



# Lokální opravy smaltovaných (anorganických) povrchů pomocí indukčních ohřevů

## Diplomová práce

*Studijní program:*

N2301 Strojní inženýrství

*Studijní obor:*

Strojírenská technologie a materiály

*Autor práce:*

**Bc. Karel Ungr**

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie





## Zadání diplomové práce

# Lokální opravy smaltovaných (anorganických) povrchů pomocí indukčních ohřevů

*Jméno a příjmení:* **Bc. Karel Ungr**  
*Osobní číslo:* S18000222  
*Studijní program:* N2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojírenská technologie a materiály  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2019/2020**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s principem tvorby anorganických povrchů na bázi smaltů.
2. Seznamte se teoreticky s principem indukčních ohřevů a vlivem velikosti frekvence na ohřívání povrch.
3. Navrhněte tvar zkušebních desek pro sledování šíření teplotních polí při vysokofrekvenčních ohřevech a metodiku zkoušení.
4. Navrhněte a realizujte experimentální program pro získání závislosti teploty na vzdálenosti induktoru od zkoušeného povrchu.
5. Otestujte maximální možné rychlosti ohřevu stávajících smaltových povrchů, při nichž nedojde k poškození stávajících smaltů.
6. Navrhněte způsob stanovení teplotní závislosti emisivity pyrometru u vybraných smaltařských frit.
7. Proveďte vyhodnocení experimentů, diskutujte dosažené výsledky a proveďte doporučení pro lokální opravy smaltových povrchů.

*Rozsah grafických prací:*  
*Rozsah pracovní zprávy:*  
*Forma zpracování práce:*  
*Jazyk práce:*

tabulky, grafy  
cca 50 stran  
tištěná/elektronická  
Čeština



### **Seznam odborné literatury:**

- [1] BOUŠE, Václav, KRAJINA Antonín a MORAVČÍK Alfons. Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně. Praha: SNTL, 1986.
- [2] LAIBLA, F. a KOLEKTIV. Příručka pro sklo, užitkovou keramiku a smalt. Praha: SNTL, 1963.
- [3] ČSN EN ISO 13807. Smalty-Stanovení teploty tvoření trhlin při zkoušce tepelným rázem u smaltů pro chemický průmysl. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [4] NĚMEČEK, L. Vypracování metodiky testování smaltovaných povrchů pro použití v kryogenních teplotách. Diplomová práce, TUL, 2016.

*Vedoucí práce:*

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Konzultant práce:*

Ing. Iva Nováková, Ph.D.  
Katedra strojírenské technologie

*Datum zadání práce:*

31. října 2019

*Předpokládaný termín odevzdání:*

30. dubna 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
děkan



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

V Liberci dne 1. listopadu 2019

## Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, 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 nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

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

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

11. června 2020

Bc. Karel Ungr

## **Anotace**

Diplomová práce je zaměřena do oblasti výzkumu vstupních parametrů potřebných pro lokální opravy smaltovaných povrchů pomocí indukčních ohřevů, dle požadavku firmy Neufe s.r.o.

Diplomová práce se skládá ze dvou částí, z teoretické a experimentální. V teoretické části dochází k popisu druhů smaltů a jejich fyzikálních a chemických vlastností. Dále je zde shrnuta problematika podkladových materiálů pro nanášení smaltů a popis technologie smaltování. Detailním způsobem jsou zde popsány vady smaltů a způsobů jejich předcházení, s možnostmi oprav smaltovaných povrchů. Poslední kapitola teoretické části se zabývá teorií zaměřenou na indukční ohřevy, využití v experimentální části této práce.

Experimentální část je koncipována na tři po sobě jdoucí podkapitoly. První kapitola je zaměřena na nalezení kritické rychlosti ohřevu, při které ještě nevzniká vada povrchu, dále optimalizace snímání teplot ze strany smaltu a nalezení výsledné emisivity povrchu snímané pyrometrem. V závěrečné části je uvedeno zkoumání vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu.

## **Klíčová slova**

Smaltované povrchy, indukční ohřev, lokální opravy smaltů, ocel P265GH

## **Annotation**

This diploma thesis is focused on the research area of input parameters which are needed for local repairs of enameled surfaces by using of induction heating. Thesis is processed according to the requirements of the Neufe s.r.o. company.

The diploma thesis consists of two parts, theoretical and experimental. Theoretical part describes basic types of enamels and their physical and chemical properties. There are described basic materials which are used for the application of enamels, enameling technology and also different defects of enamels with the possibility of their repairing. The last chapter of the theoretical part deals with the theory of induction heating that was used in the experimental part of this theses.

The experimental part contains three consecutive subchapters. The first chapter is focused on finding of both the critical heating and cooling rate where are not occurred surface defect. Second chapter is oriented to finding the resulting emissivity of the surface scanned by a pyrometer. The final part deals with effect of inductor distance of the inductor from heated surface.

## **Key words**

Glass enameled surfaces, induction heating, local repairs of glass enamels, steel P265GH

## Poděkování

V první řadě bych chtěl velice poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. za odborné vedení a ochotu při tvorbě této práce. Dále bych chtěl poděkovat zaměstnancům Katedry strojírenské technologie za umožnění provedení jednotlivých experimentů.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu nejen při tvorbě této práce, ale i po celou dobu studia.

Tato diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu Studentské grantové soutěže č. SGS-2019-5015 ze strany Technické univerzity v Liberci, v rámci „Výzkumu a vývoje v oblasti inovací a materiálů a výrobních technologií s aplikačním potenciálem ve strojírenství“.

## Obsah

1. Úvod .....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 Smalty a jejich vlastnosti .....	11
2.1.1 Druhy smaltů a jejich rozdělení .....	12
2.1.2 Teplotní roztažnost smaltů a základních materiálů.....	14
2.1.3 Fyzikální a chemické vlastnosti smaltů .....	16
2.2 Materiály vhodné pro nanášení smaltů .....	24
2.2.1 Rozdělení podkladových materiálů a jejich charakteristiky .....	24
2.2.2 Ocel P265GH.....	26
2.2.3 Úpravy povrchů před nanášením smaltu .....	27
2.3 Technologie smaltování .....	29
2.3.1 Výroba smaltěských frit a příprava suspenze .....	30
2.3.2 Způsoby nanášení, sušení a vypalování smaltových povlaků.....	30
2.4 Vady smaltových povlaků.....	33
2.4.1 Rozdělení jednotlivých vad .....	34
2.4.2 Opravy vad smaltových povlaků .....	39
2.5 Využití a vývojové trendy smaltových povlaků.....	41
2.6 Indukční ohřevy .....	41
2.6.1 Elektromagnetická indukce.....	41
2.6.2 Indukční cívky .....	42
2.6.3 Vliv frekvence induktoru na ohřívání povrch .....	43
3. Experimentální část .....	45
3.1 Vliv rychlosti ohřevu smaltového povlaku .....	45
3.1.1 Návrh testovaného vzorku a metody měření .....	46
3.1.2 Měřicí zařízení .....	49
3.1.3 Vyhodnocení naměřených dat a grafické zobrazení .....	50
3.2 Stanovení teplotní závislosti emisivity pyrometru.....	52
3.2.1 Popis experimentu.....	53
3.2.2 Výsledky měření emisivity pro základní materiál .....	57
3.2.3 Výsledky měření emisivity pro různé tloušťky smaltu.....	58
3.3 Vliv vzdálenosti induktoru na smaltovaný povrch.....	65
3.3.1 Popis experimentu.....	66
3.4 Diskuze výsledků / Zhodnocení výsledků měření .....	69
4. Závěr.....	73
Seznam literatury .....	74
Přílohy.....	76

## Seznam použitých symbolů a jednotek

$\Delta l$	Změna délky	[m]
$\alpha$	Koeficient teplotní délkové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$l_0$	Původní délka tělesa při určité teplotě $t_0$	[m]
$\Delta t$	Změna teploty	[K]
$dl$	Diferenciál délky	[m]
$\Delta V$	Změna objemu	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$	Koeficient teplotní objemové roztažnosti	[K <sup>-1</sup> ]
$V_0$	Původní objem tělesa při určité teplotě $t_0$	[m <sup>3</sup> ]
$dV$	Objemový diferenciál	[m <sup>3</sup> ]
$v$	Rychlost ohřevu/ochlazování	[°C.min <sup>-1</sup> ]
$dT$	Teplotní diferenciál	[°C]
$dt$	Časový diferenciál	[min.]
$\lambda$	Součinitel tepelné vodivosti	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$R_{mt}$	Mez pevnosti v tlaku	[MPa]
$R_m$	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
$E$	Youngův modul pružnosti	[MPa]
$HV$	Tvrдость podle Vickerse	[-]
$A$	Tažnost	[%]
$c$	Měrná tepelná kapacita	[J.kg.K <sup>-1</sup> ]
$\xi$	Měrný elektrický odpor	[Ω.m]
$U_p$	Průrazné napětí	[kV.mm <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Hustota	[kg.m <sup>-3</sup> ]
$M_g$	Teplota měknutí	[°C]
$\Delta m$	Plošný hmotnostní úbytek	[g.m <sup>-2</sup> ]
$\tau$	Čas	[h]



P	Výkon	[W]
R	Odpor	[ $\Omega$ ]
$I_{ef}$	Efektivní hodnota proudu	[A]
a	Hloubka průniku elektromagnetického pole	[m]
f	Frekvence	[Hz]
$\mu$	Relativní permeabilita	[-]
$\mu_0$	Permeabilita vakua	[H·m <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	Konduktivita (měrný elektrický odpor)	[S·m <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	Emisivita	[-]

# 1. Úvod

V dnešní době jsou kladeny vysoké nároky na schopnosti materiálů odolávat vlivům chemického prostředí. Odolnosti vůči různým typům agresivních prostředí lze dosáhnout různými způsoby, zejména volbou materiálů s vyšší chemickou odolností, nebo pomocí speciálních povlaků. Mezi takové povlaky se řadí také smalty. Smaltové povlaky splňují podmínku pro použití v chemickém, farmaceutickém, nebo potravinářském průmyslu.

Smaltový povlak se vyznačuje svojí tvrdostí, vysokou odolností vůči korozi v kyselých prostředích, nízkou tepelnou vodivostí, nízkou propustností v celém povrchu. Mezi hlavní nevýhody pak patří zejména křehkost, a tedy i snadné porušení celistvosti nárazem. Z toho důvodu lze smaltový povlak snadno porušit, a to buď cizím zaviněním, nebo vysokým mechanickým namáháním. Tato vada se projevuje odprýsknutím smaltu. Vzniklá necelistvost povlaku přináší negativní vliv z hlediska korozní odolnosti a možného ovlivnění funkčnosti výrobku.

Opravy smaltových povlaků probíhají pomocí lokálního doplnění smaltu, nebo oprava pomocí tantalových šroubů s teflonovým těsněním. Pro větší vady se využívají tzv. smaltované „hříbky“. V krajním případě dochází ke kompletnímu odstranění smaltované vrstvy a resmaltaci celého povrchu. Zejména u rozměrných výrobků tento postup obnáší přesun výrobku od zákazníka zpět k výrobcí. Proces oprav je velice časově náročný. Jedná se o odmontování výrobku, jeho přesun zpět k výrobcí, resmaltace celého povrchu, několikanásobné vypalování v peci a následné dovezení a montáž výrobku zpět u zákazníka.

V současné době je požadavek ke snížení časové náročnosti procesu a provedení opravy vady smaltovaných výrobků přímo u zákazníka, pomocí lokálních ohřevů. K tomu lze využít například infrazářičů, nebo jiných modulů zdroje tepla. Jedna z možností lokálního ohřevu materiálu, kterou se bude zabývat tato diplomová práce, je pomocí elektromagnetické indukce. Mezi hlavní výhody této metody patří lokálně cílený ohřev, u kterého lze, při dostatečně vysoké frekvenci, dosáhnout intenzivního ohřevu pouze v relativně tenké vrstvě podkladového materiálu. Mimo to lze tvarově přizpůsobit induktory velikosti vady i geometrii tvaru, kde vada vznikla.

## 2. Teoretická část

Teoretická část práce je zaměřena na popis podstaty vzniku anorganických povlaků na bázi skla. Jsou zde popsány výhody, nevýhody a aplikační použití smaltových povlaků, jejich fyzikálních a chemických vlastností, příčiny vzniku vad při tvorbě a provozu smaltovaných zařízení a možnosti jejich předcházení. Je zde shrnuta problematika podkladových materiálů určených ke smaltování, vlastní technologie výroby smaltěských frit a způsoby nanášení smaltového povlaku. Dále se teoretická část práce zabývá podstatou indukčních ohřevů, které budou následně využity v experimentální části práce.

### 2.1 Smalty a jejich vlastnosti

Smalt je anorganická sklovitá látka složitého chemického složení, jejíž vlastnosti jsou uzpůsobeny k adhezivnímu uchycení na kov a k tvorbě ochranného povlaku. Na smalt lze aplikovat teorii o struktuře skel, podle níž je struktura skla tvořená nepravidelnou mřížkou s tetraedry  $\text{SiO}_4$ . Smalt, jako sklovitý povlak, se makroskopicky vyznačuje amorfní strukturou. [1]

Spojení kovu a smaltu vzniká vypálením smaltového povlaku při teplotách 800–900°C. Vzniklý produkt je výsledkem fyzikálně-chemických reakcí skla určitého chemického složení s dalšími složkami anorganického charakteru, při jejich tepelném vytvrzení. Takto vzniklá vrstva smaltu má vlastnosti materiálů na bázi skla a keramiky se schopností adheze k podkladovému kovu. [6]

Smalt, jako anorganický povlak, se vyrábí ze skloviny, ve které jsou obsaženy sklotvorné oxidy a pomocné suroviny. Výsledný smalt je vhodně zvolenou směsí sklotvorných oxidů a pomocných surovin sloužících k dosažení dostatečné soudržnosti směsi (přídržné oxidy), ke zvýšení zákalu smaltu (kalidla), získání požadované barvy (barvítka), k zamezení negativních účinků redukčních reakcí při vypalování a odstranění nečistot organického původu (oxidační látky). [5,9,15]

Sklotvorné oxidy se rozdělují na:

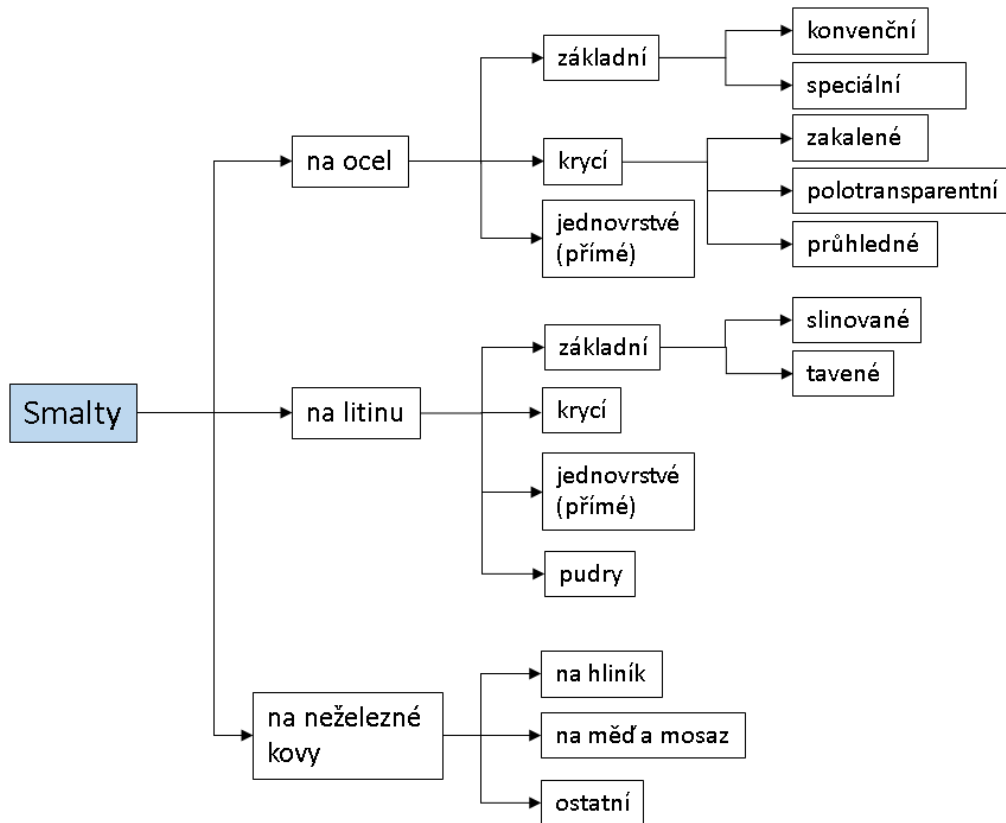
- Kyselé – oxid křemičitý  $\text{SiO}_2$ , kyselina boritá  $\text{H}_3\text{BO}_3$
- Neutrální – živec, kaolin, borax
- Zásadité – uhličitany – sodný  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , draselný  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , vápenatý  $\text{CaCO}_3$

Pomocné suroviny:

- Přídržné oxidy – oxid nikelnatý NiO, kobaltnatý CoO
- Kalidla – oxid cíničitý SnO<sub>2</sub>, titaničitý TiO<sub>2</sub>
- Barvítka – oxid chromitý Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, kobaltnatý CoO, mangančitý MnO<sub>2</sub>, železitý Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- Oxidační látky – dusitan draselný NaNO<sub>2</sub>, oxid mangančitý MnO<sub>2</sub>

### 2.1.1 Druhy smaltů a jejich rozdělení

V současnosti využívané smalty lze rozdělit jednak podle pořadí, ve kterém jsou používány v rámci technologického procesu a jednak podle materiálu, na který jsou aplikovány. Na Obr. č. 1 je schematické zobrazení základního rozdělení smaltů.



Obr. č. 1 – Základní rozdělení smaltů [1]

**Podle technologického použití** jsou děleny na:

- **Základní smalty** – jedná se o smalty, které jsou nanášeny přímo na podkladový kov. Jejich funkcí je vytvoření adhezního spojení mezi podkladovým kovem a funkční vrstvou. Obsahují tzv. přídržné oxidy na bázi kobaltu CoO a niklu NiO.

Základní smalty se vyznačují malou chemickou odolností a jako funkční povlak se využívají jen v prostředí s nízkými nároky na protikorozi odolnost. Ve většině případů po jejich nanesení na kov a vypálení, následuje nanášení krycího smaltu a výrobek se opět vypaluje.

Tloušťka vrstvy po vypálení základního smaltu je v rozmezí 80–120  $\mu\text{m}$  (pro použití smaltovaných výrobků v chemickém průmyslu je tloušťka vrstvy až 300  $\mu\text{m}$ ). [1]

Vypalovací teplota základního smaltu je vyšší, než je vypalovací teplota krycího smaltu a pohybuje se maximálně do 900 °C. [1]

- **Krycí smalty** – sloužící k vytvoření funkční vrstvy a získání požadovaných mechanických, chemických a optických vlastností. Krycí smalty se nanášejí na vrstvu základního smaltu a vypalují se v rozmezí teplot 780–860 °C. [1,6]

Rozdělují se na základě chemického složení nanášené suspenze na:

- *Smalty zakalené* – jedná se o bílé, nebo barevné smalty, které obsahují nejčastěji titaničitý, nebo titanito-zirkoničitý základ. Není zde nutná dodatečná úprava zákalu pomocí kalicích nebo barvicích přísad.
  - *Smalty polotransparentní (polozakalené)* – částečného zakalení se dosahuje již při tavení smaltu, avšak požadovaný barevný odstín se upravuje pomocí barvicích oxidů při mletí suspenze. Dosahuje se pastelových nebo méně intenzivních barev. Dle použitých barvitek se polotransparentní smalty dělí na: titaničité, zirkoničité, nebo antimonité.
  - *Smalty transparentní* – lze je univerzálně barvit pomocí barvicích oxidů při mletí suspenze a vyznačují se vysokým leskem.
- **Jednovrstvé (přímé) smalty** – mají vlastnosti základního a krycího smaltu současně. Vyznačují se dobrou adhezí k podkladovému kovu, současně s funkčností povlaku. Používají se zejména na konstrukčně složitější výrobky. Výsledná tloušťka se pohybuje v rozmezí 100–400  $\mu\text{m}$ , podle povahy prostředí, ve kterém je výrobek používán. Hlavní výhodou je jejich menší energetická náročnost při vypalování, oproti dvouvrstevným smaltům. [1,9]

**Podle podkladového materiálu** jsou děleny na:

- **Smalty na ocel** – využívají se dvouvrstvé smalty neboli smalty, které mají základní a krycí (funkční) vrstvu a jednovrstvé (přímé) smalty.
- **Smalty na litinu** – u smaltování litiny se uplatňuje její dobrá adhezní schopnost vůči smaltu, bez použití přídržných oxidů ve smaltéřské suspenzi. K dosažení hladkého a celistvého povrchu je nutné smalt nanášet ve větší tloušťce než při smaltování oceli. Smaltování litiny probíhá buď konvenčním způsobem nanášením suspenze na podkladový kov, sušením a vypalováním, nebo spékáním smaltovacího prášku (pudru) při slinovací teplotě. Vypalovací interval teplot se pro smalty na litinu pohybuje v rozmezí 700–900 °C.
- **Smalty na neželezné kovy** – nejčastěji se z neželezných kovů smaltuje hliník a jeho slitiny. Používají se smalty na bázi olova, barya a fosfátů.

U olovnatých smaltů se uplatňuje velmi dobrá odolnost v chemickém prostředí. Nevýhodou je jejich zdravotní závadnost, kvůli které se od těchto smaltů upustilo a nahrazují se barnatými a fosfátovými smalty, které mají odolnost proti chemickým vlivům nižší.

Vypalovací teplota smaltů je přizpůsobena velkému koeficientu teplotní roztažnosti, s ohledem na teplotu tání hliníku a pohybuje se mezi 500–550 °C. Tloušťka vrstvy smaltu po vypálení je maximálně 100 μm. [1,9]

### 2.1.2 Teplotní roztažnost smaltů a základních materiálů

Teplotní roztažnost je fyzikální jev, při kterém materiál se změnou teploty mění své rozměry (objem). Dodáním tepelné energie systému, se zvyšuje jeho vnitřní energie, což má za následek zvětšení amplitudy kmitů atomů kolem rovnovážné polohy a jejich vzájemné vzdálenosti. [10]

**Teplotní délková roztažnost** – jedná se o vlastnost materiálu, při které těleso mění své rozměry v daném směru o určitou délku. Pro tělesa, u kterých jeden rozměr převládá nad ostatními a pro malé teplotní rozdíly původní a dosažené teploty, lze vztah mezi změnou délky a teploty vyjádřit lineární závislostí podle vzorce (1).

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \quad (1)$$

Kde:  $\Delta l$  ... změna délky [m]  
 $\alpha$  ... koeficient teplotní délkové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]  
 $l_0$  ... původní délka tělesa při určité teplotě  $t_0$  [m]  
 $\Delta t$  ... změna teploty [K]

Změna teploty  $\Delta t$  je definována jako rozdíl dosažené teploty  $t$  a původní teploty  $t_0$ . Koeficient teplotní délkové roztažnosti  $\alpha$  lze bez lineární závislosti délky na teplotě vyjádřit vztahem (2).

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2)$$

Kde:  $\alpha$  ... koeficient teplotní délkové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]  
 $dl$  ... diferenciál délky [m]  
 $l_0$  ... původní délka tělesa při určité teplotě  $t_0$  [m]  
 $dt$  ... diferenciál teploty [K]

**Teplotní objemová roztažnost** – jedná se o změnu objemu tělesa v závislosti na teplotě. Obdobně jako u teplotní délkové roztažnosti, lze vztah pro změnu objemu v závislosti na teplotě vyjádřit vztahem (3).

$$\Delta V = \beta \cdot V_0 \cdot \Delta t \quad (3)$$

Kde:  $\Delta V$  ... změna objemu [ $m^3$ ]  
 $\beta$  ... koeficient teplotní objemové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]  
 $V_0$  ... původní objem tělesa při určité teplotě  $t_0$  [ $m^3$ ]  
 $\Delta t$  ... změna teploty [K]

Koeficient teplotní objemové roztažnosti  $\beta$  lze pak vyjádřit vztahem (4).

$$\beta = \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (4)$$

Kde:  $\beta$  ... koeficient teplotní objemové roztažnosti [ $K^{-1}$ ]  
 $dV$  ... objemový diferenciál [ $m^3$ ]  
 $V_0$  ... původní objem tělesa při určité teplotě  $t_0$  [ $m^3$ ]  
 $dt$  ... diferenciál teploty [K]

Pro většinu materiálů je hodnota koeficientu délkové roztažnosti  $\alpha$  měřena v každém směru zvlášť, z důvodu anizotropie materiálu (v každém směru jiné vlastnosti). Pro izotropní materiály (ve všech směrech stejné vlastnosti) se uplatňuje vztah mezi koeficientem délkové a objemové roztažnosti  $\beta \approx 3\alpha$  neboli koeficient délkové roztažnosti se rovná přibližně třetině koeficientu objemové roztažnosti. [10]

### 2.1.3 Fyzikální a chemické vlastnosti smaltů

Každý typ smaltového povlaku musí splňovat jednotlivé funkční vlastnosti pro jeho použití. Tyto vlastnosti se souhrnně nazývají aplikačními a jsou souborem fyzikálních a chemických vlastností povlakového systému.

Přehled fyzikálních parametrů smaltu a jejich hodnot v porovnání k oceli je zpracován v Tab. č. 1.

Tab. č. 1 – Přehled hodnot vybraných fyzikálních vlastností smaltu a oceli [1]

Parametr	Označení	Jednotka	Materiál	
			Smalt	Ocel
Mez pevnosti v tlaku	$R_{mt}$	MPa	800-1000	2000
Mez pevnosti v tahu	$R_m$	MPa	70-90	530 <sup>[22]</sup>
Teplotní koeficient délkové roztažnosti	$\alpha$	$K^{-1}$	$80 \cdot 10^{-7}$ až $95 \cdot 10^{-7}$	$135 \cdot 10^{-7}$
Modul pružnosti v tahu	E	MPa	$70 \cdot 10^3$	$210 \cdot 10^3$
Tvrdość podle Vickerse	HV	-	600	145 <sup>[22]</sup>
Tažnost	A	%	0,15-0,3	25
Odolnost proti nárazu (kulička $\varnothing 25\text{mm}$ )	IK	J	0,4-0,5	-
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,93	52,335
Měrná tepelná kapacita	c	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	837	460
Měrný elektrický odpor (pro 20 °C)	$\zeta$	$\Omega \cdot m$	$\sim 10^{10}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Průrazné napětí (pro 20 °C)	$U_p$	$kV \cdot mm^{-1}$	do 20	-



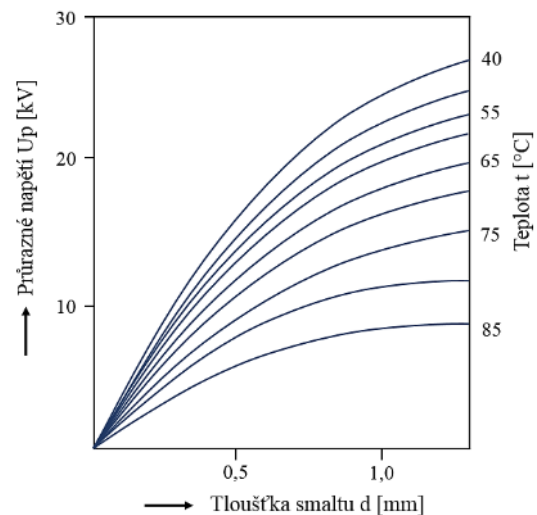
Hustota	$\rho$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2500	7800
Teplota měknutí	$M_g$	$^{\circ}\text{C}$	500-600	-

V následujících odstavcích jsou popsány významné fyzikální a chemické vlastnosti smaltů. Mezi vybrané vlastnosti patří: [1,5,6]

- a) **Celistvost povlaku** – k dosažení dostatečné protikorozní ochrany smaltu je nutné, aby smaltový povlak splňoval požadavek celistvosti po celém povrchu smaltu. Celistvost povlaku lze posuzovat vizuálně, nebo pomocí stanovení elektroizolačních vlastností, to znamená zkoušením pomocí stejnosměrného vysokého napětí. K tomu se využívají tzv. poroskopy, které generují vysoké napětí na kovové elektrodě – kartáči, současně s připojením podkladového kovu k zápornému pólu. Příklad poroskopu od firmy PCWI s průrazným napětím 30kV je na Obr. č. 2.



Obr. č. 2 – Poroskop od firmy PCWI  
– Compact DC30 [17]



Obr. č. 3 – Graf závislosti průrazného napětí ( $U_p$ ) na tloušťce ( $d$ ) a teplotě ( $t$ ) [1]

Smalt má dobré elektroizolační vlastnosti. Při necelistvosti povlaku (póry, které pronikají na podkladový kov, nebo různé nehomogenity) a působení vysokého napětí poroskopu, vzniká v daném místě elektrický výboj.

Závislost průrazného napětí  $U_p$  na teplotě prostředí a tloušťce smaltu je znázorněna na Obr. č. 3.

- b) **Adheze smaltu k podkladovému kovu** – je definována fyzikálně-chemickými reakcemi při vypalování v systému kov-smalt. Jedná se o redukci iontů  $\text{Co}^{2+}$  nebo  $\text{Ni}^{2+}$  na fázovém rozhraní, za vzniku slitin kobaltu, nebo niklu s železem. Smalty, které neobsahují přídržné oxidy  $\text{CoO}$ , nebo  $\text{NiO}$ , mají minimální adhezi k podkladovému kovu.
- c) **Mechanické vlastnosti**
- **Hustota** – hustota běžně používaných smaltových povlaků se pohybuje v intervalu  $2,4-2,7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  a liší se použitím konkrétního druhu smaltéřského základu neboli frity. [1]
  - **Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)** – je přibližně třikrát menší než u oceli. Jeho hodnota je zhruba  $70 \cdot 10^3 \text{ MPa}$ . S tím souvisí, že smaltový povlak má nízkou tažnost a mez průtažnosti, což je charakteristické pro křehké materiály. [1]
  - **Mez pevnosti v tahu a tlaku** – hodnota pevnosti v tahu je velmi nízká a pohybuje se mezi  $70-90 \text{ MPa}$ , to znamená, že je přibližně pětkrát menší než u oceli. Oproti pevnosti v tlaku, která je přibližně  $800-1000 \text{ MPa}$ . Při jednotném systému kov-smalt bylo potvrzeno, že k porušení smaltového povlaku dochází téměř po dosažení meze kluzu oceli. Tato vlastnost je výhodná z hlediska montáže výrobku. Důležitými parametry jsou také poměr tloušťky povlaku k tloušťce podkladového kovu, stav povrchu smaltu a chemické složení frity. [1]
  - **Tvrдость** – dle Mohsovy stupnice tvrdosti, která vyjadřuje míru odporu materiálu vůči trvalé deformaci, se smalt nachází mezi 5. stupněm, který přísluší apatitu a 7. stupněm, který je specifický pro křemen. Tvrдость lze měřit tvrdoměrem např. podle Vickerse, z hlediska malých tlouštěk smaltu. [1,6]  
Tvrдость dokáže ovlivnit chemické složení smaltéřského základu. Při zvýšeném množství oxidu křemičitého ve smaltéřské fritě je výsledná tvrdost větší, oxid draselný a sodný tuto hodnotu naopak snižuje. [1,16]
  - **Tloušťka povlaku** – hodnota tloušťky konkrétních smaltových povlaků se řídí normami pro daný výrobek, nebo technickými požadavky. Obvyklá hodnota tloušťky smaltu pro spotřební zboží, se pohybuje do  $450 \mu\text{m}$ . Pro použití výrobků v chemickém průmyslu je výsledná tloušťka úměrně větší. [1]
  - **Odolnost vůči mechanickým nárazům** – stanovuje se maximální hodnotou kinetické energie, při které ještě zůstává smaltový povlak celistvý a nedochází k jeho porušení. Pro výrobky spotřebního průmyslu je hodnota kinetické energie  $0,3 \text{ J}$ . U výrobků,

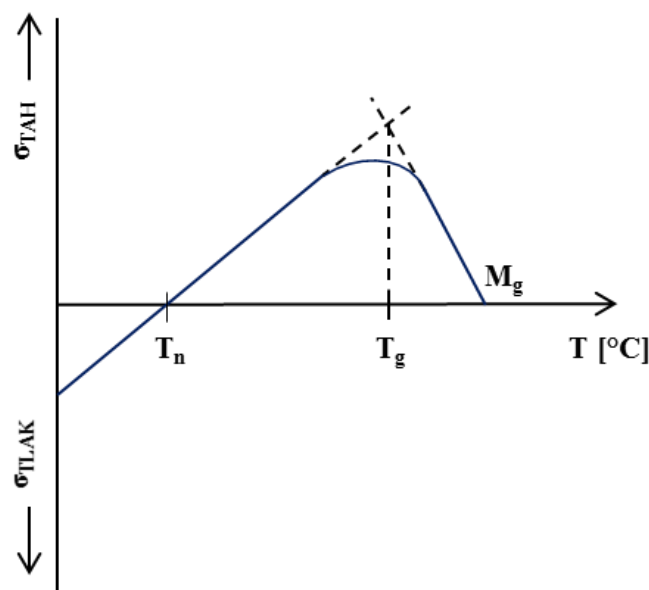
kteří se používají v chemickém prostředí je tato hodnota mezi 0,4-0,5 J, při nárazu kuličky o průměru 25 mm podle normy ČSN ISO 4532.

Odolnost smaltového povlaku závisí na poměru tloušťky smaltu, k tloušťce podkladového kovu, na konstrukci výrobku a výsledné kinetické energii nárazu. [1]

- Odolnost vůči abrazi – smalt má větší odolnost proti abrazi ve srovnání s ocelí. Odolnost je také závislá na chemickém složení smaltéřské frity, na přísadách, které se používají při přípravě suspenze, dále na tloušťce povlaku a stupni vypálení. Důležitým parametrem je druh působících abrazivních látek. [1]
- Mechanické napětí v systému kov – smalt – vznik mechanického napětí v systému je zapříčiněn rozdílnou teplotní roztažností a modulem pružnosti mezi podkladovým kovem a smaltem.

Z grafu na Obr. č. 4 je zřejmé, že při teplotě okolí působí ve smaltu *tlaková napětí*. Se zvýšením teploty, se tato napětí snižují, až do tzv. *neutrálního bodu*  $T_n$ , kde nabývají nulové hodnoty. Při dalším zvýšení teploty se napětí změní na *tahová napětí*, která dosáhnou svého maxima při *transformační teplotě*  $T_g$  smaltového povlaku. Poté napětí klesají na nulovou hodnotu při teplotě  *bodu měknutí smaltu*  $M_g$ , která je úměrná *vypalovací teplotě smaltu*  $t_v$ .

Platí, že čím větší hodnoty nabývá *transformační teplota*  $T_g$ , tím větší je odolnost smaltu proti náhlým změnám teploty a vzniku vad. [1]



Obr. č. 4 – Teplotní závislost mechanického napětí v systému kov – smalt [1]

#### d) Tepelné vlastnosti

- Teplotní roztažnost – se liší pro délkovou a objemovou roztažnost smaltu a podkladového kovu viz kapitola 2.1.2. Z toho vyplývá vliv na konečné vlastnosti výrobku a adhezi smaltu ke kovu. Dále způsobuje rozdílné rozložení napětí v systému smalt-kov a možný vznik povrchových vad, např. odprýsknutí smaltu, v důsledku tlakového napětí, nebo vznik vlasových trhlin v důsledku tahového napětí.

Důležitým parametrem pro odhad chování materiálů je objemová teplotní roztažnost  $\beta$ , pro kterou platí, že pod *transformační teplotou*  $T_g$  je téměř lineární. Porovnání objemové teplotní roztažnosti různých druhů smaltů, vzhledem k oceli, je zřejmé z Tab. č. 2. Z uvedených hodnot je zřejmé, že teplotní roztažnost smaltu je menší než teplotní roztažnost podkladového kovu.

Tab. č. 2 – Porovnání materiálů z hlediska teplotní objemové roztažnosti

Materiál	Teplotní objemová roztažnost $\beta$ [K <sup>-1</sup> ]	Transformační teplota $T_g$ [°C]	Teplota měknutí $M_g$ [°C]
Základní smalt	250-290	500-520	520-560
Základní smalt (po vypálení)	350-380	450	480-510
Krycí smalt	280-360	420-500	480-530
Ocel	360-450	-	-

- Tepelná vodivost – smaltový povlak vykazuje malou tepelnou vodivost, která závisí na tloušťce smaltu a jeho složení.

#### e) Optické vlastnosti

- Lesk – ovlivňuje ho chemické složení smaltu, obzvláště množství alkálií a oxidu boritého ve smaltéřském základu a stupeň vypálení. Lesk smaltu lze posuzovat vizuálně, nebo změřit tzv. leskoměrem.
- Zákal a průhlednost – zákalu smaltu se dosahuje pomocí kalidel ve směsi, jako jsou oxid cíničitý, nebo titaničitý.
- Barva – barevnost smaltu lze ovlivnit přísadou barvicích oxidů ve smaltéřské fritě, nebo přípravě suspenze. Smalt lze připravit v mnoha barevných odstínech. Barevnost

se vyhodnocuje pomocí měření jednotlivých trichromatických složek v porovnání s etalony.

f) **Elektrické vlastnosti** – jak již bylo řečeno, smaltový povlak má dobré elektroizolační vlastnosti a podobně jako sklo je považován za izolant. Smalt také vykazuje velký měrný elektrický odpor. Tyto vlastnosti se snižují se zvyšující se teplotou. [1]

g) **Chemické vlastnosti**

**Podle stupně chemické odolnosti** se smalty dělí na tři skupiny: [1]

- *Smalty s velkou chemickou odolností* – určené pro chemické aparatury. Vyznačují se vysokým obsahem  $\text{SiO}_2$  (více jak 50 %) a nízkým množstvím oxidů alkalických kovů. Vypalovací teplota je vyšší a pohybuje se nad  $820\text{ }^\circ\text{C}$ . Tloušťka vypáleného smaltu je mezi  $400\text{-}1000\text{ }\mu\text{m}$ , v některých případech až  $2000\text{ }\mu\text{m}$ . Výsledný smalt je složen z několika vrstev základních a krycích smaltů, přičemž základní mezivrstvy mají tloušťku do  $300\text{ }\mu\text{m}$ . Limitní teplota použití těchto smaltů na oceli je v rozmezí  $250\text{-}350\text{ }^\circ\text{C}$ . Při použití smaltu na litinu je maximální teplota do  $250\text{ }^\circ\text{C}$ , pro zajištění správně funkce daného povlaku. Tyto smalty dlouhodobě odolávají všem organickým a anorganickým kyselinám, vyjma kyseliny fluorovodíkové.
- *Smalty se střední chemickou odolností* – pro potravinářská zařízení. Vypalovací teplota těchto smaltů je nižší, přibližně  $780\text{-}820\text{ }^\circ\text{C}$ . Při použití smaltu na hliník a jiné neželezné kovy je vypalovací teplota okolo  $500\text{-}550\text{ }^\circ\text{C}$ . Jejich tloušťka je  $100\text{-}500\text{ }\mu\text{m}$ . Vykazují dobrou odolnost proti vlivu organických kyselin do teploty  $250\text{ }^\circ\text{C}$ . V prostředí nízkých koncentrací anorganických kyselin odolávají teplotám do  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Podmínka u těchto druhů smaltů, vzhledem k použití, je jejich zdravotní nezávadnost a bioinertivita.
- *Smalty bez zvýšené chemické odolnosti* – pro spotřební zboží, dekorativní povlaky, nebo pro elektroizolační účely. Svým zpracováním jsou srovnatelné se smalty se střední chemickou odolností. Lze je využívat do teploty max.  $400\text{ }^\circ\text{C}$  a odolávají jen mírně agresivnímu prostředí. Při smaltování oceli se tento druh povlaku vypaluje při teplotě do  $800\text{ }^\circ\text{C}$ . Tloušťka se pohybuje mezi  $50\text{-}400\text{ }\mu\text{m}$ .

**Podle typu prostředí**, ve kterém je povlak zkoušen na odolnost vůči danému prostředí, dělíme na:

- Odolnost v prostředí vody a vodní páry – narušování povlaku v prostředí vody a vodní páry lze přirovnat k hydrolýze. Odolnost smaltů zvyšuje podíl oxidu křemičitého, zirkoničitého a titaničitého, a naopak jí snižují příměsi sloučenin bóru, fosforu a fluoru. Praktická funkční zkouška se provádí podle dle ISO 28706-2:2017 a jedná se o expozici po dobu 24-1000 h ke zjištění křivky hmotnostního úbytku. [1]
- Odolnost vůči kyselinám – jedná se o základní funkční vlastnost smaltových povlaků. Na zvýšení odolnosti v kyselém prostředí mají vliv oxidy  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{LiO}_2$ . Oxidy, které odolnost snižují, jsou  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{CaO}$ . Zkoušky se provádí dle mezinárodní normy ISO 28706-1:2008 pro zkoušky za pokojové teploty a dle ISO 28706-2:2017 při varu na normalizovaných zkušebních vzorcích.

Pro smalty ve spotřebním průmyslu a chemicky odolné smalty se předepisuje zkouška odolnosti v 10% roztoku kyseliny citrónové po dobu 15 minut, při pokojové teplotě. Na konci zkoušky se vyhodnocují jednotlivé parametry smaltu, jako případná změna barvy, nebo úbytek lesku. Chemicky odolné smalty a smalty, které se používají ve spotřebním průmyslu, se testují v prostředí varu 6% roztoku kyseliny citrónové po dobu 2,5 h. Pro varné nádoby, se předepisuje zkouška v prostředí varu 4% roztoku kyseliny octové po dobu 1 h. Po ukončení zkoušek, se u výrobků měří hmotnostní úbytek, který je limitován předepsanou maximální hodnotou dle normy.

Pro smalty, které vyžadují velkou chemickou odolnost, se předepisuje zkouška pomocí 20% roztoku kyseliny chlorovodíkové za varu, po dobu 48 hodin.

Pro získání křivek hmotnostního úbytku neboli korozních křivek v závislosti na čase je potřeba zvýšit dobu trvání jednotlivých zkoušek. [1]
- Odolnost vůči alkáliím – působení alkalického prostředí při zvýšené teplotě, je ve srovnání s kyselým prostředím mnohem agresivnější. Z tohoto důvodu se neprovádí zkouška za varu a vysoké hodnotě pH použitých roztoků.

Provádí se zkouška za studena (pro méně odolné smalty), nebo za tepla (max. 80 °C) pro smalty odolnější vůči alkáliím za působení 3% roztoku uhličitanu sodného po dobu 20 min.

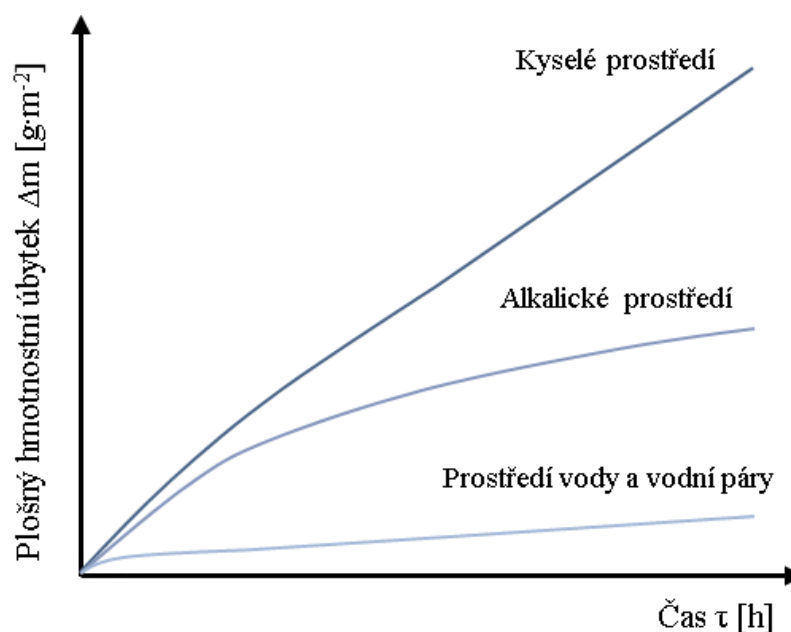
Standardně je použití smaltů v tomto prostředí limitováno koncentrací použitých alkálií a teplotou přibližně 50-60 °C. [1]



➤ Odolnost v agresivním prostředí – pro zkoušení povlaku se používá kombinace vody, slabých kyselých roztoků, slunečního záření a změny teploty. Tato zkouška probíhá při cyklickém teplotním zatěžování, s naprogramovaným vystavením smaltu prostředí ve vlhkostních komorách. Hodnotí se změna optických vlastností. U smaltů na hliník se měří změna adheze smaltu ke kovu. [1]

h) Korozní vlastnosti – smaltové povlaky se využívají jako prostředek v protikorozi ochraně kovů, ale i u těchto povlaků může nastat koroze, z důsledku fyzikálních, nebo fyzikálně-chemických jevů. Mezi působící fyzikální vlivy, které zrychlují degradaci povlaku a zvyšují hmotnostní úbytek, patří: eroze, abraze, mechanické a termické namáhání, nebo působení slunečního záření. [1]

Koroze povlaku může nastat při vystavení různým chemickým prostředím, jako je kyselé, alkalické, vody a vodní páry, nebo v agresivních atmosférách. Příklady korozních křivek pro různá prostředí a hmotnostního úbytku v daných prostředích v závislosti na čase jsou na Obr. č. 5.



Obr. č. 5 – Časová závislost hmotnostního úbytku pro různá prostředí [1]

Metody zkoušek, možnosti předcházení koroze, teplotní limity a výběr správného typu smaltu do daného prostředí jsou popsány v předchozím odstavci o chemických vlastnostech.

## 2.2 Materiály vhodné pro nanášení smaltů

Pro výběr vhodného materiálu pro smaltování je důležité, aby splňoval podmínky pro vytvoření smaltované vrstvy. Povrch podkladového materiálu by měl být hladký, bez okují a povrchových vad. Je nutné, aby materiál obsahoval velmi malé množství přísad, které by se vlivem teploty mohly rozkládat, tvořit plyny a narušovat tak celistvost smaltované vrstvy. Další podmínkou je, aby materiál byl odolný proti deformaci za tepla.

Smaltový povlak lze vytvořit na neželezných kovech, oceli a litině. Nejčastější použití smaltových povlaků je u nízkouhlíkových konstrukčních ocelí a u litiny. [4]

### 2.2.1 Rozdělení podkladových materiálů a jejich charakteristiky

U smaltování *litin* se využívá především nízké hodnoty koeficientu objemové teplotní roztažnosti  $\beta$ , který činí v intervalu teplot 0°–500 °C přibližně  $380 \cdot 10^{-7}$  [K<sup>-1</sup>].

Ve smaltování se využívá převážně šedá litina neboli litina, kde je uhlík z větší části vyloučen jako grafit ve formě lupínků a zbytek jako cementit. Perlitická struktura se při tepelném zpracování litiny mění na feritickou s rovnoměrně rozloženým lamelárním grafitem. Rozpad cementitu při vyšších teplotách zvyšuje hodnotu koeficientu teplotní roztažnosti. [1,2]

Pro správný postup smaltování je nutné, aby litina obsahovala co nejméně vázaného uhlíku ve formě cementitu a lamelární grafit byl rovnoměrně rozptýlen. Jestliže grafit vytváří shluky, dochází při vypalování smaltu k intenzivní oxidaci, za vzniku oxidů – uhelnatého a uhličitého, které mají negativní vliv na celistvost smaltového povlaku. V Tab. č. 3 je uvedeno doporučené rozmezí chemického složení litin určených ke smaltování. [1]

Tab. č. 3 – Chemické složení litiny vhodné pro smaltování

Prvek	C <sub>celkový</sub>	C <sub>vázaný</sub>	Si	Mn	P	S
<b>Chemické složení [hm. %]</b>	3,4–3,7	0,3–0,6	2,2–2,6	0,4–0,8	0,6–1,3	0,05–0,1

Vliv dalších prvků je následující: Křemík má příznivý vliv na grafitizaci a brání tvorbě cementitu. Mangan působí v litině jako prvek, který snižuje negativní účinek síry,



která způsobuje zvýšenou tvrdost, křehkost a podílí se na tvorbě cementitu. Fosfor podporuje u litin jejich tekutost a tím umožňuje výrobu tenkostěnných odlitků. Při vyšším množství, než 1% fosfor způsobuje křehkost litiny a dochází tak k tvorbě vlasových trhlinek na povrchu smaltu. [3]

Smaltování *ocelí* se provádí většinou u ocelí, které lze dle jejich chemického složení rozdělit na:

- Hlubokotažné nízkouhlíkaté oceli
- Oceli legované příměsemi – Cr, Ni, Ta, Nb, V, Zr
- Titanové oceli

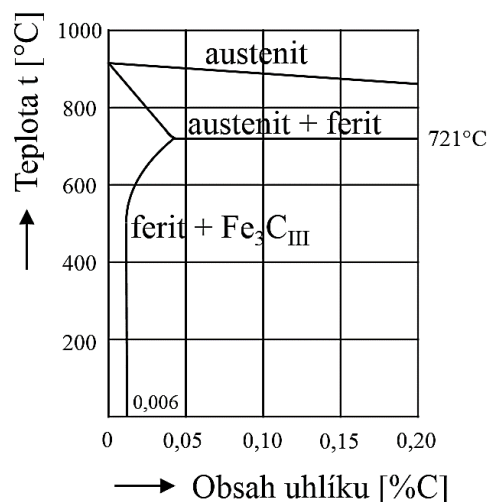
Koeficient objemové teplotní roztažnosti  $\beta$  u ocelí, v intervalu teplot  $0^{\circ}$ – $500^{\circ}$  °C, se rovná přibližně  $426 \cdot 10^{-7}$  [K<sup>-1</sup>].

Ke smaltování jsou vhodné oceli s maximálním obsahem uhlíku do 0,12 %. Oceli lze podle struktury matrice dělit na:

- Oceli s obsahem uhlíku do 0,01 % s čistě feritickou strukturou
- Oceli s obsahem uhlíku mezi 0,01 – 0,04 % s feritickou strukturou a zbytkovým cementitem
- Oceli s obsahem uhlíku nad 0,04 % s feriticko-perlitickou strukturou a zbytkovým cementitem

Oblast smaltovatelných ocelí je zřejmá z fázového diagramu železo-uhlík na Obr.

č. 6.



Obr. č. 6 – Oblast smaltovatelných ocelí – diagram železo-uhlík [1]



Smaltování *hliníku a jeho slitin* se vyznačuje tím, že se využívají smalty s vyšší hodnotou teplotní roztažnosti a nižší teplotou tavení, z důvodu fyzikálních vlastností hliníku. Hliník se vyznačuje tím, že má poměrně vysokou hodnotu teplotní roztažnosti a nízkou teplotu tavení. Ke smaltování je vhodný čistý hliník 99,5 Al a jeho slitiny. Póry na povrchu smaltu a nedostatečná příprava povrchu před smaltováním vede k tvorbě nečelistvosti povrchu a špatné přilnavosti smaltu k povrchu kovu. [2,3,4]

## 2.2.2 Ocel P265GH

Protože v rámci experimentální části byla využita ocel P265GH, jsou v této kapitole popsány její fyzikální a chemické vlastnosti. Jedná se ve shodě se značením oceli dle ČSN EN ISO 10027-1 o ocel pro tlakové nádoby (P), s minimální zaručenou mezí kluzu 265 MPa, určenou pro vysoké teploty (H). [14]

Materiál se vyznačuje dobrou svařitelností a může se využívat pro souvislé teplotné zatížení do 450°C. Používá se na výrobu tlakových nádob, kotlů a potrubí pro přepravu horkých kapalin. [7,13]

Chemické složení oceli ve shodě s normou ČSN EN 10028-2 je uvedeno v Tab. č. 4. Mechanické vlastnosti oceli v závislosti na tloušťce vzorku jsou zřejmé z Tab. č. 5. Zjišťování mechanických vlastností se provádí zkouškou tahem při pokojové teplotě a v příčném směru, pro různé tloušťky vzorku. Pro zjištění rázové energie a chování materiálu při dynamickém zatížení, byla využita zkouška rázem v ohybu ČSN EN 10045-1 pro daný teplotní rozsah a tloušťku vzorku v intervalu 6-10 mm. [7]

Tab. č. 4 – Chemické složení oceli P265GH dle ČSN EN 10028-2

Prvek	C	Mn	S <sub>max</sub>	N	Nb	Ti <sub>max</sub>	Si
<b>Chemické složení [hm. %]</b>	≤ 0,2	0,8 – 1,4	<0,015	≤ 0,012	≤ 0,3	0,03	≤ 0,4
Prvek	P <sub>max</sub>	Al	Cr	Mo	Ni	V	
<b>Chemické složení [hm. %]</b>	0,2	≤ 0,02	≤ 0,3	≤ 0,08	≤ 0,3	≤ 0,02	

*Podmínka: množství chromu, mědi a molybdenu nesmí v kombinaci překročit 0,7%*

Tab. č. 5 – Mechanické vlastnosti dle ČSN EN 10028-2 – materiál P265GH

Tloušťka [mm]	Mez kluzu $R_e$ [MPa]	Mez pev- nosti $R_m$ [MPa]	Tažnost A [%]	Rázová energie KV [J]		
				-20 °C	0 °C	+20 °C
≤ 16	265	410–530	min. 22	27	34	40
16–40	255	410–530				
40–60	245	410–530				
60–100	215	410–530				
100–150	200	400–530				
150–250	185	390–530				

### 2.2.3 Úpravy povrchů před nanášením smaltu

Pro správné nanesení smaltové vrstvy je důležité, aby byl kov před smaltováním zbaven nečistot, které snižují přilnavost smaltu a podkladového kovu. Úpravy povrchů před smaltováním se dělí na *mechanické* a *chemické*. [2]

**Chemické úpravy povrchu kovu** – se používají výhradně u ocelí, s tloušťkou materiálu do 3 mm a jsou charakterizovány následujícími operacemi:

- **Odmašťování** – slouží k odstranění zbytků konzervačních, nebo mazacích olejů po zpracování podkladového kovu a jiných nečistot. Využívá se 5-10 % odmašťovacích roztoků na bázi různých alkalicky reagujících látek. Nejčastější složkou těchto lázní je hydroxid draselný. Lázně se ohřívají obvykle na teplotu 80 až 100 °C. Doba procesu závisí na stupni znečištění. Pohybuje se okolo 5-25 minut.
- **Moření** – operace, při které dojde k odstranění oxidů na povrchu ve formě rzi, nebo okují a zvětšení drsnosti povrchu pro lepší přilnavost smaltu. Používají se různé kyseliny, především kyselina chlorovodíková a kyselina sírová. Při reakci s povrchem

kovu vznikají příslušné soli a vodík, který tvoří na povrchu kovu malé bublinky, jež svým tlakem odstraňují z povrchu zbytky okují a rzi.

Protože rychlost rozpouštění železa v kyselinách je větší, než rychlost rozpouštění okují na povrchu, dochází při průniku kyselin přes nestejnou vrstvu okují na podkladový kov k intenzivnímu rozpouštění kovu a hmotnostnímu úbytku přibližně 2 %. Proto je důležité, aby postup moření byl nastaven vhodnou koncentrací mořící lázně a její teplotou. Přidáním tzv. inhibitorů do mořící lázně, kterými jsou např. škrob, nebo dehtový olej, lze vytvořit tenkou vrstvu na povrchu kovu, která brání rozpouštění podkladového kovu, bez vlivu na rozpouštění okují.

Příliš dlouhá doba moření může způsobit tzv. zkřehnutí povrchu kovu množstvím absorbovaného vodíku. To se později projevuje vznikem bublin a kráterů na smaltovém povlaku.

- **Niklování** – tato operace se zařazuje ve speciálních případech po moření kovu, před neutralizací. Jedná se o vytvoření tenké vrstvičky niklu na povrchu kovu, která je vytvořena díky reakci roztoku síranu nikelnatého v prostředí kyseliny sírové. Množství vyloučeného niklu na povrchu kovu se pohybuje mezi  $0,7 - 1,2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ . Vrstva niklu zlepšuje stabilitu povrchu před smaltováním a také přilnavost smaltu k podkladovému kovu.
- **Neutralizace s pasivací** – spočívá v neutralizaci zbytků kyselin po moření podkladového kovu. Využívají se roztoky solí alkalických kovů s koncentrací podle účinné složky  $\text{Na}_2\text{O}$  v rozmezí 0,2-0,3 %. Teplota lázně se pohybuje okolo 80-90 °C a doba procesu je v rozmezí 3 až 5 minut.

Po neutralizaci může nastat případ, kdy na povrchu kovu zůstávají zbytky neutralizačních solí, které při sušení krystalizují. To způsobuje při následném smaltování snížení přilnavosti smaltu a podkladového kovu a také vznik necelistvosti smaltového povlaku. U mokrého nanášení smaltéřské suspenze se zbytky solí rozpouštějí a rozptylují po celém povrchu kovu. U suchého nanášení nedochází k rozpouštění solí a při následném vypalování dochází k reakcím s povrchem kovu za vzniku vad. Z toho důvodu se na povrch podkladového kovu aplikují teplé a studené oplachy. [1,2]

**Mechanické úpravy povrchu kovu** – se používají pro šedou litinu a ocelové výrobky s tloušťkou materiálu více než 3 mm. Využívají se abrazivní materiály, které díky kine-

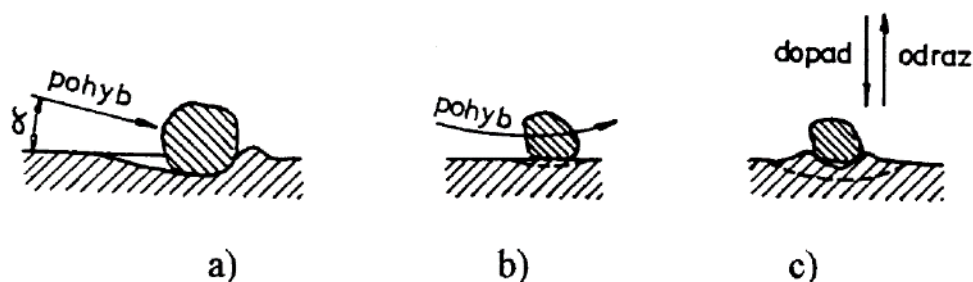
tické energii částic, získanou z lopatkových, nebo pneumatických tryskačů, uvolnily nečistoty a zdrsnilly povrch podkladového kovu. Adheze smaltového povlaku závisí na tom, jaká je drsnost podkladového kovu. To znamená, že s rostoucí drsností povrchu kovu se zároveň zvyšuje přilnavost smaltu. [1]

➤ **Otryskání** – používají se tryskačí materiály, které svou kinetickou energií strhávají částice okují a rzi z povrchu podkladového kovu a u litin zbytky formovacích hmot. Mezi tyto materiály patří především syntetický korund a ocelová, nebo litinová drť. Provádí se na ručních, nebo kolových tryskačích zařízeních.

Účinnost tryskání se reguluje následujícími parametry: velikostí zrn tryskačích materiálů, úhlem a vzdáleností tryskačí pistole od povrchu kovu, nebo velikostí trysky. [9]

Podle tvaru zrna dělíme tryskačí materiály na:

- *materiály s kulatým zrnem* – dochází ke zpevnění povrchu a zvýšení meze pevnosti
- *materiály s ostrohranným zrnem* – výsledná drsnost povrchu závisí na úhlu dopadu materiálu, jak je zřejmé z Obr. č. 7.



Obr. č. 7 – Úhel dopadu částic na povrch podkladového kovu – a) šikmý, b) rovnoběžný, c) kolmý [9]

## 2.3 Technologie smaltování

Technologie smaltování je proces výroby smaltového povlaku na podkladovém kovu. Jedná se o tepelnou povrchovou úpravu kovu, za účelem pevného spojení jednotlivých fází systému smalt-kov. [1]

Samotnou technologii lze rozdělit na čtyři etapy. První etapou je úprava povrchu před nanášením smaltu, která je popsána v předchozí kapitole (2.2.3). Další etapou je výroba smaltéřských frit. Třetí etapou je úprava frit pomocí vybraných přísad a příprava

prášků, nebo suspenze, tzv. břechky. Poslední etapou je samotné smaltování, které zahrnuje nanášení, sušení a vypalování povlaku.

### 2.3.1 Výroba smaltěřských frit a příprava suspenze

Homogenizovaná a navážená směs sklotvorných oxidů a pomocných surovin se taví za teplot 1150 až 1400 °C podle druhu skloviny. Roztavená sklovina se chladí vodou za vzniku malých zrníček, tzv. smaltěřských frit, které se suší a melou za sucha nebo za mokra s různými přísadami. Přísady mají za úkol upravit tekutost smaltěřské břechky (soda, borax, nebo dusitan sodný). Dále se také přidávají látky, které upravují teplotu vypalování povlaku (křemen, živec). [9]

Z fyzikálního hlediska je smaltěřská suspenze heterogenní vícesložkový soubor tuhých částic rozptýlených ve vodě. Základní složkou jsou *jíly* a *bentonity*, které jsou základem tekutosti smaltu, a voda je jejich disperzním prostředím.

Při suchém mletí se využívá *hydrofobizace* smaltěřské frity, která obnáší obalení mletého prášku dielektrikem (organické sloučeniny křemíku). Tato operace zlepšuje schopnost prášku vytvářet aerosol, pro lepší nanášení v elektrostatickém poli. [1]

### 2.3.2 Způsoby nanášení, sušení a vypalování smaltových povlaků

V této kapitole je popsána procedura smaltování, která zahrnuje procesy nanášení, sušení a vypalování povlaku.

Při výběru optimální metody nanášení se zohledňují následující faktory:

- a) geometrie výrobku
- b) požadované funkční vlastnosti
- c) sériovost procesu

**Podle způsobu nanášení** se smalty rozdělují pro aplikaci: [1,2]

➤ Za mokra ve formě vodní suspenze, tzv. břechky

Dle mechanismu vytváření vrstvy, dělíme na:

- **Metoda stříkací** – metoda je vhodná na rozměrné díly s jednoduchou geometrií. Je založená na rozprašování suspenze na díl pomocí tlakové stříkací pistole. Částice dopadají na povrch podkladového materiálu a spojují se v jednolitý film. Stříkání probíhá v podtlakových kabinách. Nevýhodou je vysoká spotřeba su-

spenze a požadavek na zručnost operátora při ručním stříkání. Koncentrace rozptýlené suspenze se mění v závislosti na vzdálenosti nanášecího kužele stříkací pistole, v rámci jeho osy. Zásobní tlakové nádrže na suspenzi jsou vybaveny míchadlem, které udržují suspenzi v homogenním stavu.

Metoda se dělí na:

- *Automatické stříkání* – uplatnění pro velkosériovou výrobu a tvarově členité, velkorozměrné díly. Slouží k potlačení závislosti kvality povlaku na lidském faktoru.
- *Ruční stříkání* – při smaltování výrobků v malých sériích a tam, kde se vyžaduje rychlá změna barvy a druhu nanášeného povlaku.
- *Elektrostatické stříkání* – použití zejména na ploché výrobky s menšími nároky na protikorozní odolnost smaltu (titaničité jednovrstvé smalty). Součástí stříkací pistole je ionizační elektroda, která je připojená na zdroj vysokého napětí (80-120 kV), která částicím uděluje záporný náboj. Částice poté putují směrem ke smaltovanému dílu a dostávají se do oblasti siločar elektrostatického pole, které je usměrňuje.
- **Metoda elektroforetická** – vychází z Coehnova principu, který říká, že částice, které mají relativní permitivitu menší, než je relativní permitivita vody, se v poli stejnosměrného elektrického napětí nabíjejí záporně. Jedná se o částice rozptýlené ve smaltéřské suspenzi, do níž se vloží dvě elektrody (katoda a anoda). Tuhé částice suspenze se pohybují směrem k výrobku, který tvoří anodu, a vytvářejí na něm povlak.  
Tato metoda se využívá u tvarově složitých výrobků, kde umožňuje dosáhnout rovnoměrné vrstvy a dokonalé pokrytí. Mezi nevýhody patří velká spotřeba energie, vody a vysoké náklady na technologické zařízení.
- **Metoda stékání** – patří mezi nejstarší metody nanášení. Je vhodná pro duté a rotační součásti malých rozměrů.

Metodu lze dále dělit na:

- *Máčení* – vrstva se nanáší ponořením dílu do smaltéřské suspenze. Po vytažení je výrobek pokryt vrstvou břechky. Přebytečné množství suspenze je odváděno pomocí gravitační síly tečením z výrobku. Je nutné, aby přebytečná suspenze odtékala z výrobku rovnoměrně, k zachování konstantní tloušťky.

- *Polévání* – využívá se při složitější geometrii dílů. Z hlediska manipulace s výrobkem se používají polévací automatické stroje.
- *Nanášení ve vakuu* – tento postup se využívá se na vnitřní plochy uzavřených dutých dílů. Generovaný podtlak vytvoří rovnoměrný nános suspenze a její optimální roztečení.
- Za sucha ve formě pudrů (na litinu)
  - **Nanášení za tepla** (pudrování posypem) – dochází k přehřevu dílů na teplotu až 900 °C. Na díly se nanáší jemný prášek, který se při styku s povrchem kovu taví a vytváří kompaktní povlak.
  - **Nanášení za studena** (pudrování fluidací) – je založeno na principu nanesení vrstvy prášku ve fluidním loži, ihned po vypálení základního smaltu, který byl nanesen mokřým způsobem. Dochází k natavení naneseného prášku za vzniku souvislé vrstvy.
- Ve formě suchých prášků (nanášení v elektrostatickém poli) – dochází k aplikaci rozemleté frity ve formě prášku pomocí speciálních pistolí. Částice prášku jsou při opouštění pistole nabity záporně a tlakovým vzduchem unášeny k povrchu s kladným nábojem. Prášek se udržuje na dílu pomocí elektrostatických sil.

**Sušení smaltu** – smaltéřská suspenze, která byla nanesena mokřým způsobem nanášení, se suší, za vzniku tzv. biskvitu, který podstupuje operaci vypalování. Kdyby nedošlo k sušení povlaku před jeho vypalováním, tak by během vypalování docházelo k trhlinám povlaku vlivem tlaku vodní páry, nebo ke kontaminaci prachovými částicemi ještě před jeho vypálením. [1]

Podle prostředí, ve kterém sušení probíhá, dělíme na:

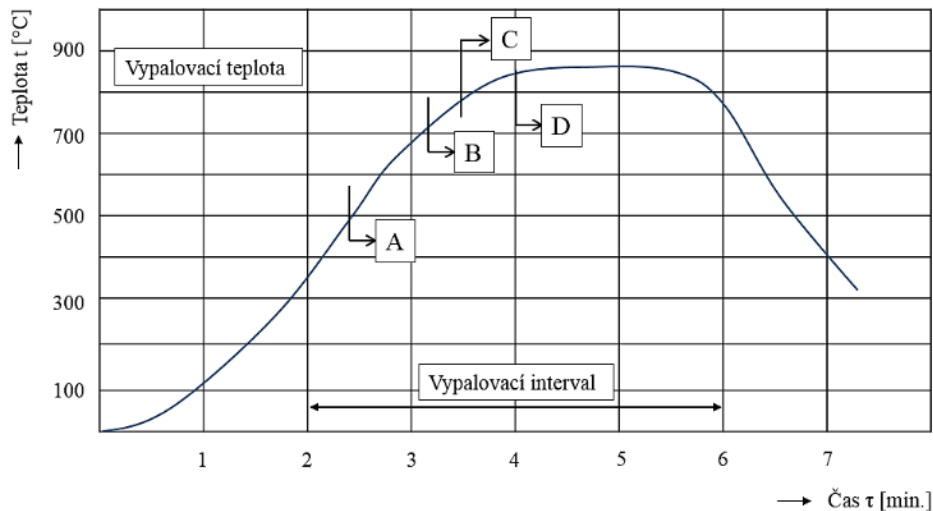
- Sušení v sušících zařízeních – doba sušení při přenosu tepla konvencí je přibližně 15-20 minut a teplota vzduchu uvnitř sušárny je 60-130 °C, při radiačním přenosu tepla je doba sušení 3-5 min.  
Sušárny jsou elektrické nebo vyhřívané odpadním teplem z vypalovací pece a rozdělují se na komorové a tunelové.
- Sušení na volném vzduchu – doba sušení je 6-8 hodin. Metoda je využívána ke snížení energetického využití.





**Vypalování smaltu** – po vypálení vzniká sklovitá vrstva smaltu s lesklým a hladkým povrchem, která je adhezí spojena s podkladovým kovem.

Při vypalování základního smaltu je kladen požadavek na vytvoření fázového rozhraní kov – smalt. U vypalování krycího smaltu se jedná o vytvoření smaltového povlaku požadovaných funkčních vlastností. Tyto děje probíhají při teplotách od 740 °C do 900 °C. Průběh jednotlivých dějů při vypalování je zřejmý z Obr. č. 8.



Obr. č. 8 – Průběh jednotlivých dějů při vypalování

**A** – počátek tvorby FeO, **B** – počátek vypalování a fázové přeměny železa, **C** – počátek rozpouštění SiO<sub>2</sub> a jílu, **D** – tvorba přídržné vrstvy [1]

Vypalování probíhá ve vypalovacích pecích. V praxi se využívají zejména vsázkové, nebo kontinuální pece, které se dále dělí, podle způsobu ohřevu a druhu energie, na plynové, olejové a elektrické. [1]

## 2.4 Vady smaltových povlaků

Povrchové vady ve smaltech se objevují z důvodu nedodržení správné technologie výroby, nebo při špatné přípravě podkladového povrchu před smaltováním, nebo volbě nevhodného podkladového kovu. Vady se nejčastěji projevují celkovou, nebo částečnou nehomogenitou povrchu a vznikem slabých míst v povlaku, které méně odolávají tepelnému a chemickému namáhání. [1]



### 2.4.1 Rozdělení jednotlivých vad

Vady smaltových povlaků lze rozdělit na dva základní typy: [1]

- Porušení celistvosti povrchu nebo povrchové nerovnosti
- Nerovnoměrné zbarvení povrchu

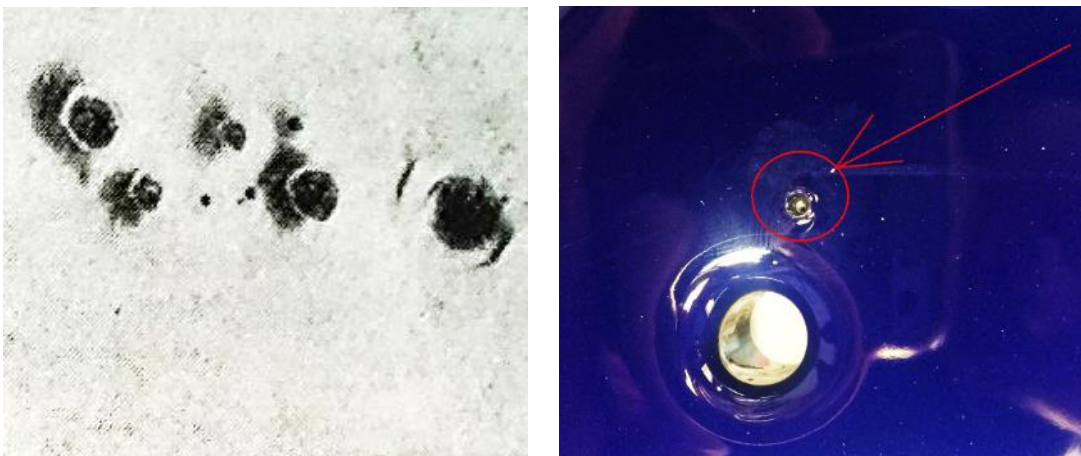
Mezi hlavní závady smaltových povlaků patří: [1,2,3]

- **Bubliny a krátery** – pro tyto závady je specifické, že se jedná o výstupky kulovitěho tvaru, které tvoří necelistvost povlaku smaltu. Velikost výstupků se pohybuje okolo jednoho, případně více milimetrů a tvoří buď shluky, nebo jsou rozprostřeny po smaltovém povlaku, viz Obr. č. 9.

Příčinou vzniku této vady je nejčastěji přítomnost vodíku, který vzniká při moření. Proces moření se používá k odstranění okují a rzi z povrchu kovu pomocí roztoků kyselin za vzniku solí a zbytkového vodíku. Pro snížení množství zbytkového vodíku je nutné dodržet předepsanou dobu moření a provést kontrolu neutralizační lázně.

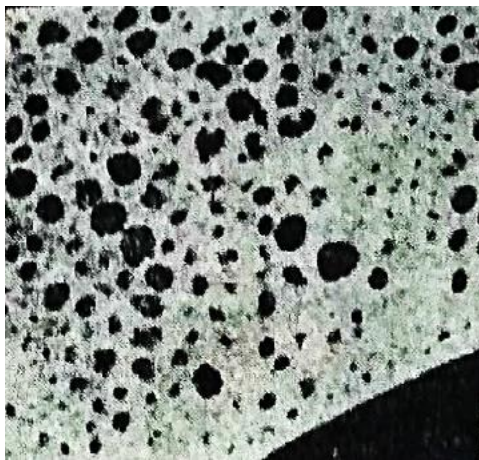
Množství plynů také závisí na chemickém složení podkladového kovu. Vysoký obsah uhlíku způsobuje při vypalování v oxidačním prostředí přeměnu na oxid uhličitý.

Plyny, které zůstávají pod vrstvou smaltu, zvětšují při vypalování svůj objem a pronikají touto vrstvou. Jestliže dojde k náhlému přerušení vypalování smaltu, dochází ke ztvrdnutí vrstvy a vzniku kráterů, které se nestačily zalít roztaveným smaltem. Krátery se vyskytují ve formě vyvýšených kruhových prohlubenin, které v některých případech zasahují až na podkladový kov, čímž vzniká necelistvost povlaku.



Obr. č. 9 – Vada smaltového povlaku – Bubliny, krátery [2]

- **Vyvřeliny** – jedná se o shluk bublin, který se vyskytuje výhradně u krycího smaltu. Strukturou připomínají pěnu, jak je vidět na Obr. č. 10. Pocházejí z uvolněného oxidu siřičitého, který je obsažený v prostředí pece, nebo z příliš velkého obsahu síranu ve smaltéřské fritě.
- **Póry** – u tohoto typu vady se jedná o mikroskopické, až makroskopické otvory ve smaltu (viz Obr. č. 11), které mohou pronikat krycí vrstvou smaltu, přes vrstvu základního smaltu, až na podkladový kov. Příčinou vzniku je vodík, který je přítomen v podkladovém kovu, nebo kontaminace nevypáleného smaltu částicemi prachu.



Obr. č. 10 – Vada smaltového povlaku  
– Vyvřeliny

Obr. č. 11 – Vada smaltového povlaku  
– Póry

- **Odprýsknutí smaltu** – ke vzniku této vady dochází při nedostatečné přilnavosti základního smaltu k povrchu podkladového kovu, nebo při rychlém ochlazení po vypálení smaltu, z důvodu rozdílného koeficientu teplotní roztažnosti smaltu a podkladového kovu. Tato situace se může projevit i mezi základním a krycím smaltem.

Velmi častou příčinou odprýsknutí smaltu bývá nedostatečně očištěný povrch podkladového kovu před nanesením smaltéřské břečky, nebo mastnota základního smaltu před nanesením vrstvy krycího smaltu.



Obr. č. 12 – Vada smaltového povlaku – Odprýsknutí smaltu

- **Rybí šupiny (nehty)** – jedná se o povrchové poškození smaltové vrstvy, jenž tvarem připomíná rybí šupiny, nebo nehty. V podstatě se jedná o odprýsknutí smaltu ve formě malých šupin neboli prohlubní, které jsou na jedné straně rovné a na druhé půlkruhové. Hloubka této vady může sahat až na podkladový kov a způsobit necelistvost povlaku.

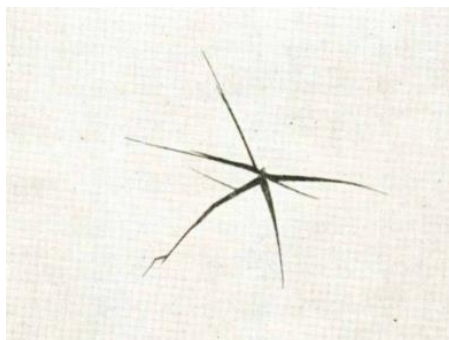
Odprýsknutí povrchové vrstvy ve formě rybích šupin nastává až po delší době a nejpravděpodobnější příčinou vzniku této vady je difúze vodíku do mřížky podkladového kovu při vypalování. Jedná se o výsledek reakce mezi vodou, pocházející z vlhkosti v atmosféře pece a železem z podkladového kovu. Reakce probíhá až do rovnovážného stavu. Po ochlazení smaltovaného výrobku se začne vodík postupně uvolňovat a hromadit okolo mikroskopických vad, za vzniku větších molekul, které způsobují zvýšení tlaku v povrchové vrstvě a odprýsknutí smaltu.

Dalším zdrojem vodíku mohou být jednotlivé přísady používané při mletí smaltu, nebo zbytkový vodík po moření oceli.



Obr. č. 13 – Vada smaltového povlaku – Rybí šupiny [5]

- **Vlasové trhliny** – tato vada se projevuje jemnými trhlinkami, nebo shlukem křížových trhlín na povrchu smaltu. Příčinou vzniku této vady může být náhlé ochlazení, nevhodně navržená konstrukce výrobku, zvolený smalt se špatnou tepelnou roztažností, nebo zbytkové pnutí v podkladovém kovu, které nebylo odstraněno žiháním. Jelikož má smaltovaná vrstva relativně malou pevnost v tahu, projevuje se zbytkové pnutí tvorbou vlasových trhlín (viz Obr. č. 14).

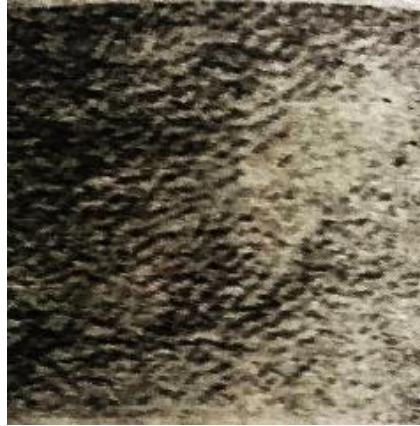


Obr. č. 14 – Vada smaltového povlaku – Vlasové trhliny [5]

- **Vlasové čáry** – jedná se o viditelné čáry ve vrstvě smaltu, bez porušení povlaku. Tato vada vzniká popraskáním naneseného smaltu před tím, než dojde k roztavení na výrobku. Příčinou vzniku vady je vysoká, nebo příliš nízká vypalovací teplota, velmi jemné mletí smaltéřské břechky, nebo její tlustý nános na podkladový kov a špatná konstrukce smaltovaného výrobku.
- **Změna barvy nebo lesku krycí vrstvy** – nastává v případě, kdy po vypálení jsou celé smaltované výrobky, nebo jejich části matné. Příčiny vzniku matného povrchu mohou být následující: vypalování na nízkou teplotu, kontaminace smaltu z prostředí pece, špatné složení povrchového smaltu (velký přídavek barvicí složky atd.).
- **Zvlnění krycí vrstvy, pomerančová kůra a zvrásnění** – u vlnitého povrchu se jedná o střídavé prohlubeniny a vyvýšeniny, které se pravidelně střídají na povrchu smaltu. Příčinou této vady je nedostatečné rozmíchání, nebo rozpuštění stavěcí složky ve smaltéřské břechce.

Pro pomerančovou kůru (viz Obr. č. 15) je specifický pórovitý povrch smaltu s pravidelně rozmístěnými důlky. Tato vada vzniká převážně při nanášení smaltu pomocí stříkací pistole pod velkým tlakem, malé vzdálenosti od výrobku a špatně zvoleným úhlem nanášení.

Zvrásnění povrchu smaltu se projevuje výskytem malých trhlinek nepravidelného tvaru. Příčinou vady bývá velmi tlustá vrstva smaltu, nebo kontaminace smaltéřské břečky.



Obr. č. 15 – Vada smaltového povlaku – Pomerančová kůra [2]

- **Měděné hlavičky** – jedná se o hnědočervené skvrny na povrchu vypáleného základního smaltu. Vznikají lokálním okysličením povrchu a propálením smaltu, za vzniku oxidu železitého, pocházejícího ze zbytků okují. Ty pocházejí ze znečištěného povrchu zbytků železitých solí, po moření podkladového kovu.  
Možnosti předcházení vzniku vad jsou:
  - a) zvolení základního smaltu o nízké viskozitě, ve kterém dojde k lepšímu rozpouštění železitých solí
  - b) využití niklové lázně pro moření podkladového kovu
- **Porušení smaltované vrstvy vodou** – může se projevit podmáčením, kdy se pod okrajem výrobku vytvoří nepravidelná čára, která zasahuje do určité vzdálenosti. Příčinou je vnikání vlhkosti do tzv. biskvitu neboli do vysušeného nevypáleného smaltovaného povlaku.
- **Tmavé body ve smaltu** – tuto vadu způsobuje kontaminace z atmosféry pece (obsahující síru), okujemi nebo drobnými částicemi metalického železa, prachem, sazemí. Možnosti předcházení této vady je dodržení čistoty při tavení frit, mletí, nanášení a vypalování. A dále přesné dodržování technologického postupu.
- **Květy ve smaltu** – projevují se bíle zbarvenými místy, nepravidelných tvarů, na povrchu smaltu. Jsou způsobeny obsahem síry a jejích oxidů v atmosféře pece, nebo ve smaltéřských fritách. Způsoby předcházení této vady jsou: dostatečná těsnost tzv.

mufle neboli části pece, nádoby ze žárovzdorného materiálu, která tvoří vlastní pracovní prostor a provedení kontroly chemického složení vstupních surovin.

- **Vyhořelá místa** – neboli propálený smaltový povlak. Důvodem vzniku je nesterjnoměrné nanesení smaltéřské břečky, výhradně místa s tenkou vrstvou naneseného smaltu. Tato situace vyžaduje kontrolu stejnosměrnosti nanášení smaltu. Dalším důvodem je znečištěný povrch kovu před nanesením smaltéřské břečky, který vzniká po nedokonalém moření.
- **Mechanické poškození** – tato vada se vyskytuje buď ve vypáleném smaltu, nebo v nevypáleném smaltovaném povlaku, tzv. biskvitu. Jedná se o stopy od manipulačního nářadí, otisky prstů operátorů, nebo poškození cizím zaviněním na hotovém výrobku, které se projevují necelistvostí povrchu smaltu.
- **Borcení výrobků** – nastává v případě, kdy konstrukce výrobku nespĺňuje požadavky pro nanášení smaltu. Nebo nedošlo k žihání podkladového kovu ke snížení vnitřních pnutí atd.

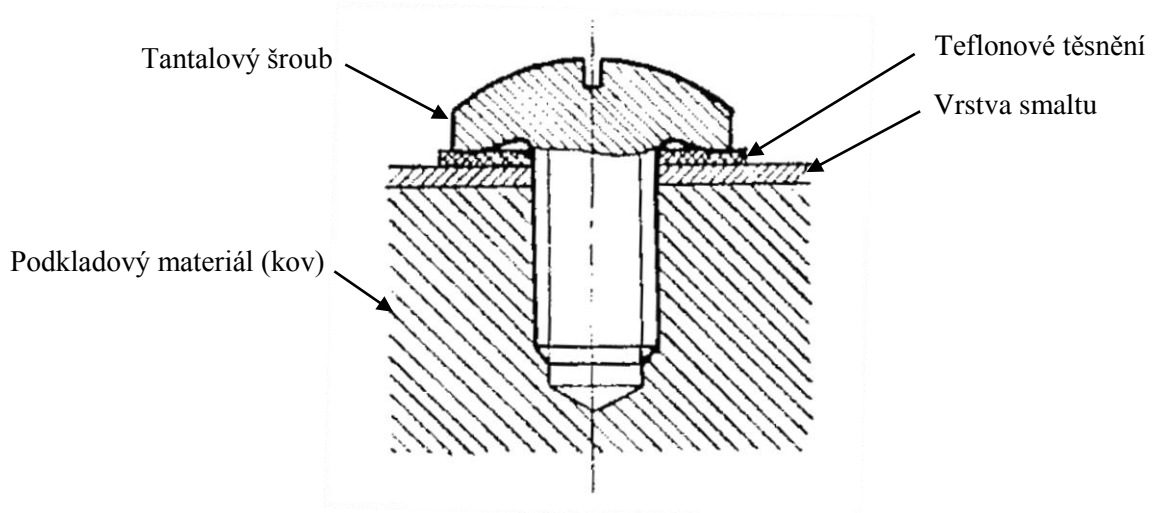
## 2.4.2 Opravy vad smaltových povlaků

Smaltové povlaky, které obsahují nějakou vadu, která by mohla negativně ovlivnit funkčnost výrobku, se musí neprodleně opravit. A to pomocí lokálního doplnění smaltu, až po kompletní odstranění vrstvy smaltu a přesmaltování celého povrchu. Při poškození smaltu v chemických provozech se využívají metody opravy pomocí tantalových šroubů s teflonovým těsněním, viz Obr. č. 16, nebo pro větší vady se využívají tzv. smaltované „hříbky“ (viz Obr. č. 17). U tantalových šroubů se uplatňuje srovnatelná chemická odolnost tantalu, teflonového těsnění vzhledem ke smaltu.

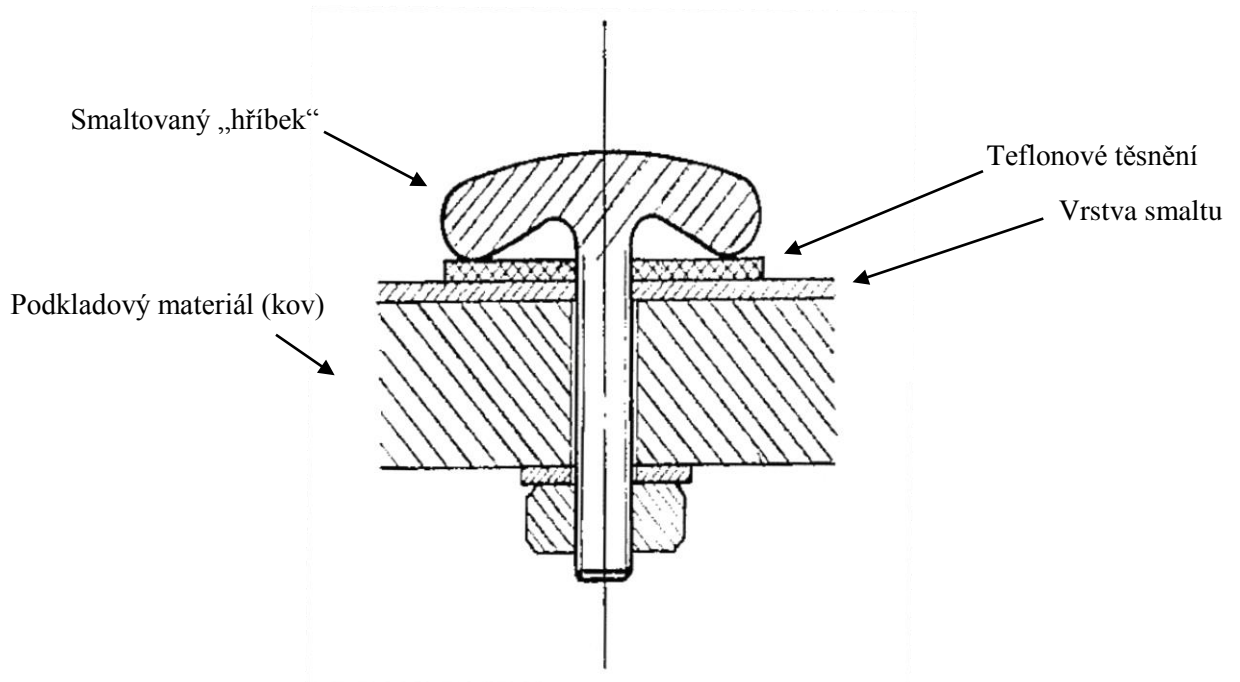
Mezi velice nákladné operace patří celková oprava smaltového povlaku, která vyžaduje odstranění původního smaltu, přesmaltování celého výrobku, s následným vypálením v peci. Původní smalt lze odstranit pomocí mechanického tryskání, které je prováděno pro větší tloušťky materiálu současně s teplotním šokem, nebo pomocí chemických reakcí se zásadami alkalických kovů pro menší tloušťky. Přesmaltování celého povrchu neboli tzv. resmaltace, se využívá v případech, kdy opotřebení je natolik veliké, že nelze využít jiného druhu oprav.

Pro lokální opravy smaltových povlaků se využívají jednovrstvé smalty (přímé). Ty patří mezi speciální typy smaltů, které mají chemické a fyzikální vlastnosti základního

i krycího smaltu současně. Uvedené poškozené místo je nutno vybrousit, nanést nový smalt a následně vypálit v peci. [1]



Obr. č. 16 – Tantalový šroub pro opravy smaltových povlaků [1]



Obr. č. 17 – Smaltovaný hříbek pro opravy smaltových povlaků [1]



## 2.5 Využití a vývojové trendy smaltových povlaků

V minulosti a také v současné době jsou smaltové povlaky využívány zejména v oblasti potravinářského průmyslu a v oblasti farmacie. Nicméně smaltový povlak se považuje za povrchovou úpravu třetího tisíciletí. Kvůli jeho korozní odolnosti, variabilitě v barevnosti povlaku, zdravotní nezávadnosti, absorpční schopnosti slunečního záření, dobré stabilitě v atmosférických podmínkách a možnému zvýšení křehkolomových vlastností a odolnosti proti nárazu při aplikaci vrstev nanočástic, lze smalt využívat v různých průmyslových odvětvích. Jedná se především o strojírenství, energetiku, zemědělství, či stavebnictví. Ale uplatnění nachází i v medicíně, letectví či kosmonautice. [12]

Vývoj smaltových povlaků se orientuje na nové způsoby nanášení smaltěřských prášků, například v poli vysokého napětí, dále vývoj nových podkladových ocelí a využití nanočástic složek smaltěřské břečky k nanášení vrstev v nanorozměrech.

Schopnost absorbovat sluneční záření se pak využívá při konstrukci solárních kolektorů. Dále odolnost smaltu proti vysokoteplotní korozi se uplatňuje při konstrukci kotlů, spalovacích motorů, pecí, nebo turbín. V těchto případech dochází k dostatečné ochraně podkladového kovu. [12]

## 2.6 Indukční ohřevy

Indukční ohřevy jsou nejčastěji využívány pro tepelné zpracování kovů, ohřev pro tváření, svařování a pájení nebo k roztavení kovů v tavicích pecích. [18]

Mezi hlavní výhody indukčních ohřevů patří vysoká hustota výkonu a rychlost ohřevu, relativní pružnost regulace a také to, že není zapotřebí kontakt mezi materiálem a induktorem. Lokální ohřev materiálů probíhá indukcí s přímou aplikací Jouleova a Lenzova zákona. [20]

### 2.6.1 Elektromagnetická indukce

Indukční ohřevy využívají principu elektromagnetické indukce, kdy dochází k dopadu elektromagnetického vlnění na vodivý materiál a vzniku časově proměnného magnetického pole, s následným vznikem vířivých proudů a tepla uvnitř materiálu. [19]

Dle Lenzova indukčního zákona platí, že na vodič, který je umístěn v proměnném magnetickém poli, působí elektromotorická síla za vzniku vířivých proudů. [20]

Vířivé proudy vytvářejí teplo dle Joulova zákona (5):

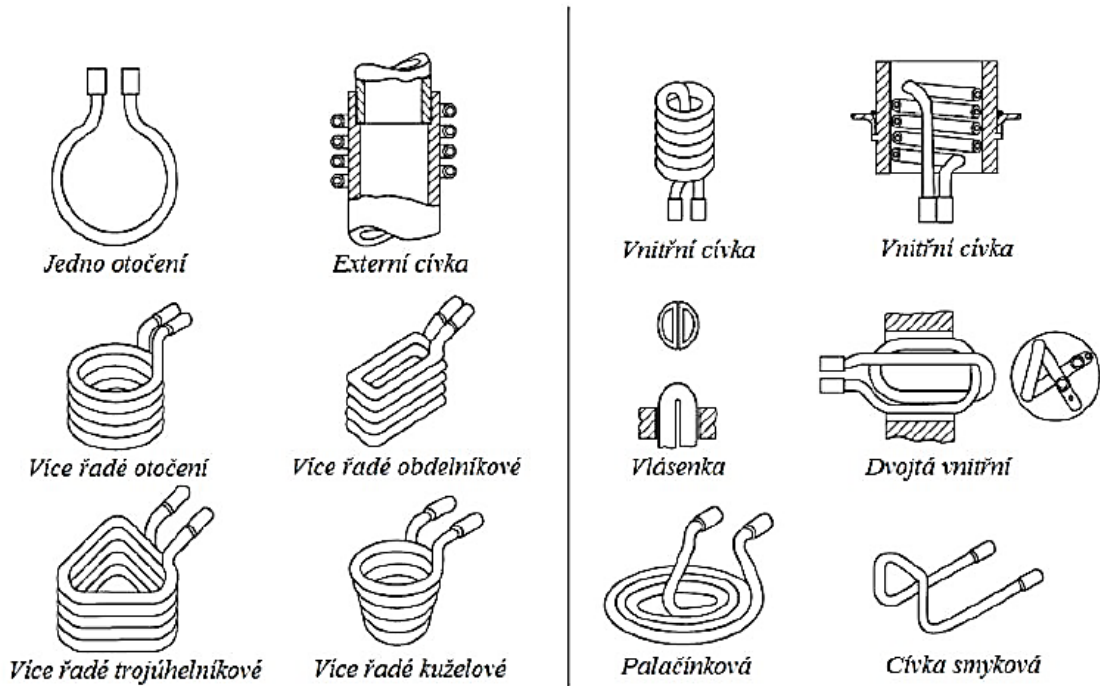
$$Q = R \cdot I_{ef}^2 \cdot \tau \quad (5)$$

Kde:                    Q ... teplo [J]  
                          R ... odpor [ $\Omega$ ]  
                           $I_{ef}$  ... efektivní hodnota proudu [A]  
                           $\tau$  ... čas [s]

## 2.6.2 Indukční cívky

Indukční cívka neboli induktor je pracovní nástroj, pomocí něhož probíhá indukční ohřev. Konstrukčně je induktor elektrický vodič neboli cívka. Induktor je napájen proudem v rozmezí 10-3000 A o nízké (<3 kHz), střední (3-50 kHz), nebo vysoké frekvenci (50-1000 kHz). Přivedením střídavého proudu vzniká v okolí induktoru magnetické pole. [20]

Indukční cívky jsou nejčastěji z mědi, jelikož měď nedeformuje magnetické pole, díky permeabilitě materiálu blízké 1 a má výbornou elektrickou vodivost. Induktory mohou být jedno závitové, nebo více závitové, pro různá použití, s vnitřním chlazením, nebo bez. Příklady jsou ukázány na Obr. č. 18.



Obr. č. 18 – Příklady indukčních cívek [21]

### 2.6.3 Vliv frekvence induktoru na ohřivaný povrch

Hloubka vniku magnetického pole je nepřímo úměrná frekvenci induktoru. Z toho vyplývá, že s rostoucí frekvencí hloubka, a tedy i přímý ohřev, klesá. S tím souvisí fyzikální jev vyskytující se i u indukčního ohřevu, tzv. „skin efekt“. [18]

Tento jev lze využít i při vysokofrekvenčním svařování. Hloubku vniku elektromagnetického pole (6) lze vyjádřit jako:

$$a = \sqrt{\frac{\zeta}{f \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \pi}} \quad (6)$$

Kde:

a ... hloubka průniku elektromagnetického pole [m]

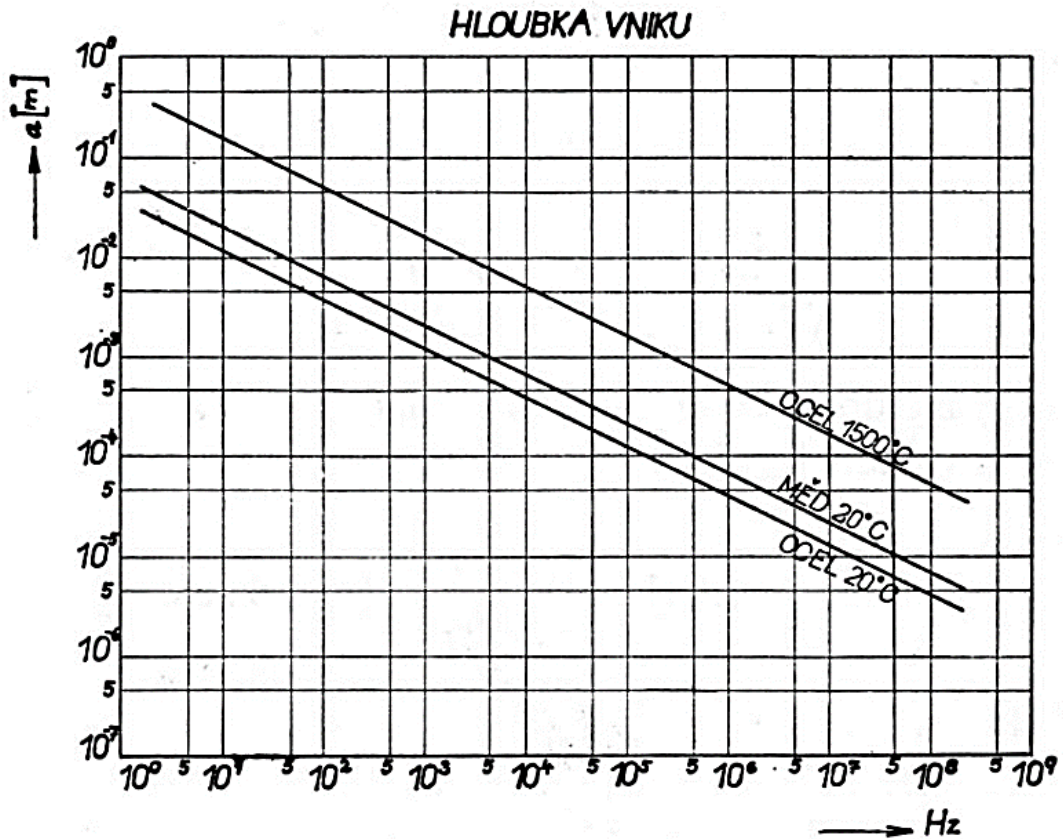
$\zeta$  ... měrný elektrický odpor [ $\Omega \cdot m$ ]

f ... frekvence [Hz]

$\mu_r$  ... relativní permeabilita [-]

$\mu_0$  ... permeabilita vakua; konstantní hodnota  $4\pi \cdot 10^{-7}$  [ $H \cdot m^{-1}$ ]





Obr. č. 19 – Hloubka vniku pro různé materiály v závislosti na frekvenci [19]

Tab. č. 6 – Hodnoty hloubky vniku pro různé materiály v závislosti na frekvenci [19]

	Frekvence [Hz]					
	50	$1 \cdot 10^3$	$10 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$300 \cdot 10^3$ *)	$1000 \cdot 10^3$
Materiál	Hloubka vniku a [mm]					
a) Měď (20 °C)	9,597	2,146	0,679	0,215	0,124	0,068
b) Ocel (20 °C)	5,956	1,332	0,421	0,133	0,077	0,042
c) Ocel (1500 °C)	71,176	15,915	5,033	1,592	0,919	0,503

\*) Frekvence induktoru použitá v experimentální části práce

a) Měď při 20 °C,  $\gamma = 1/\xi = 5,5 \cdot 10^7$  [S·m<sup>-1</sup>],  $\mu_r = 1$

b) Ocel při 20 °C,  $\gamma = 1/\xi = 5,5 \cdot 10^7$  [S·m<sup>-1</sup>],  $\mu_r = 10$  (do Curieovy teploty 740 ÷ 760 °C)

c) Ocel při 1500 °C,  $\gamma = 1/\xi = 5,5 \cdot 10^7$  [S·m<sup>-1</sup>],  $\mu_r = 1$  (nad Curieovou teplotou)



### 3. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce navazuje na teorii zpracovanou v předchozí části práce. Jednotlivé experimenty byly navrženy a zpracovány na základě požadavku firmy Neufe s.r.o. na zjištění počátečních parametrů pro lokální opravy smaltových povlaků pomocí indukčních ohřevů. Společnost Neufe s.r.o. je výrobcem smaltovaného zařízení pro chemický, farmaceutický a potravinářský průmysl.

Na základě daného požadavku, byly navrženy základní cíle experimentální části, koncipované na tři po sobě jdoucí etapy. Jde o nalezení *kritické rychlosti ohřevu*, *optimalizaci snímání teplot ze strany smaltu* a definování *vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu*.

První etapa je věnována nalezení tzv. kritické rychlosti ohřevu. Jde o posouzení vlivu rychlosti ohřevu smaltového povlaku na kovovém podkladu a zjištění maximální rychlosti ohřevu/ochlazování, při kterém ještě nevznikají ve smaltovém povlaku vady.

Úkolem druhé etapy je bezkontaktní měření teploty nevodivé smaltované vrstvy, přičemž zjištěné údaje budou následně využity pro zpětnovazebné řízení výkonu induktoru. Půjde o stanovení teplotní závislosti emisivity povrchu pro různé stavy a tloušťky smaltovaných vrstev.

Třetí etapa bude zaměřena na posouzení vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu z pohledu výkonu generátoru a jeho účinnosti, ale i z hlediska rovnoměrnosti vznikajících teplotních polí pod induktorem.

#### 3.1 Vliv rychlosti ohřevu smaltového povlaku

Na základě stávajících poznatků bylo v teoretické části práce uvedeno, že při rychlém ohřevu smaltu, nebo při rychlém ochlazení po vypálení smaltu, mohou vznikat vady výrobku, jako na příklad praskliny, nebo odprýsknutí vrstvy smaltu. Důvodem jsou rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti smaltu a podkladového kovu.

Pro posouzení vlivu rychlosti ohřevu a ochlazování na stabilitu smaltové vrstvy, bylo na základě plánu experimentů provedeno měření, jehož cílem bylo stanovení kritické rychlosti ohřevu a ochlazování, při kterém ještě nedojde k poškození stávající vrstvy smaltu.

Experiment byl relativně jednoduchý a spočíval v umístění speciálně vytvořeného zkušebního vzorku do prostředí s vyšší teplotou. Poté byla sledována rychlost ohřevu

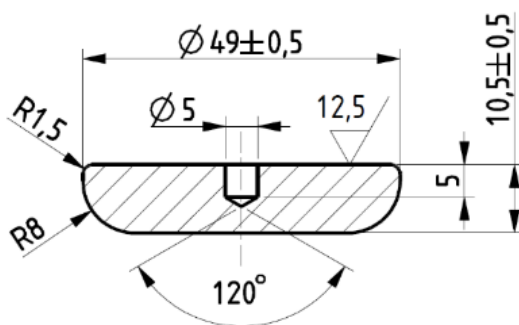
smaltového povlaku a vizuálně posuzováno, zda došlo k poškození vrstvy smaltu či ne. Experiment byl koncipován jako sedm po sobě jdoucích měření a byl přehledně zpracován do Tab. č. 7.

Tab. č. 7 – Plán experimentu pro zjištění vlivu rychlosti ohřevu smaltové vrstvy

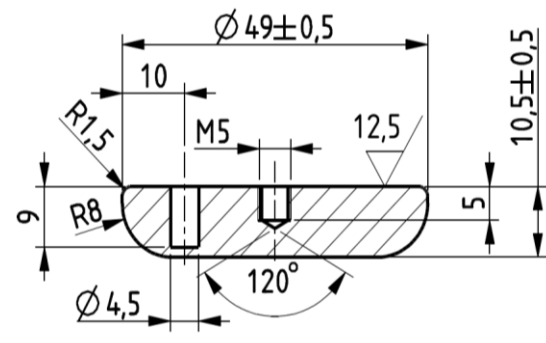
Číslo měření	Teplota pece	Rozsah teplot	Místo ohřevu/ochlazení
1	200 °C	23–200 °C	pec/vzduch
2	300 °C	50–300 °C	
3	400 °C	50–400 °C	
4	500 °C	50–500 °C	
5	600 °C	50–600 °C	
6	700 °C	50–700 °C	
7	800 °C	50–800 °C	

### 3.1.1 Návrh testovaného vzorku a metody měření

Tvar a rozměry testovaného vzorku byly odvozeny z normy ČSN EN ISO 13807. Podle této normy se jedná se o vzorek, používaný pro stanovení teploty tvoření trhlin při zkoušce tepelným rázem u smaltů pro chemický průmysl. Vzorek byl navržen tak, aby docházelo k rovnoměrnému rozložení napětí po celém povrchu, bez vrubů a hran. Na Obr. č. 20 je znázorněn testovací vzorek vycházející z normy ČSN EN ISO 13807.



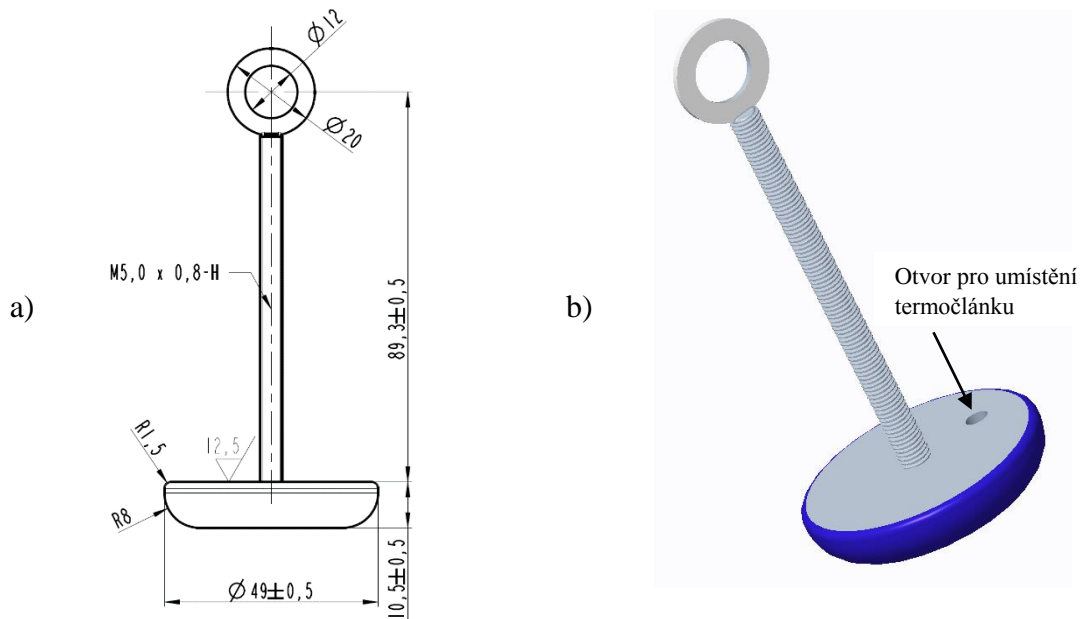
Obr. č. 20 – Testovaný vzorek dle normy ČSN EN ISO 13807 [8]



Obr. č. 21 – Modifikace testovaného vzorku pro měření

Pro účely měření byl testovaný vzorek upraven tak, že středový otvor o  $\varnothing 5$  mm, byl nahrazen závitem M5, pro umístění závitové tyčky s okem. Pro měření teploty pomocí

termočlánek byl do testovaného vzorku vyfrézován otvor, v optimální vzdálenosti dna od smaltové plochy, co možná nejbližší povrchu (viz Obr. č. 21). Na dno otvoru byl kondenzátorově přivařen termočlánek typu K. Celková koncepce zkušební vzorku je zřejmá z Obr. č. 22.



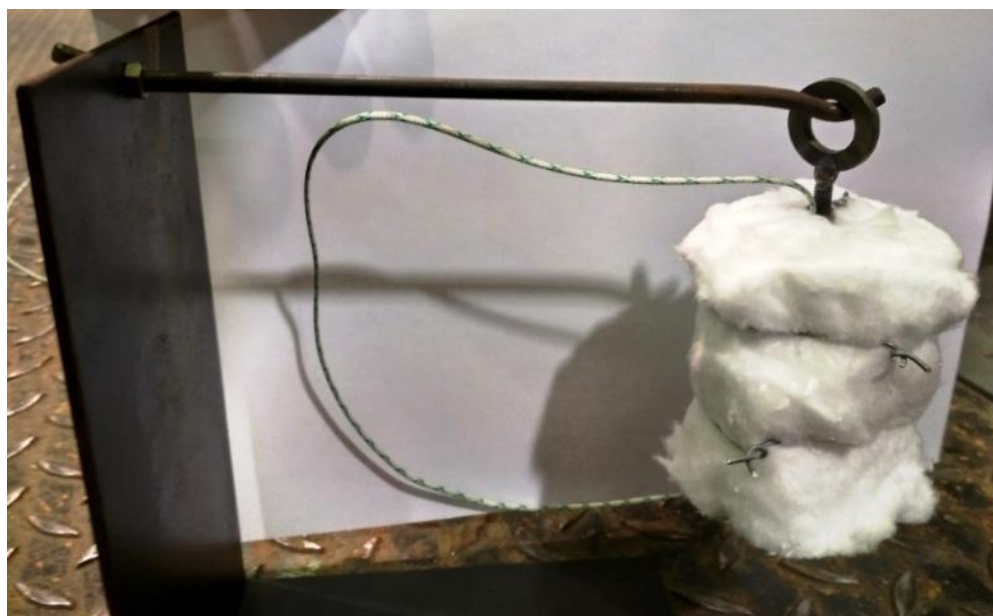
Obr. č. 22 – Zkušební vzorek – a) Detail vzorku b) 3D model vzorku určeného k zavěšení

Nanesená vrstva smaltu měla tloušťku přibližně 0,9 mm a podkladovým materiálem vzorku byla, s ohledem na využití firmou Neufe s.r.o., zvolena ocel P265GH. Podkladový materiál byl po přivaření termočláneku izolován vrstvou izolační vaty značky SIBRAL tak, aby byl umožněn přestup tepla do vzorku pouze radiací přes smaltový povlak. Izolační vata SIBRAL je složena z hlinito-křemičitých vláken s průměrnou tloušťkou do 5  $\mu\text{m}$ , s použitím do teploty až 1260°C. [11]

Termočlánek pak snímal změnu teploty ve vzdálenosti 1,9 mm od osálávaného povrchu. Na Obr. č. 23 je ukázán zaizolovaný vzorek s měřícím termočlánekem a na Obr. č. 24 je ukázána celá koncepce experimentu, včetně zavěšení na přípravku.



Obr. č. 23 – Izolace měřeného vzorku



Obr. č. 24 – Přípravek se zavěšeným vzorkem



### 3.1.2 Měřicí zařízení

Záznam teploty z termočláнку probíhal pomocí měřicího zařízení DiagWeld, vyvinutém na TUL, které je vybaveno sběrníci a řídicím počítačem (viz Obr. č. 25). Na měřicím zařízení lze upravit frekvenci snímání signálu z termočláunku a je plně dotykové. Data lze ukládat přímo na USB disk, nebo ukládat do vnitřní paměti, s následným stažením přes internetovou síť. Zařízení je schopno zaznamenávat s frekvencí snímání až 20 Hz a to až 18 teplotních kanálů současně. S rostoucím počtem snímacích kanálů však frekvence záznamu snímané veličiny klesá.

Na Obr. č. 26 je ukázána celková koncepce experimentu při měření v peci s kantalovými odporovými topnými segmenty, ohřáté na teplotu 700°C.



Obr. č. 25 – Měřicí zařízení DiagWeld



Obr. č. 26 – Odporová pec s umístěným vzorkem

### 3.1.3 Vyhodnocení naměřených dat a grafické zobrazení

Po každém teplotním cyklu realizovaném v odporové peci a následném chladnutím na vzduchu byla provedena vizuální kontrola měřeného vzorku, zda nedošlo k poškození povlaku (viz obr č. 27). K vizuální kontrole došlo jednak okamžitě po vychladnutí vzorku a také po delším časovém úseku (24 hodin) z důvodu možného porušení díky zbytkového napětí mezi podkladovým materiálem a smaltem.



Obr. č. 27 – Vzorek na konci měření

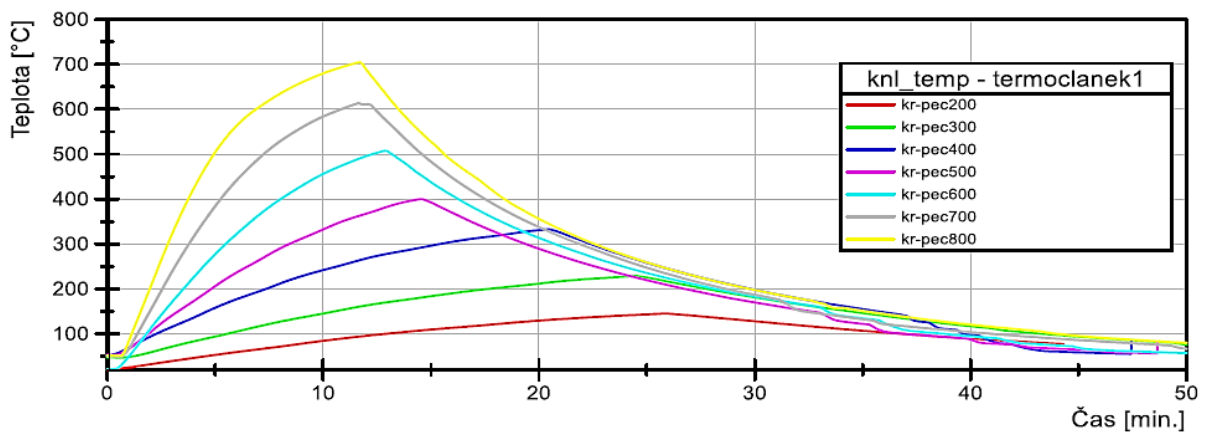
Naměřená data byla vyhodnocena v programu DIAdem 2015 od National Instruments. Jedná se o software, který slouží pro správu, analýzu a prohlížení velkého množství naměřených dat, s možností vytváření výstupních reportů z měření.

Ke zjištění rychlosti teploty ohřevu a ochlazování byly jednotlivé křivky teploty derivovány podle času, ve shodě se vztahem (7):

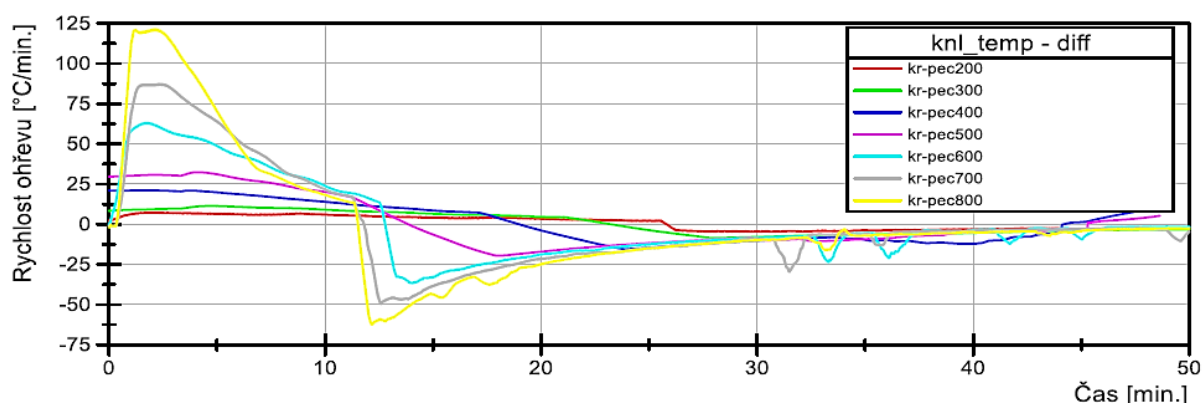
$$v = \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Kde:  $v$  ... rychlost ohřevu/ochlazování [ $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ ]  
 $dT$  ... teplotní diferenciál [ $^{\circ}\text{C}$ ]  
 $dt$  ... časový diferenciál [min.]

Výsledné průběhy teplot naměřených na zkušebních vzorcích, pro různě vysoké hodnoty okolní teploty, jsou uvedeny na Obr. č. 28. Průběhy rychlosti ohřevu vzorků, získané derivací teploty podle času, jsou uvedeny na Obr. č. 29. Hodnoty maximálních rychlostí ohřevu a ochlazení byly zpracovány do přehledové Tab. č. 8.



Obr. č. 28 – Grafické zobrazení naměřených dat – **teplota**



Obr. č. 29 – Grafické zobrazení naměřených dat – rychlost

Tab. č. 8 – Jednotlivé parametry určené z naměřených dat

Měření	Označení měření	Max. dosažená teplota [°C]	Max. rychlost ohřevu [°C.min <sup>-1</sup> ]	Max. rychlost chlazení [°C.min <sup>-1</sup> ]
1	kr-pec200°C	145,5	7,5	-4,6
2	kr-pec300°C	229,6	11,4	-8,5
3	kr-pec400°C	332,7	21,1	-15,5
4	kr-pec500°C	400,3	32,3	-19,6
5	kr-pec600°C	507,8	63,1	-36,8
6	kr-pec700°C	613,7	87,2	-49,7
7	kr-pec800°C	705,1	121,3	-62,5

### 3.2 Stanovení teplotní závislosti emisivity pyrometru

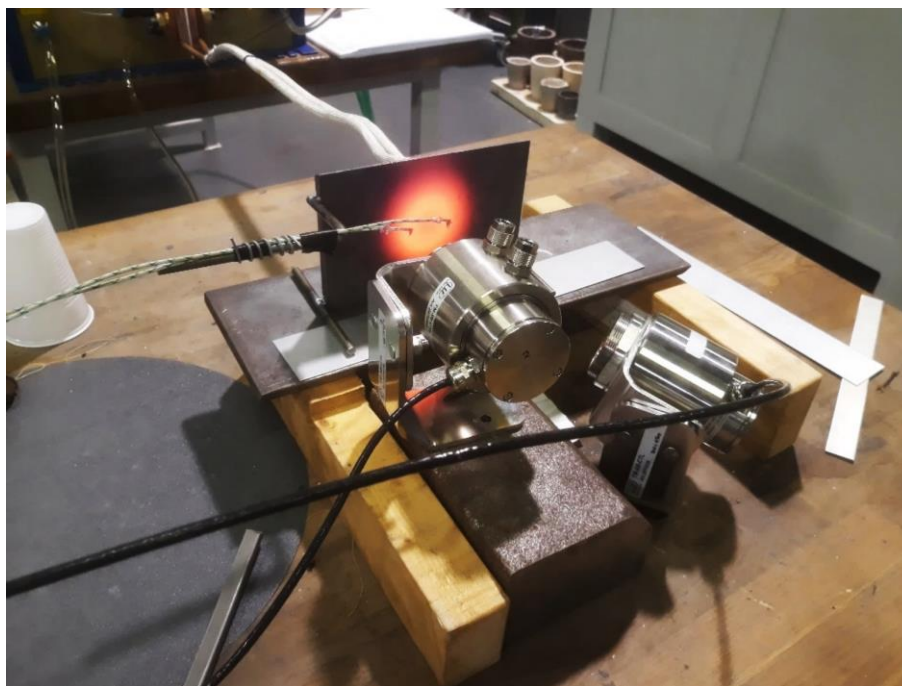
Při zamýšlených opravách smaltovaných povrchů pomocí lokálního indukčního ohřevu, není možné připojit termočlánky k hlídání teplotních polí a zpětnovazebného řízení induktoru ze strany smaltu, protože by došlo k narušení celistvosti smaltové vrstvy. Jediná možnost řízení výkonu indukčního zdroje pomocí teploty na rozhraní smalt-kovový podklad je pomocí pyrometru. Přesnost odečítání teploty pyrometrem závisí na přesnosti nastavení emisivity z vyzařovaného povrchu.

Emisivita závisí na druhu prostředí a stavu povrchu tělesa, u kterého se určuje teplotní vyzařování. Absolutně černé těleso má emisivitu  $\varepsilon = 1$ . Proto se pro různá prostředí určuje hodnota emisivity a dochází ke kalibraci pyrometru pro dané prostředí pomocí termočlánků.



### 3.2.1 Popis experimentu

Podstatou návrhu experimentu byl předpoklad, že kromě pyrometru bude teplota v daném bodě snímána ještě pomocí termočlánku. K základnímu materiálu tedy byly kondenzátorově přivařeny termočlánky typu K. Pro měření teploty bylo využito dvou pyrometrů, snímajících různé vlnové délky radiace, namířených do těsné blízkosti kondenzátorově přivařených termočlánků. Pyrometr 1 umožňující měření v rozsahu teplot 200 až 1100 °C a pyrometr 2 umožňující měření v rozsahu teplot od -60 do 700 °C. Každý z pyrometrů měl jinou ohniskovou vzdálenost. U pyrometru 1 to bylo 300 mm, u pyrometru 2 to bylo 150 mm. Ohřev vzorku byl realizován indukčně. Na Obr. č. 30 je ukázáno uspořádání experimentu.



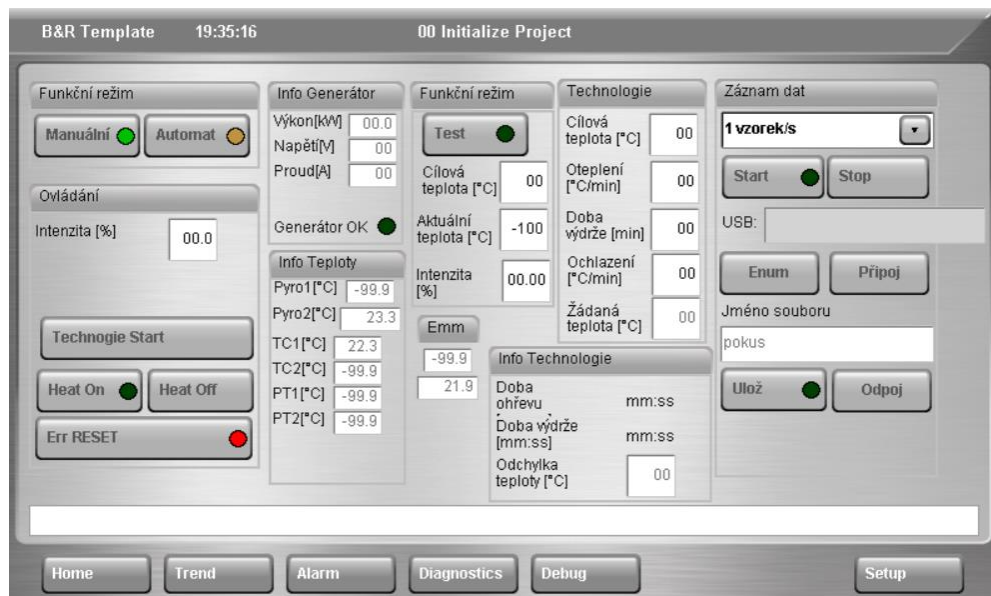
Obr. č. 30 – Umístění termočlánků a pyrometrů na měřeném vzorku

Měření teploty s následným stanovením emisivity vyzařování povrchu probíhalo jak pro základní materiál, tak pro vrstvu základního smaltu různých tloušťek nanesenou ručním stříkáním. Podkladovým kovem byla zvolena ocel P265GH. Povrch kovu byl před měřením a nanášením smaltu otryskán. Ruční nástřik byl realizován po navaření termočlánků, ze vzdálenosti cca 250 mm, nejprve horizontálními a následně také vertikálními pohyby tak, aby byla získána co nejkompaktnější vrstva. Pistole s průměrem trysky 2 mm, použitá pro ruční nástřik základní smaltu, je ukázána na Obr. č. 31.



Obr. č. 31 – Stříkáč pro nanášení vrstvy smaltu

K ohřevu byl využit indukční ohřev přístrojem typ HFR s výkonem 25kW a frekvencí 300 kHz. K ovládání výkonu zdroje byla použita první zkušební verze řídicího softwaru pro zpětnovazební řízení. Vizualizace prostředí softwaru pro zpětnovazební řízení induktoru je ukázána na Obr. č. 32.



Obr. č. 32 – Prostředí softwaru pro zpětnovazební řízení výkonu generátoru

Software byl nastaven tak, že řízení intenzity ohřevu bylo realizováno pomocí údajů o teplotě změřených pyrometrem, přičemž pro první část ohřevu od teploty okolí,



do teploty 400 °C, byl použit pyrometr 2. Po dosažení teploty 400 °C došlo k automatickému přepnutí a výkon indukčního zdroje byl při vyšších teplotách již řízen pyrometrem 1. Teplota 400 °C byla zvolena na základě dostatečného překryvu měřících rozsahů jednotlivých pyrometrů tak, aby při automatickém přepnutí docházelo jen k minimálním výkyvům při zpětnovazebném řízení výkonu generátoru.

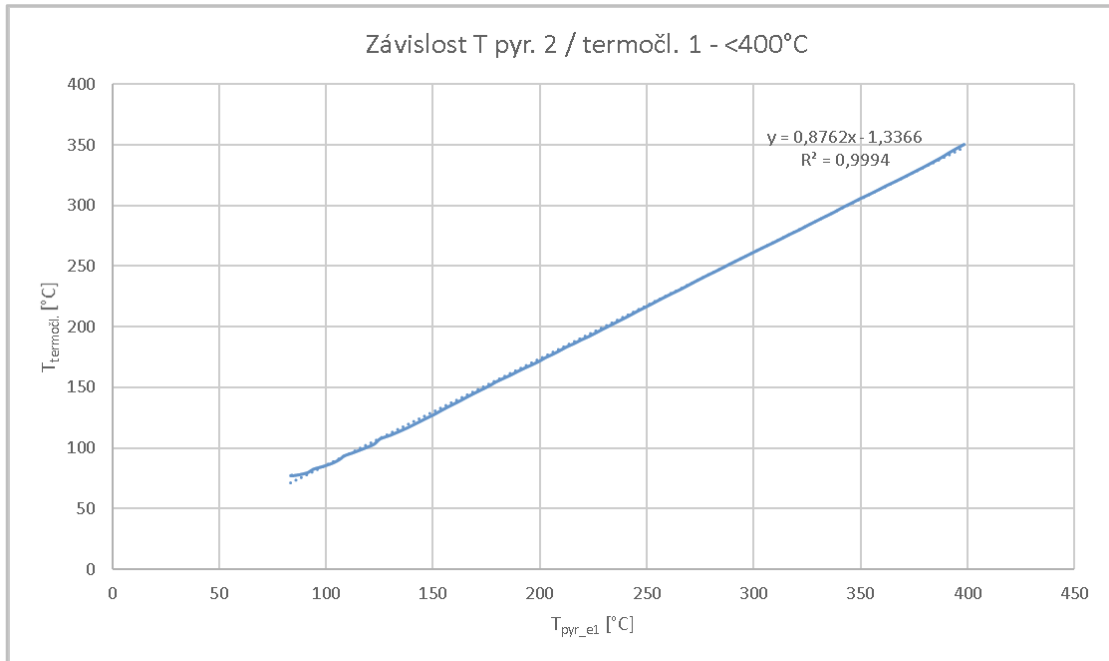


Obr. č. 33 – Generátor typ HFR s induktorem a měřeným vzorkem

Tvar induktoru byl navržen tak, aby splňoval podmínky experimentu. Indukční ohřev byl realizován přes celou tloušťku vzorku (8 mm), přičemž byl induktor vzdálen 4 mm od ohřívajícího povrchu. Uspořádání experimentu ze strany induktoru je ukázáno na Obr. č. 33.

Vyhodnocení naměřených dat probíhalo pomocí aplikace Microsoft Excel 2016. Pro zjištění příslušné emisivity vyzařování povrchu, byla data umístěna do grafu závislosti teploty změřené pyrometrem na teplotě změřené termočlánkem a proložena lineární funkcí ( $y = e \cdot x + q$ ) pro výpočet směrnice funkce a parametru  $q$ , který určuje její svislý posun. Pyrometry mají standardně při továrním nastavení emisivitu  $\varepsilon = 1$ . Po nalezení směrnice lineární funkce byla tato hodnota použita pro přepočítání pyrometrem zaznamenaného teplotního cyklu (viz Obr. č. 34).

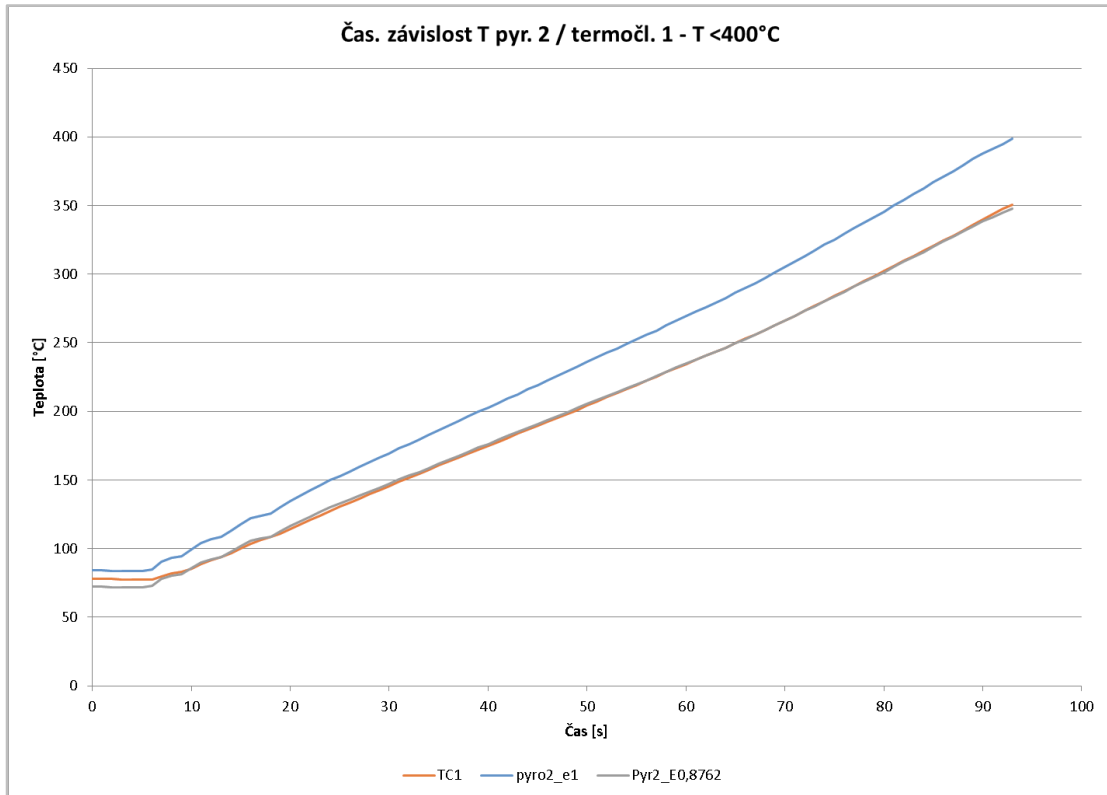




Obr. č. 34 – Závislost snímané teploty pyrometru a termočlátku prezentováno pro měřený teplotní interval

Data byla následně vykreslena do grafu časové závislosti teploty snímání pyrometru a termočlátku pro zjištění optimálního překrytí a verifikaci hodnoty emisivity. Na obr. č. 35 je oranžovou barvou znázorněn teplotní cyklus změřený termočlátkem TC1, dále je modrou barvou znázorněn teplotní cyklus změřený pyrometrem s nastavenou emisivitou  $\varepsilon = 1$ , a šedou barvou je znázorněn výsledek, jak by vypadal reálný teplotní cyklus změřený pyrometrem, při správně nastavené hodnotě emisivity povrchu. Stejným postupem proběhlo vyhodnocení emisivity vyzařování povrchu pro údaje snímané druhým pyrometrem, i vyhodnocení emisivity vyzařování povrchu přes různé tloušťky nanesené vrstvy základního smaltu. Grafické vyhodnocení všech měření je uvedeno v příloze 1.1 a 1.2.





Obr. č. 35 – Časová závislost snímané teploty pyrometru a termočlánku s verifikací hodnoty emisivity povrchu (*oranžová barva* – teplotní cyklus změřený termočlánkem, *modrá barva* – teplotní cyklus změřený pyrometrem s nastavenou emisivitou  $\varepsilon = 1$ , *šedá barva* – reálný teplotní cyklus změřený pyrometrem, při správně nastavené korekci emisivity povrchu)

### 3.2.2 Výsledky měření emisivity pro základní materiál

Měření emisivity probíhalo při snímání pyrometrů v blízkosti termočlánku 1 a 2. Ohřev probíhal rychlostí 200 °C/min, data byla ukládána s frekvencí záznamu 1 Hz. Maximální teplota ohřevu byla nastavena na 900 °C. Jednotlivé průběhy teplot naměřených na zkušebním základním materiálu byly vykresleny do grafů závislosti teploty pyrometru a termočlánku a následně proloženy lineární křivkou pro nalezení směrnice křivky a hodnoty hledané emisivity. Grafy časových závislostí snímaných teplot pro základní materiál, s výslednou korekcí emisivity povrchu základního materiálu, jsou uvedeny v příloze na obrázcích 1.1.1 až 1.1.5.

Měření probíhalo ve dvou fázích. V první fázi bylo nutné porovnat emisivity povrchu základního materiálu pomocí termočlánek 1, termočlánek 2 a pyrometrů namířených na jednotlivé termočlánky. Ve druhé fázi, realizované pro ověření nastavení emisivity pro jeden konkrétní bod ohřívaného povrchu, byly oba pyrometry namířeny na termočlánek 2.

Z důvodu rozdílného intervalu měření po pyrometr 1 (200 až 1100 °C) a pyrometr 2 (-60 do 700 °C), bylo měření rozděleno, s respektováním teploty přechodu mezi pyrometry (400 °C), na měření do 400 °C (pro pyrometr 2) a nad 400 °C (pro pyrometr 1).

Výsledné hodnoty emisivity pro základní materiál jsou zpracovány v přehledové Tab. č. 9.

Tab. č. 9 – Hodnoty emisivity pro základní materiál

Materiál	Termočlánek	Pyrometr 1 (do 400°C)		Pyrometr 1 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
Základní materiál	tc1	-	-	<b>0,890</b>	-28,410
	tc2	-	-	<b>0,887</b>	-29,461
	tc1 - 2. měření	-	-	<b>0,899</b>	23,632
	Termočlánek	Pyrometr 2 (do 400°C)		Pyrometr 2 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
	tc1	-	-	-	-
	tc2	<b>0,916</b>	-9,618	-	-
	tc1 - 2. měření	<b>0,876</b>	-1,337	-	-

- \*) data nejsou k dispozici (mimo měřený rozsah pyrometru, nebo porušení záznamu dat)

Při zpracování výsledků bylo zjištěno porušení záznamu dat z pyrometru 2 u měření na termočlánek 1. Z výsledků pro pyrometr 1 vyplývá vzájemná podobnost mezi výsledky pro měření na obou termočláncích, což lze aplikovat i na pyrometr 1 a považovat výslednou hodnotu emisivity za univerzální pro oba termočlánky, při stejném základním materiálu.

### 3.2.3 Výsledky měření emisivity pro různé tloušťky smaltu

Dle požadavků a zkušeností firmy Neufe s.r.o. se doporučuje nanesení vrstvy základního smaltu v tloušťce přibližně 0,5-0,6 mm, což po vypálení znamená výslednou tloušťku smaltu cca 0,35-0,4 mm. Pro posouzení vlivu tloušťky vrstvy smaltu na emisivitu povrchu však byly připraveny tři zkušební vzorky. První dva vzorky měli tloušťku

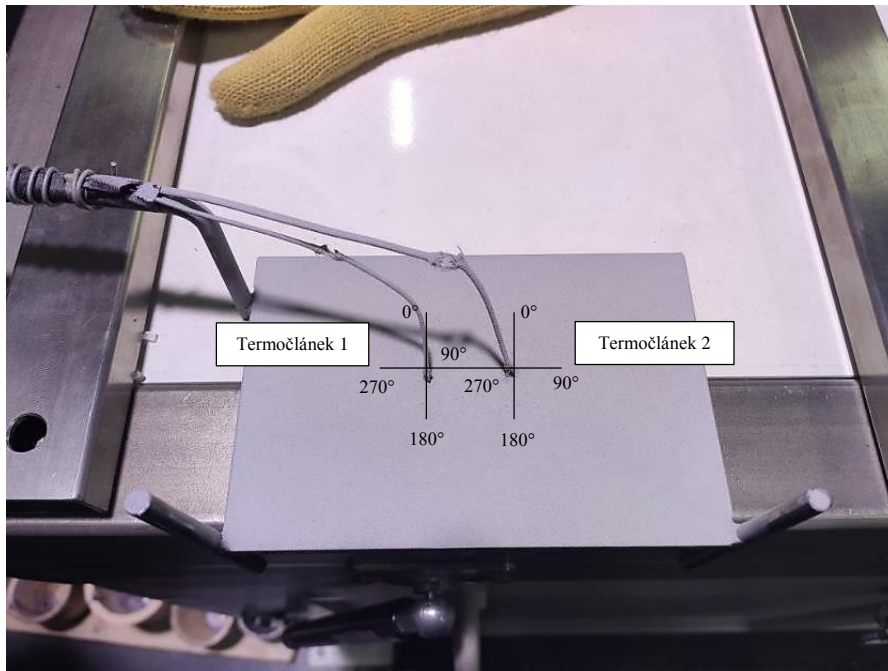
naneseného smaltu v místě měření v rozmezí 0,2 a 0,25 mm a třetí vzorek měl tloušťku naneseného smaltu 0,55 mm.

Tloušťka naneseného smaltu byla měřena přístrojem PosiTector 6000 (viz Obr. č. 36) v různých částech měřeného vzorku. Přístroj je určen pro měření tlouštěk nekovových povrchových vrstev a měří tloušťku vrstvy v mikrometrech.



Obr. č. 36 – Tloušťkoměr PosiTector 6000

Přehled měřených míst v blízkosti jednotlivých termočlánku je znázorněn na Obr. č. 37. Výsledky měření tloušťky před a po vypálení a jejich průměrná hodnota pro každý vzorek jsou zpracovány v Tab. č. 10.



Obr. č. 37 – Tloušťka vzorku – přehled měřících míst

Tab. č. 10 – Naměřené tloušťky jednotlivých nánosů smaltu před a po vypálení

Tloušťka smaltu									
Před vypálením					Po vypálení				
	Smalt00	Smalt01	Smalt02	Pozice		Smalt00	Smalt01	Smalt02	Pozice
Termočl. 1	0,138	0,185	0,548	0°	Termočl. 1	0,110	0,134	0,370	0°
	0,196	0,170	0,517	90°		0,119	0,117	0,372	90°
	0,196	0,249	0,518	180° *)		0,144	0,146	0,375	180° *)
	0,196	0,208	0,483	270°		0,146	0,146	0,318	270°
Termočl. 2	0,144	0,185	0,548	0°	Termočl. 2	0,146	0,138	0,370	0°
	0,246	0,192	0,616	90°		0,171	0,138	0,441	90°
	0,224	0,201	0,530	180° *)		0,162	0,164	0,395	180° *)
	0,216	0,192	0,568	270°		0,125	0,096	0,380	270°
Průměr	<b>0,195</b>	<b>0,198</b>	<b>0,541</b>	[mm]	Průměr	<b>0,140</b>	<b>0,135</b>	<b>0,378</b>	[mm]
Sm.odch.	0,035	0,022	0,037		Sm.odch.	0,020	0,019	0,032	
Min	0,138	0,170	0,483		Min	0,110	0,096	0,318	
Max	0,246	0,249	0,616		Max	0,171	0,164	0,441	

\*) měřící pozice pyrometrů

Měření teploty probíhalo při pyrometrech namířených do místa cca 1 mm pod kondenzátorově přivařeným termočlánekem, tedy do pozice odpovídající 180° (viz Obr. 37). Na základě zkušeností z prvotního experimentu probíhal ohřev vzorku rychlostí 100°C.min<sup>-1</sup>. Frekvence záznamu zůstala 1 Hz. Maximální teplota ohřevu byla nastavena na 900 °C s dobou výdrže na teplotě 1 min. Průběhy teplot naměřených na zkušebním



vzorku, byly obdobně jako u měření na základním materiálu, vykresleny do grafů závislostí teploty pyrometru a termočlánu a následně proloženy lineární křivkou pro nalezení hodnoty emisivity dané tloušťky smaltu. Zpracované grafy časových závislostí teplot jsou uvedeny v příloze na obrázcích 1.2.1 až 1.2.10.

Měření bylo opět rozděleno s respektováním teploty přechodu mezi pyrometry (400 °C), na měření do 400 °C (pro pyrometr 2) a nad 400 °C (pro pyrometr 1). Výsledné hodnoty zjištěné emisivity pro jednotlivé tloušťky naneseného povlaku jsou uvedeny v Tab. č. 11.

Tab. č. 11 – Hodnoty emisivity pro jednotlivé tloušťky nánosů smaltu

Materiál	Termočlánek	Pyrometr 1 (do 400°C)		Pyrometr 1 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
Smalt00	tc1	-	-	<b>0,761</b>	24,992
	tc1 - 2. měření	-	-	<b>0,816</b>	9,726
	Termočlánek	Pyrometr 2 (do 400°C)		Pyrometr 2 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
	tc1	<b>0,690</b>	3,506	-	-
	tc1 - 2. měření <sup>**) </sup>	<b>0,883</b>	-3,585	-	-
Materiál	Termočlánek	Pyrometr1 (do 400°C)		Pyrometr1 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
Smalt01	tc1	-	-	<b>0,836</b>	56,902
	tc2 - 2. měření - posunutí	-	-	<b>0,819</b>	-15,161
	Termočlánek	Pyrometr2 (do 400°C)		Pyrometr2 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
	tc1	<b>0,823</b>	-0,379	-	-
	tc2 - 2. měření - posunutí	<b>0,802</b>	-0,515	-	-
Materiál	Termočlánek	Pyrometr1 (do 400°C)		Pyrometr1 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
Smalt02	tc2	-	-	<b>0,998</b>	-22,565
	tc2 - 2. měření - posunutí	-	-	<b>0,991</b>	-10,834
	Termočlánek	Pyrometr2 (do 400°C) <sup>***) </sup>		Pyrometr2 (od 400°C)	
		emisivita e	q	emisivita e	q
	tc2	-	-	-	-
	tc2 - 2. měření - posunutí	-	-	-	-

Poznámky:

- \*) data nejsou k dispozici

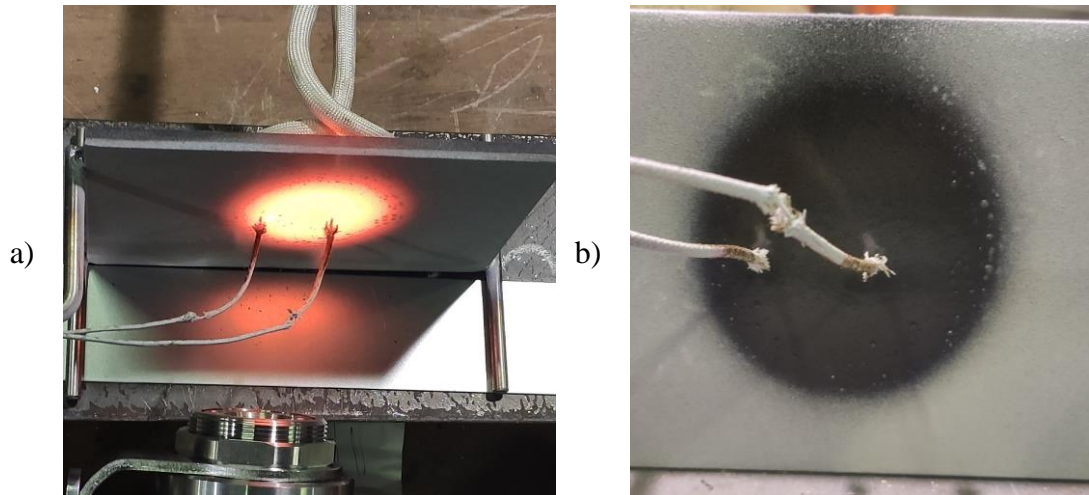


\*\*\*) opakované měření probíhalo od teploty  $>400\text{ }^{\circ}\text{C}$ , výsledná emisivita pro pyrometr 2, získána z měření teploty pyrometrem při ochlazování měřeného vzorku, po dosažení teploty  $<400\text{ }^{\circ}\text{C}$   
\*\*\*) během experimentu došlo k poruše snímání pyrometru 2, data nelze využít

Měření bylo opětovně rozděleno do dvou fází, jako u měření na základním materiálu. V první fázi probíhalo měření na nevypáleném povrchu v okolí jednotlivých termočlánků, na které byly v těsné blízkosti namířeny pyrometry. Ve druhé fázi bylo měření opakováno se stejně koncipovaným experimentem, cílem bylo zjistit, zda již kompaktně vypálený povrch smaltu bude mít stejnou nebo rozdílnou emisivitu oproti povrchu nevypálenému (viz vzorek Smalt 00). U dalších experimentů došlo k posunutí induktoru a přesunu pozice zaměření pyrometrů od termočlánku 1 k termočlánku 2 (viz vzorek Smalt 01 a 02). Tyto experimenty byly provedeny z důvodu nálezu povrchových vad smaltu na okrajích ohřívané oblasti. Cílem bylo mimo jiné zjistit, zda vlivem teplotního pole dochází k jejich odstranění, opětovnému vzniku, nebo přesunu těchto vad do jiných částí teplotního pole.

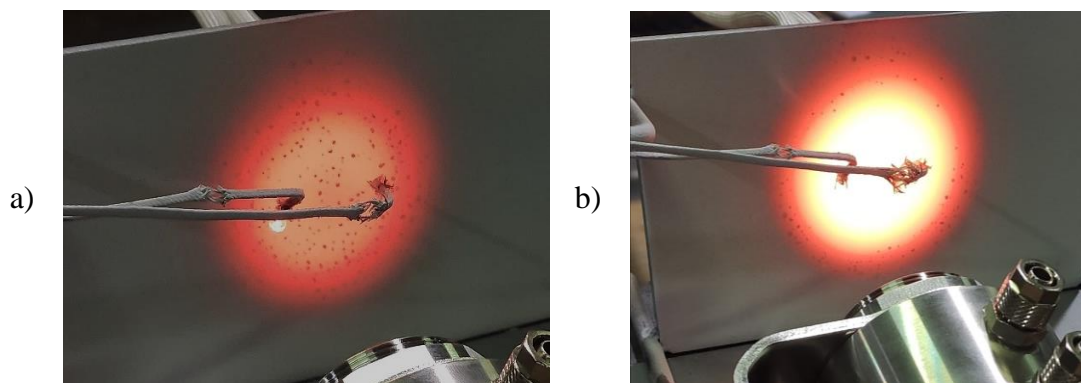
**Stav povlaku po aplikaci teplotního cyklu** – u každého vzorku byla po aplikaci teplotního provedena vizuální kontrola stavu povlaku, zda nedošlo k tvorbě vad. U všech vzorků docházelo k tvorbě bublin ve smaltu, které se buď dokázaly rozpustit během vypalování, nebo zůstaly na vzorku po vypálení. Tyto vady se vyskytovaly v okrajových částech teplotního pole, kde docházelo k hromadění bublin a nebylo zde možné z důvodu nižší intenzity teplotního pole jejich rozpuštění a odstranění.

- **Smalt00** – pro tuto tloušťku povlaku bylo měření opakováno ve stejné pozici induktoru na již vypáleném smaltu, viz Obr. č 38 a) a b). Po opětovném ohřátí nedošlo k rozpuštění, a tedy ani k odstranění bublin v okrajových částech vzorku.



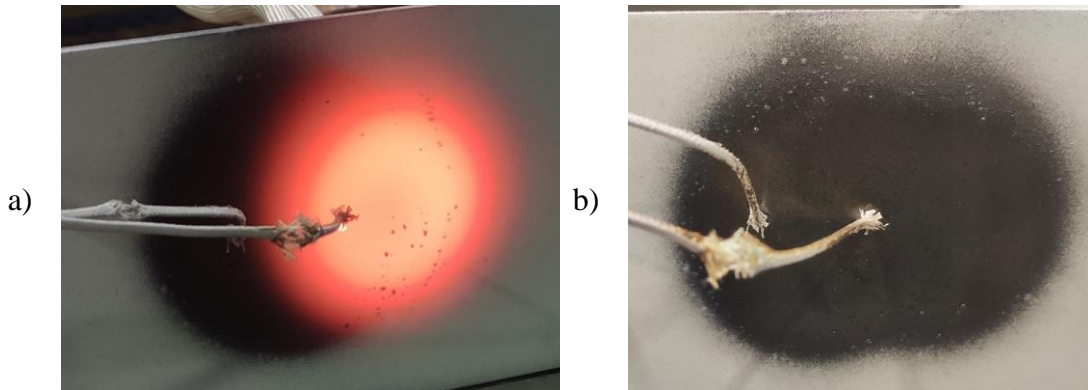
Obr. č. 38 – Smalt00 – a) stav během vypalování, b) stav vypáleného smaltu

- **Smalt01** – v průběhu ohřevu byly bubliny rovnoměrně rozptýleny v celé ohřívané oblasti, viz Obr. č 39 a). Se zvyšující se teplotou docházelo k rozpuštění bublin ve vrstvě nataveného smaltu a přesunutí bublin do okrajových částí ohřívané plochy, viz Obr. č 39 b). Při opakovaném měření byl induktor posunut doprava, tedy ve směru od termočlánku 1 k termočlánku 2. Důvodem bylo zjištění možného vlivu opětovného roztavení smaltu na redukci bublin při vyšší teplotě, než byla v daném místě při prvním teplotním cyklu. Bylo zjištěno, že posunutím došlo k rozpuštění jednotlivých bublin vzniklých při předchozím ohřevu. Vady se ale logicky přesunuly do okrajových částí teplotního pole, jak je zřejmé z Obr. č. 40 a) a promítnuly se i do konečného stavu vzorku po vypálení a zchlazení, viz Obr. č. 40 b).



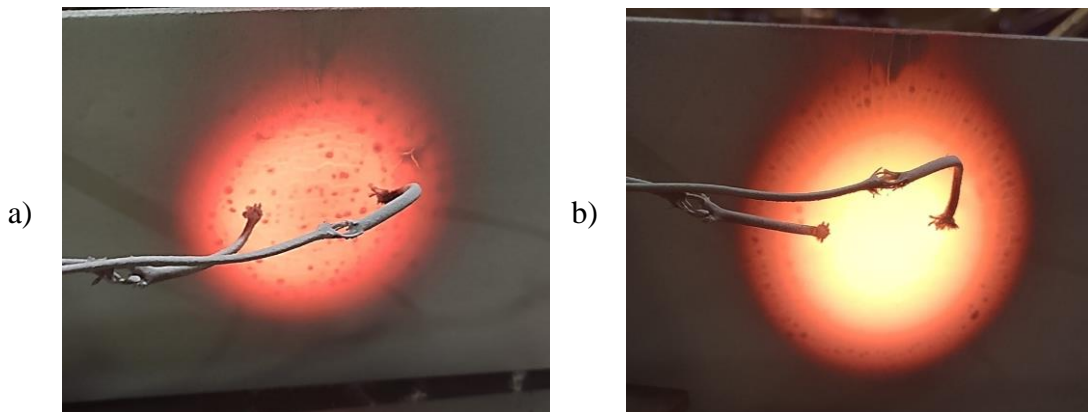
Obr. č. 39 – Smalt01 – a) počáteční fáze ohřevu vzorku, b) fáze výdrže na teplotě





Obr. č. 40 – Smalt01 – a) stav během vypalování č. 2, b) stav vypáleného smaltu

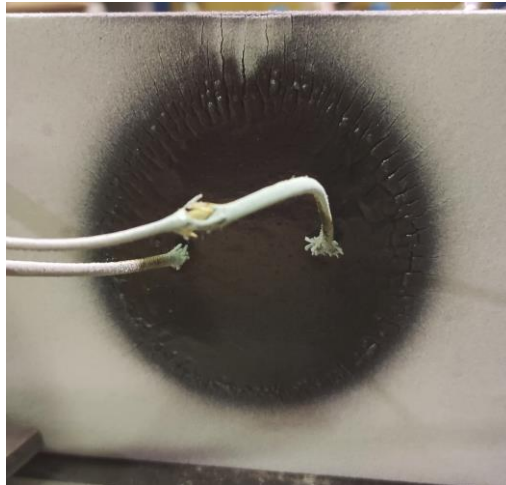
- **Smalt02** – u vzorku s největší naměřenou tloušťkou byla zjištěna největší koncentrace vzniku bublin mezi testovanými vzorky. Docházelo také k popraskání a staženinám, z důvodu pnutí v okrajových částech teplotního pole. V počáteční fázi ohřevu a nižší teplotě byly bubliny rovnoměrně rozptýleny v celém teplotním poli, viz Obr. č. 41 a). Při zvyšující se teplotě došlo uprostřed teplotního pole k rozpuštění bublin a jejich přesunu k okraji teplotního pole, to znamená do oblasti nižších teplot, jak je zřejmé z Obr. č. 41 b).



Obr. č. 41 – Smalt02 – a) počáteční fáze ohřevu vzorku, b) fáze výdrže na teplotě

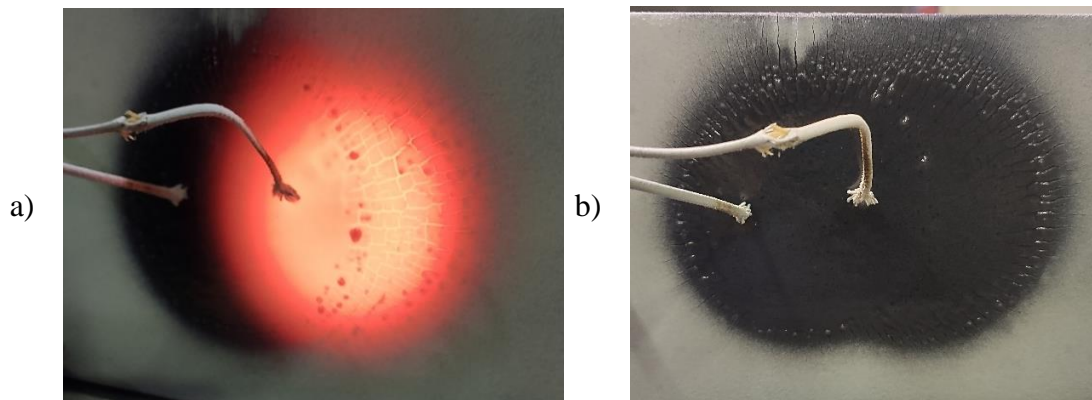
Po prvním vypálení a zchladnutí vzorku byly zjištěny na okraji ohřívané oblasti staženiny a praskliny (viz Obr. č. 42).





Obr. č. 42 – Smalt02 – stav vypáleného smaltu po prvním vypálení

Při opakovaném měření a posunutí induktoru směrem doprava, docházelo k rozpouštění části vad z prvního vypálení vlivem teplotního pole a přesunutí do okrajových částí vzorku, viz Obr. č. 43 a). Po aplikaci teplotního cyklu byl stav smaltu v okrajových částech podobný stavu povrchu z prvního vypalování, došlo pouze k přesunutí vad do pravé části vzorku, jak je zřejmé z Obr. č. 43 b).



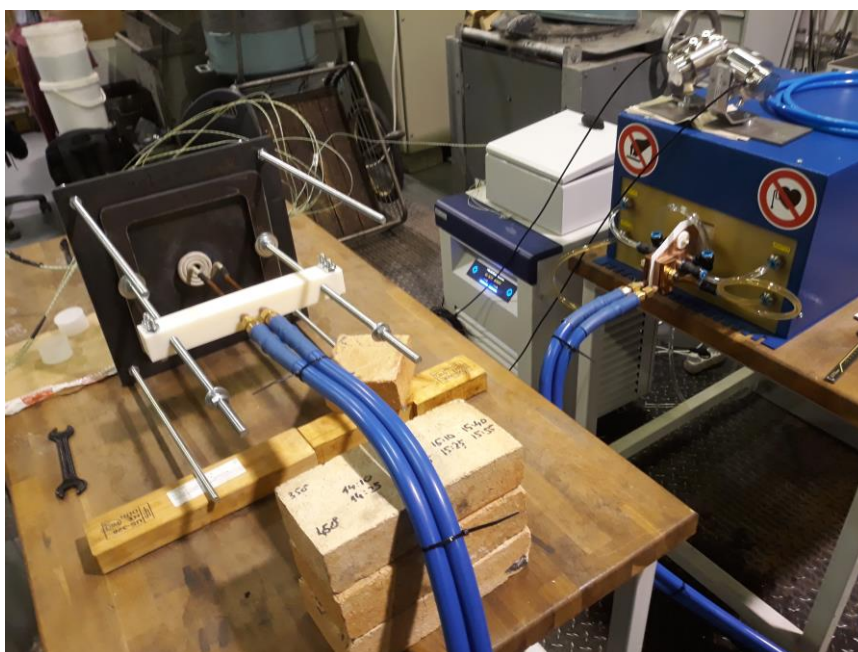
Obr. č. 43 – Smalt02 – a) stav během vypalování č. 2, b) stav vypáleného smaltu

### 3.3 Vliv vzdálenosti induktoru na smaltovaný povrch

Při opravě smaltovaného povrchu pomocí lokálního indukčního ohřevu je z technologického hlediska nutné zachovat definovanou vzdálenosti induktoru od povrchu základního materiálu. Z důvodu oprav se předpokládá minimální vzdálenost induktoru 5 mm od povrchu smaltu. Další podmínkou je co možná nejrovnoměrnější rozložení teplotního pole v místě lokální opravy.

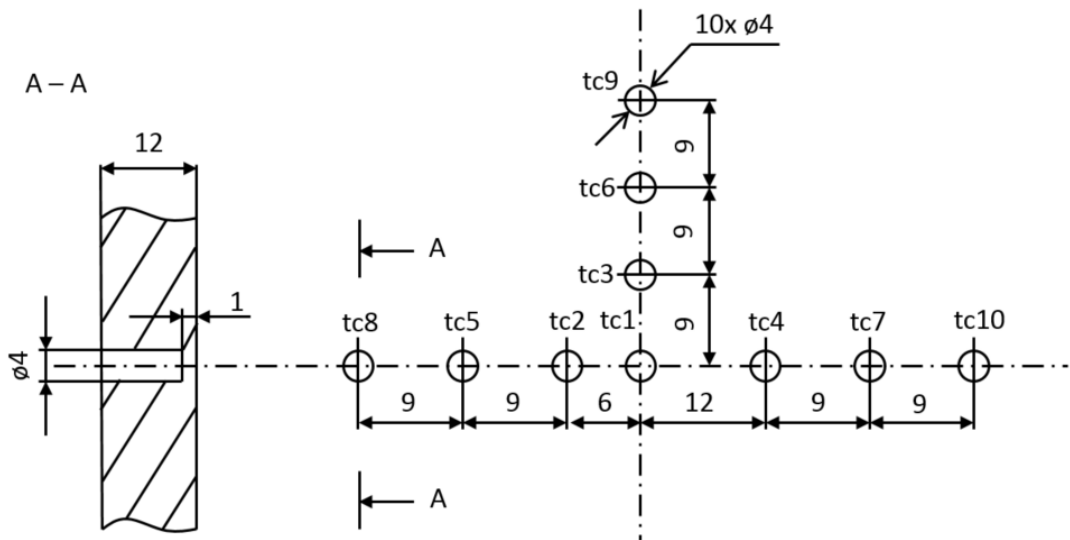
### 3.3.1 Popis experimentu

Podstatou experimentu byla snaha o zmapování teplotních polí pomocí speciálně vytvořené desky, s plošně rozmístěnými termočlánky v definovaných vzdálenostech. Zkušební deska byla vyrobena z oceli P265GH o tloušťce 12 mm. K ohřevu byl využit indukční ohřev přístrojem typ HFR s výkonem 25kW a frekvencí 300 kHz. Uspořádání experimentu je zřejmé z Obr. č. 44. K ovládání výkonu zdroje byla použita zkušební verze řídicího software pro zpětnovazební řízení, obdobně jako při experimentu popsáném v kapitole 3.2. Oproti předchozím experimentům byl použit nový typ induktoru (ohebný s možností dosahu až do tří metrů od generátoru), který je plánován pro lokální opravy smaltovaných povrchů.



Obr. č. 44 – Indukční generátor s tvarovým induktorem a deskou osazenou termočlánky

Pro účel mapování teplotního pole byly do zkušební desky vyfrézovány otvory o průměru 4 mm tak, aby spodní plocha otvoru byla ve vzdálenosti 1 mm od ohříváného povrchu. K těmto plochám byly kondenzátorově přivařeny termočlánky typu K (viz Obr. č. 45). Rozložení termočlánků odpovídalo vzdálenostmi rozložení šroubovice induktoru, pro pokrytí celého teplotního pole. Uspořádání termočlánků na desce je k vidění na Obr. č. 46. Záznam teploty z termočlánků probíhal pomocí měřicího zařízení DiagWeld.

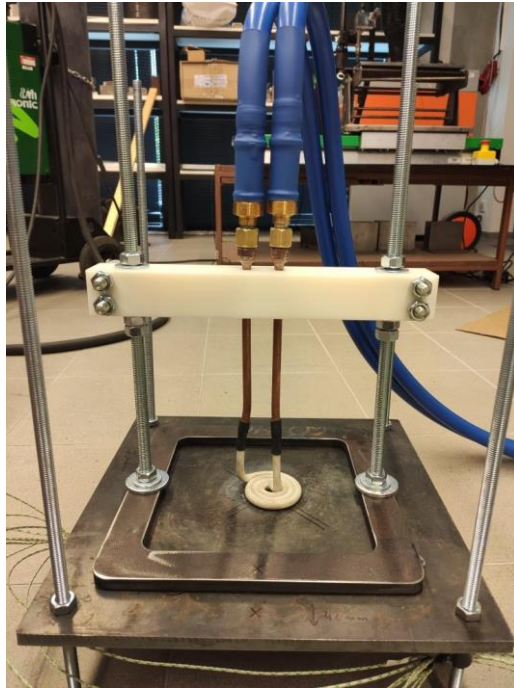


Obr. č. 45 – Schéma uspořádání termočlánků na desce základního materiálu



Obr. č. 46 – Deska ze základního materiálu osazena termočlánky typu K

Pro definování vzdálenosti induktoru od základního materiálu byl navržen přípravek, který obsahoval podpěru, dvě vodící závítové tyče a silonové pouzdro k pružnému a izolovanému uchycení tyčí induktoru, viz Obr. č. 47. Dále bylo zabezpečeno, aby nedocházelo k dotyku induktoru s vodivými předměty v celém jeho vedení, z důvodu nebezpečí jejich ohřevu a poškození induktoru.



Obr. č. 47 – Přípravek pro uchycení induktoru v přesně dané vzdálenosti od základního materiálu

V okamžiku spuštění experimentu pro vzdálenost induktoru 5 mm od základního materiálu, bylo pro daný typ induktoru možné získat z generátoru pouze maximální výkon 6 kW, přestože celkový výkon generátoru je 25 kW. Napětí v usměrňovači bylo 210 V neboli 100 % své hodnoty a hodnota proudu se udržovala na konstantní hodnotě okolo 30 A, viz Obr. č. 48. Při těchto podmínkách bylo možné ohřát základní materiál pouze na hodnotu 750 °C.

Důvodem nestandardního chování nového typu induktoru byla rozdílná impedance ve vedení. Jediná možnost optimalizace, k získání dostatečného výkonu k ohřevu, byla konstrukční úprava generátoru a přidání dodatečných kondenzátorů.

Konstrukční úprava generátoru a přidání dodatečných kondenzátorů bude realizována v průběhu června a července 2020, tedy až po odevzdání této diplomové práce. Z tohoto důvodu nemohlo být provedeno plánované měření teplotních polí.



Obr. č. 48 – Displej usměrňovače induktoru – provozní parametry

### 3.4 Diskuze výsledků / Zhodnocení výsledků měření

V rámci experimentální činnosti byly provedeny činnosti vedoucí k nalezení kritické rychlosti ohřevu, stanovení teplotní závislosti emisivity povrchu pro různé stavy a tloušťky smaltovaných vrstev a posouzení vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu.

Při hledání *kritické rychlosti ohřevu* byly zjištěny maximální hodnoty rychlostí, při kterých ještě nevzniká vada smaltového povlaku. Pro měření byl využit vzorek, jehož tvar a rozměry byly odvozeny z normy ČSN EN ISO 13807. Experiment probíhal v peci v rozmezí teplot 200–800 °C v souladu s popisem uvedeným v kapitole 3.1.

Maximální dosažená rychlost ohřevu, při které ještě nevznikají vady na povrchu normalizovaného vzorku, byla 121,3 °C.min<sup>-1</sup> a rychlost ochlazování -62,5 °C.min<sup>-1</sup>. Tyto hodnoty byly využity při navazujícím experimentu.

Při praktickém použití ale bude záležet na rozměru a tvaru reálné součástí a jejím chování při teplotním zatěžování. Je předpoklad, že na velkých plochách budou působit větší smyková napětí mezi povrchem smaltu a podkladovým kovem a maximální použitelné rychlosti ohřevu a ochlazování tak budou pravděpodobně menší. To však bude muset být experimentálně potvrzeno při dalším výzkumu.

K *optimalizaci snímání teplot ze strany smaltu* bylo využito porovnání mezi teplotou snímanou pomocí dvou pyrometrů ve srovnání s teplotou změřenou termočlánky.



Díky tomu mohly být stanoveny emisivity povrchu základního materiálu a smaltů o různé tloušťce, ve shodě s popisem experimentu v kapitole 3.2.

Z důvodu rozdílných měřících rozsahů použitých pyrometrů, byla teplota přechodu mezi pyrometry nastavena na 400 °C. Data ke zjištění emisivity tak byla vyhodnocována v rozsahu do 400 °C pro pyrometr 2 (schopnost měřit již od nízkých teplot) a pro pyrometr 1 nad 400 °C (schopnost měření pro teploty vyšší než 200 °C). Z grafického zobrazení závislosti snímaných teplot pyrometru a termočlánku vyplývá, že při aplikaci experimentálně zjištěných emisivit povrchu dochází k velmi dobré shodě mezi hodnotami změřenými pyrometry a termočlánkem.

Po experimentech stanovení emisivity na *základním materiálu* bylo zjištěno, že emisivita povrchu je pro oba pyrometry téměř identická (0,887 resp. 0,916), což je rozdíl cca 3 %. Také opakované měření potvrdilo obdobné hodnoty emisivity (0,899 resp. 0,876), kde byl rozdíl 2 %.

U *smaltovaných povrchů* se projevil vliv tloušťky nanesené vrstvy na hodnotu výsledné emisivity povrchu. Z výsledků je patrné (viz Tab. č. 11), že při zvětšující se tloušťce smaltu dochází k nárůstu emisivity povrchu při aplikaci teplotního cyklu.

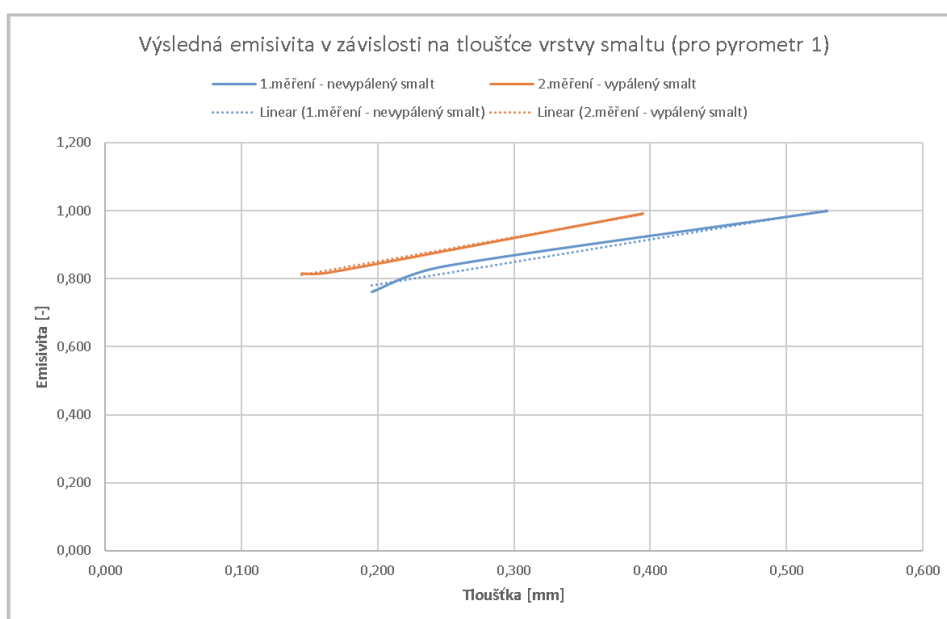
Při tloušťce 0,196 mm základního smaltu vzorku *Smalt 00*, byla zjištěná emisivita povrchu 0,761 resp. 0,690. Při opakovaném měření na již kompaktním vypáleném povlaku, se výsledná emisivita zvýšila na hodnotu 0,816 resp. 0,883, což je nárůst na pyrometru 1 o 7 % a na pyrometru 2 o 22 %.

Pro tloušťku základního smaltu 0,249 mm byla na vzorku *Smalt01* zjištěna výsledná hodnota emisivity 0,836 resp. 0,823. Při opakovaném měření na již vypáleném povlaku zároveň došlo k posunutí teplotního pole induktoru a pyrometrů doprava k termočlánku 2. Důvodem byla snaha zjistit, zda vady typu pórů, vznikající na okrajích oblastí ohříváných induktorem, zmizí, při přesunutí zdroje tepla. V nově ohříváném místě byla zjištěna emisivita povrchu 0,819 resp. 0,802, při tloušťce vrstvy vypáleného smaltu 0,164 mm. Pokles emisivity cca o 2 % souvisí se změnou výchozí tloušťky v místě měření (dle Tab. č. 10).

U měřeného vzorku *Smalt02* se ukázal největší vliv tloušťky smaltu na výslednou hodnotu emisivity. Větší vrstva nevypáleného smaltu o tloušťce 0,53 mm se se emisivitou blížila k hodnotě 1 (emisivita 0,998). Při opakovaném měření a posunutí ohřevu směrem

doprava, na stejném místě měření u termočlánku 2, byla zjištěna hodnota emisivity povrchu 0,991, pro tloušťku vypálené vrstvy smaltu 0,395 mm. Z provedených experimentů je zřejmé, že při vypálení smaltu je kromě kompaktního povrchu dosaženo i celkové snížení tloušťky smaltu o 25-34 % oproti původně nanesené tloušťce smaltové vrstvy.

Grafické znázornění závislosti emisivity na tloušťce nanesené vrstvy, před a po vypálení, je patrné z grafu na Obr. č. 49. Z hlediska samotné technologie smaltování je oblast zájmu směřována na počátek natavování smaltu a pásmo teplot 700-900 °C, které je snímáno pyrometrem 1. Z grafu je zřejmá vzájemná korelace hodnot emisivity ve stavu před a po vypálení smaltu.



Obr. č. 49 – Grafické znázornění závislosti emisivity na tloušťce nanesené vrstvy

Na smaltovaném povrchu se během vypalování a po jeho ukončení objevily povrchové vady. Jednalo se o tvorbu bublin (Smalt00 a Smalt01), nebo staženin, při větší tloušťce nanesené vrstvy (Smalt02). Z toho důvodu byly realizovány opakované ohřevy, jejichž účelem bylo zjistit, zda dochází k odstranění zmíněných vad, nebo přesunu do jiných částí ohřívané oblasti. V průběhu experimentu bylo prokázáno, že dochází k přesunutí vad do okrajových částí teplotního pole. To bylo způsobeno tím, že na okrajích ohřívané oblasti není teplota dostatečná na to, aby došlo ke ztečení vrstvy smaltu v celé ploše.



Při plánovaných lokálních opravách smaltovaných povrchů, kde bude vada o ploše menší než plocha induktoru, je pravděpodobné, že se nalezené vady na okrajích ohřívané oblasti již vyskytovat nebudou. Důvodem je fakt, že okolí vady bude tvořit kompaktní vrstva již vypáleného smaltu, což dílčím způsobem potvrdily i opakované ohřevy na místech vytvrzených smaltů. Přesto však bude třeba uvedený postup podrobit dalšímu komplexnějšímu výzkumu.

Při definování *vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu* bylo zjištěno, že druh induktoru má zcela zásadní vliv na chování daného zařízení. Při použití nově konstruovaného typu induktoru, který umožňuje flexibilní přivedení k místu ohřevu a nastavení vzdálenosti od základního materiálu, bylo možné získat z generátoru maximální výkon pouze 6 kW, z celkového výkonu generátoru 25 kW. Maximální dosažená teplota povrchu tak byla 750 °C, což je pro podmínky experimentu nedostačující. Pro mobilní zařízení, tedy induktor ve formě tvarových, vodou chlazených hadic, nelze využít současné konfigurace indukčního generátoru. Z tohoto důvodu je nezbytná úprava vyvíjeného mobilního zařízení, tedy změna kondenzátorů tak, aby se zvýšilo výstupní napětí.



## 4. Závěr

Tato diplomová práce pojednává o problematice lokálních oprav smaltovaných (anorganických) povrchů pomocí indukčních ohřevů, dle požadavků společnosti Neufe s.r.o. Práce splnila všechny body zadání, tak jak byly specifikovány v zásadách pro vypracování. V teoretické části práce došlo k ucelenému popisu smaltů a jejich vlastností. Následně byla rozebrána problematika týkající se podkladových materiálů pro nanášení smaltů, popis technologie smaltování. Dále předcházení a oprav povrchových vad smaltů. V závěru byl popsán princip indukčních ohřevů, využitých v experimentální části této práce.

Experimentální měření probíhalo ve třech etapách. Jednalo se o nalezení kritické rychlosti ohřevu, při které ještě nevzniká vada povrchu normalizovaného vzorku, o bezkontaktní měření teploty nevodivé smaltované vrstvy a nalezení výsledné korekce emisivity povrchu, pro zpětnovazební řízení induktoru a o posouzení vlivu vzdálenosti induktoru od místa ohřevu. Na základě provedených experimentů a jejich vyhodnocení lze učinit následující závěry:

- 1) Kritická rychlost ohřevu smaltovaného povrchu, při které ještě nedošlo k poškození povrchu smaltu na normalizovaném vzorku, byla  $121 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  a při ochlazování  $-62,5 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ .
- 2) Emisivita povrchu snímaného pyrometrem je rozdílná pro povrch smaltu nanesený stříkáčím pistolí a pro slinutý povrch po aplikaci teplotního cyklu. V obou případech roste emisivita s rostoucí tloušťkou nanesené vrstvy.
- 3) Tloušťka nanesené vrstvy smaltu se po aplikaci teplotního cyklu, při kterém dojde ke slinutí povrchu, sníží o 25-34 %, v závislosti na tloušťce původní vrstvy.
- 4) Při použití tvarového induktoru je na okrajích zdroje tepla nižší teplota, což způsobuje vady typu bublin v místech, kde nedošlo k úplnému slinutí smaltu. Tyto vady je možné odstranit opakovaným ohřevem, při posunutí tvarového induktoru (zvýšení teploty v daném místě).
- 5) Použití tvarového induktoru, umožňujícího flexibilní přivedení indukčního ohřevu do libovolného místa ve vzdálenosti do 3 metrů od generátoru, vykazuje zcela odlišnou impedanci než běžné stacionární induktory. To způsobuje výrazné snížení výkonu generátoru až o 75 %. K eliminaci negativní impedance bude nezbytné upravit konstrukční návrh generátoru.

## Seznam literatury

- [1] BOUŠE, Václav, KRAJINA Antonín a MORAVČÍK Alfons. *Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně*. Praha: SNTL, 1986.
- [2] HÁJEK, Ludvík. *Smaltérství: Technologie pro 1. a 2. ročník OU a UŠ*. Praha: SNTL, 1971, 191 s. Kurs technických znalostí, sv. 84.
- [3] TROJÁNEK, František. *Příručka pro povrchové úpravy. IV. díl, Tepelné povrchové úpravy a smalty*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Řada strojírenské literatury.
- [4] LAIBLA, F. A KOLEKTIV. *Příručka pro sklo užitkovou keramiku a smalt*. Praha: SNTL, 1963.
- [5] NOVOTNÝ, Antonín. *Základy technologie smaltování*. Praha: Technicko – vědecké vydavatelství, 1951. ISBN 331–48413–51–3.
- [6] PODJUKLOVÁ, Jitka, HRABOVSKÁ, Kamila. *Nové obzory v poznání vlastností sklokeramických smaltových povlaků*. Ostrava. VŠB – Technický univerzita Ostrava, 2010. 135 s. ISBN 978–80–248–2339–3.
- [7] ČSN EN 10028-2. *Ploché výrobky z ocelí pro tlakové účely – Část 2: Nelegované a legované oceli se stanovenými vlastnostmi pro vyšší teploty*, Česká technická norma 2010. Třídící znak: 420937.
- [8] ČSN EN ISO 13807. *Smalty-Stanovení teploty tvoření trhlin při zkoušce tepelným rázem u smaltů pro chemický průmysl*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [9] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [10] Stanovení koeficientu teplotní roztažnosti. In: *Ústav fyziky a materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_pol/FP1\\_lab\\_08.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_pol/FP1_lab_08.pdf)
- [11] Sibrál, volná vlna z hlinito-křemičitých vláken. *Technické listy* [online]. Praha: AZ Flex, a.s. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: [http://www.azflex.cz/old/images/stories/sibral/technicke\\_listy](http://www.azflex.cz/old/images/stories/sibral/technicke_listy)

- [12] Povrchové úpravy kovů a jejich slitin. *Smalt v technických oborech a průmyslu*. [online]. Brno: Metodické centrum konzervace. Technické muzeum v Brně [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://mck.technicalmuseum.cz/smalt/frame3.html>
- [13] *P265GH Ocelová tlaková nádoba* [online]. [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5235>
- [14] ČSN EN 10027-1, Systémy označování ocelí – Část 1: Stavba značek ocelí, Česká technická norma 2006. Třídící znak: 420011.
- [15] ČSN EN ISO 19496-1 - Smalty – Terminologie – Část 1: Termíny a definice, Česká technická norma 2018. Třídící znak: 945000
- [16] LOKŠIN, V. J. *Technologie smaltování kovových výrobků*. Praha. Státní nakladatelství technické literatury. 1955.
- [17] PCWI Compact DC30. In: *POROSKOP ISKROWY* [online]. Dostupné z: <https://tape.pl/poroskopy-urzadzenia-pomocnicze/>
- [18] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York; Marcel Dekker, c2003, ISBN 0-8247-0848-2.
- [19] LANGER, Emil, *Teorie indukčního a dielektrického tepla*, vyd. Academia, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1979.
- [20] Indukční ohřev. In: *Indukční ohřev – technologie* [online]. Rajmont s.r.o. [cit. 2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [21] DOBEŠ, Bc. Václav. DIPLOMOVÁ PRÁCE: *Indukční pájení trubkových rozvodů z vysokolegovaných ocelí*. [online]. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: [https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109531/DOB0031\\_FS\\_N2301\\_2303T002\\_20\\_2015.pdf?sequence=1](https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/109531/DOB0031_FS_N2301_2303T002_20_2015.pdf?sequence=1)
- [22] ADOLF, Bc. Tomáš. DIPLOMOVÁ PRÁCE: *Vliv opakované resmaltace na mechanické vlastnosti a celkovou degradaci oceli P265GH*. [online]. [cit. 2020-04-27]. Dostupné z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/149789>

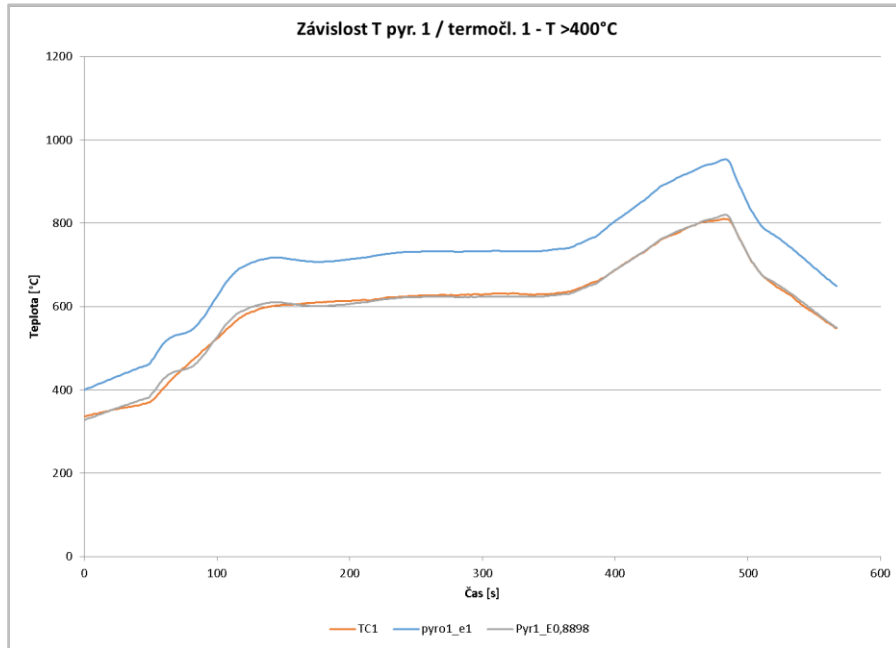
## Přílohy

### 1. Stanovení teplotní závislosti emisivity pyrometru (kapitola 3.2.)

#### 1.1 Výsledky měření emisivity pro různé tloušťky smaltu

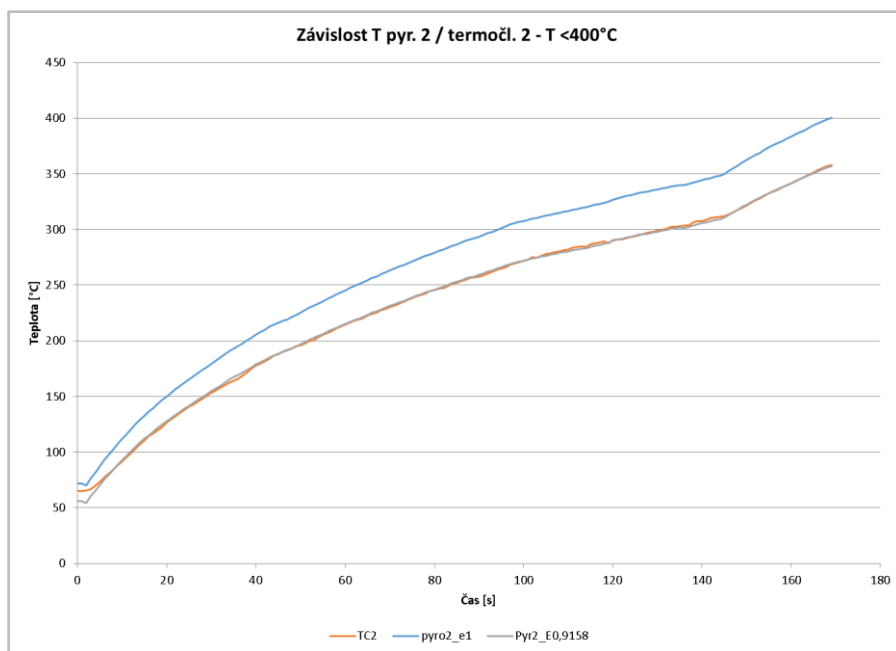
##### 1.1.1 Základní materiál – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem

1 – pro teplotu nad 400 °C

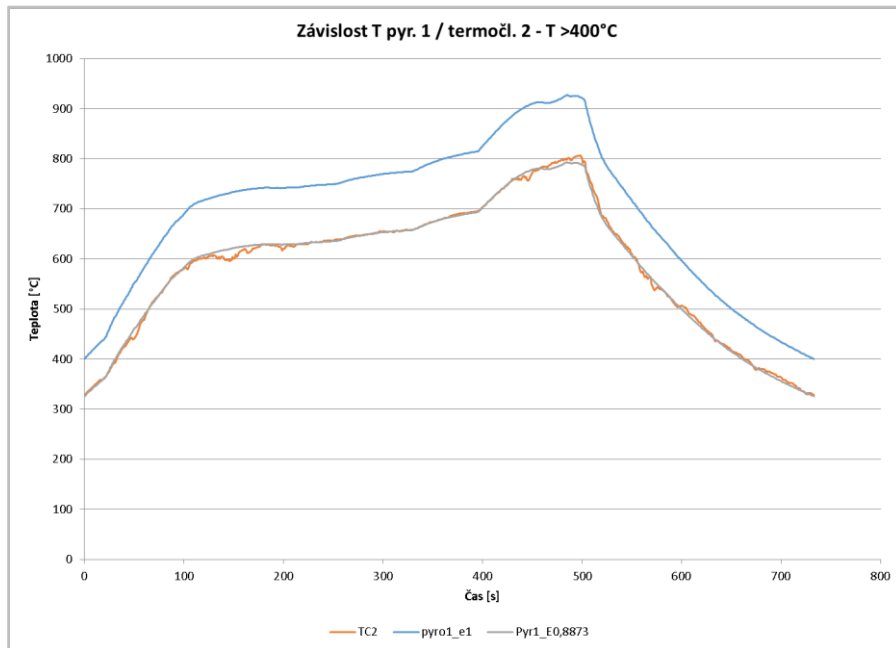


##### 1.1.2 Základní materiál – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem

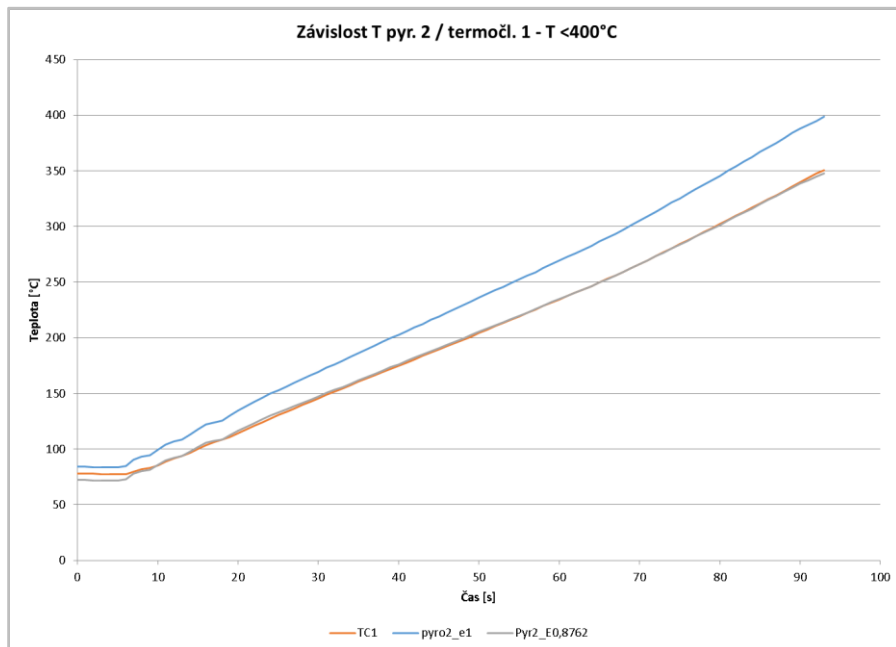
2 – pro teplotu do 400 °C



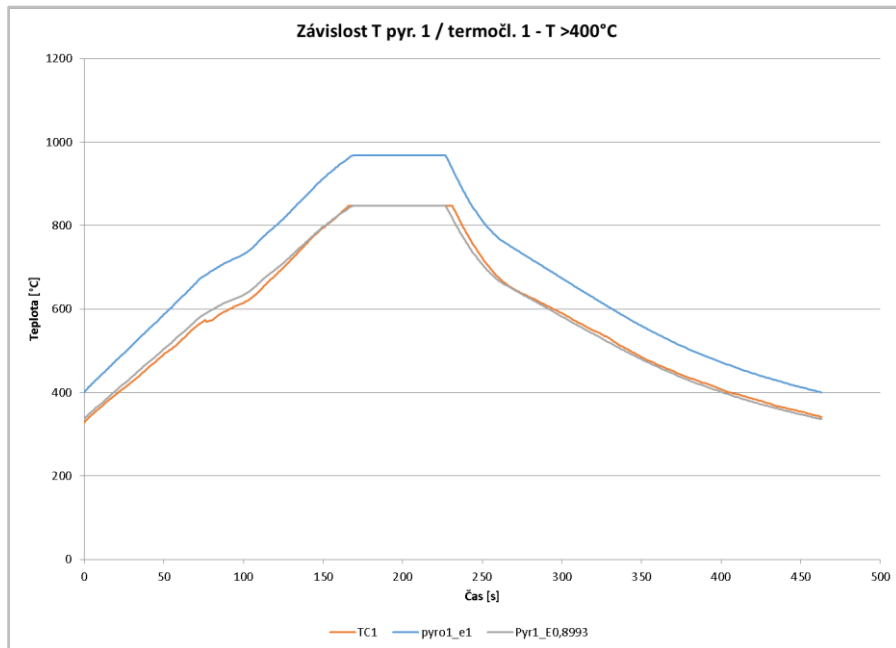
1.1.3 Základní materiál – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 2 – pro teplotu nad 400 °C



1.1.4 Základní materiál – 2. měření – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem 1 – pro teplotu do 400 °C

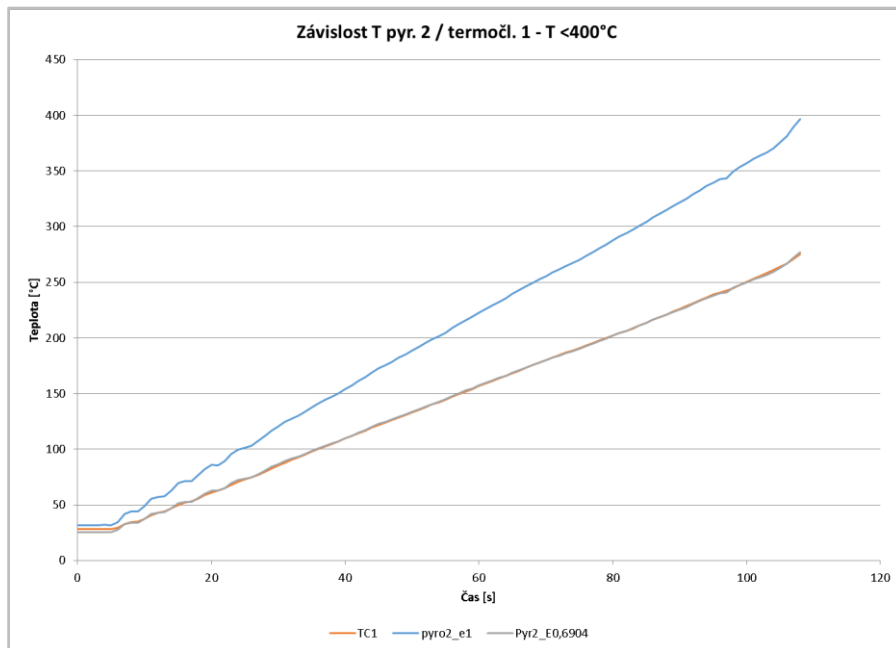


1.1.5 Základní materiál – 2. měření – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 1 – pro teplotu nad 400 °C

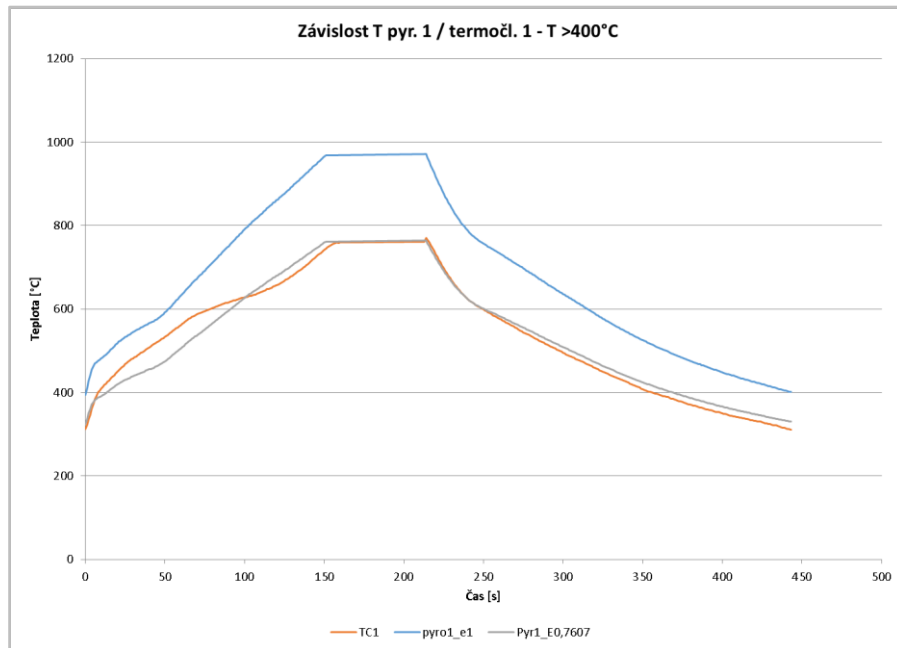


1.2 **Výsledky měření emisivity pro různé tloušťky smaltu**

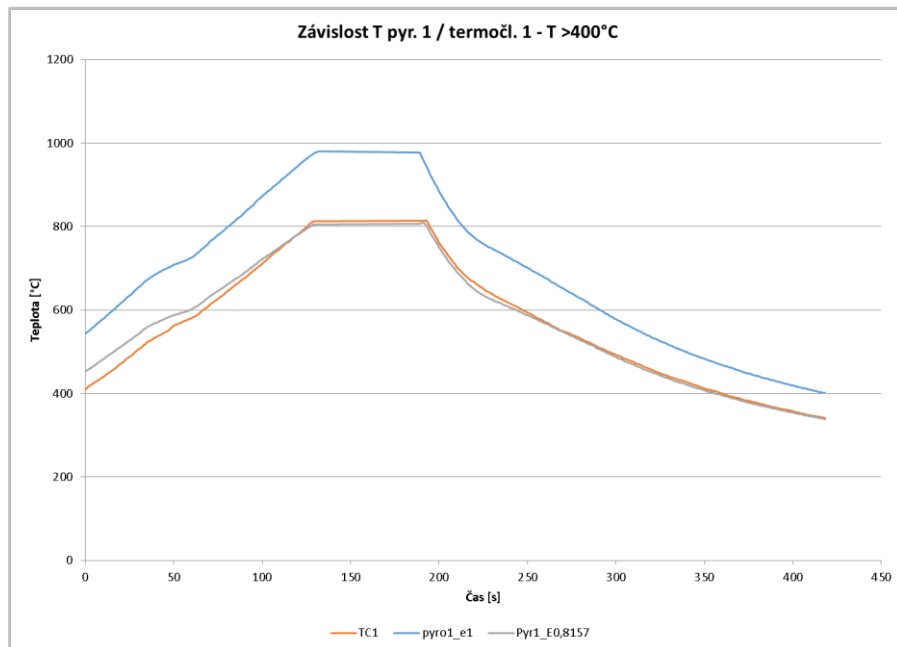
1.2.1 Smalt00 – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem 1 – pro teplotu do 400 °C



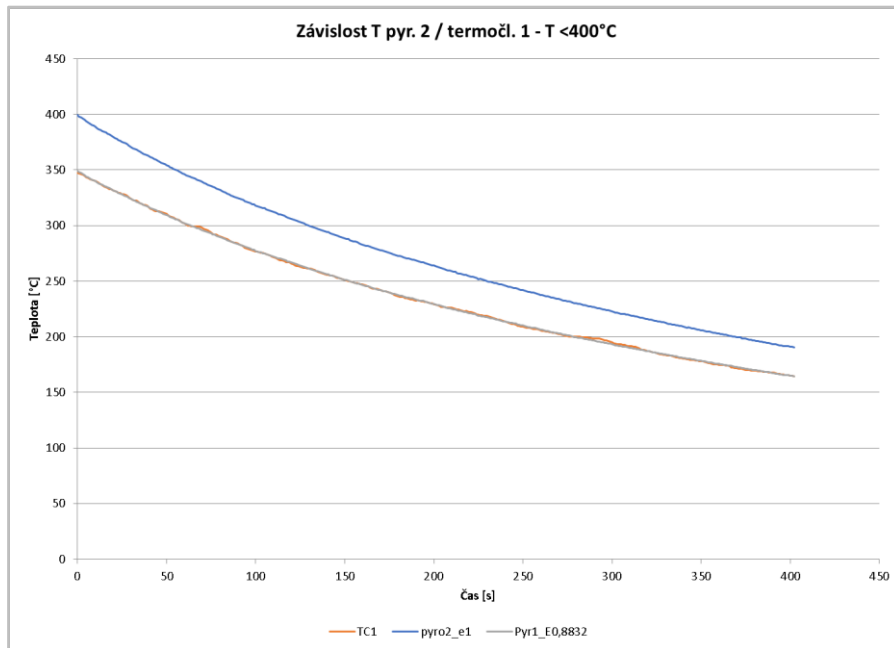
1.2.2 Smalt00 – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 1 – pro teplotu nad 400 °C



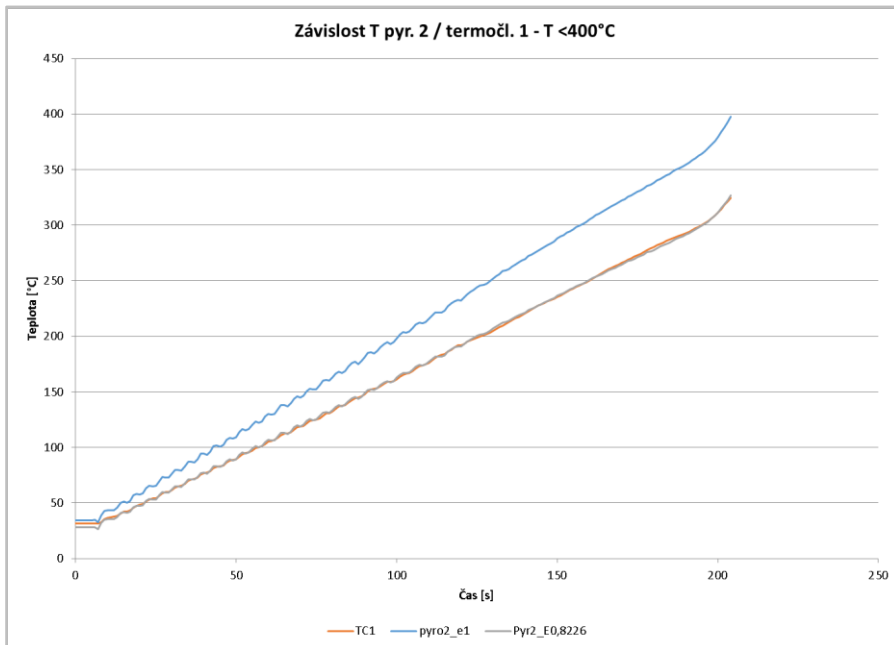
1.2.3 Smalt00 – 2. měření – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 1 – pro teplotu nad 400 °C



1.2.4 Smalt00 – 2. měření – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem 1 – pro teplotu do 400 °C

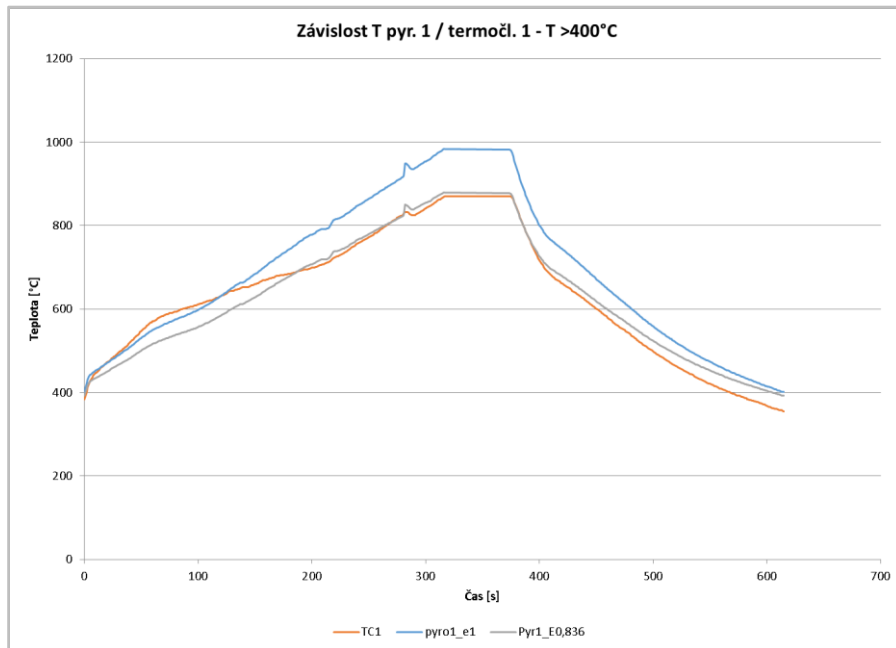


1.2.5 Smalt01 – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem 1 – pro teplotu do 400 °C

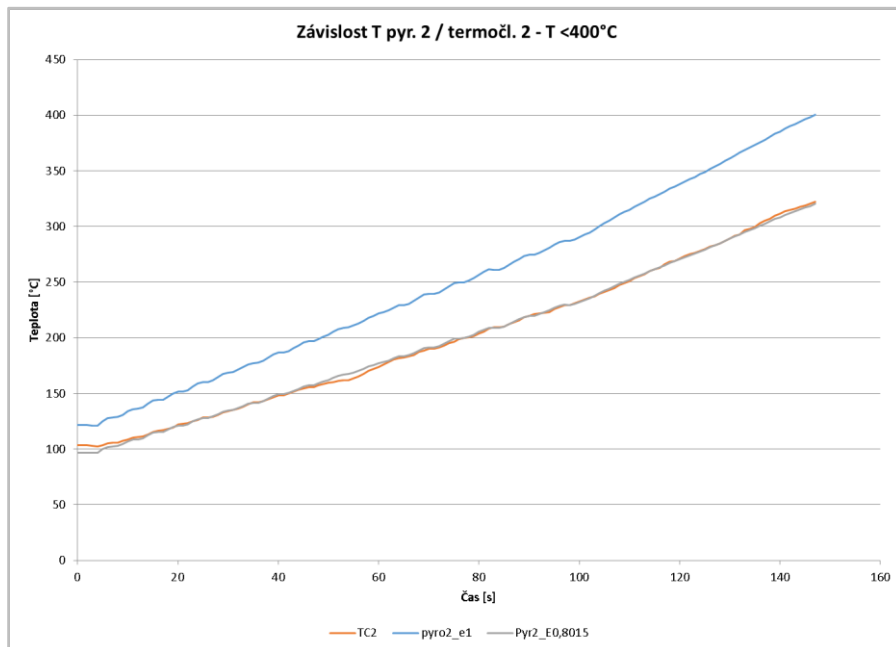




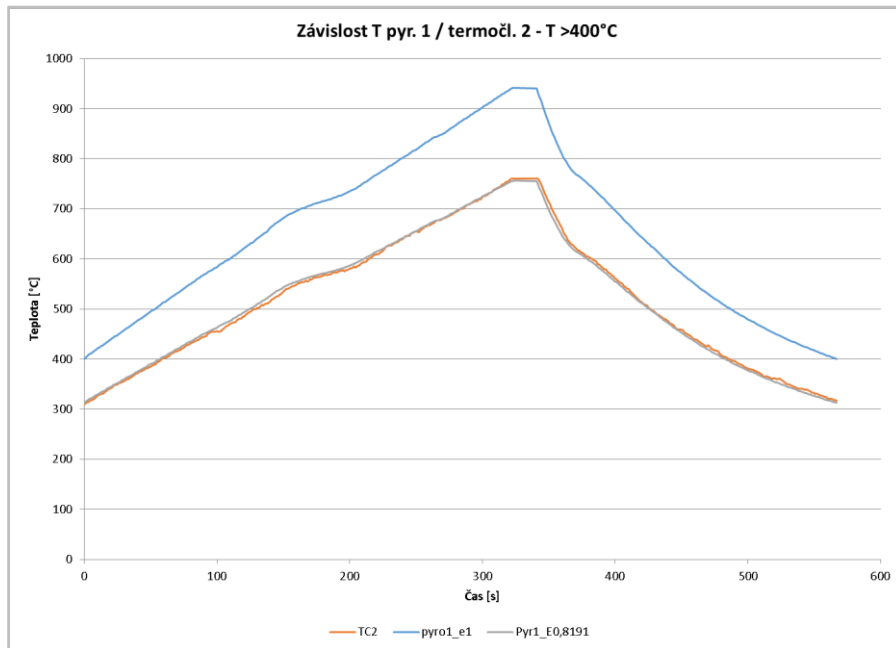
1.2.6 Smalt01 – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 1 – pro teplotu nad 400 °C



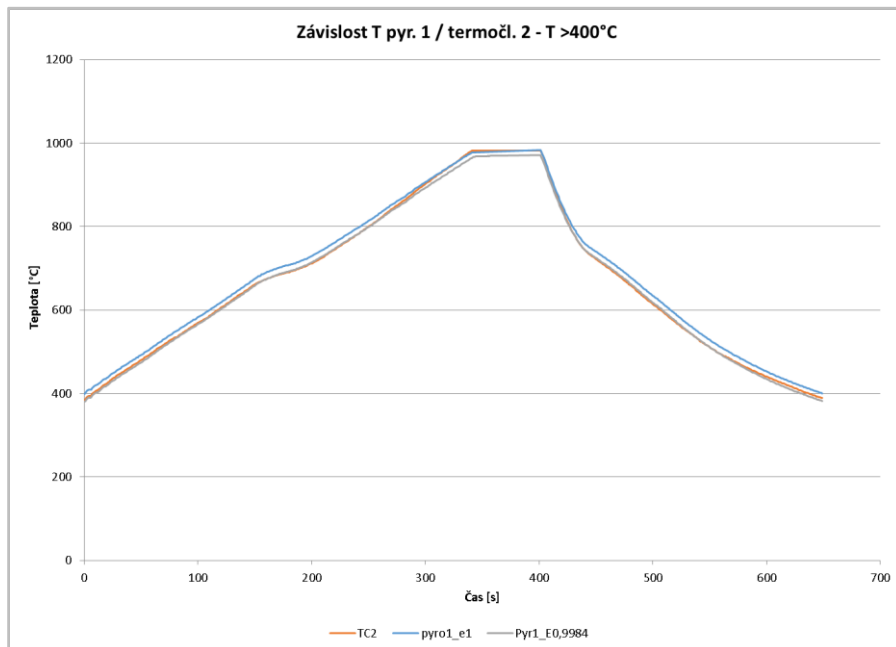
1.2.7 Smalt01 – 2. měření – posunutí – časový průběh měřené teploty pyrometrem 2 a termočlánkem 2 – pro teplotu do 400 °C



1.2.8 Smalt01 – 2. měření – posunutí – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 2 – pro teplotu nad 400 °C



1.2.9 Smalt02 – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 2 – pro teplotu nad 400 °C



1.2.10 Smalt02 – 2. měření – posunutí – časový průběh měřené teploty pyrometrem 1 a termočlánkem 2 – pro teplotu nad 400 °C

