120	123	122	120	114	118
2	143	127	118	124	123	122	111	117
3	145	127	120	125	119	117	111	116
4	145	126	116	122	120	118	117	118
5	147	127	117	124	122	118	115	117
6	144	125	116	121	120	121	113	118
7	146	127	119	121	118	119	116	118
8	145	128	117	123	122	118	114	114
9	144	124	120	122	121	122	111	115
Průměrná hodnota	145	127	118	123	121	119	114	117
Směrodatná odchylka σ	1,3	1,3	1,7	1,4	1,6	1,9	2,2	1,5



Obr. 3-11 Grafické zpracování průběhů tvrdosti

Z obr. 3-11 je patrné, že nejvyšší tvrdost vykazuje materiál, který byl dodán výrobcem. Po žihání nádoby dochází u tohoto materiálu k poklesu tvrdosti z původní hodnoty 145 HV na 127 HV. Pokud následně žiháný materiál vystavíme tepelnému namáhání odpovídající resmaltaci, tvrdost se bude pohybovat v rozmezí 119 ± 3 HV.

3.4 VRUBOVÁ HOUŽEVNATOST

Zkouška rázem v ohybu spočívá v deformování zkušební tyče o standardizovaných rozměrech daných normou ČSN EN 10045-1. Vzorek se ukládá tak, aby vytvořený vrub ležel v rovině kyvu kladiva, v místě dráhy s jeho největší kinetickou energií. Uložen je na dvou podporách.

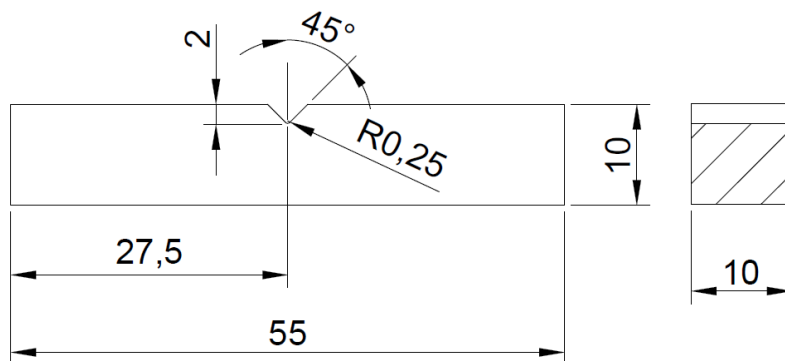
Zkouška byla prováděna na Charpyho kladivu, viz obr. 3-12. Maximální práci, kterou je kladivo schopno pohltit je 300 J.

Zkouška probíhala jednak při teplotě okolí ($23 \pm 5^\circ\text{C}$), tak teplotě -30°C . Záporné teploty vzorků bylo dosaženo v mrazicím boxu. Interval mezi vyjmutím vzorku z mrazicího boxu a provedením zkoušky nepřesahovala 5s.

Vrubová houževnatost, resp. absorbované energie byla hodnocena na 6 vzorcích od každé sady, vždy 3 pro každou teplotu. Zkušební tělesem byl hranol s V vrubem a s rozměry dle normy ČSN EN 10045-1, viz obr. 3-13.



Obr. 3-12 Charpyho kladivo – 300 J



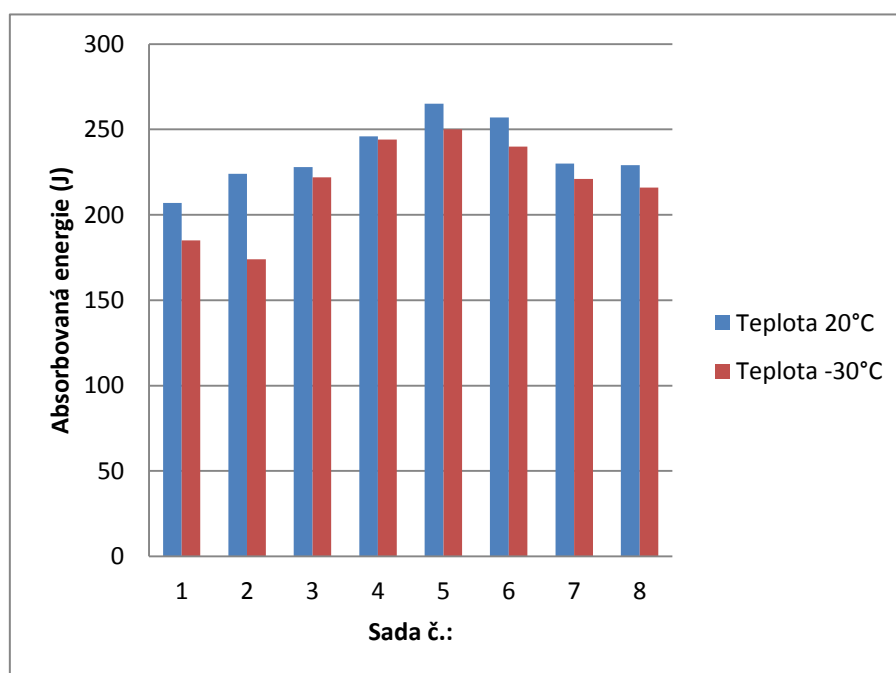
Obr. 3-13 Těleso pro zkoušku rázem v ohybu

Naměřené hodnoty absorbované energie KV jsou uvedeny v tabulce 3-5 a jejich grafické zpracování na obr. 3-14. Vrubová houževnatost KCV je dána poměrem této energie a plochy nejmenšího průřezu zkušební vzorku.

Tabulka 3-5 Naměřené hodnoty zkoušky rázem v ohybu

Sada č.	vzorek č.	Teplota 20 °C				Teplota -30°C			
		KV (J)	KCV (J/cm ²)	Průměrná hodnota KV (J)	Směrodatná odchylka σ (J)	KV (J)	KCV (J/cm ²)	Průměrná hodnota KV (J)	Směrodatná odchylka σ (J)
1	1	203	253,8	207	15	194	242,5	185	12,1
	2	224	280			189	236,3		
	3	195	243,8			171	213,8		

Sada č.	vzorek č.	Teplota 20 °C				Teplota -30°C			
		KV (J)	KCV (J/cm ²)	Průměrná hodnota KV (J)	Směrodatná odchylka σ (J)	KV (J)	KCV (J/cm ²)	Průměrná hodnota KV (J)	Směrodatná odchylka σ (J)
2	1	213	266,3	224	11,5	177	221,3	174	4,9
	2	236	295			176	220		
	3	224	280			168	210		
3	1	235	293,9	228	8,9	244	304,4	222	20,4
	2	231	288,8			217	271,3		
	3	218	272,5			204	255		
4	1	258	322,5	246	10,4	233	290,6	244	15,5
	2	243	303,8			238	297,5		
	3	238	297,5			262	327,5		
5	1	274	342,5	265	7,8	267	333,8	251	14,6
	2	259	323,8			246	307,5		
	3	263	328,8			239	298,8		
6	1	246	307,5	257	11,5	229	286,3	240	9,8
	2	256	320			248	310		
	3	269	336,3			243	303,8		
7	1	241	301,3	230	12,1	233	290,8	221	19,9
	2	217	271,3			232	290		
	3	232	290			198	247,5		
8	1	233	290,6	229	2,7	211	263,8	216	20
	2	229	285,6			199	248,8		
	3	227	284,1			238	297,5		



Obr. 3-14 Grafické zpracování průběhů absorbované energie

U tohoto materiálu dochází po žhání nádoby, u vzorků testovaných při teplotě 20°C, k růstu absorbované energie. Z původní hodnoty materiálu 207 J vzrostla po žhání na 224 J. Absorbovaná energie se během teplotních cyklů použitých při resmaltaci pohybuje v rozmezí 243 ± 16 J. U vzorků testovaných při teplotě -30°C se absorbovaná energie pohybuje v rozmezí 232 ± 15 J.

3.5 METALOGRAFIE

Struktura jednotlivých vzorků byla pozorována na optickém mikroskopu Olympus DSX 500, viz obr. 3-15. Vzorek pro metalografické hodnocení byl odebrán ze vzorků po zkoušce rázem v ohybu na rozbrušovací kotoučové pile Delta AbrasiMet.



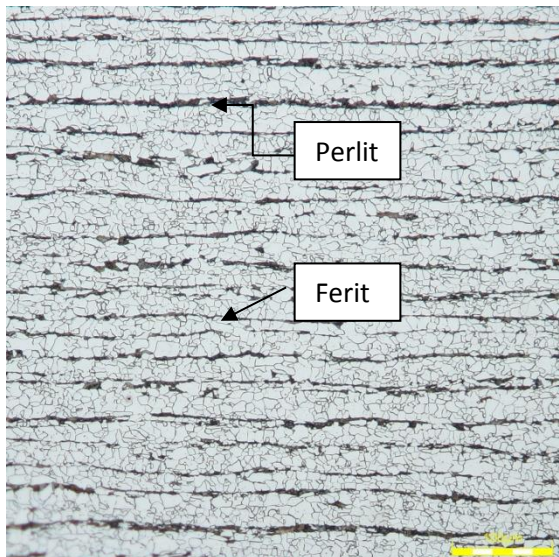
Obr. 3-15 Mikroskop Olympus DSX 500

Vzorky pro pozorování na optickém mikroskopu byly připraveny běžným metalografickým postupem. Po nařezání byly vzorky zality do formiček o průměru 30 mm pomocí hmoty Dentacryl. Po vytvrzení hmoty byl metalografický vzorek broušen a leštěn na poloautomatickém zařízení PHOENIX 400, viz obr. 3-17. Byly použity brusné papíry s označením drsnosti 120, 240, 400, 600 a 800. Pro leštění bylo použito smáčedlo pro diamantové suspenze Metadi fluid a diamantová suspenze se zrnky o velikosti 3 μ m. Pro zvýraznění struktury bylo použito leptadlo 3% Nital, což je roztok kyseliny dusičné v ethylalkoholu.

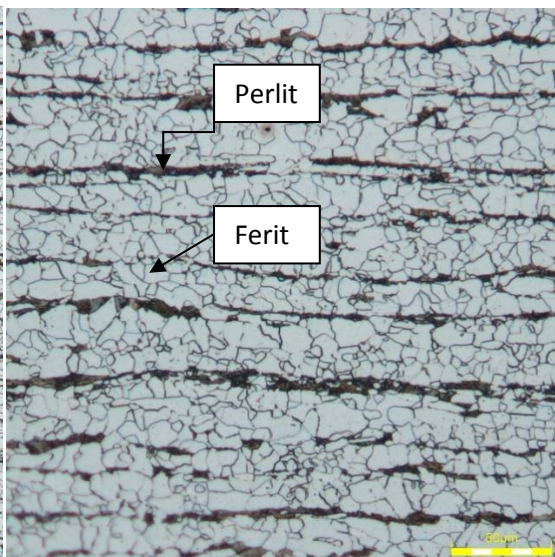


*Obr. 3-16 Rozbrušovací kotoučové pila Obr. 3-17 Bruska a leštička
Delta AbrasiMet PHOENIX 400*

Na níže uvedených obrázcích 3-18 až 3-33 jsou uvedeny struktury vzorků jednotlivých sledovaných sad. Pro názornost jsou uvedeny při 500x a 1000x násobném zvětšení.



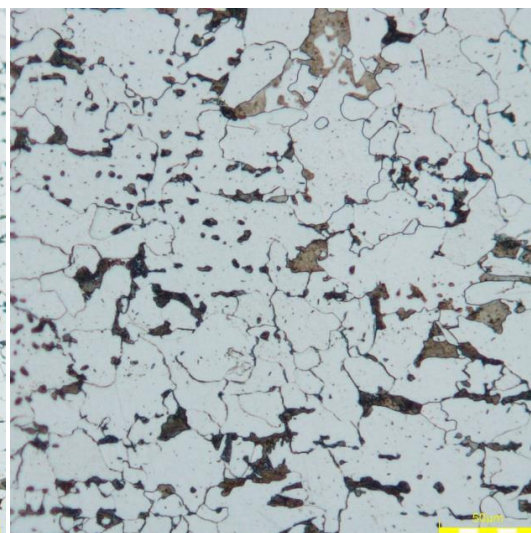
Obr. 3-18 Sada č. 1: Zvětšeno 500x



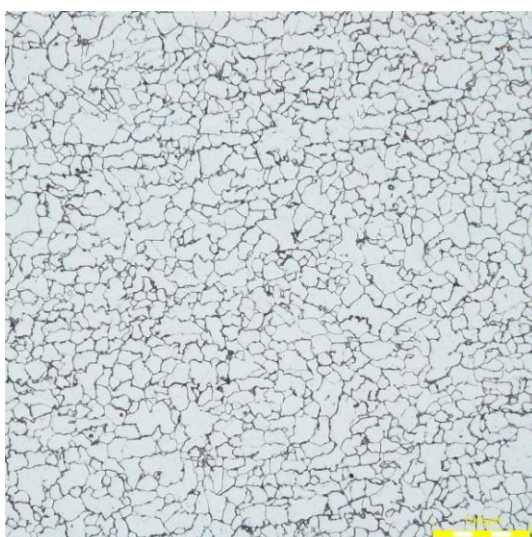
Obr. 3-19 Sada č. 1: Zvětšeno 1000x



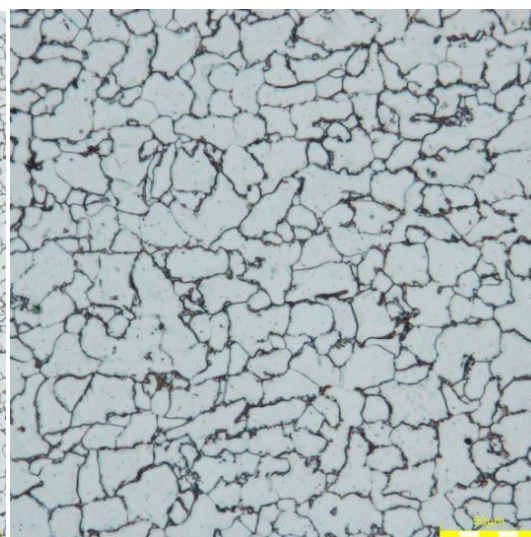
Obr. 3-20 Sada č. 2: Zvětšeno 500x



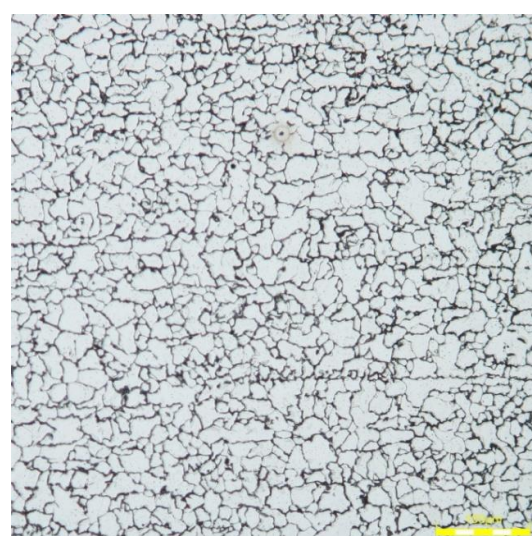
Obr. 3-21 Sada č. 2: Zvětšeno 1000x



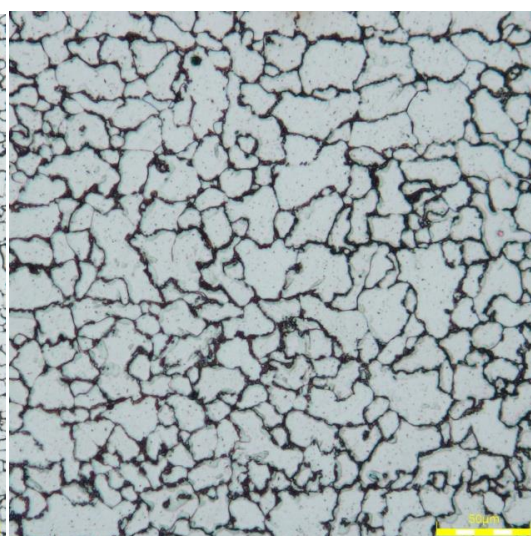
Obr. 3-22 Sada č. 3: Zvětšeno 500x



Obr. 3-23 Sada č. 3: Zvětšeno 1000x



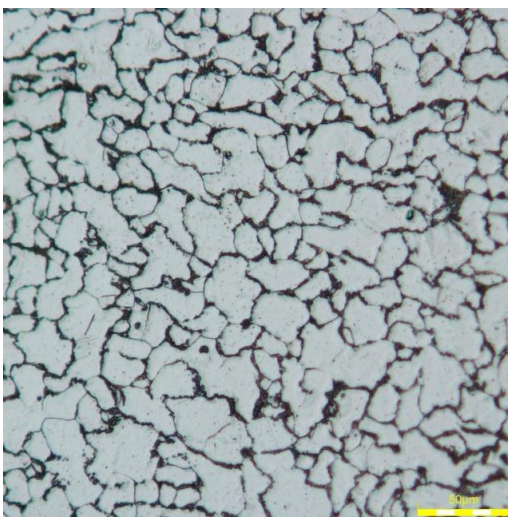
Obr. 3-24 Sada č. 4: Zvětšeno 500x



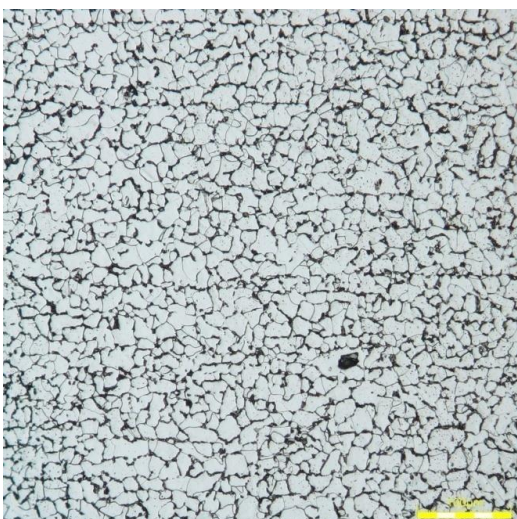
Obr. 3-25 Sada č. 4: Zvětšeno 1000x



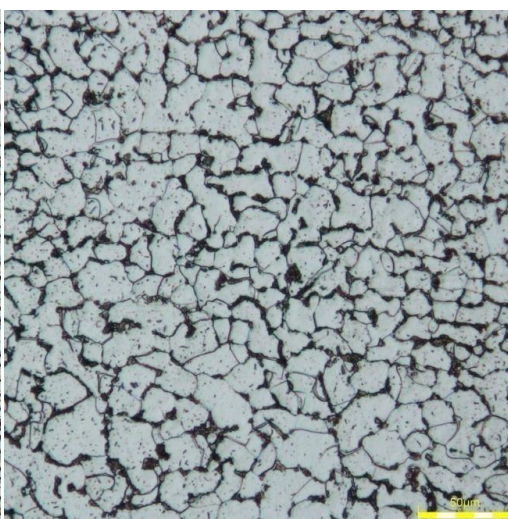
Obr. 3-26 Sada č. 5: Zvětšeno 500x



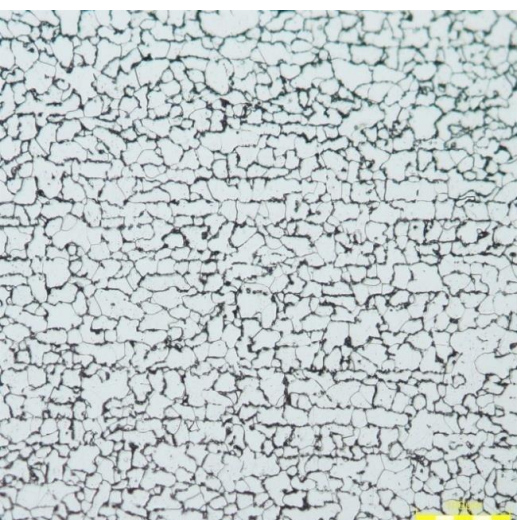
Obr. 3-27 Sada č. 5: Zvětšeno 1000x



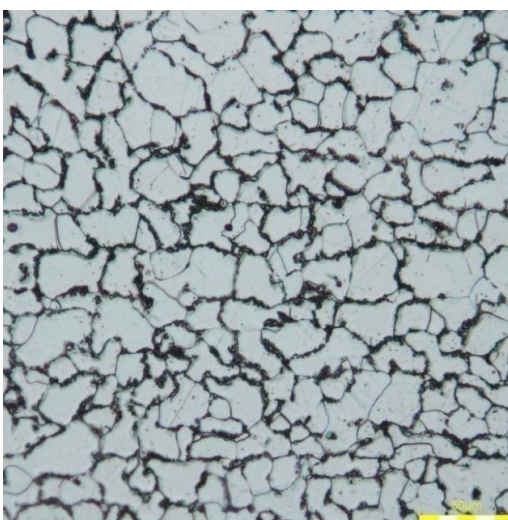
Obr. 3-28 Sada č. 6: Zvětšeno 500x



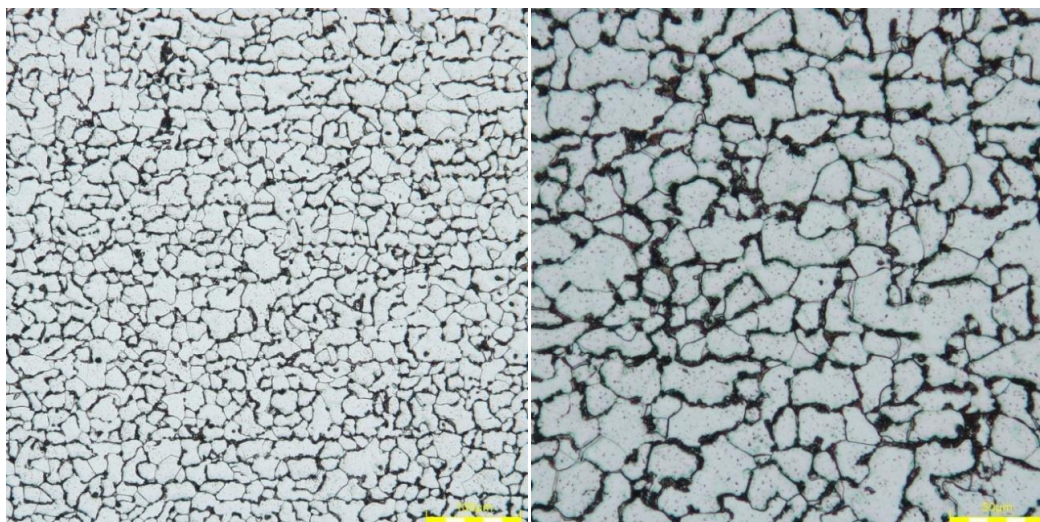
Obr. 3-29 Sada č. 6: Zvětšeno 1000x



Obr. 3-30 Sada č. 7: Zvětšeno 500x



Obr. 3-31 Sada č. 7: Zvětšeno 1000x



Obr. 3-32 Sada č. 8: Zvětšeno 500x Obr. 3-33 Sada č. 8: Zvětšeno 1000x

Při sledování měnící se podeutektické struktury materiálu, je u první sady pozorována hrubá, řádkovitá struktura složená z feritu a perlitu. Po žíhání do oblasti austenitu dle obr. 3-1 (žíhání nádoby) se tato struktura během následného ochlazování rozpadá na rovnoměrnou, jemnozrnnou směs feritu a perlitu s místy řádkovitou strukturou. Při vystavení dalším teplotním cyklům dle obr. 3-2 (vypalování smaltu), dojde k ustálení velikosti zrn a v objemu zůstávají rovnoměrně rozložena.

4 DISKUZE

Při chemickém rozboru testovaných vzorků došlo k potvrzení faktu, že se jedná o podeutektoidní, nelegovanou, nízkouhlíkovou ocel P265GH s obsahem uhlíku menším než 0,2%. Co se týče ovlivnění obsahu prvků během expozice při tepelném namáhání při opakovaném smaltování, nejsou pozorovány žádné změny. Obsah chemických prvků zůstává beze změn. Maximální teplota používaná při žihání nádoby je 930°C, což je teplota, která je nedostatečná pro změnu obsahu chemických prvků.

Při vyhodnocení zkoušky tahem je nejdůležitější hodnotou mez kluzu, kdy dochází k plastické deformaci. Tato hodnota se používá pro výpočet dovoleného namáhání pro provozní podmínky tlakových nádob. Materiál vykazuje dle protokolu z tahových zkoušek výraznou mez kluzu s horní a dolní hodnotou charakteristickou pro měkké materiály s nízkým obsahem uhlíku.

Dle normy ČSN EN 10028-2 má sledovaná ocel pro tloušťky 16 mm mez pevnosti 410 - 530 MPa a horní mez kluzu 265 MPa. Materiál dodaný výrobcem obě tyto hodnoty splňuje. Po žihání materiálu se meze kluzu a meze pevnosti sníží. Z původní hodnoty horní meze kluzu 408 MPa dojde k poklesu o 123 MPa na hodnotu 285 MPa, což je pokles o cca 30%. Mez pevnosti klesne z původních 483 MPa na 437 MPa, což je pokles o cca 10%. Průměrná hodnota meze pevnosti pro teplotní cykly použité při resmaltaci činí 431 ± 8 MPa a pro horní mez kluzu 283 ± 9 MPa. Obě tyto hodnoty splňují normu a je zřejmé, že tepelné zatížení charakteristické pro resmaltaci neovlivňuje mez pevnosti a horní mez kluzu.

V důsledku snížení mezí kluzu a pevností dochází ke změknutí původního materiálu. Celková tažnost se po žihání nádoby zvýší o 8 %, z 32 % na 34,8 %. Během opakovaného vystavení teplotním cyklům použitým při resmaltaci je průměrná hodnota celkové tažnosti $37,3 \pm 0,8$ %. Oproti původnímu materiálu je to nárůst o cca 14,4 % a proti žíhanému materiálu nárůst o cca 6,1 %. Dle normy ČSN EN 10028-2 musí být tažnost min. 22 %, což materiál ve všech případech teplotního zatěžování splňuje. Teplotní zatěžování použité při resmaltaci neovlivňuje celkovou tažnost materiálu.

Nejvyšší tvrdost ze všech měřených vzorků, 145 HV, vykazuje materiál dodaný od výrobce. Následné žihání snižuje tuto tvrdost na 127 HV. Během rostoucího počtu teplotních cyklů charakteristických pro resmaltaci zůstává tvrdost konstantní a její průměrná hodnota se pohybuje v hodnotách žíhaného materiálu 119 ± 3 HV. Jedná se o pokles vůči původnímu materiálu o cca 18 %, oproti žíhanému materiálu o cca 6 %.

Dodaná ocel P265GH má přechodovou teplotu -32°C , proto měly při provádění zkoušek všechny vzorky pouze houževnatý lom, jenž se projevuje větší energetickou náročností a plastickou deformací.

Vývoj absorbované energie pro teplotu -30°C kopíruje absorbovanou energii pro teplotu okolí, s tím rozdílem, že celková práce potřebná pro přeražení vzorků, je pro teplotu -30°C menší. Po žihání u vzorků za teploty zkoušení 20°C , absorbovaná energie vzrostla u původního materiálu z 207 J na 224 J, což je nárůst o cca 8 %. Při vzrůstajícím počtu teplotních cyklů použitých při resmaltování absorbovaná energie vzrostla na průměrnou hodnotu 243 ± 16 J. Rozdíl mezi žihaným materiálem a průměrnou hodnotou absorbované energie je cca 8%. U zkoušek při teplotě -30°C došlo během teplotních cyklů k nárůstu absorbované energie, oproti materiálu od výrobce o 25 %. Průměrná hodnota vzorků vystavených teplotám používaných při resmaltaci činí 232 ± 15 J. Dle normy ČSN EN 10028-2 má ocel P265GH minimální absorbovanou energii pro teplotu 20°C 40 J a pro -20°C 27 J. V obou případech jsou výsledné hodnoty několikanásobně překročeny. Resmaltace neovlivňuje vrubovou houževnatost.

Jak již bylo zmíněno, jedná se o podeutektickou ocel charakteristickou směsí perlitu a feritu. Při teplotách použitých při resmaltaci dochází během prvních 5 cyklů k ustalování této jemné struktury. Místy jsou pozorovány zbytky řádkovité struktury. Při dalších cyklech mizí a struktura ani velikost zrn feritu a perlitu se mění.

Z experimentální části této práce je zřejmé, že opakovaná resmaltace neovlivňuje obsah chemických prvků, pevnost v tahu, tvrdost, vrubovou houževnatost a metalografii.

5 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo zjistit míru vlivu teplotních cyklů, kterým je materiál P265GH vystaven během smaltování, popř. při resmaltaci, na jeho strukturu a mechanické vlastnosti.

Teoretická část této práce je věnována složení smaltu, jeho vlastnostem, způsobu výroby smaltovaných povrchů. Hlavní pozornost je zaměřena na materiály, které jsou pro smaltování vhodné, zejména na rozbor oceli P265GH, která byla hodnocena v rámci experimentu. Samostatná kapitola je potom věnována studiu vlivu expozice materiálu vysokým teplotám na jeho vlastnosti.

Experimentální část práce byla provedena ve spolupráci s firmou TENEZ a.s. V rámci experimentu byl sledován vliv počtu teplotních cyklů na chemické složení materiálu, pevnost v tahu, tvrdost a vrubovou houževnatost při 20°C a při -30°C. Dále byl sledován jejich vliv na metalografickou strukturu.

Teploty, při kterých probíhá smaltování a resmaltace jsou příliš nízké na to, aby v materiálu došlo ke změně chemického složení. Obsahy prvků materiálu vystaveného teplotním cyklům používaných při resmaltaci jsou totožné.

Pevnost v tahu materiálu je po žíhání 437 MPa. Během teplotní expozice při resmaltaci pevnost klesne na průměrných 431 ± 8 MPa. Mohu tedy opět říct, že teploty charakteristické pro resmaltaci neovlivňují pevnost v tahu.

Tvrdost vykazuje podobný průběh hodnot, jako v předešlém případě. Skokový pokles tvrdosti se odehrál po žíhání původního materiálu. Z původních 145 HV materiál snížil svou tvrdost na 127 HV. Tvrdost tedy klesla o cca 12%. Průměrná hodnota tvrdosti je během teplotních cyklů při resmaltaci 119 ± 3 HV. Také v tomto případě při opakovaném vystavení materiálu teplotnímu zatížení odpovídající resmaltaci nedošlo k ovlivnění.

Při zkouškách vrubové houževnatosti prováděných při teplotě okolí (20°C) je průměrná hodnota absorbované energie u vzorků vystavených teplotám používaných při resmaltaci 243 ± 16 J. Oproti tomu je absorbovaná energie žíhaného materiálu 224 J. Ani při této zkoušce nebylo zjištěno ovlivnění teplotní expozicí při resmaltaci. Zajímavé by bylo sledovat změnu vrubové houževnatosti za teploty nižší než -32°C, kdy se mění houževnatý lom na křehký.

Po žíhání se struktura během ochlazování rozpadá na rovnoměrnou, jemnozrnnou směs feritu a perlitu s místy řádkovitou strukturou. Při vystavení teplotám používaných při resmaltaci, dojde k ustálení velikosti zrn a v objemu zůstávají rovnoměrně rozložena.

Na základě těchto výsledků může společnost TENEZ a.s. garantovat svým zákazníkům, že materiál P265GH vystavený 27 teplotním cyklům používaným při resmaltaci nemění obsah chemických prvků, pevnost v tahu, tvrdost, vrubovou houževnatost a metalografii.

Ve výsledku se dá říci, že tepelná expozice během několikanásobné resmaltace neovlivňuje metalografickou strukturu a mechanické vlastnosti. Ovlivňuje je žíhání, které předchází smaltování.

Vzhledem k tomu, že k výraznější degradaci materiálu dochází v procesu svařování, bude další fáze výzkumu zaměřena na hodnocení vlastností svarových spojů tlakových nádob.

Tato diplomová práce byla vypracována s podporou projektu SGS 21122, poskytnutého Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

6 LITERATURA

- [1] PODJUKLOVÁ, Jitka. *Studium vlastností systému kov – sklovitý smaltový povlak*, VŠB TU Ostrava 2000.
- [2] Dostupné z: <http://www.porcelainenamel.com/> [cit. 21. březen 2016]
- [3] PODJUKLOVÁ, Jitka, *Speciální technologie povrchových úprav 1*, Ostrava 1997
- [4] BOUŠE, Václav, KRAJINA Antonín, MORAVČÍK Alfons, *Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně*, Praha: SNTL 1986
- [5] KREJČÍK, Vladimír, *Povrchová úprava kovu 1*, Praha 1987
- [6] Dostupné z: http://www.ganoksin.com/borisat/nenam/gom-metals_for_enameling.htm [cit. 8. březen 2016].
- [7] TROJÁNEK, František, *Příručka pro povrchové úpravy*, Praha: SNTL 1964
- [8] MOHYLA, Miroslav, *Technologie povrchových úprav kovů*, Ostrava: SNTL 1995
- [9] MURCINA, Leopold, *Studium vlivu vstupních surovin na křehkolomové vlastnosti sklovitého smaltového povlaku*, Ostrava: 2009
Dostupné z: http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/71407/MUR068_FS_N2301_2303T002_2009.pdf.txt;jsessionid=E3D9AFB0BB4B7F58CFAD6F5BBCBF7CC9?sequence=4 [cit. 1. září 2015]
- [10] PLUHAŘ J., KORYTA J., *Strojírenské materiály*, Praha: SNTL, 1977
- [11] JECH, Jaroslav. *Tepelné zpracování oceli, Metalografická příručka. 4. vyd.* Praha 1: SNTL, 1983.
- [12] PACAL, Bohumil a Pavel DOLEŽAL, *Struktura a vlastnosti slitin metastabilní soustavy železo - karbid železa*, Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/svms/index.htm>. [cit. 6. června 2015]
- [13] Dostupné z: <http://www.pdms.cz/news/p235gh-tepelne-odolna-ocel-pro-tlakove-nadoby/> [cit. 11. října 2015].
- [14] Československé závody lehkého kovoprůmyslu, *Technika smaltování*, Praha: 1950
- [15] ČSN EN 10028-2, *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely - Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*, Česka technická norma 2010. Třídící znak: 420937.
- [16] ČSN EN 10027-1, *Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek ocelí*, Česka technická norma 2006. Třídící znak: 420011.
- [17] MACHEK, Václav, *Kovové materiály 1*, Praha: Nakladatelství ČVUT 2013
- [18] MACHEK, Václav, *Speciální kovové materiály*, Praha: Nakladatelství ČVUT 2010

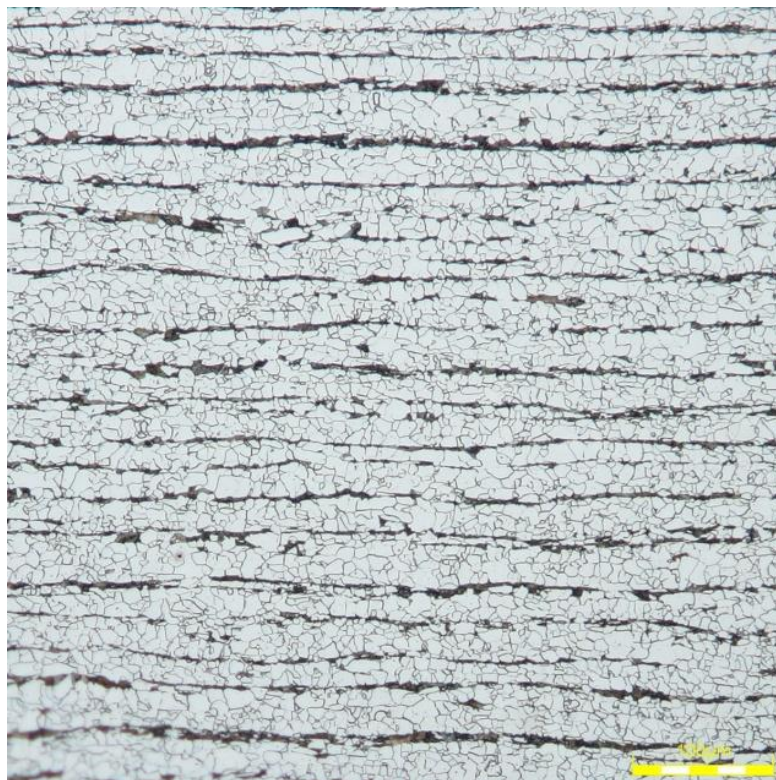
- [19] KADEŘÁVEK, František, *Základy strojírenství*, Praha: SNTL, 1956
- [20] ČSN EN 10028-1+A, *Ploché výrobky z oceli pro tlakové účely - Část 1: Všeobecné požadavky*, Česka technická norma 2009. Třídící znak: 420937.
- [21] Dostupné z: <http://www.tlakinfo.cz/t.py?t=2&i=1293> , [cit. 13. října 2015].
- [22] ČSN 69 0010-3.1 *Tlakové nádoby stabilní - Technická pravidla - Část 3.1: Materiál*, Technická norma 1996. Třídící znak: 690010.
- [23] Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27918
[cit. 13. prosince 2015]
- [24] Dostupní z https://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%BD%C3%ADh%C3%A1n%C3%AD_
[cit. 21. prosince 2015]
- [25] JECH, Jaroslav, *Tepelné zpracování oceli*, Praha: SNTL, 1969
- [26] VOJTĚCH, Dalibor, *Kovové materiály*, Praha: 2006
- [27] Dostupní z
http://www.spssvsetin.cz/index_htm_files/dumy/19/VY_32_INOVACE_19_04.pdf
[cit. 3 .leden 2016]
- [28] Dostupné z http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_03/papers/51.pdf
[cit. 9. leden 2016]
- [29] Dostupné z <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/hodnocen%C3%AD.pdf>
[cit. 9. leden 2016]
- [30] Dostupné z http://konsys-t.tanger.cz/files/proceedings/metal_07/Lists/Papers/149.pdf
[cit. 13. duben 2016]
- [31] PEŠINA, Jan. *Historie vývoje žáruvzdorných oceli a superslitin*, Brno 2012

Přílohy

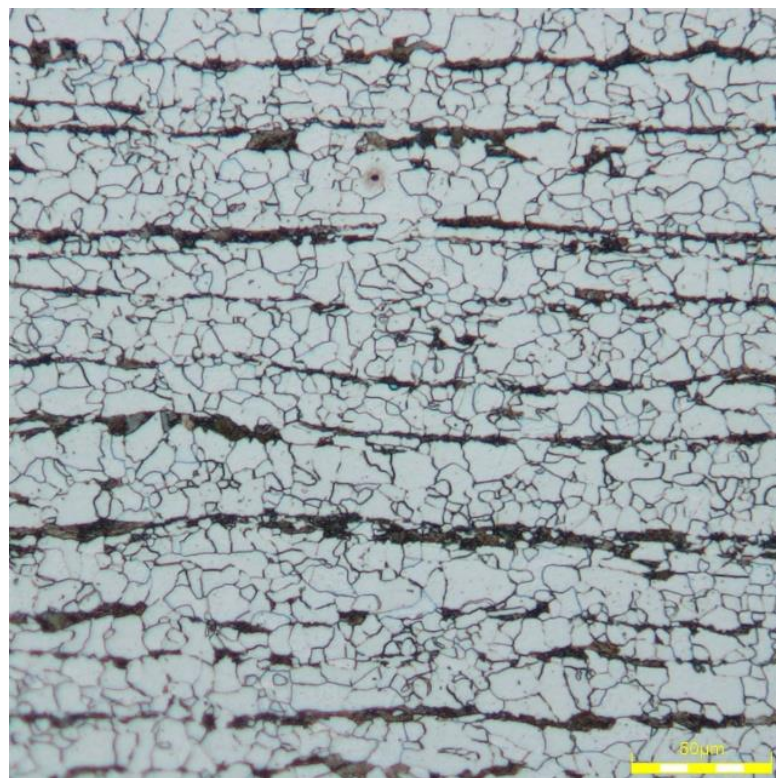
7 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 1)
Příloha č. 2	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 1)
Příloha č. 3	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 2)
Příloha č. 4	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 2)
Příloha č. 5	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 3)
Příloha č. 6	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 3)
Příloha č. 7	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 4)
Příloha č. 8	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 4)
Příloha č. 9	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 5)
Příloha č. 10	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 5)
Příloha č. 11	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 6)
Příloha č. 12	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 6)
Příloha č. 13	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 7)
Příloha č. 14	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 7)
Příloha č. 15	Metalografie - zvětšeno 500x (sada č. 8)
Příloha č. 16	Metalografie - zvětšeno 1000x (sada č. 8)

Příloha č. 1: Ukázka struktury - Sada č. 1 - zvětšeno 500x



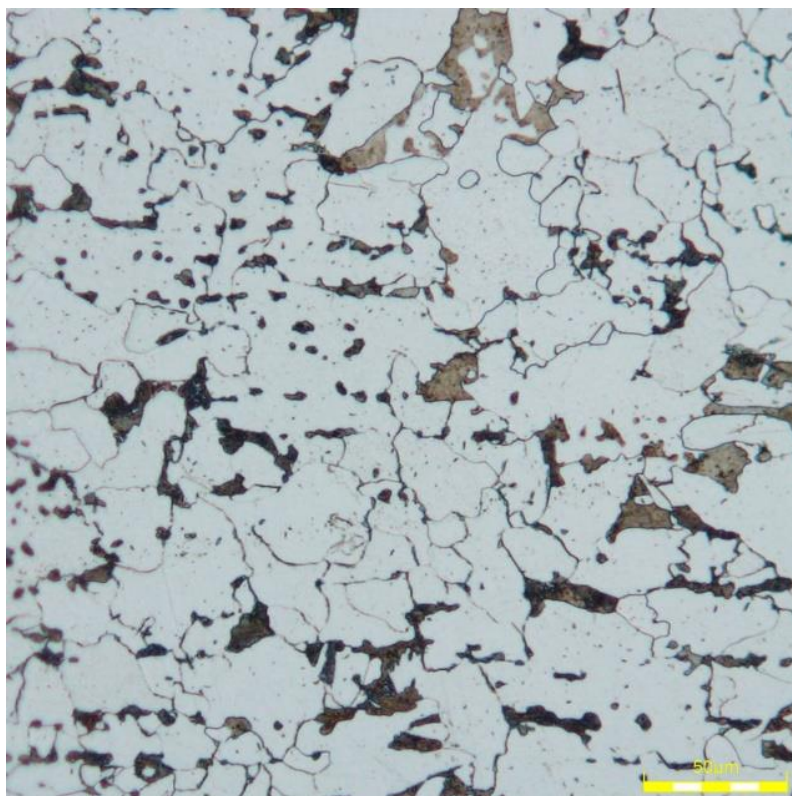
Příloha č. 2: Ukázka struktury - Sada č. 1 - zvětšeno 1000x



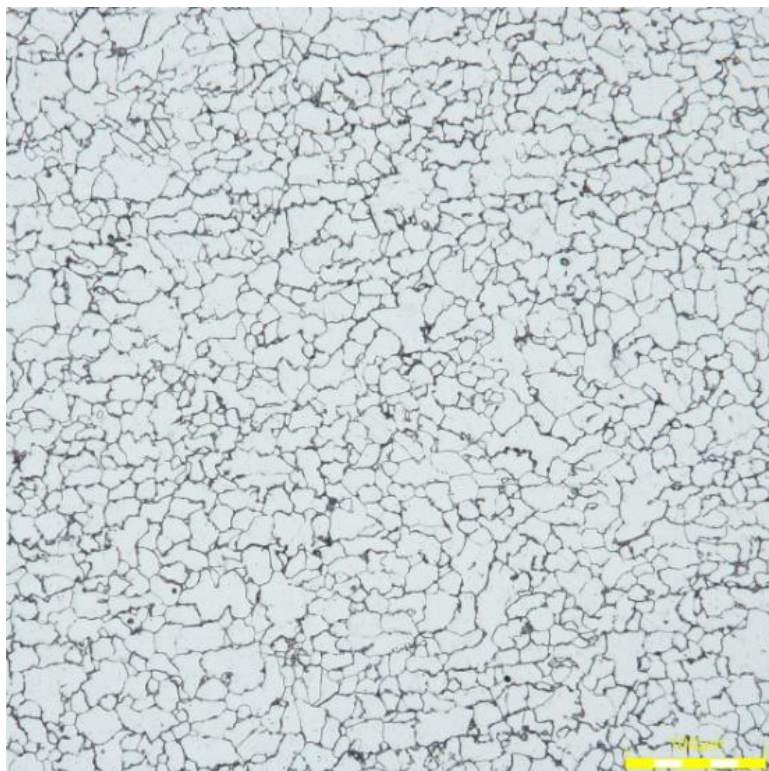
Příloha č. 3: Ukázka struktury - Sada č. 2 - zvětšeno 500x



Příloha č. 4: Ukázka struktury - Sada č. 2 - zvětšeno 1000x



Příloha č. 5: Ukázka struktury - Sada č. 3 - zvětšeno 500x



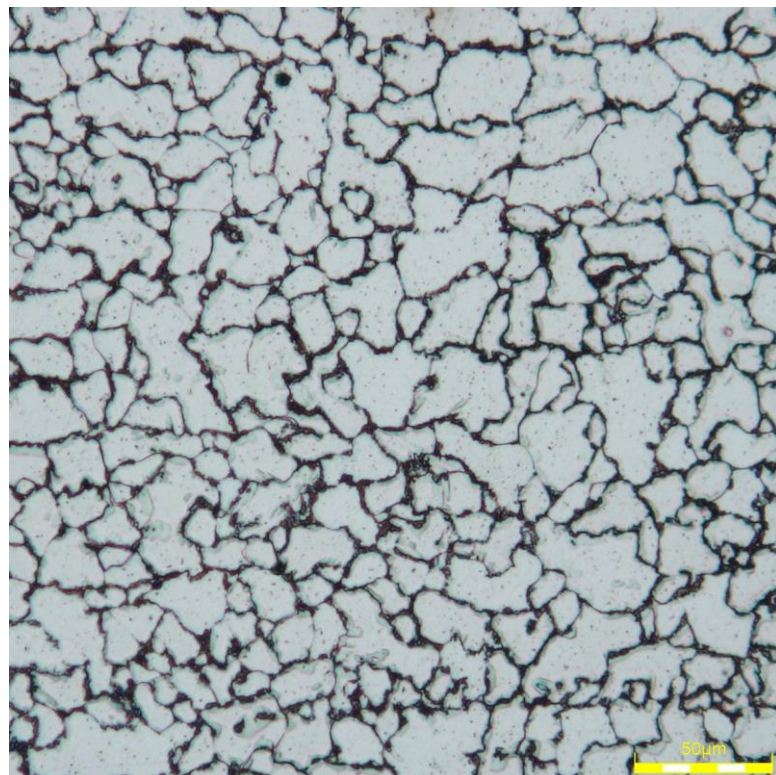
Příloha č. 6: Ukázka struktury - Sada č. 3 - zvětšeno 1000x



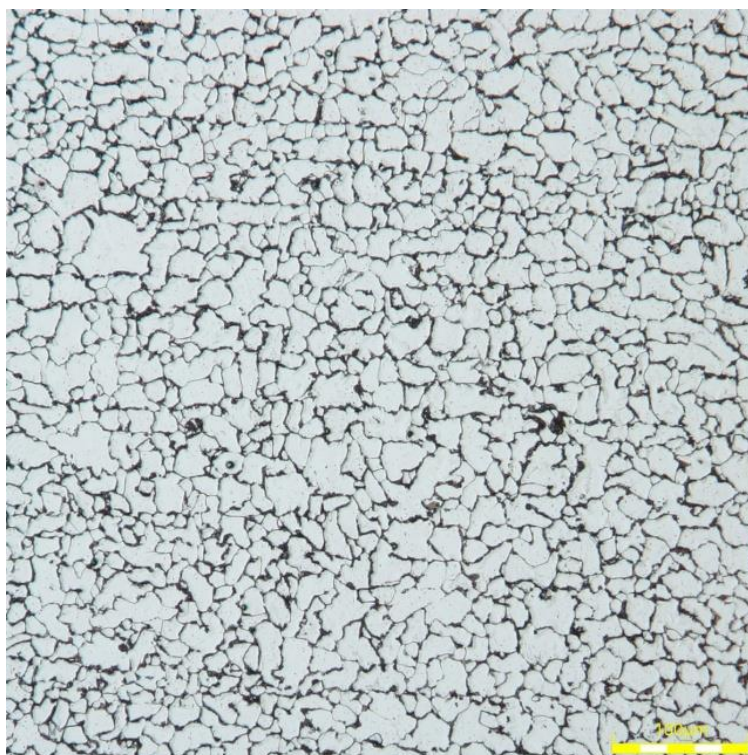
Příloha č. 7: Ukázka struktury - Sada č. 4 - zvětšeno 500x



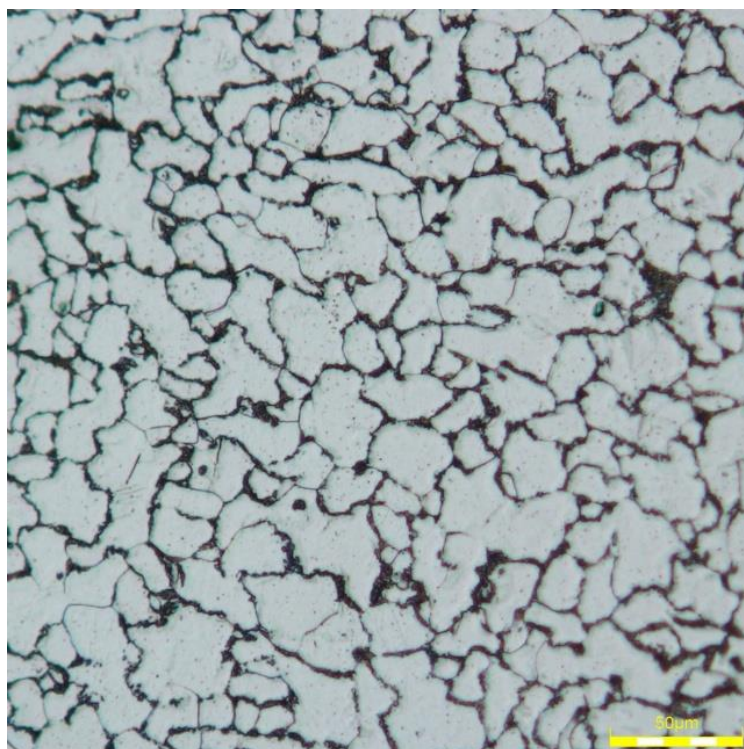
Příloha č. 8: Ukázka struktury - Sada č. 4 - zvětšeno 1000x



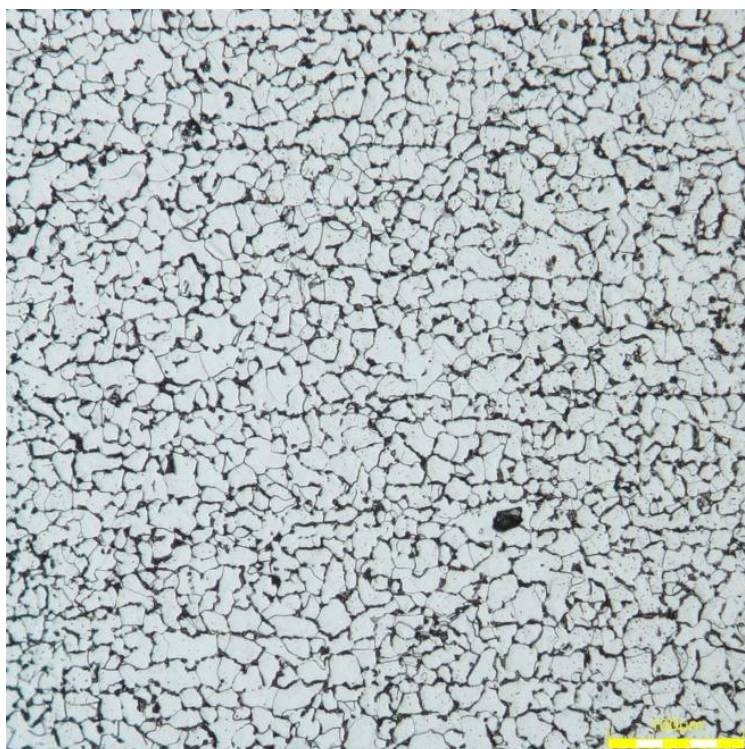
Příloha č. 9: Ukázka struktury - Sada č. 5 - zvětšeno 500x



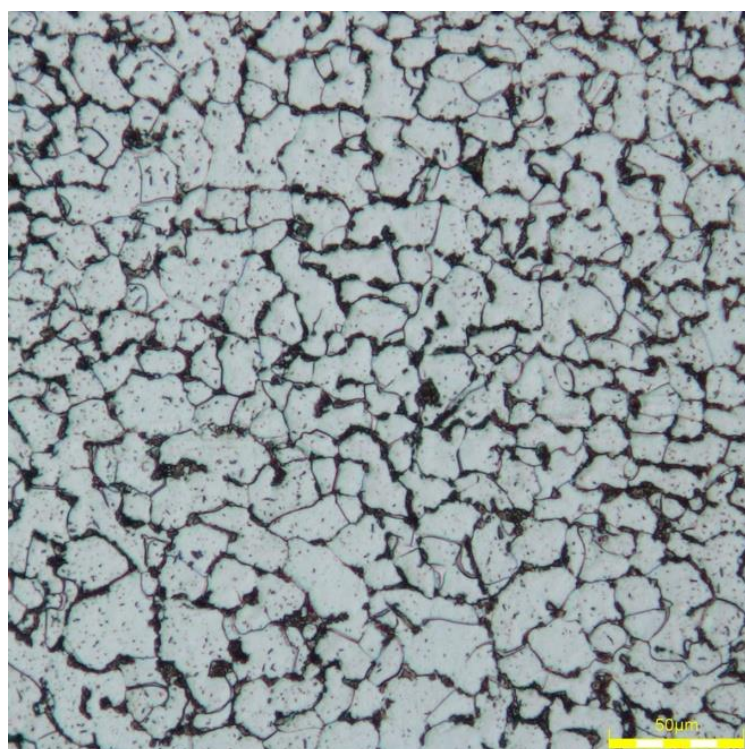
Příloha č. 10: Ukázka struktury - Sada č. 5 - zvětšeno 1000x



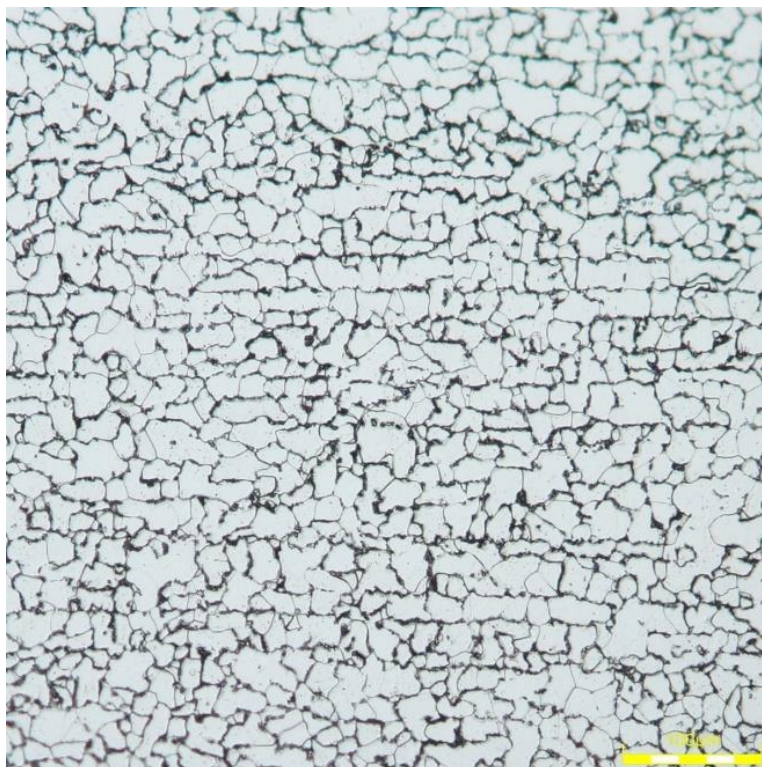
Příloha č. 11: Ukázka struktury - Sada č. 6 - zvětšeno 500x



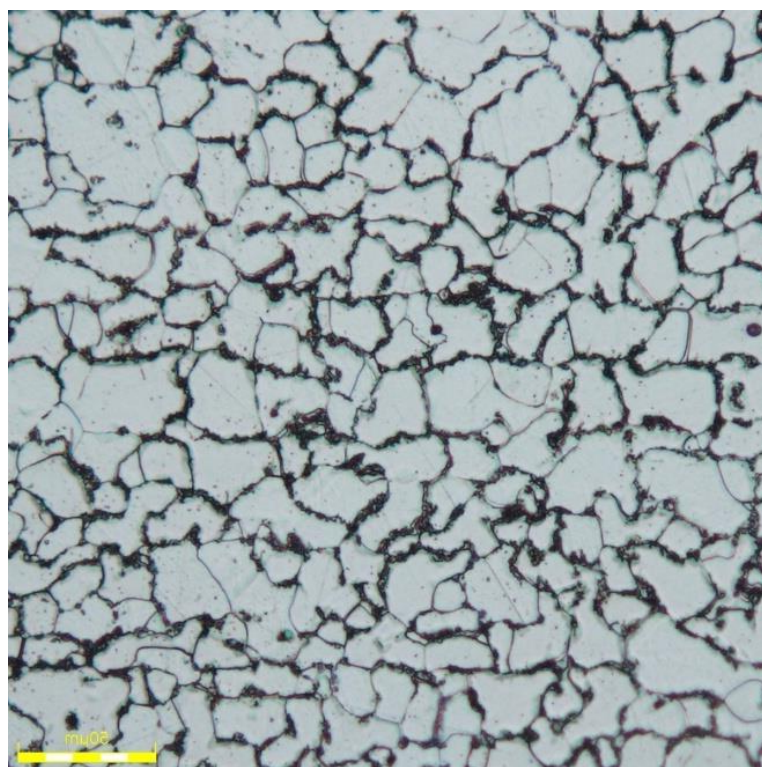
Příloha č. 12: Ukázka struktury - Sada č. 6 - zvětšeno 1000x



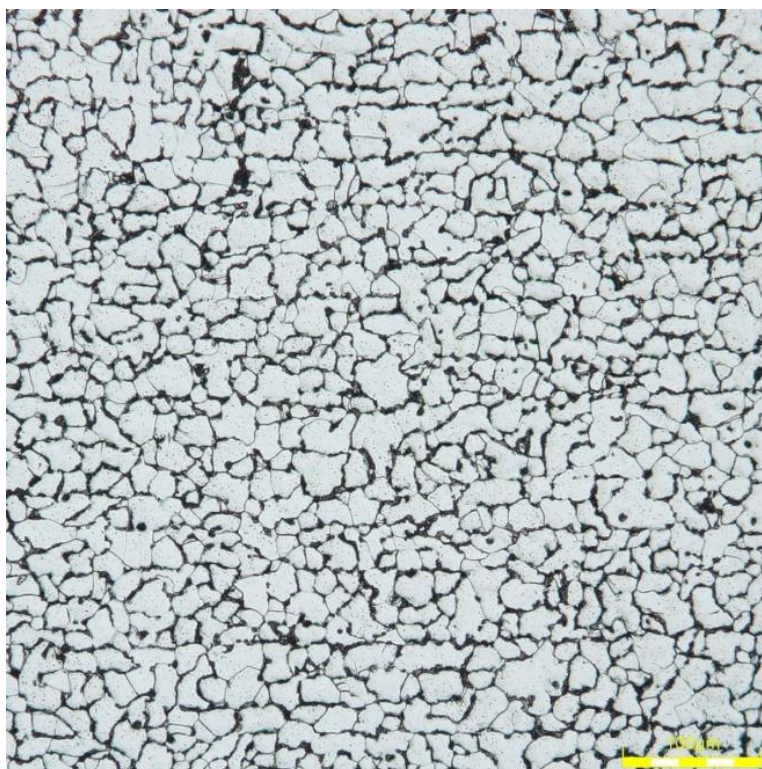
Příloha č. 13: Ukázka struktury - Sada č. 7 - zvětšeno 500x



Příloha č. 14: Ukázka struktury - Sada č. 7 - zvětšeno 1000x



Příloha č. 15: Ukázka struktury - Sada č. 8 - zvětšeno 500x



Příloha č. 16: Ukázka struktury - Sada č. 8 - zvětšeno 1000x

