



Vícevrstvé lokální opravy smaltových povrchů pomocí teplotních cyklů

Bakalářská práce

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Přemysl Čapek

Vedoucí práce:

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

Konzultant práce:

Ing. Milan Jelínek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Vícevrstvé lokální opravy smaltových povrchů pomocí teplotních cyklů

Jméno a příjmení: Přemysl Čapek
Osobní číslo: S19000262
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2021/2022

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principem a podmínkami tvorby anorganických povrchů na bázi smaltů.
2. Seznamte se s možnostmi oprav smaltových povrchů a s vadami vznikajícími v průběhu smaltování.
3. Navrhněte a realizujte experimentální program vedoucí k vícevrstvým lokálním opravám smaltových povrchů.
4. Stanovte podmínky rychlosti ohřevu, výdrže na teplotě i rychlosti ochlazování pro jednotlivé opravné vrstvy.
5. Optimalizujte podmínky z pohledu vzájemné přilnavosti jednotlivých vrstev.
6. Proveďte vyhodnocení experimentů, diskutujte dosažené výsledky a proveďte doporučení pro další výzkum.

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

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
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] LAIBL, 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:

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

Konzultant práce:

Ing. Milan Jelínek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

10. května 2022

Přemysl Čapek

Anotace

Předložená bakalářská práce je zaměřena na optimalizaci technologických podmínek vysokofrekvenčního indukčního ohřevu při lokálních opravách smaltových povrchů. Hlavním cílem práce je při opravách nastavit takové technologické parametry, při kterých nebude docházet k tvorbě prasklin v původním ani opravném smaltovém povlaku.

V teoretické části práce je seznámení s výrobou, vlastnostmi a možnými druhy vad smaltových povrchů. Dále jsou v ní popsány teplotní vlastnosti systému smalt-ocel a technologie indukčního ohřevu.

V experimentální části jsou popsány testované vzorky a zařízení, na kterém experimenty probíhají. Poté jsou uvedeny jednotlivé experimenty, jejich průběhy a výsledky.

Klíčová slova:

Smalt, ocel, indukční ohřev, praskliny ve smaltu, optimalizace technologických podmínek

Annotation

The presented bachelor thesis is focused on the optimization of technological conditions of high-frequency induction heating during local repairs of enamel surfaces. The main goal of the work is to set such technological parameters during repairs, at which there will be no cracks in the original or repaired enamel coating.

The theoretical part of the work is an introduction of the production, properties and types of defects of enamel surfaces. The temperature properties of the enamel-steel system and induction heating technology are also described.

The experimental part describe the tested samples and equipment on which the experiments take place. Then the individual experiments, their course and results be presented.

Key words:

Enamel, steel, induction heating, cracks in enamel, optimization of technological conditions

Poděkování

Tímto bych moc rád poděkoval paní Ing. Ivě Novákové, Ph.D. za její čas, ochotu a trpělivost. Při tvorbě mé bakalářské práce byla zdrojem rad a zkušeností, které pro mě byly velkým přínosem. Dále děkuji panu Ing. Milanu Jelínkovi, Ph.D. za vedení experimentální části a poskytnutí jeho odborných znalostí z praxe.

V neposlední řadě děkuji své rodině a přítelkyni za podporu při tvorbě bakalářské práce i v průběhu celého mého studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1. Úvod.....	10
2. Teoretická část.....	11
2.1 Výroba smaltových povrchů	11
2.2 Vlastnosti smaltů	15
2.3 Vady smaltových povrchů	16
2.4 Opravy smaltových povrchů	17
2.5 Teplotní vlastnosti smaltovaných povrchů (smalt-ocel).....	18
2.6 Vysokofrekvenční indukční ohřev	21
3. Experimentální část	23
3.1 Vliv technologických podmínek na tvorbu prasklin ve vrstvě smaltu.....	25
4. Diskuse výsledků	36
5. Závěr.....	39
Seznam použité literatury	40

Seznam použitých zkratek a symbolů

A	tažnost	[%]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
HV	tvrdost dle Vickerse	[-]
I _{ef}	efektivní hodnota proudu	[A]
P	hustota	[kg.m ³]
Q	teplo	[J]
R	odpor	[Ω]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _{mt}	mez pevnosti v tlaku	[MPa]
T _g	teplota skelného přechodu	[°C]
c	měrná tepelná kapacita	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
α	koefficient teplotní délkové roztažnosti	[K ⁻¹]
ζ	měrný elektrický odpor	[Ω.m]
λ	součinitel tepelné vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
τ	čas	[s]
KP	konečné prvky	

1. Úvod

Jedním z nejčastěji využívaných materiálů v technickém průmyslu je ocel. Má spoustu kladných vlastností, které je možné využívat v řadě odvětví. S ocelí je úzce spjata i jedna její hlavní nevýhoda, a to poměrně značná náchylnost ke korozi. Při korozi dochází k postupnému narušování materiálu, které vede ke zhoršení jeho vlastností. V chemicky agresivnějším prostředí je proto nutné, aby součást vyrobená z ocele byla opatřena ochranným povlakem.

Velmi účinná a odolná ochranná vrstva, která se nanáší na povrch ocele, je smalt. Tento smaltový povlak brání ocel před kontaktem s agresivním prostředím a vlhkostí díky své celistvosti. Smalt je vysoce odolný vůči korozi a také se vyznačuje svojí tvrdostí, která brání ocelový povrch proti abrazi. S tvrdostí je ovšem často spjata i křehkost.

Proto má smalt, jako většina tvrdých materiálů, jednu hlavní nevýhodu, a to je křehkost. Při příliš velkém mechanickém namáhání nebo cizím zavinění může dojít k vytvoření prasklin v ochranné vrstvě. Jakmile smalt popraská, ztratí svoji celistvost a přestává tak chránit ocelový materiál před korozi.

Pokud dojde k tomuto poškození, je potřeba ho co nejrychleji opravit. Kvůli vysokým nákladům na kompletní obnovení smaltované vrstvy se využívá možnosti lokální opravy. Pro lokální opravu by bylo vhodné vybroušení původního smaltu s vadou a nanesení opravné vrstvy a její vypálení. V současné době je na KSP řešen projekt zaměřený na lokální opravy smaltu pomocí indukčního ohřevu.

Právě touto metodou lokální opravy se bude zabývat tato bakalářská práce, která navazuje na výsledky předchozího výzkumu a jejím cílem je optimalizace technologických parametrů lokální opravy.

2. Teoretická část

V teoretické části je popsána výroba smaltovaných povrchů od přípravy podkladového materiálu a suspenze, přes způsoby nanášení až po vypalování smaltové vrstvy. Dále jsou zde popsány časté vady smaltových vrstev a možnosti jejich opravy. Hlavní pozornost je však věnována teplotním vlastnostem smaltovaných povrchů, resp. podkladového ocelového materiálu a smaltu. S ohledem na využití indukčního ohřevu při vypalování smaltu je na závěr popsán princip vysokofrekvenčního indukčního ohřevu.

2.1 Výroba smaltových povrchů

Pojmem smalt je označována ochranná vrstva anorganické látky na bázi skla [1]. Vlastnosti této látky jsou uzpůsobeny k adheznímu uchycení na kov a k vytvoření ochranného povlaku, který chrání podkladový materiál jak proti chemické kontaminaci, tak před mechanickými rázy, či abrazí. Zároveň zabrání vniknutí vlhkosti na povrch oceli a předejde tak možné tvorbě rzi. Povlak vzniká vypálením smaltéřské frity na povrchu podkladového materiálu. Ta je vytvořena ze směsi granulí nebo šupinek, vzniklých prudkým ochlazením skloviny se speciálním chemickým složením [2].

Základní stavební jednotkou smaltů jsou tetraedry, které jsou složeny převážně z oxidu křemíku, ale i dalších významných prvků. Mezi tyto významné prvky patří například bor, hliník, mangan apod., které na sebe pojí kyslík. Zmiňované prvky můžeme rozdělit na **sklotvorné**, které napomáhají k vytvoření určité struktury a jsou tvořeny převážně na bázi oxidů. **Intermediální**, ty zpevňují strukturu, patří mezi ně například hliník apod. Dále se přidávají prvky **pozměňující** vlastnosti smaltu. Do této skupiny patří alkalické kovy a zeminy [2].

Na podkladový materiál je možné nanášet povlak dvouvrstvý či jednovrstvý. Dvouvrstvý povlak se skládá ze základového a krycího smaltu. Nejprve se na povrch nanáší základový smalt, který slouží k vytvoření adhezního spojení mezi podkladovým materiálem a vrstvou krycího smaltu. Krycí smalt tvoří funkční vrstvu povlaku a má požadované mechanické vlastnosti. Jednovrstvý tzv. přímý smalt má vlastnosti krycího i základního smaltu současně. Přímý smalt je speciálním typem smaltu, který lze nanést pouze jako jednu vrstvu smaltu bez základové vrstvy, neboť má dobrou přilnavost k podkladovému materiálu i požadované funkční vlastnosti [2].

Povrch podkladového materiálu musí být před nanesením suspenze dokonale připraven, aby došlo ke správnému přilnutí obou fází. To znamená, upravit geometrii

povrchu a také ho zbavit nečistot, které by při procesu vypalování mohly vytvářet plyny. Plyny zapříčiní tvorbu pórů, smalt je tak méně celistvý a nedojde k správné adhezi smaltové vrstvy. Povrchové úpravy se provádí mechanicky a chemicky [2].

S rostoucí drsností povrchu podkladového materiálu se zvyšuje přilnavost smaltu a při **mechanických úpravách povrchu** docílíme nejen odstranění některých nečistot, ale i zdrsňení povrchu. Jsou využívány pro ocelové výrobky s tloušťkou více než 3 mm a výrobky z šedé litiny [3]. Při těchto úpravách je využívána kinetická energie částic při takzvaném otryskání [4].

Dále se využívají **chemické úpravy povrchu** a ty jsou rozděleny do čtyř základních operací. Odmašťování, moření, neutralizace a niklování. K nim je nutné zmínit i vedlejší operaci, oplachování vodou se sušením, které se provádí mezi těmito základními procesy. Chemické úpravy se provádí především na povrchu ocelí o tloušťce maximálně 3 mm [2].

Odmašťování je využíváno k odstranění mastnot z povrchu podkladového materiálu a probíhá formou lázně. Lázeň bývá často na bázi hydroxidu draselného a ohřívá se na teplotu 80 – 100 °C [2].

Moření slouží k odstranění povrchové rzi, okují i zdrsňení povrchu ocele. To zajišťuje nejčastěji kyselina sírová a chlorovodíková. Vytvoří na povrchu drobné bublinky, které svým tlakem zbaví povrch oxidů železa (rzi a okují) [2].

Jako další operace se provádí neutralizace, která probíhá v neutralizační lázni. Ta zbaví povrch kovu zbytků kyseliny po moření. Využívají se roztoky solí alkalických kovů o teplotě 80 – 90 °C. Po neutralizaci je nutné provést oplach, aby se soli z povrchu odstranily. Zbytky solí na povrchu podkladového materiálu by totiž vedly k snížení celistvosti smaltu a k tvorbě vad [2].

V některých případech se u jednovrstvého smaltu po moření kovu provádí niklování, aby se zlepšila adheze s podkladovým materiálem. Výjimečně se však používá i při výrobě dvouvrstvého smaltu. Tenká vrstva niklu na povrchu podkladového materiálu vznikne reakcí roztoku síranu nikelnatého v prostředí kyseliny sírové [2].

Zároveň s úpravami povrchů probíhá v procesu smaltování i příprava **smaltéřské suspenze**. Hlavní surovinou pro tvorbu suspenze je **smaltéřská frit**a. Roztavením homogenizované směsi sklotvorných oxidů a pomocných surovin vznikne sklovina, nejčastěji na bázi křemíku, boru s křemíkem nebo méně často fosforu. Sklovina je následně zchlazena vodou a vznikne již zmíněná frit a v podobě malých zrníček. Ty se dále buď suší

a melou v kulových mlýnech nebo jsou rozmíchány s vodou a dalšími přísadami ovlivňujícími **viskozitu** suspenze [3].

Viskozita má vliv na zaplnění kráterů, vznikajících v důsledku unikání plynů z podkladového materiálu, ale i samotného smaltu. K zaplnění těchto kráterů dochází v případě, že je viskozita dostatečně nízká. Je nutno podotknout, že se viskozita v závislosti na teplotě může několikanásobně snížit nebo zvýšit, a proto při teplotním cyklu pro vypalování smaltu hrozí, že ve vyšších teplotách viskozita výrazně klesne a smalt začne z podkladového materiálu stékat. K výrobě správné viskozity nanášené suspenze je tedy nutné brát v potaz průběh teploty vypalovacího procesu, a tak docílit optimálního povlaku na povrchu výrobku [2].

Velkou roli má i **povrchové napětí**, které ovlivňuje **smáčivost** suspenze. Čím větší je povrchové napětí suspenze, tím hůře smáčí povrch podkladového materiálu a hůře se po něm i rozlévá. I při velmi vysokém povrchovém napětí se může stát, že smalt z povrchu začne stékat, jako v případě nízké viskozity. Proto je zapotřebí smáčivost vlivem povrchového napětí nastavit tak, aby se suspenze po povrchu podkladového materiálu správně rozlila, přilnula k němu a poté byl výsledný vypálený smaltový povlak bez velkého množství pórů a prasklin [2].

Do smaltéřského základu se velmi často přidávají kaliva, která způsobují **zákal**. Ta způsobí, že se dopadající světlo na povrch výrobku ve smaltovém povlaku rozptýlí. Kaliva se přidávají přímo do smaltéřské frity před jejím tavením nebo vmíchávají do suspenze. **Průhledné** smalty bez kaliv se ve strojírenství nevyužívají [1].

Stejně jako kaliva se do frity či suspenze dají přidat barviva, přesněji barvicí oxidy nebo jemné částičky kovů. Díky tomu je možné vytvořit smaltové vrstvy v mnoha barevných provedeních [1].

Vytvořenou suspenzi je nyní možné nanášet na upravený povrch. Často používaná metoda nanášení je **metoda stékací**, kterou lze dále rozdělit na metodu máčení, polévání a nanášení ve vakuu. Metoda máčení spočívá v nanášení vrstvy ponořením předmětu do smaltéřské suspenze. Přebytečná suspenze na povrchu předmětu následně steče pomocí gravitační síly. Je potřeba, aby suspenze stékala rovnoměrně, kvůli zachování konstantní tloušťky nanášené vrstvy. Při polévání je předmět poléván suspenzí a přebytečné množství je opět odvedeno pomocí gravitační síly. Metoda nanášení ve vakuu zajišťuje rovnoměrné nanášení suspenze pomocí uměle vytvořeného podtlaku. Je vhodná pro vnitřní plochy dutých dílů [2].

Elektroforetická metoda spočívá v ponoření předmětu z vodivého materiálu do koupele, ve které se nachází speciální vodou ředitelná nátěrová látka. Daný předmět je připojen na anodu a vana na katodu. Působením stejnosměrného proudu pak vznikne elektrické pole mezi předmětem a vanou. Záporně nabitě částice sušiny nátěrové látky se pohybují po siločarách elektrického pole v koupeli směrem k anodě a na výrobku vytvoří výsledný povlak [2].

Metodou stříkací je suspenze nastříkána na předmět pomocí trysky či tlakové pistole. Nanesené částice suspenze se na povrchu podkladového materiálu spojí v souvislou vrstvu. Důležité je suspenzi udržovat v homogenním stavu. Mezi hlavní nevýhody této metody patří vysoká spotřeba suspenze [2].

Nanesená vrstva suspenze se před vypalováním suší. Sušení probíhá v sušících zařízeních 3 – 5 minut nebo na volném vzduchu 6 – 8 hodin [3]. Vznikne tzv. biskvit, který je následně vypálen v peci a vytvoří se hladká smaltová vrstva. Hlavními faktory při vypalování jsou vypalovací teplota, interval a doba vypalování. Vypalovací teplota je minimální teplota, která ukončuje reakce v povlaku. Pohybuje se mezi 740 a 900 °C. Vypalovací interval je rozsah teplot, při kterých povlak nabyde požadovaných vlastností [2]. Průběh celého teplotního cyklu vypalování je znázorněn na obr. 1 [2].



Obr. 1 Teplotní průběh při vypalování [2]

- 1 - počátek tvorby oxidu železnatého, 2 - fázové přeměny železa,
- 3 - počátek rozpouštění oxidu křemičitého a jílu, 4 - vznik přídržných sil obou vrstev

Vypalovací doba znázorněná na obr. 1 je pouze orientační. Její průběh se volí s ohledem na charakter výrobku a konstrukci vypalovací pece dle předpisu jednotlivých

výrobků. Co se týče pecí, tak pro vypalování se využívají převážně vsázkové nebo kontinuální pece. Dále jsou rozděleny dle typu energie na elektrické, plynové a olejové [2].

2.2 Vlastnosti smaltů

Vlastnosti smaltů lze obecně rozčlenit do pěti základních skupin, mezi které patří vlastnosti mechanické, tepelné, fyzikální, chemické a optické [1].

Hodnoty jednotlivých mechanických vlastností smaltů v porovnání s podkladovým materiálem jsou rozepsány v tab. 1.

Tab. 1 Orientační porovnání vlastností smaltu vůči oceli [2]

Vlastnost	Značení	Jednotka	Materiál	
			Smalt	Ocelový plech
Mez pevnosti v tlaku	R_{mt}	MPa	1000	2000
Mez pevnosti v tahu	R_m	MPa	80	500
Koeficient teplotní délkové roztažnosti	α	K^{-1}	$90 \cdot 10^{-7}$	$135 \cdot 10^{-7}$
Modul pružnosti v tahu (při 20 °C)	E	MPa	$70 \cdot 10^3$	$210 \cdot 10^3$
Tvrdoost (dle Vickerse)	HV	-	600	110
Tažnost (při 20 °C)	A	%	0,2	25
Součinitel tepelné vodivosti	λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	0,93	52
Měrná tepelná kapacita	c	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	837	460
Měrný elektrický odpor (při 20 °C)	ζ	$\Omega \cdot m$	$\sim 10^{10}$	$0,2 \cdot 10^{-6}$
Hustota	ρ	$kg \cdot m^{-3}$	2500	7800

Pružnost smaltu v tahu je oproti oceli velmi nízká (přibližně třikrát menší), konkrétně se jedná o hodnotu cca $70 \cdot 10^3$ MPa charakterizovanou Youngovým modulem. Materiál je také křehký tzn., že má nízkou tažnost a mez průtažnosti [2].

Pevnost smaltu v tahu a tlaku je v porovnání s ocelí až pětkrát menší. Avšak z pokusů vyplývá, že k poruše vrstvy smaltu tahovým či tlakovým namáháním dochází při zatěžování blízkému hodnotě meze kluzu oceli. Tzn., že se pevnost vrstvy musí posuzovat jako jednotný systém obou materiálů, za předpokladu dostatečné přilnavosti smaltu k podkladovému materiálu [2].

Tvrdoost smaltu je proti oceli cca pětkrát větší. Podle Mohsovy stupnice tvrdosti je tvrdost smaltu mezi 5. (apatit) a 7. stupněm (křemen). Mohsova stupnice vyjadřuje míru odporu materiálu proti trvalé deformaci. Obsahuje-li fritta zvýšené množství oxidu

křemičitého, je tvrdost smaltu výrazně vyšší. V opačném případě, obsah oxidu draselného a sodného tvrdost smaltu se snižuje [2].

Pevnost v nárazu není v mechanice ani exaktní fyzice definována, přesto se zkoušky pevnosti v nárazu provádí, a to především u spotřebních výrobků. Tato vlastnost určuje maximální možnou hodnotu kinetické energie, která může zapůsobit na povrch, aniž by ho narušila [1]. Vliv na pevnost v nárazu má kromě složení smaltu i poměr tloušťek obou materiálů a konstrukce smaltovaného výrobku [2].

Mezi další mechanické vlastnosti smaltu lze zařadit **odolnost vůči abrazi**. Smalt má v porovnání s ocelí výrazně větší odolnost. Odolnost, podobně jako tvrdost, záleží na chemickém složení frity. Dalšími vlastnostmi působícími na odolnost smaltu jsou např. tloušťka povlaku a stupně vypálení [2].

2.3 Vady smaltových povrchů

Než budou podrobně popsány jednotlivé vady, je zapotřebí definovat, jak by měl vypadat kvalitně vyrobený smaltový povrch. Jednou z hlavních vlastností je **správná adheze** smaltu a podkladového materiálu. Pokud smalt správně nepřilne k podkladovému materiálu, může být zkrácena životnost výrobku a negativně ovlivněny požadované vlastnosti smaltové vrstvy. Další základní vlastností je **celistvost vrstvy**. Pokud není vrstva celistvá, nechrání dostatečně podkladový materiál před vlivem okolí. To může způsobit chemickou kontaminaci podkladu, či vnik vlhkosti a tvorbu koroze. Celistvost je možné kontrolovat vizuálně nebo se dá pomocí elektroizolačních vlastností změřit [2].

V případě, že při výrobě smaltové vrstvy dojde k nedodržení správné technologie výroby, či k nesprávnému výběru podkladového materiálu, po vypálení vzniknou povrchové vady. Vady může způsobit i špatně připravený povrch podkladového materiálu. Následkem již zmíněných pochybení ve výrobě je porušení celistvosti smaltové vrstvy nebo nerovnost povrchu [2].

Jednou z často se objevujících vad jsou **bublíny** o velikosti jednoho i více milimetrů a **krátery** ve formě vyvýšených kruhových prohlubní, které mohou zasahovat až k podkladovému materiálu. Příčinou vzniku tohoto typu vad je ve většině případů přítomnost vodíku, který vzniká při moření. Přítomnost zbytkového vodíku lze zredukovat správnou dobou moření, případně provést kontrolu neutralizační lázně [2].

Dále v důsledku zbytkového vodíku, ale i kontaminace suspenze prachovými částicemi mohou vzniknout mikroskopické **póry**. Ty se od bublin liší svou velikostí, která je několikanásobně menší [2].

Při uvolňování oxidu siřičitého se na povrchu tvoří takzvané **vyvřeliny**. To jsou shluky bublin, které se vyskytují výhradně u krycího smaltu. Oxid siřičitý bývá obsažen v prostředí pece nebo vzniká z vysokého obsahu síranu ve smaltéřské fritě [2].

V případě, že nedojde ke správnému přilnutí vrstvy smaltu k podkladovému materiálu, může dojít k **odprýsknutí**. Tento jev se může projevit i při nedostatečném přilnutí krycí vrstvy k základové vrstvě smaltu. Nejčastěji se tak stává v případě, kdy na podkladovém materiálu nebo základní vrstvě zůstane mastnota či nečistoty. Tato vada může nastat i po prudkém zchlazení následně po vypálení. Odprýsknutí se může objevit i po delší době, a to v podobě vady označované jako **rybí šupiny**. Na povrchu smaltové vrstvy po odprýskání zbydou prohlubně ve tvaru rybích šupin, které mohou svojí hloubkou sahat až k podkladovému materiálu. Opět zde hraje roli vodík, který se postupně uvolňuje a hromadí v okolí mikroskopických vad, za vzniku větších molekul, které způsobí vyšší tlak v povrchové vrstvě a následně odprýsknutí [2].

Ve vrstvě smaltu mohou vzniknout i **praskliny**. Ty se na povrchu mohou vytvořit díky pnutí v podkladu, špatné geometrii podkladového materiálu nebo příliš tlusté vrstvě smaltu. Konkrétně pnutí může být způsobeno buď příliš rozdílnými teplotními roztažnostmi smaltu a podkladového materiálu nebo nevhodnými podmínkami vypalování a chlazení [2].

Vrstva smaltu se může případně **zvlítnit** z důvodu špatného rozmíchání suspenze, **zvrásnit** kontaminací břechky nebo se na ní vytvoří tzv. **pomerančová kůra** kvůli špatným technologickým podmínkám nanášení [2].

V důsledku kontaminace povrchu podkladového materiálu vznikají **měděné hlavičky**. To jsou zoxidovaná místa smaltu v podobě černých nebo hnědočervených skvrn. Vyskytují se v základním či přímém smaltu a narušují celistvost povlaku [2].

Při kontaminaci různými nečistotami vznikají **temné body**, tzv. mušiny. Tyto různobarevné body bývají roztroušené uvnitř a na povrchu smaltové vrstvy.

Jako nepravidelné čáry, které zasahují jen do určité vzdálenosti od kraje smaltové vrstvy, se projevují **vodní pásy**. K těmto vizuálním vadám dochází vlivem nedostatečného vysušení.

Při nedostatečném promísení suspenze může dojít k **nerovnoměrnému zakalení** výsledného povrchu [2].

2.4 Opravy smaltových povrchů

V případě, že ve smaltové vrstvě vznikne vada, tak je mnohdy negativně ovlivněna funkčnost celého výrobku. Proto je zapotřebí včas vrstvu opravit. Vady se v praxi opravují

nejčastěji tak, že se lokálně nanáší nová opravná vrstva smaltu. Tuto variantu opravy lze provést pouze za předpokladu, že nebude překročena předepsaná dovolená tloušťka smaltové vrstvy. Při tomto procesu se nejprve vybrousí vrstva starého smaltu s vadou a potom následuje běžný postup při výrobě jednovrstvého (přímého) smaltu [2].

Pokud jsou vady ve smaltové vrstvě příliš četné a rozsáhlé je za potřebí z výrobku odstranit kompletně celou smaltovou vrstvu pomocí teplotního šoku v kombinaci s mechanickým tryskáním, nebo chemických reakcí se zásadami alkalických kovů. Tato varianta je ekonomicky velmi náročná kvůli případné demontáži a dopravě výrobku do smaltovny [2].

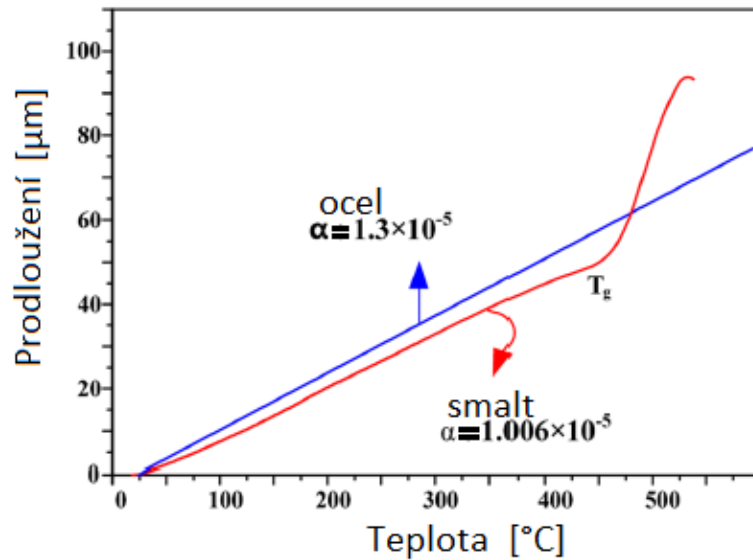
V chemickém provozu může dojít k poškození smaltové vrstvy, kde vada nedosahuje příliš velkých rozměrů. V takovém případě se využívají opravy pomocí tantalových šroubů s teflonovým těsněním, případně „hříbků“ s teflonovým těsněním, které jsou poměrně větší. Jsou používány převážně díky chemické odolnosti tantalu a teflonu, která je srovnatelná se smaltem [2].

2.5 Teplotní vlastnosti smaltovaných povrchů (smalt-ocel)

Smalty aplikované na ocel mají podobné vlastnosti jako bimetalické pásy. **Zbytková napětí**, která vzniknou během vypalování vlivem **teplotní roztažnosti**, by měla dosahovat ideálních hodnot a být prospěšná pro pevnost smaltovaného výrobku po vypálení. Během ohřevu není systém smalt-ocel namáhán až dokud nedosáhne vypalovací teploty. Jakmile je smalt vypálený a oba materiály se začnou ochlazovat na pokojovou teplotu, rozdíly v teplotních roztažnostech budou silně ovlivňovat tvorbu zbytkového napětí [5].

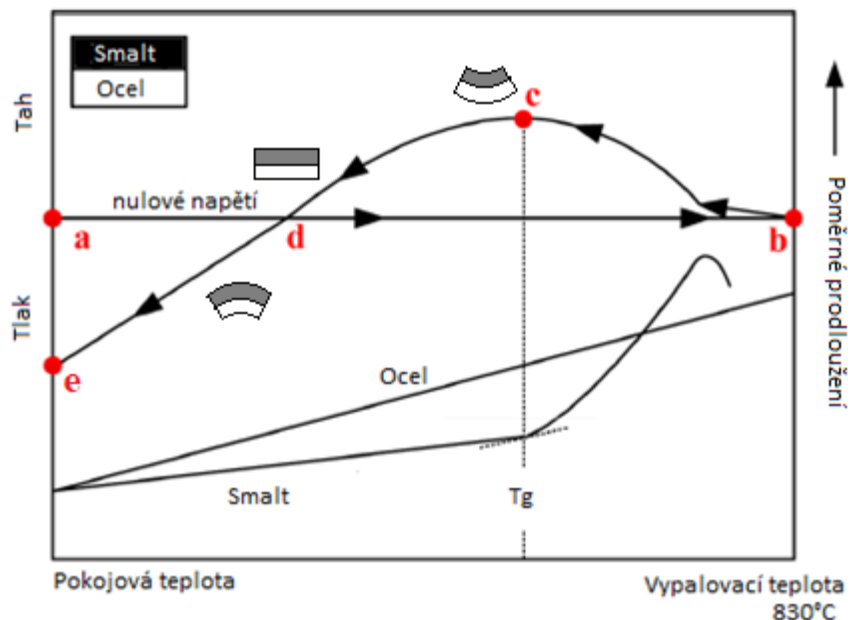
Vytvořené zbytkové napětí však může mít i negativní vliv na odolnost proti praskání, adhezi vrstev a životnost povrchové vrstvy. Možný je i vznik příliš velké deformace obou materiálů, při které dochází k nedodržení požadovaných rozměrů výrobku. Proto je důležité předpovědět zbytkové napětí v už ochlazené smaltované oceli, které zapříčinily rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti [6].

Koeficienty teplotních roztažností smaltovaného povlaku a ocelového substrátu jsou uvedeny na obr. 2 [6].



Obr. 2 Graf prodĺoužení v závislosti na teplotě [6]

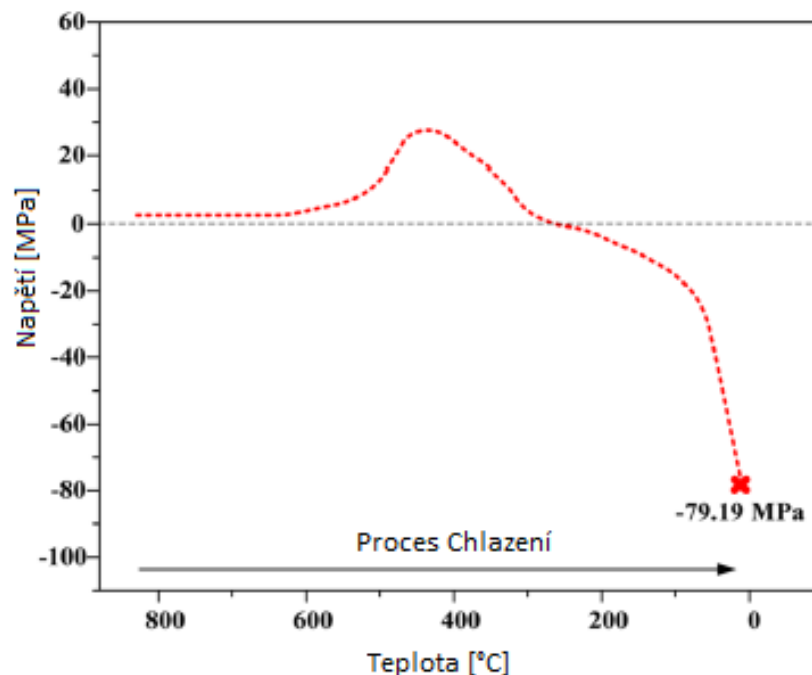
Rozdílné objemové změny smaltu a podkladového materiálu, které generují napětí a díky tomu dochází k porušení souvislosti smaltu, jsou způsobeny rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti materiálu obou vrstev. Při ohřevu ocel vykazuje téměř lineární závislosti součinitele teplotní roztažnosti až do teploty přibližně 900°C. U smaltu je však tento průběh lineární pouze při teplotách pod transformačním bodem teploty zesklenní T_g , jak znázorňuje obr. 3 [6].



Obr. 3 Porovnání teplotní roztažnosti a napjatosti ve smaltovém povlaku [6]

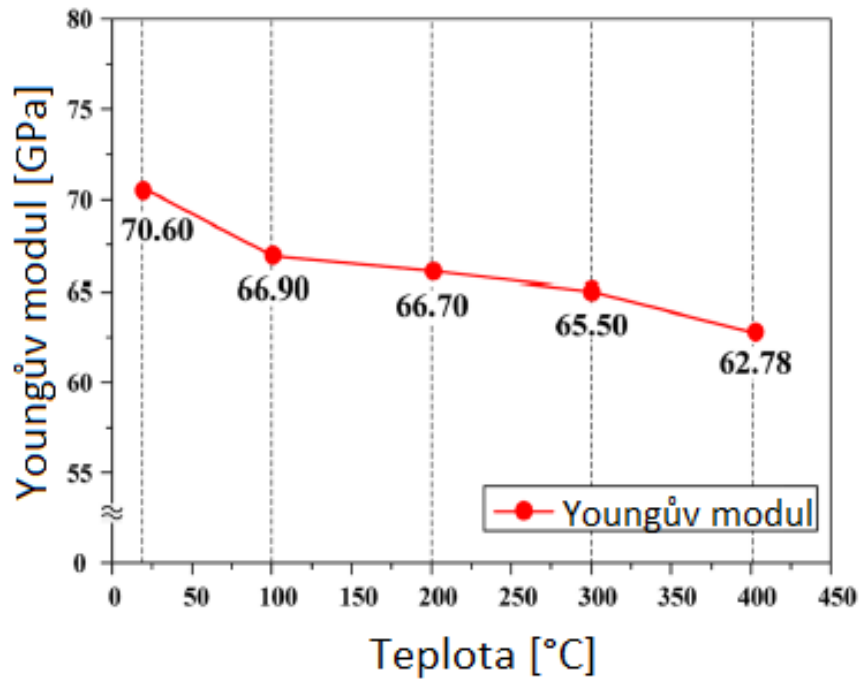
Při ohřevu základního materiálu nastříkaného smaltovou suspenzí v peci na vypalovací teplotu, kdy se prášek roztaví, není vytvářeno žádné napětí (na obr. 3 znázorněno čarou z a do b). Po vyjmutí z pece se smaltová vrstva začne ochlazovat (na obr. 4 znázorněno čarou mezi bodem b a bodem c). Protože se v tuto chvíli smalt smršťuje rychleji než ocel, je namáhán tahem a vzorek se ohýbá směrem ke smaltu. Tento stav se udržuje, dokud se povlak skloviny nestane viskóznějším. Při ochlazení na teplotu T_g (cca 400 až 500 °C) se dosáhne maximálního tahového napětí, které je označeno bodem c. Při dalším ochlazování (křivka c-d) se rychlost smršťování skloviny prudce sníží a začne se rychleji smršťovat ocel a vzniklé tahové napětí se pomalu začne vyrovnávat. Křivka napětí klesá až k bodu d, kde je hranice nulového napětí. Odtud je už smalt namáhán tlakem, jak je reprezentováno čarou mezi bodem d a bodem e, kdy v bodě e dosáhne pokojové teploty [6].

Experimentálně stanovený průběh napětí ve vrstvě smaltu, nanesené na ocelovém nosníku, je zobrazen na obr. 4 v závislosti na teplotě během procesu ochlazování. Jak bylo uvedeno výše, tahové napětí smaltovaného povlaku se zvyšuje před teplotou T_g , ale když teplota výrobku dosáhne přibližně 300 °C, napětí se mění na tlakové [6].



Obr. 4 Průběh napětí v závislosti na teplotě při procesu chlazení [6]

Youngův modul (E) smaltovaného povlaku v závislosti na teplotě je znázorněno na obr. 5 [6].



Obr. 5 Graf Youngova modulu v závislosti teplotě [6]

V případě lokálních oprav smaltovaných povrchů, které se provádí vybroušením vady a nanesením jednotlivých vrstev opravného a krycího smaltu, které jsou vypalovány pomocí indukčního ohřevu, jsou rozdílné teploty kovového podkladu a smaltu v daném místě důležitým parametrem ovlivňujícím napětí ve smaltu. S ohledem na princip indukčního ohřevu, kdy se vířivé proudy indukují pouze v elektricky vodivém materiálu, tedy v kovovém podkladu nikoliv ve smaltu, který elektricky vodivý není. Teplo vzniká tedy pouze v podkladovém kovu a smalt je od něho ohříván pouze tepelnou vodivostí [7].

V původní vrstvě smaltu zůstává zbytkové tlakové napětí, které se při následném ohřevu přičítá k napětí vzniklému v důsledku ohřevu a ochlazování vypalované vrstvy a tím ovlivňuje výsledné napětí ve vrstvě. Takto vzniklá tahová napětí vedou v okolí místa lokální opravy ke vzniku prasklin na povrchu původní vrstvy smaltu. Z hlediska odolnosti smaltované vrstvy proti tvorbě prasklin je tedy důležitá i historie předešlého zpracování.

2.6 Vysokofrekvenční indukční ohřev

Při indukčním ohřevu je možné zahřívát pouze vodivé materiály. Je tomu tak díky elektromagnetické indukci, při které dochází k dopadu elektromagnetického vlnění na zahříváný předmět. Při tom vzniká časově proměnné magnetické pole a následně vířivé proudy, které materiál ohřívají [8].

Teplo vzniklé působením vířivých proudů je dle Joulova zákona dáno vztahem:

$$Q = R \cdot I_{ef}^2 \cdot \tau \quad (1)$$

kde značí:

Q	-	teplo [J],
R	-	odpor [Ω],
I_{ef}	-	efektivní hodnota proudu [A],
τ	-	čas [s].

Předmět ohříváný pomocí elektromagnetické indukce neodebírání teplo z okolí ani není připojen ke zdroji elektrické energie. Nedochozí ke kontaktu ani s ohřívacím zařízením tzv. induktorem. Mezi další výhody patří velká rychlost ohřevu, účinnost, přesnost určení polohy ohřevu, pružná regulace a hustota výkonu [10].

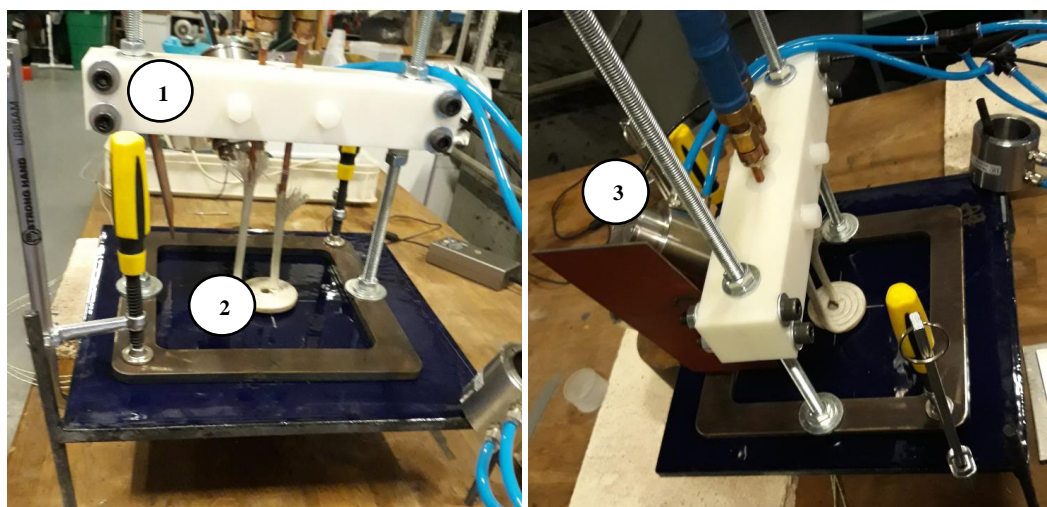
Induktor neboli indukční cívka je vodič napájen proudem z vysokofrekvenčního generátoru v rozmezí 10-3000 A o vysoké frekvenci 50-1000 kHz. V důsledku přivedení střídavého proudu do cívky, vznikne v jeho okolí magnetické pole. Cívky jsou nejčastěji vyráběny z mědi, protože měď má velmi vysokou vodivost a nedeformuje magnetické pole. Vyrábí se v různých tvarech s jedním nebo více závitů o různých průřezích a s chlazením nebo bez. Proti případnému kontaktu mezi jednotlivými závitů se často využívá ochranný plášť, např. ze skelných vláken, který je použit v rámci této práce [9].

Hloubka vniku magnetického pole do zahříváného předmětu je přímo úměrná frekvenci střídavého proudu [9].

3. Experimentální část

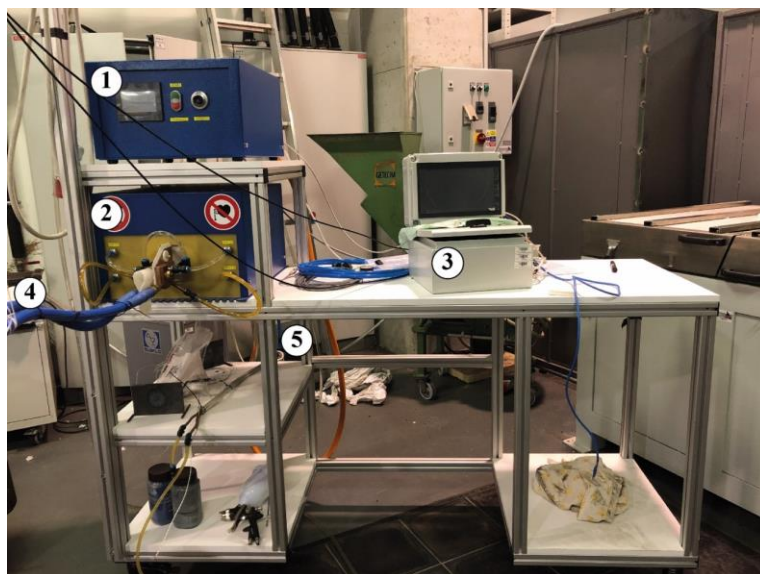
Tato bakalářská práce je řešena v rámci grantového projektu FV40144 – Návrh a výroba prototypu zařízení pro lokální opravy funkčnosti anorganických povrchů. Během projektu bylo vyvinuto prototypové zařízení, které umožní provádět lokální opravy anorganických povrchů zásobníků, míchadel a tlakových nádrží. Řešená bakalářská práce navazuje na předešlé výzkumy a poznatky získané v tomto projektu a experimenty se provádí na již zmíněném prototypovém zařízení.

Za účelem ohřevu smaltované oceli bylo využíváno již zmíněné prototypové zařízení, které je složeno primárně z řídicí jednotky a vysokofrekvenčního generátoru o výkonu 25 kW, který upravuje frekvenci elektrického proudu na 300 KHz. Sestava zařízení dále obsahuje flexibilní kabel umožňující přivést proud o vysoké frekvenci až do vzdálenosti 2600 mm od generátoru. Na flexibilní kabel je napojený induktor, který je pozicovaný do místa ohřevu pomocí speciálního přípravku. Tento přípravek zajišťuje ustavení induktoru v definované vzdálenosti od ohřívání materiálu. Dalšími částmi sestavy jsou chladicí okruhy a chladicí zařízení Hyperchill plus 50 Hz o výkonu 6,34 kW, díky nimž je chlazená řídicí jednotka, pyrometr, přívodní kabel a samotný induktor. Poslední částí sestavy zařízení je zpětnovazební modul, který snímá okamžité teploty v ohřívání oblasti a zajišťuje okamžitou úpravu výkonu generátoru tak, aby bylo docíleno požadovaného průběhu teplotního cyklu. Přípravek s induktorem a pyrometrem, je ukázán na obr. 6. a na obr. 7. je zobrazen zbytek sestavy, kterou tvoří řídicí a zpětnovazební jednotka, generátor a kabely mobilního induktoru.



Obr. 6 Přípravek pro zařízení určenému k lokálním opravám smaltovaných povrchů

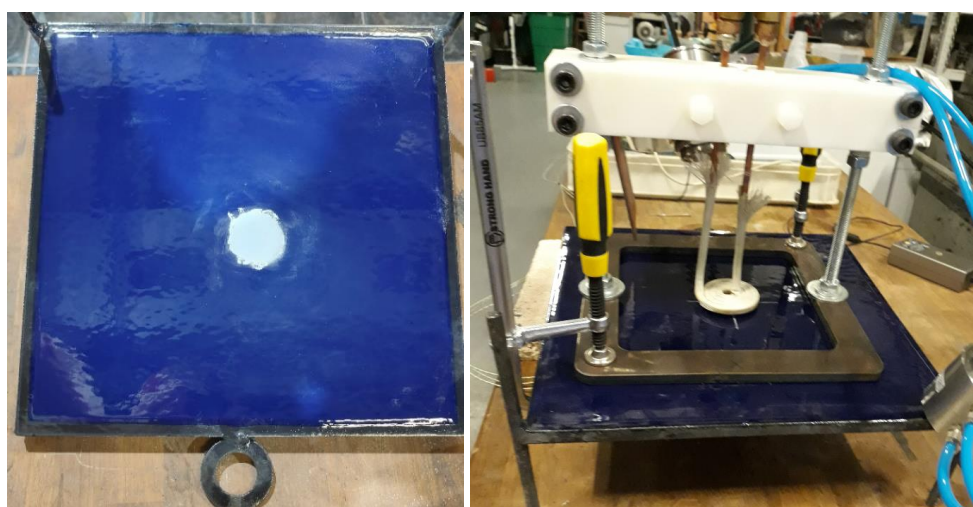
1 – přípravek, 2 – induktor, 3 – pyrometr



Obr. 7 Sestava prototypového zařízení pro lokální opravy smaltovaných povrchů se zpětnovazebním modulem

1- řídicí jednotka, 2 – generátor typu HFR, 3 – sestava zpětnovazebního řízení, 4 – kabely mobilního induktoru, 5 – místo pro chladicí zařízení

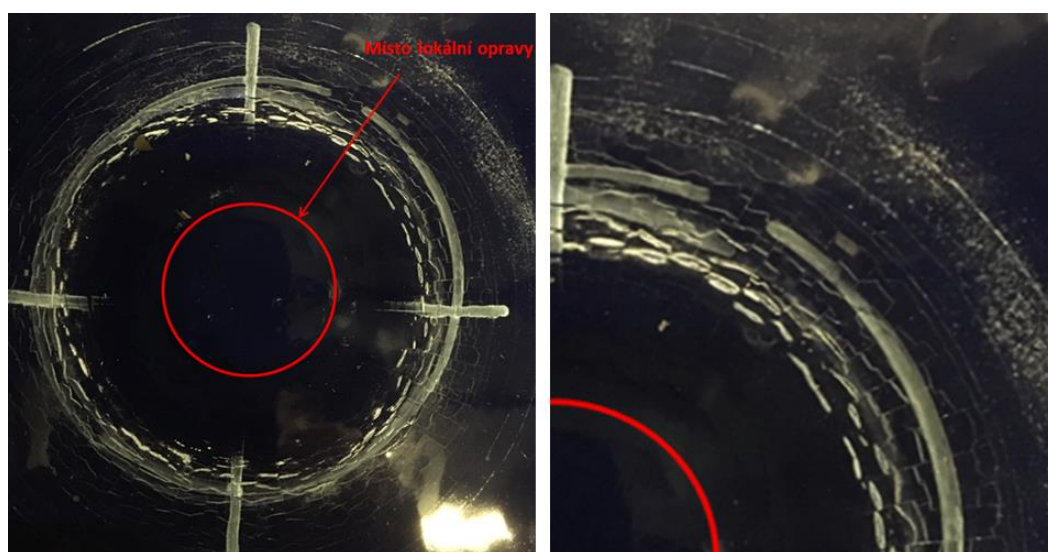
V praxi se tloušťka smaltu u nádrží pohybuje v rozmezí 0,8 až 2 mm, standardně 1,2 mm. Rozměry testovacích desek byly voleny s ohledem na reálné podmínky lokálních oprav v praxi. Pro experiment byly připraveny smaltované desky o rozměru 350 x 350 x 12 mm pokryty vrstvou smaltu o tloušťce cca 1,2 mm. Na testovací desku byl smalt nanesen standardním způsobem ve čtyřech vrstvách (2x základní + 2x krycí smalt). Na středu desky byla potom vybroušena vada o velikosti 30 mm a na takto upravenou vadu byla postupně nanášena první vrstva opravného smaltu, viz obr. 8.



Obr. 8 Smaltovaná ocelová deska s vybroušenou vadou a vrstvou opravného smaltu při vypalování

Tloušťka nanesené vrstvy opravného smaltu byla kontrolována pomocí tloušťkoměru PosiTector 6000, s průměrnou tloušťkou nevypáleného smaltu 0,563 mm. Vypalování probíhalo pomocí induktoru, který je umístěn 4 mm od povrchu desky.

V předešlém výzkumu daného projektu byly stanoveny technologické parametry, za kterých došlo k dokonalému spojení smaltu v místě lokální opravy a původního povlaku. Vlivem teplotních cyklů během opravy však docházelo ke vzniku zbytkových napětí v oblastech mimo opravu (vzdálenost od místa lokální opravy cca 20 mm), která vedla ke vzniku prasklin. Za použití rychlosti ohřevu 50 °C/min, výdrže na vypalovací teplotě 860 °C po dobu 10 min a rychlosti chlazení 50 °C/min, se opravný smalt dokonale spojil s vrstvou původního smaltu a na původní vrstvě se vytvořily praskliny, viz obr. 9.



Obr. 9 Praskliny vytvořené na povrchu původního smaltu

Při experimentech v předložené bakalářské práci se technologické parametry odvíjely od parametrů z předešlého výzkumu. Cílem bylo optimalizovat tyto parametry tak, aby při lokální opravě smaltového povrchu pomocí vysokofrekvenčního indukčního ohřevu nedocházelo k tvorbě prasklin původního smaltu v okolí místa lokální opravy.

3.1 Vliv technologických podmínek na tvorbu prasklin ve vrstvě smaltu

V experimentech je zkoumána tvorba prasklin ve smaltu, které se tvoří v místě lokálního ohřevu a jeho okolí. Cílem experimentů je nastavit technologické podmínky teplotního cyklu, jako jsou rychlost ohřevu a chlazení tak, aby po vychlazení desky na pokojovou teplotu nedošlo k vytvoření prasklin ve smaltové vrstvě. Kvůli snížení úniku

tepla do okolního prostředí je na desce umístěna izolace v podobě deky z keramické tkaniny a sibalalu, jak je znázorněno na obr. 10.



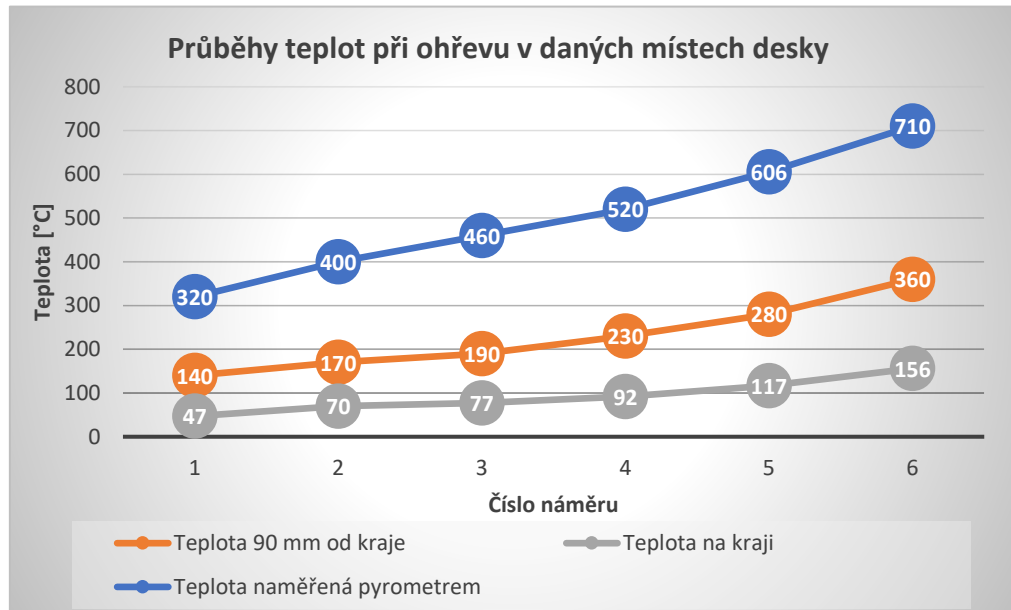
Obr. 10 Zobrazení izolace na povrchu desky v průběhu experimentu

Při prvním experimentu byly podmínky teplotního cyklu induktoru nastaveny na 10 °C/min jak při ohřívání, tak při ochlazování. Při docílení teploty 860 °C , tzn. vypalovací teploty smaltu, byla nastavena výdrž na teplotě 10 min. Po výdrži na vypalovací teplotě se ohřívaná oblast začala postupně ochlazovat 10 °C/min . Při této rychlosti ochlazování a vysokých teplotách je potřeba desku stále přehřívat, protože samovolné chlazení by bylo zásadně rychlejší. Tento fakt se však mění při ochlazení na 300 °C . Od dosažení této teploty se deska naopak nestíhá ochlazovat v zadaném parametru 10 °C/min a ochlazování probíhá pomaleji, protože deska nemá chladicí zařízení. Údaje o teplotě, podle kterých se řídí teplotní cyklus, jsou vyhodnocovány na základě měření pyrometru. Ten je namířen do osy induktoru a snímá teplotu na smaltovém povrchu, viz obr. 11.



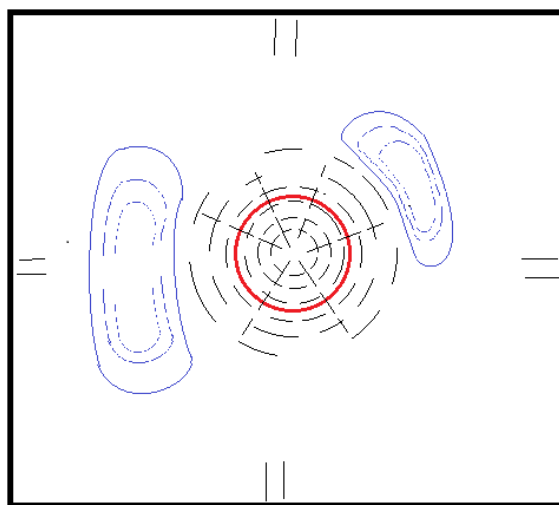
Obr. 11 Uložení pyrometru vůči induktoru a desce

Pro získání údajů o šíření tepla v desce byly měřeny další dva body, a to na kraji a ve vzdálenosti cca 90 mm od kraje desky, viz obr. 12.



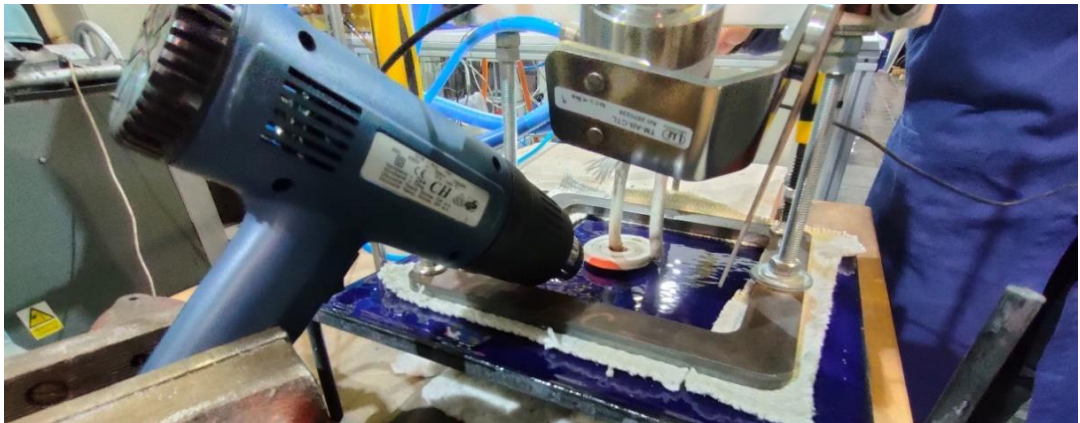
Obr. 12 Průběhy teplot při ohřevu desky v daných místech při prvním experimentu

Jakmile se deska ochladila na pokojovou teplotu, vytvořily se praskliny a změny barvy smaltu hned na několika místech. Jak je vidět na obr. 13, tak praskliny, které jsou znázorněny tenkými černými čarami, vznikly v okolí induktoru v různých směrech. Poloha induktoru je zde znázorněna červenou čarou. Praskliny se vytvořily i na krajích desky kolmo k hraně. Na dvou místech došlo ke změnám odstínu smaltové vrstvy, ty znázorňují tenké modré čáry.



Obr. 13 Schéma vzniklých vad smaltu na desce po vypalovacím teplotním cyklu prvního experimentu

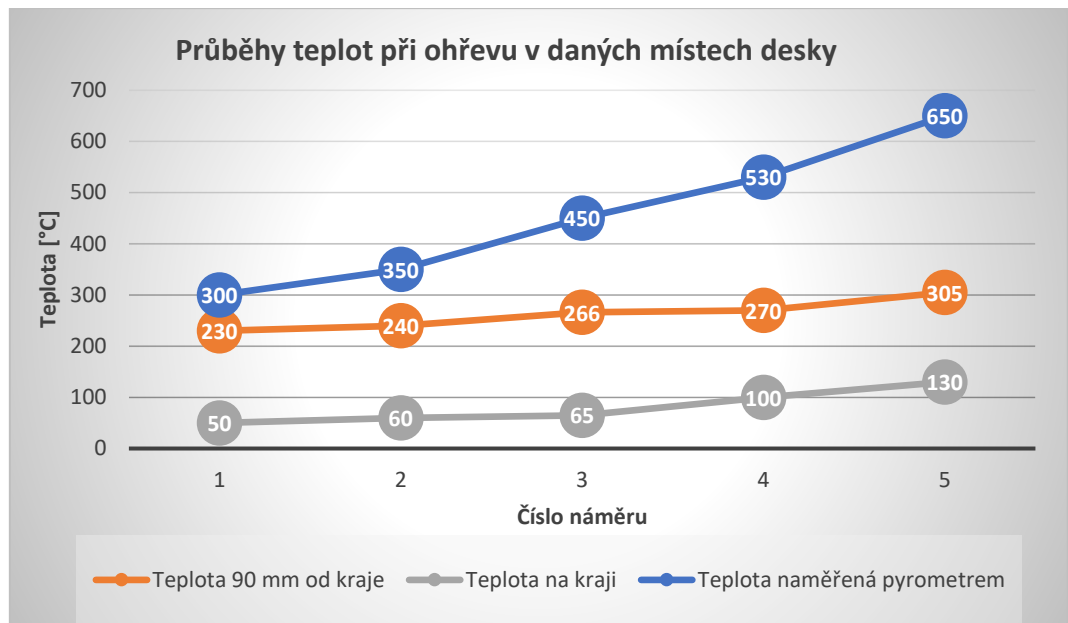
Při druhém experimentu byla zvýšena rychlost ohřívání i chlazení na 25 °C/min. Doba výdrže na vypalovací teplotě byla ponechána na hodnotě 10 min. Kvůli tomu, že je ohříván pouze ocelový podkladový materiál, byla odstraněna izolace a přidán přehřev pomocí horkovzdušné pistole, jak je znázorněno na obr. 14.



Obr. 14 Zobrazení přehřevu pomocí horkovzdušné pistole

Smalt se tak rychleji ohřívá a snižuje se rozdíl jeho teploty oproti podkladovému materiálu. Při přehřevu se také dříve ohřeje materiál desky v okolí lokální opravy, docílí se tak lepšího rozložení teplot a sníží se pravděpodobnost tvorby prasklin. Při ohřevu na vypalovací teplotu však přehřev zapříčinil to, že se teplota pod induktorem měřená pyrometrem zastavila na 830°C. Při takto vysoké teplotě horkovzdušná pistole povrch naopak ochlazuje, proto byla včas vypnuta, aby mohl teplotní cyklus pokračovat. Po výdrži na vypalovací teplotě se deska začala ochlazovat a při 800 °C byla horkovzdušná pistole opět spuštěna. V okamžik, kdy pyrometr naměřil teplotu 300 °C, byl z desky sundán přípravek s induktorem a zůstal ponechán pouze přehřev. Díky pomalému ochlazení pomocí horkovzdušné pistole se opět snižuje riziko tvorby prasklin způsobené teplotní roztažností. Jako v předešlém experimentu byly měřeny teploty dvou bodů na desce v okolí místa lokální opravy, viz obr. 15.

Po ochlazení desky na pokojovou teplotu se vytvořily praskliny ve smaltu podobně jako v předchozím experimentu. Protože s přehřevem pomocí horkovzdušné pistole nedošlo k žádným výrazným změnám, bude se muset instalovat efektivnější přehřev.



Obr. 15 Průběhy teplot při ohřevu desky v daných místech při druhém experimentu

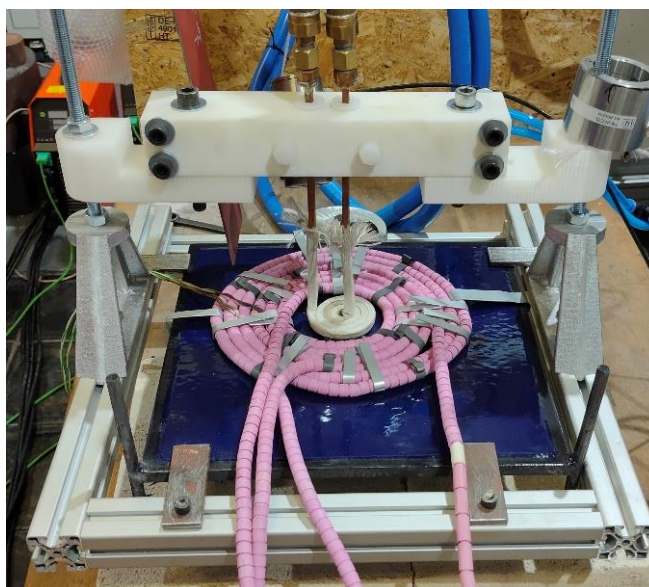
Před třetím experimentem byl vyměněn přípravek na polohování induktoru a pyrometru. Nový přípravek byl upraven pro instalaci odporového předehřevu, který nahradí horkovzdušnou pistoli z předešlého experimentu. Odporový předehřev tak bude, na rozdíl od pistole, ohřívat rovnoměrně okolí místa indukčního ohřevu.

Jako předehřev tedy do sestavy přibyl invertorový odporový ohřev DHC 6510R o výkonu 10,8 kW. Toto zařízení dokáže ohřát výrobek až na 1050 °C a je vybaven regulátorem teploty. Umožňuje multizónový režim teplot, je díky němu možné zaznamenávat teplotu a lze ho naprogramovat případně propojit s jinými zařízeními. Zřízení DHC 6510R je vybaveno příslušenstvím v podobě dvou keramických one line elementů o délce 2135 mm, odběru 1,35 kW a maximálním možném napětí 30 V a jedním o délce 4500 mm, odběru 3 kW a maximálním možném napětí 60 V. Těmito elementy se vyskládá okolí indukčního ohřevu a následně předehřívá deska. Zařízení s příslušenstvím je zobrazeno na obr. 16. V experimentech budou využívána dvě tato zařízení DHC a pouze dva 30 V one line elementy. Pro regulaci teploty jsou z obou zařízení DHC 6510R přivedeny termočlánky. Každý z těchto termočlánků je umístěn v bezprostřední blízkosti povrchu mezi dvěma keramickými prvky one line elementu.

Při třetím experimentu byla testována deska s vrstvou opravného smaltu, novým odporovým předehřevem a s přípravkem, viz obr. 17.

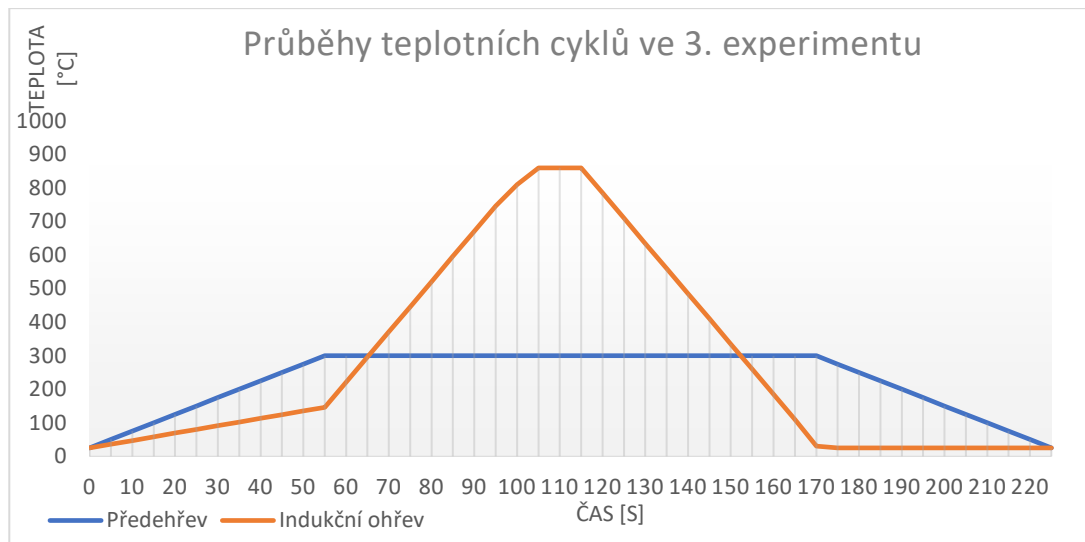


Obr. 16 Zařízení DHC 6510R s keramickým one line elementem



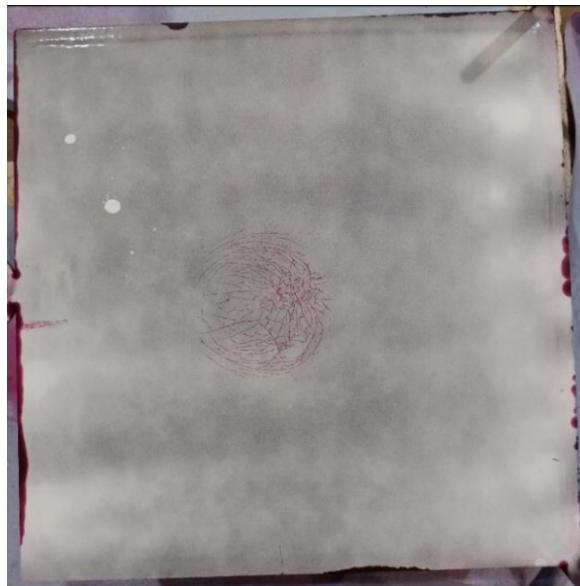
Obr. 17 Nový přípravek a odporový předehřev

Pro teplotní cyklus induktoru byly nastaveny vstupní hodnoty: ohřev $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, chlazení $15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, výdrž na vypalovací teplotě 10 min i vypalovací teplota $860\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dříve než se spustil cyklus indukčního ohřevu, byl spuštěn odporový předehřev. Ten byl nastaven na rychlost ohřevu $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ až na teplotu $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při dosažení této teploty byl spuštěn cyklus indukčního ohřevu. Odporový předehřev udržoval tuto teplotu na povrchu desky v okolí lokální opravy po dobu 115 min. Během této doby dokončil svůj cyklus induktor, který byl následně odejmut a místo lokální opravy bylo zaizolováno sibralem. Poté začaly odporové topné elementy povrch postupně ochlazovat rychlostí $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ až na teplotu $215\text{ }^{\circ}\text{C}$ kdy samovolné chladnutí probíhalo pomaleji než nastavené a odporový předehřev již nemusel povrch přehřívat. Na obr. 18 jsou vidět průběhy teplot indukčního ohřevu a odporového předehřevu.



Obr. 18 Graf porovnávající průběhy teplot vypalování i předehřevu v závislosti na čase

Po ochlazení smaltované desky na pokojovou teplotu byla provedena kapilární zkouška, při které byly odhaleny praskliny v několika místech, viz obr. 19. Praskliny se vytvořily především v místě lokální opravy mimo oblast předehřevu. S velkou pravděpodobností je tomu tak kvůli rozdílným teplotám smaltu a podkladového materiálu v opraveném místě při ukončení indukčního teplotního cyklu. V tento moment je totiž stále aktivní předehřev, který drží okolní vrstvu smaltu na teplotě 300 °C, ale opravný smalt, i když je řádně zaizolovaný, se ochladí na teplotu 200 °C a méně.

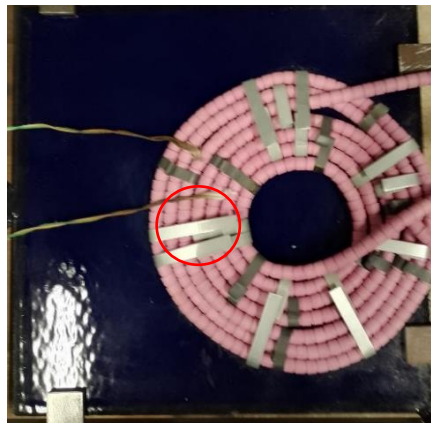


Obr. 19 Kapilární zkouška povrchu testované desky při třetím experimentu

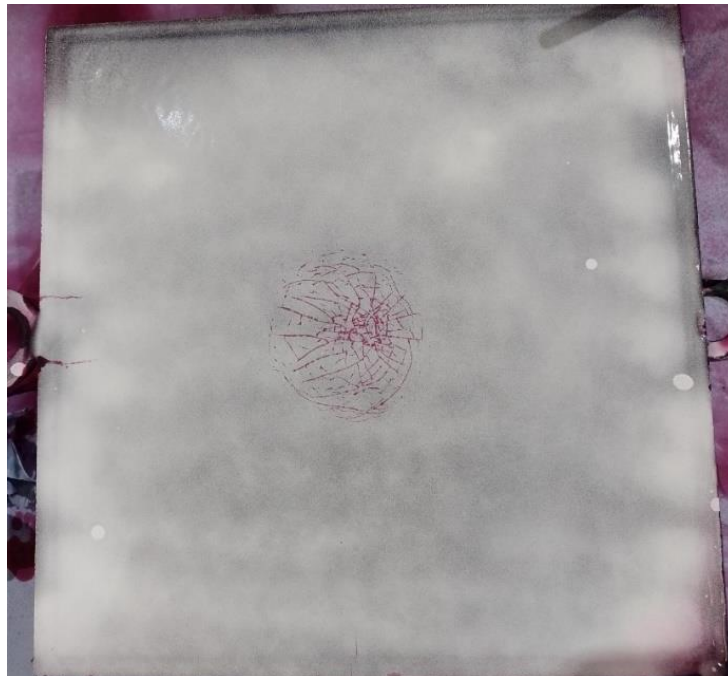
Tím, že v opraveném místě podkladová ocel chladne pomaleji než smalt, dochází k velmi rozdílným dilatacím smaltu a oceli. Ideální je, když má vyšší teplotu při chladnutí

naopak smalt, který má nižší koeficient teplotní roztažnosti. Vyšší teplotu smaltu zajišťuje právě odporový přehřev a v okolí opravovaného místa, kde byl aplikován, nedošlo k vytvoření žádných prasklin.

Ve čtvrtém experimentu byl proto testován odporový přehřev i v místě, které popraskalo v předchozím experimentu. Ve fázi chladnutí, kdy se odejímal induktor pryč z desky a zaizolovávalo se volné místo, které po něm zbylo, se místo izolace tohoto místa posunul celý přehřev tak, aby zakryl celou tuto část. Na obr. 20 je vidět umístění přehřevu po odstranění izolace a červeně označená opravná vrstva smaltu.



Obr. 20 Umístění přehřevu po docílení 300 °C při ochlazování

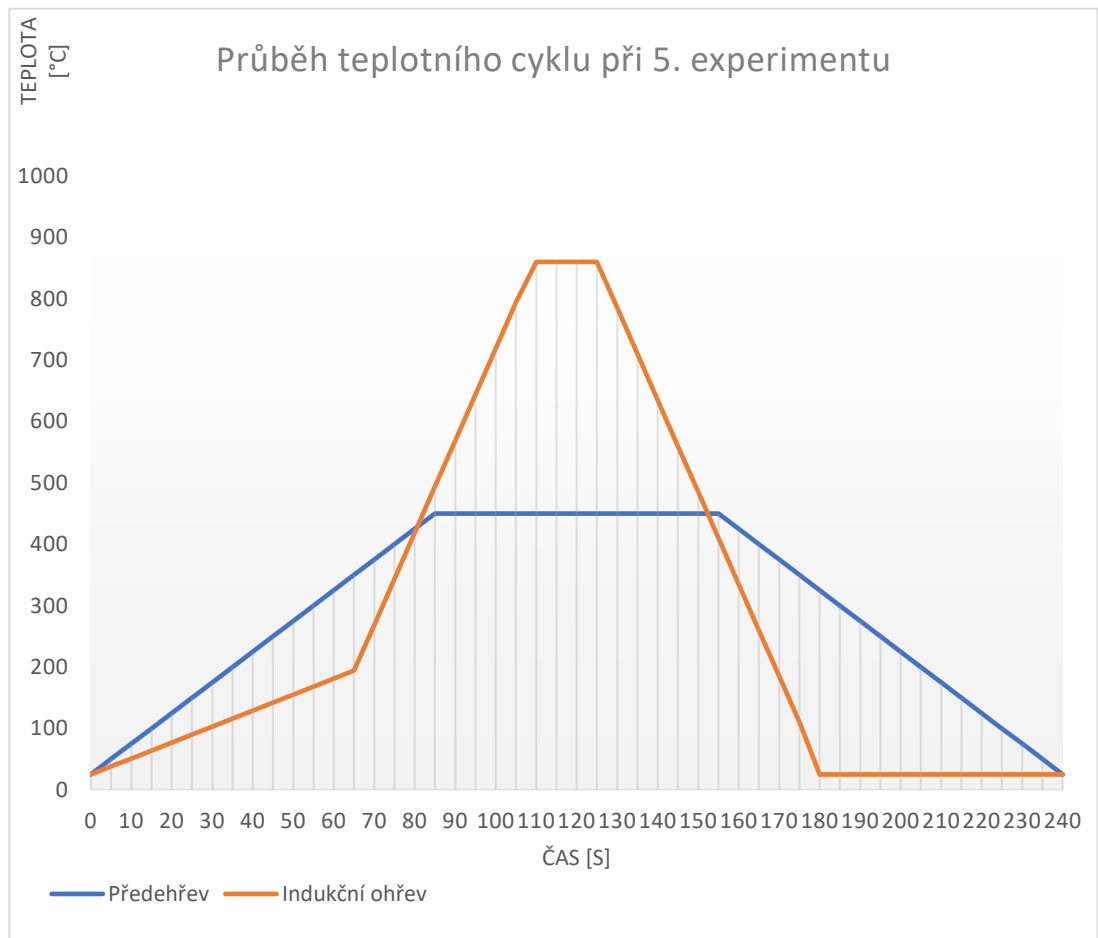


Obr. 21 Kapilární zkouška povrchu testované desky při čtvrtém experimentu

Posunutím přehřevu došlo v porovnání s předchozím experimentem ke zmenšení četnosti prasklin v místě lokální opravy, jak je vidět na obr. 21.

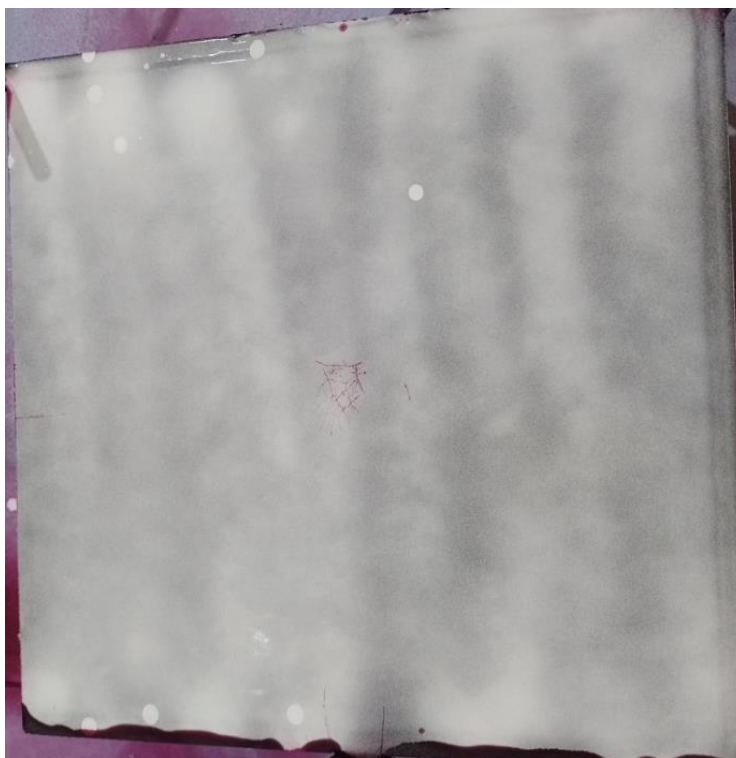
Vzhledem ke snížení výskytu prasklin byl postup s posunutím přehřevu do opravovaného místa v pátém experimentu zachován a došlo pouze k úpravě parametrů teplotního cyklu.

S ohledem na občasnou nedokonalost vypálení nové vrstvy byla prodloužena výdrž na vypalovací teplotě na 15 min. Přehřev byl nastaven na teplotu 450 °C s výdrží 70 min a rychlost ohřevu indukci zvýšena na 25 °C/min. Průběhy teplot jsou znázorněny na obr. 22. Po ochlazení na 450 °C byl opět přehřev posunut na opravované místo viz obr. 20.



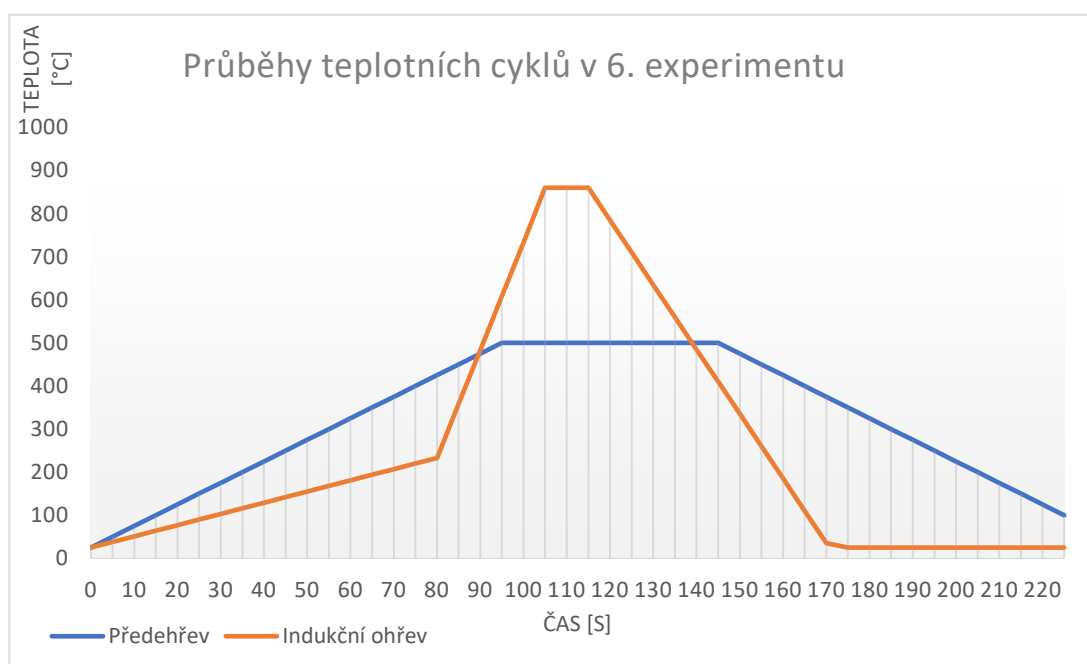
Obr. 22 Graf porovnávací průběhy teplot vypalování i přehřevu v závislosti na čase

Při kapilární zkoušce se ukázalo, že se tentokrát podařilo zamezit tvorbě prasklin v původním smaltu. Částečně popraskaná zůstala opravná vrstva smaltu, ale v daleko menší míře než v předchozím experimentu, viz obr. 23.



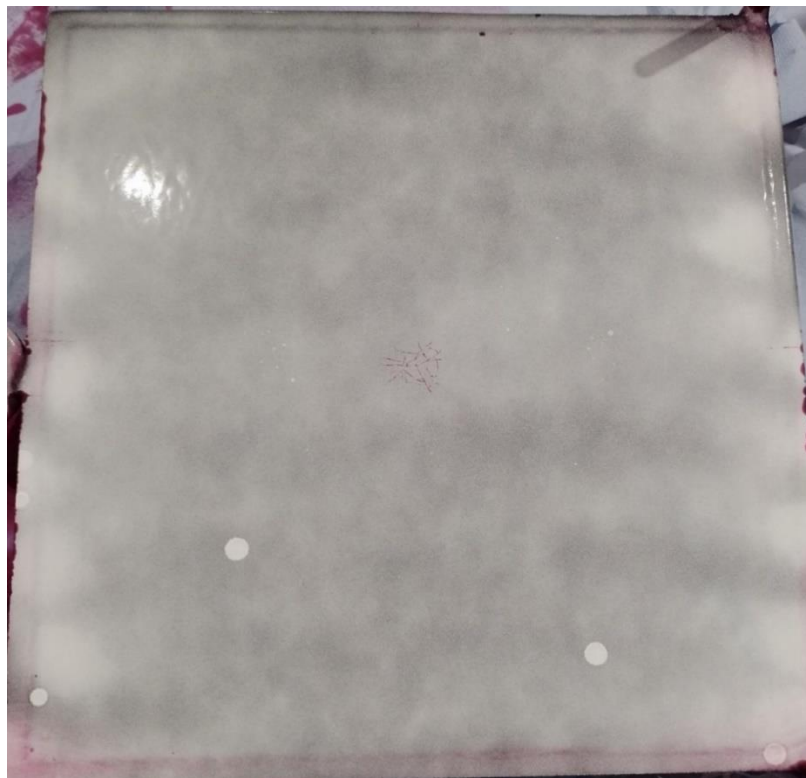
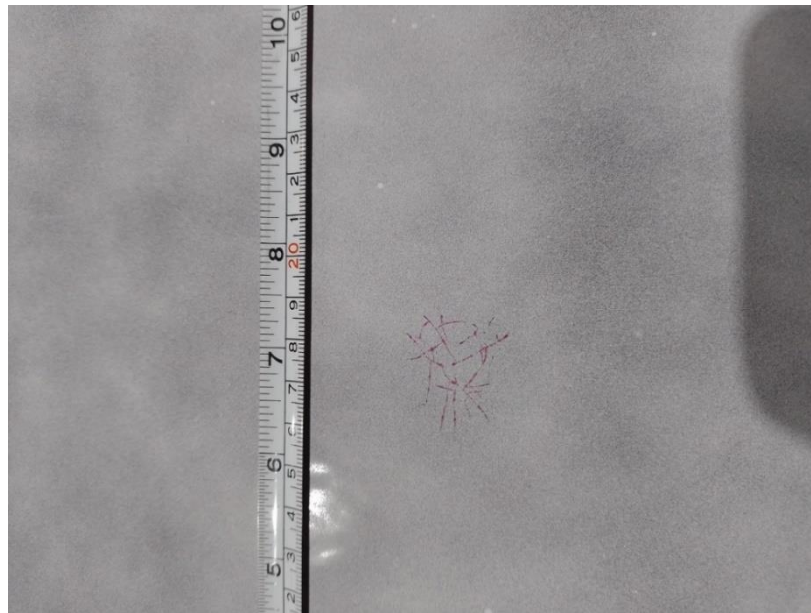
Obr. 23 Kapilární zkouška povrchu testované desky při pátém experimentu

V posledním experimentu byly nastaveny tyto technologické parametry induktoru: Výdrž na vypalovací teplotě 10 min, rychlost ohřevu 25 °C/min a rychlost ochlazování na 15 °C/min. Vypalovací teplota byla ponechána na 860 °C.



Obr. 24 Graf porovnávající průběhy teplot vypalování i předehřevu v závislosti na čase

Byla zvýšena maximální teplota odporového přehřevu na 500 °C a rychlosti jeho ohřevu a chlazení byly ponechány na 5 °C/min. Jako v předchozích dvou experimentech bylo při ochlazení na 500 °C posunuto odporové topné těleso na opravované místo, viz obr. 20. Kapilární zkouška testované desky je zobrazena na obr. 24. Podařil se snížit výskyt prasklin díky zvýšení teploty přehřevu, obdobně jako v předchozím experimentu.



Obr. 25 Kapilární zkouška povrchu testované desky při šestém experimentu

4. Diskuse výsledků

V průběhu experimentální části bakalářské práce bylo uskutečněno 6 jednotlivých experimentů. Během nich byly testovány ocelové desky se smaltovým povlakem na prototypovém zařízení, které je určeno k lokálním opravám smaltovaných povrchů ocelových nádrží. Smaltované ocelové desky simulují povrch těchto nádrží a díky svým menším rozměrům tak usnadňují manipulaci během experimentu.

V předešlém výzkumu daného projektu byly stanoveny technologické parametry, za kterých došlo k dokonalému spojení smaltu v místě lokální opravy a původního povlaku. Vlivem teplotních cyklů během opravy však docházelo ke vzniku zbytkových napětí v oblastech mimo opravu (vzdálenost od místa lokální opravy cca 20 mm), která vedla ke vzniku prasklin.

Vzhledem k tomu, že bylo nutné tvorbě prasklin předejít, byly v jednotlivých experimentech testovány různé technologické parametry, viz tab. 2.

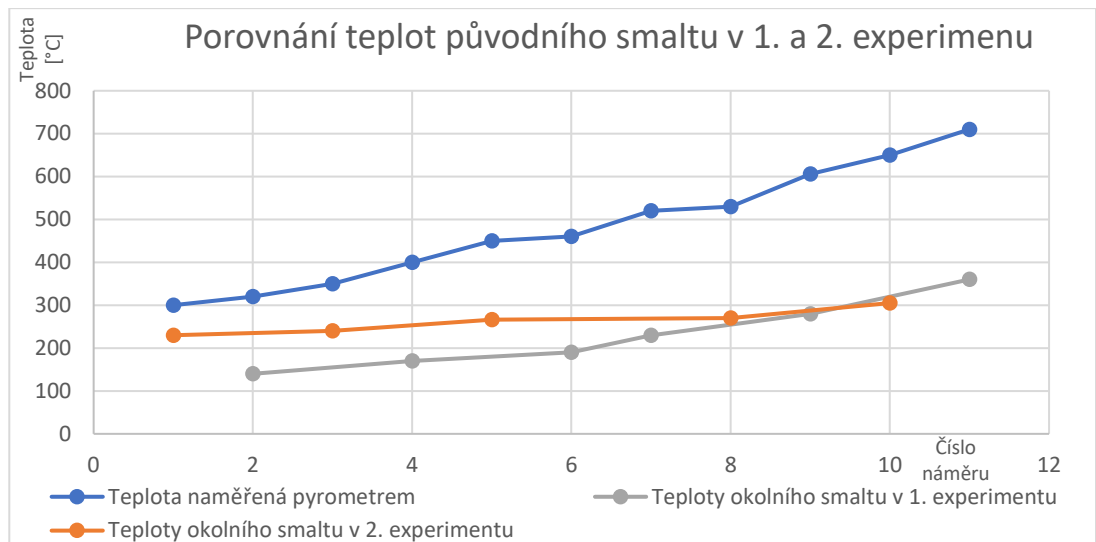
Tab. 2 Technologické parametry použité v jednotlivých experimentech

Číslo experimentu	Rychlost ohřevu [°C/min]	Rychlost ochlazování [°C/min]	Výdrž na vypalovací teplotě [min]	Vypalovací teplota [°C]	Nastavená teplota odporového předehřevu [°C]	Rychlost ohřevu a ochlazování [°C/min]
1.	10	10	10	860	-	5
2.	25	25	10	860	-	5
3.	15	15	10	860	300	5
4.	15	15	10	860	300	5
5.	25	25	15	860	450	5
6.	25	15	10	860	500	5

Předpokládanou příčinou vzniku prasklin byla nevhodná rychlost ochlazování a vyšší teplota ocelového podkladového materiálu než smaltového povlaku. Vyšší teplota oceli je způsobena indukčním ohřevem, který je schopný ohřívat elektricky vodivé materiály, tzn. pouze ocel. Smaltový povlak je ohříván šířením tepla z ocelového podkladu.

V prvním experimentu bylo za účelem vyrovnání teplot mezi smaltovým povlakem a ocelovým podkladem využito izolace povrchu sibralem, který zamezil odvodu tepla ze smaltu do okolí. K úbytku prasklin však nedošlo, a proto bylo rozhodnuto v dalších experimentech povrch aktivně přehřívát.

Ve druhém experimentu byla pro ohřev povrchu použita horkovzdušná pistole. Na obr. 26 je ukázáno porovnání teplot povrchu smaltu experimentů č. 1 a č. 2. Je patrné, že vlivem přehřívání došlo ke zvýšení teplot v okolí opravovaného místa.



Obr. 26 Porovnání naměřených hodnot v okolí induktoru (90 mm od kraje desky)

Proud horkého vzduchu, který však nebylo možno spolehlivě regulovat, nedokázal smaltový povlak ohřát natolik, aby se výrazně snížil výskyt prasklin, a tak byl ve třetím experimentu instalován odporový předeřev s keramickými elementy.

Tento předeřev dokáže rovnoměrně ohřát povrch okolí opravovaného místa na vyšší teploty než horkovzdušná pistole. Další výhodou předeřevu je možnost přesného nastavení teploty a rychlosti předeřevu a dohřevu.

Dále byla k vyhodnocování tvorby prasklin nově použita kapilární metoda. Ta odhalila skutečnost, že v oblasti pod předeřevem se nyní praskliny nevytvořily, zatím co oblast pod induktorem a mezera mezi těmito oblastmi popraskala. Pravděpodobným důvodem je opět vyšší teplota oceli kvůli úniku tepla ze smaltového povlaku při chladnutí, případně nevhodná rychlost ohřevu nebo ochlazování.

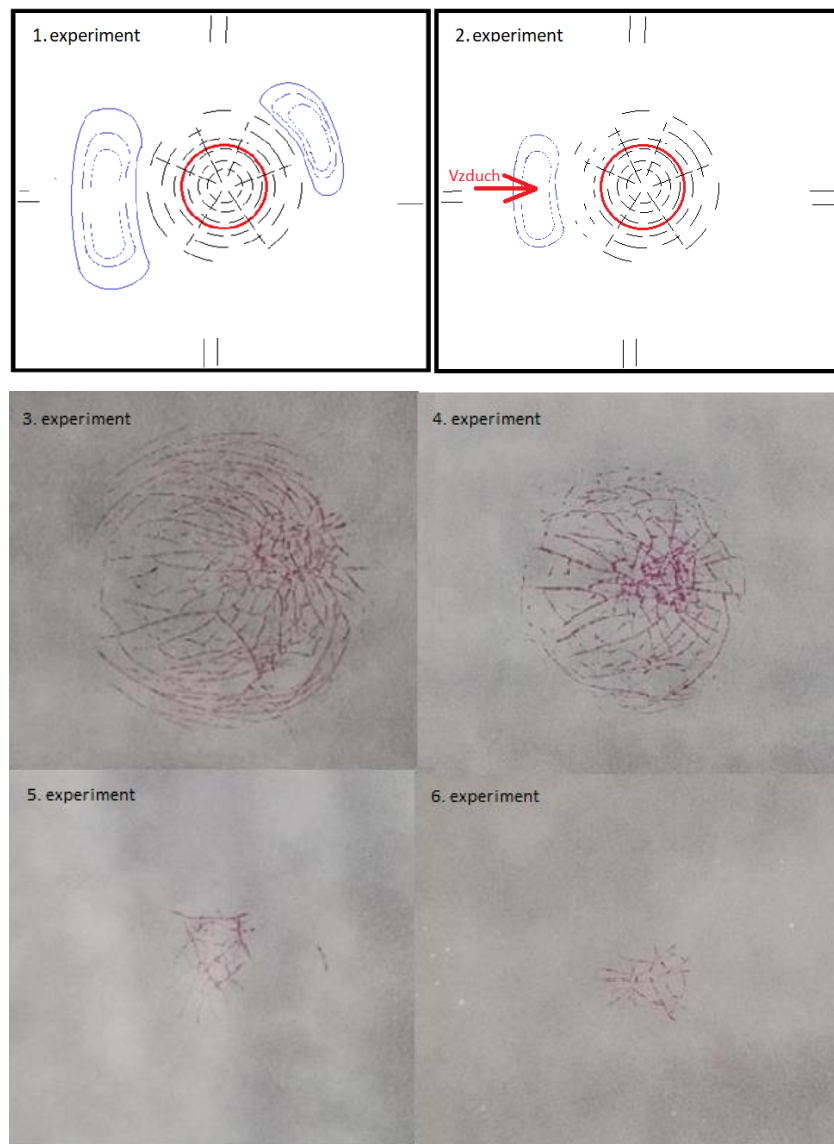
Při následujícím čtvrtém experimentu byla oblast pod induktorem a jeho okolí kontrolovaně dohřívána (ochlazována) odporovými keramickými tělesy. Toho bylo dosaženo posunutím předeřevu přes tuto oblast po odstranění induktoru při dosažení teploty 300 °C. Při kapilární zkoušce se ukázalo, že se touto metodou dosáhlo znatelného úbytku prasklin. K tvorbě prasklin už zřejmě došlo před dosažením teploty 300 °C, proto pro další experiment bylo rozhodnuto dodržet stejný postup a zvýšit teplotu, při které bude aplikován dohřev opravované oblasti keramickými odporovými tělesy.

V pátém experimentu byla zvýšena teplota odporového předeřevu na 450 °C, tím se podařilo dosáhnout daleko lepšího výsledku než v předešlých experimentech. Oproti předchozímu experimentu ubylo cca 80 % prasklin. Veškeré praskliny se vytvořily pouze v opravné vrstvě smaltu v oblasti pod induktorem, tzn., že smalt v mezeře mezi oblastmi

přehřevu a induktoru zůstal bez poškození. Tím byl potvrzen význam kontrolovaného dohřevu opravovaného místa.

V šestém experimentu byla snížena rychlost ochlazování induktorem o 10 °C/min a teplota přehřevu byla zvýšena na 500 °C. Opravované místo bylo dohříváno (ochlazováno) po dosažení teploty 500 °C. Výsledkem tohoto experimentu bylo zlepšení, ne však tak markantní jako v předchozím případě. Díky změnám těchto technologických parametrů ubylo cca 15 % prasklin ve srovnání s předchozím experimentem.

Na obr. 27 jsou pro srovnání znázorněny praskliny vzniklé u jednotlivých experimentů. U prvních dvou experimentů jsou praskliny znázorněny schematicky a u ostatních jsou zdokumentovány ve stejném měřítku pomocí kapilární zkoušky.



Obr. 27 Porovnání výsledků jednotlivých experimentů

5. Závěr

Cílem předložené bakalářské práce bylo optimalizovat technologické podmínky lokální opravy smaltovaných povrchů. Práce byla řešena v rámci projektu FV40144 – Návrh a výroba prototypu zařízení pro lokální opravy funkčnosti anorganických povrchů.

V teoretické části je popsán účel a vlastnosti smaltovaných povrchů. Dále je uveden proces výroby a typické vady smaltovaných povrchů. Samostatná kapitola je věnována problematice teplotní roztažnosti smaltů a ocelového podkladu a vzniku napětí v jednotlivých vrstvách.

Experimentální část byla zaměřena na stanovení technologických parametrů se zaměřením na zabránění vzniku prasklin ve smaltovaném povrchu.

V první fázi experimentů byla testována lokální oprava bez aktivního předehřevu okolí opravovaného místa. Výsledkem byly praskliny v povrchu opraveného místa i v jeho okolí.

V druhé fázi experimentů byl využit aktivní předehřev okolí opravovaného místa. Praskliny se vyskytly pouze v oblasti lokální opravy, kde nebyl aplikován aktivní předehřev (dohřev).

V poslední fázi experimentů byl využit aktivní předehřev okolí opravovaného místa a aktivní dohřev v místě opravy. Výsledkem bylo zamezení výskytu prasklin v okolí opravovaného místa a výrazné snížení prasklin v místě opravy. Vzniklé praskliny jsou pouze v oblasti, ve které dojde k přetavení smaltové vrstvy v průběhu aplikace dalších vrstev.

V další fázi výzkumu by bylo vhodné zaměřit se na odladění technologických parametrů při aplikaci dalších vrstev smaltu, především na dohřívání opravovaného místa.

Seznam použité literatury

- [1] LAIBLA, František et al. Příručka pro sklo, užitkovou keramiku a smalt. Praha: SNTL, 1963.
- [2] BOUŠE, Václav, KRAJINA Antonín a MORAVČÍK Alfons. Smalty a jejich použití v protikorozní ochraně. Praha: SNTL, 1986.
- [3] TROJÁNEK, František et al. Tepelné povrchové úpravy a smalty. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [4] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [5] FAUST, William D. a Ferro CORPORATION. Practical Considerations Regarding Stress and Strain in Enamel-Steel Composites [online]. Cleveland, Ohio USA [cit. 2022-04-22]. Dostupné z: <https://www.yumpu.com/en/document/read/28641379/practical-considerations-regarding-stress-and-strain-in-enamel>
- [6] SON, Young-Ki, Kyung-Hun LEE, Kyung-Soek YANG, Dae-Cheol KO a Byung-Min KIM. Prediction of residual stress and deformation of enameled steel. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing [online]. 2015, 16(7), 1647-1653 [cit. 2022-04-22]. ISSN 2234-7593. Dostupné z: [doi:10.1007/s12541-015-0216-9](https://doi.org/10.1007/s12541-015-0216-9)
- [7] KALČÍK, Josef a SÝKORA Karel. Technická termomechanika. Praha: Československá akademie věd, 1973.
- [8] LANGER, Emil, Teorie indukčního a dielektrického tepla, vyd. Academia, Nakladatelství Československé akademie věd, Praha 1979.
- [9] Indukční ohřev. In: Indukční ohřev – technologie [online]. Rajmont s.r.o. [cit.2020-04-20]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>
- [10] Indukční ohřev – technologie. RAJMONT s.r.o. [online]. [vid. 2021-02-24]. Dostupné z: <https://www.rajmont.cz/technologie-indukcni-ohrev/>

- [11] FV40144 - Návrh a výroba prototypu zařízení pro lokální opravy funkčnosti anorganických povrchů (2019-2022, MPO/FV). Informační systém výzkumu, vývoje a inovací [online]. [vid. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.isvavai.cz/cep?s=jednoduchevyhledavani&ss=detail&n=0&h=FV40144>