

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta strojní



DIPLOMOVÁ PRÁCE
Měření teplot na slévárně přesného lítí

Adam Průcha
Praha
2016

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D., za podporu, příkladné vedení a pomoc při vypracování této diplomové práce. Dále mé poděkování patří zaměstnancům firmy Prague Casting Services a.s. za pomoc a konzultace při provádění experimentů. V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a blízkým za podporu při studii na ČVUT v Praze.

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá měřením teplot ve slévárně přesného lití. Praktická část diplomové práce je rozdělena na tři části. První část se zabývá možností zavedení nových ochranných trubic termočlánků pro měření teplot taveniny na vakuové peci. Druhá část obsahuje experiment zavedení bezkontaktního způsobu zjišťování teplot na vakuové peci. Třetí část se zabývá měřením teplot vybraných skořepin vyjmutých z předehřívací pece za použití termokamery.

Klíčová slova:

Ochranné trubice termočlánků, pyrometr, termokamera, měření teplot, vakuová pec

Anotation:

This diploma thesis deals with the measurement of temperature in the investment casting foundry. The practical part of thesis is divided into three parts. The first part deals with the possibility of using new protective tubes of thermocouples for measuring the temperature of the melt in a vacuum furnace. The second part contains the experiment of the non-contact method applied for measuring temperature in a vacuum furnace. The third part deals with measuring temperature of selected shells removed from the preheating furnace using a thermovision.

Key words:

Thermocouple protecting tubes, pyrometer, thermovision, measuring of temperature, vacuum furnace

Tímto prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Aleše Hermana, Ph.D. a uvedl v seznamu literatury veškerou použitou literaturu a další zdroje.

V Praze dne:

Podpis:

.....

.....

Obsah

ÚVOD	6
1. MOŽNOST MĚŘENÍ TEPLŮ NA SLÉVÁRNĚ PŘESNÉHO LITÍ	7
1.1 UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY DOTYKOVÝM MĚŘENÍM TEPLŮ	7
1.2 UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TEPLŮ	11
1.2.1 Teoretický základ bezdotykového měření	11
1.2.2 Rozdělení bezdotykových snímačů teploty	16
1.2.3 Pyrometry	17
1.2.4 Zobrazovací metody	20
2. TPV V OBLASTI TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL	22
2.1 ÚVOD	22
2.2 PODSTATA TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL	22
2.3 PROCES TECHNOLOGIE VÝROBY	23
2.3.1 Výroba voskového modelu	24
2.3.2 Výroba skořepinových forem	25
2.3.3 Tavení a odlévání	28
2.3.4 Dokončovací operace	28
3. ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO PROCESU MĚŘENÍ TEPLŮ V PCS A.S.	31
3.1 OTEVŘENÉ LITÍ	31
3.2 VAKUOVÉ LITÍ	33
4. NÁVRHY NA MĚŘENÍ TEPLŮ SKOŘEPIN A TAVENINY	35
4.1 TESTOVÁNÍ BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TAVENINY NA VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECI KOPP VSP – 5	35
4.2 TESTOVÁNÍ OCHRANNÝCH TRUBIC TERMOČLÁNKŮ NA VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECI KOPP VSP – 5	37
4.2.1 Výběr ochranných trubic k testování	38
4.3 MĚŘENÍ VYBRANÝCH VZORKŮ SKOŘEPIN	41
5. OVĚŘENÍ POPSANÝCH METOD MĚŘENÍ TEPLŮ	43
5.1 TESTOVÁNÍ BEZDOTYKOVÉHO MĚŘENÍ TAVENINY NA VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECI KOPP VSP – 5	43
5.1.1 Návrh řešení	48
5.2 TESTOVÁNÍ OCHRANNÝCH TRUBIC TERMOČLÁNKŮ NA VAKUOVÉ INDUKČNÍ PECI KOPP VSP – 5	49
5.2.1 Testování Metamic 829 (S363F)	49
5.2.2 Testování trubic Lunit 73 (C610) a Luxal 203 (C609)	50

5.2.3	<i>Výsledky měření</i>	51
5.3	MĚŘENÍ VYBRANÝCH VZORKŮ SKOŘEPIN	52
5.3.1	<i>Chladnutí skořepiny X bez zábalu – 8 obalů</i>	53
5.3.2	<i>Chladnutí skořepiny X - zábal 13 mm Sibal</i>	56
5.3.3	<i>Chladnutí skořepiny X - zábal 25 mm Sibal</i>	57
5.3.4	<i>Chladnutí skořepiny X– zábal 38 mm Sibal</i>	58
5.3.5	<i>Porovnání chladnutí skořepin X v závislosti na tloušťce zábalu</i>	59
5.3.6	<i>Chladnutí skořepiny C</i>	60
5.3.7	<i>Chladnutí skořepiny B</i>	63
5.3.8	<i>Chladnutí skořepiny A</i>	64
5.3.9	<i>Porovnání skořepin s různým počtem obalů</i>	66
5.3.10	<i>Ohřev skořepiny B</i>	67
	ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	72

ÚVOD

Vzhledem k neustále se zvyšujícím nárokům na kvalitu odlitků je kladen důraz na přesné dodržování technologických procesů při jejich výrobě. Na kvalitu odlitků má nezanedbatelný vliv i přesná znalost teploty taveniny v průběhu technologického procesu výroby. Teplota je jednou z nejvíce měřených fyzikálních veličin hned po čase a přesné monitorování této veličiny zajišťuje potřebnou kvalitu výrobku a zlepšování produktivity. [1]

Tato diplomová práce je vytvořena ve spolupráci se společností Prague Casting Services a.s., která se zabývá výrobou přesných odlitků metodou na vytavitelný model. Slévárna podnikající pod značkou PRAGUECAST odlévá široké spektrum materiálů, jako jsou uhlíkové, nerezové a žáruvzdorné oceli nebo niklové a kobaltové superslitiny. Klíčová odvětví, pro které PRAGUECAST dodává odlitky, jsou průmyslové plynové turbíny (lopatky, statorové segmenty, tepelné štíty a jiné konstrukční části), letecké motory (lopatky, rozvaděče a jiné díly), jaderná energetika (části palivových článků), zdravotnická (kloubní náhrady), chemický průmysl (různé díly). [2]

V úvodní teoretické části bude popsána teorie související s problematikou měření teplot. Popsána bude problematika dotykového a bezdotykového měření teplot, základní principy, rozdělení jednotlivých způsobů měření a výhody a nevýhody způsobů měření. Dále je v teoretické části popsána technologie výroby přesných odlitků metodou na vytavitelný model.

Cíle práce:

- zavedení měření bezkontaktním způsobem v rámci modernizace zařízení vakuové pece KOPP VSP – 5,
- zavedení nové ochrany termočlánku pro měření taveniny ve vakuové peci KOPP VSP – 5,
- zkoumání průběhu chladnutí a opětovného ohřevu skořepin při různých podmínkách.

1. MOŽNOST MĚŘENÍ TEPLOT NA SLÉVÁRNĚ PŘESNÉHO LITÍ

Měření teploty lze rozlišovat podle různých hledisek, k nimž patří např.:

- Způsob použití teploměru
 - dotykové
 - bezdotykové
- Druh měřeného prostředí
 - v klidných a proudících kapalinách, párách a plynech
 - uvnitř a na povrchu těles, která jsou v klidu, nebo se pohybují
 - ve speciálních podmínkách - měření teploty tavenin, těles v peci a plamenů
- Účel měření

Volba vhodného způsobu měření teploty, vhodného snímače teploty nebo teploměru závisí nejen na měřeném prostředí, ale také na účelu měření. Účel měření a zejména požadovaná výsledná přesnost měření má podstatný vliv na volbu měřicí metody a snímačů teploty nebo teploměrů. [3]

1.1 Uvedení do problematiky dotykovým měřením teplot

V technické praxi je tento způsob měření teplot stále nejběžnější. Jak již název napovídá, při dotykovém měření teploty je měřicí část teploměru (snímače teploty) v přímém styku s měřenou látkou. Proto se používá všude tam, kde může být měřicí část snímače teploty v přímém styku s měřeným prostředím. Zavedením snímače teploty do měřeného prostředí se sice místně naruší teplotní pole, ale existuje řada způsobů, jak tyto nežádoucí vlivy omezit nebo dokonce zcela eliminovat. Dotykové měření teploty je obvykle přesnější a z hlediska finančního méně nákladné oproti měření bezdotykovému. Dotykové teploměry a snímače teploty jsou svým provedením a zabudováním uzpůsobeny tak, aby vyhovovaly okamžitým požadavkům měřeného prostředí. Dotykem se měří teploty tekutin ve stavu proudícím i klidném, vnitřní i povrchové teploty stacionárních i pohybujících se těles. Místní porušení teplotního pole (tepelné ztráty vedením a zářením) jsou obvykle eliminovány konstrukčními úpravami snímače teploty. [3]

Výhody:

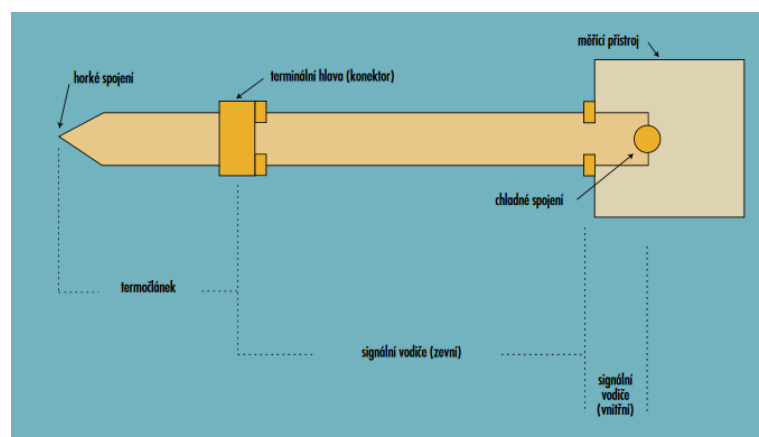
- malý vliv okolního rušení a vlivů na samotné měření (možnost velmi přesného měření)
- snadná výroba a použití senzoru
- možnost měřit teplotu i uvnitř tělesa

Nevýhody:

- často jen poměrně malý rozsah měřené teploty (jen několik stovek °C)
- rychlost měření závislá na tepelné vodivosti pouzdra senzoru i povrchu měřeného objektu (médiu)
- možné ovlivňování měřeného předmětu samotným senzorem (odvod tepla do senzoru, kontaminace látky či objektu látkami na povrchu senzoru / sondy)
- pouzdro senzoru je nutné volit podle vlastností měřeného materiálu, s nímž přichází do styku [4]

Pod pojmem dotykové měření teplot v souvislosti s měřením ve slévárenství mluvíme o bodovém měření průmyslovými termočlánci. Termočlánci jsou jednoduché a široce používané komponenty právě pro měření teploty. Využívají termoelektrický jev, který byl objeven roku 1821 německým fyzikem Seebeckem, podle něhož se také nazývá Seebeckův jev.

Termočlánek se skládá ze dvou rozdílných kovových vodičů spojených na jednom konci. Tento konec se nazývá měřicí neboli tzv. „teplý“ spoj. Druhý konec, kde vodiče nejsou spojeny, je napojený na obvody převodníku signálu tvořených převážně z mědi. Toto spojení mezi materiálem termočlánci a měděným vedením se nazývá referenční nebo tzv. „studený“ spoj. Měřicí spoj bývá tvořen mechanickým spojením, pájením nebo svařením drátů stejného průměru. Na *obrázku 1* jsou vyobrazeny příklady řešení termočlánců. [5] [6]



Obrázek 1: schéma termočlánci [8]

Pro výběr termočlánku se používají následující kritéria [6] :

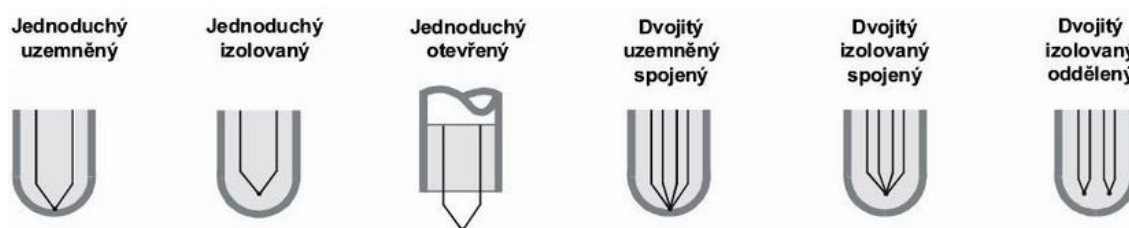
- Teplotní rozsah
- Chemická odolnost termočlánku nebo materiálu pláště
- Odolnost proti abrazi a vibracím
- Požadavky instalace (potřeba kompatibility s existujícím přístrojem)

Termočlánků je několik typů a liší se podle druhu použitého materiálu. Jednotlivé kombinace materiálů, které tvoří termočlánek, jsou normalizované. Podle materiálu můžeme dělit termoelektrické články z drahých kovů a z obecných kovů, popřípadě ještě ze zvláštních materiálů. Do skupiny drahých kovů počítáme platinu, rhodium, zlato, stříbro, iridium, rhenium a palladium. Ve skupině obecných kovů jsou nejpoužívanější materiály měď, nikl, železo, chrom, wolfram a jejich slitiny. Výjimečně používané materiály jako je uhlík a karbid křemíku zařazujeme do skupiny zvláštních materiálů. [3]

Pro měření teploty taveniny ve slévárnách a ocelárnách jsou nejčastěji používané následující typy termočlánků:

Positive leg	Negative leg	ANSI-type	Temp. range
PtRh10%	Pt	S	- 50 to 1767 °C
PtRh13%	Pt	R	- 50 to 1767 °C
PtRh30%	PtRh6%	B	0 to 1820 °C

Obrázek 2: typy termočlánků [20]



Obrázek 3: typy provedení termočlánků [21]

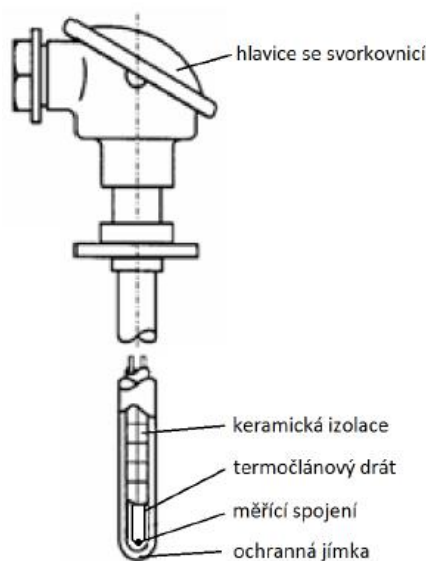
Vzhledem k tomu, že v mnoha případech je potřeba ochránit termočlánek před měřeným prostředím, používají se plášťované termočlánky. Plášťované termočlánky jsou rozděleny do třech provedení: uzemněný, neuzemněný nebo nechráněný. U uzemněného měřícího konce sondy jsou termočlánekové dráty fyzicky spojeny s vnitřní stěnou pláště termočlánku. To má za následek dobrý přenos tepla z vnějšku přes stěnu pláště sondy k termočlánekovému spoji. V neuzemněné (izolované) sondě je termočlánekový spoj oddělen od stěny pláště sondy. Časová odezva u tohoto

termočlánek je pomalejší než u typu uzemněného. Termočlánek s nechráněným spojem má spoj vystrčený vně z konce pláště a je tak vystaven okolní atmosféře. Tento typ nabízí nejlepší odezvu, avšak použití je omezeno na suché nekorozivní a beztlakové aplikace. [6]

Důležitou součástí termoelektrických snímačů teploty je izolační a ochranná keramika. Z keramiky jsou zhotoveny izolační kapiláry a u snímačů určených pro vysoké teploty i ochranné trubice. Na kvalitě keramiky závisí stabilita termoelektrických článků a tím i správnost měřených hodnot. I když izolace termoelektrických článků může být z různých materiálů, např. z křemenného skla, azbestu, či plastů, nejvhodnějším materiálem je vysoce čistý oxid hlinitý (99,5% Al_2O_3).

Izolační keramiku dělíme na kapiláry a ochranné trubice. Kapiláry jsou jednotvorové nebo víceotvorové. Délka kapiláry má být taková, aby celá délka termoelektrického článku, která je zahřívána na vyšší teplotu, byla v jednom kuse kapiláry. Používání korálků nebo krátkých keramických trubiček není vhodné. [3]

Na následujícím *obrázku 4* je znázorněno schéma tyčového termoelektrického snímače:



Obrázek 4: schéma tyčového termoelektrického snímače [22]

1.2 Uvedení do problematiky bezdotykového měření teplot

Bezdotykové měření teplot se především používá tam, kde nelze do měřeného prostředí zabudovat dotykový snímač teploty. Důvodů může být hned několik a to například rozsah teploty, technické omezení použití dotykového teploměru nebo snímače teploty, podmínky měření a další. Bezdotykové snímače teploty obvykle odvozují teplotu z tepelného vyzařování měřeného objektu. Podle způsobu zpracování dopadajícího záření se bezdotykové měření dá rozdělit na pyrometry a zobrazovací systémy. [3]

Výhody bezkontaktního měření teplot:

- měření pohyblivých, přehřátých objektů a objektů vyskytujících se v nebezpečném prostředí
- velmi rychlá odezva a čas expozice
- měření bez interakce, nedochází k ovlivnění měřeného předmětu
- jedná se o nedestruktivní měření
- možnost dlouhodobého měření, bez mechanického opotřebení

Nevýhody bezkontaktního měření teplot:

- měřený objekt musí být opticky viditelný
- pevné překážky dovolují pouze povrchové měření
- nutnost ochrany čidla před prachem a kondenzujícími kapalinami
- měří se pouze povrchová teplota materiálů a je nutné brát v úvahu jejich emisivitu [7] [9]

1.2.1 Teoretický základ bezdotykového měření

Pro pochopení funkce a pro správné používání měřicí techniky při bezdotykovém měření teploty je důležitá znalost teoretických základů používaných měřících metod. Mezi základní zákony potřebné pro pochopení termovizních měření patří Planckův vyzařovací zákon, Wienův zákon, Stefanův - Boltzmannův zákon a také 1. a 2. Kirchhoffův zákon. [10]

Planckův vyzařovací zákon [3], [10]

Říká, jaké množství energie vyzáří do poloprostoru za jednotku času v nekonečně úzkém intervalu vlnových délek černý zářič s teplotou T . Lze jej vyjádřit graficky (viz obrázek 5) nebo pomocí rovnice:

$$E_{\lambda 0} = \frac{c_1 \cdot \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1)$$

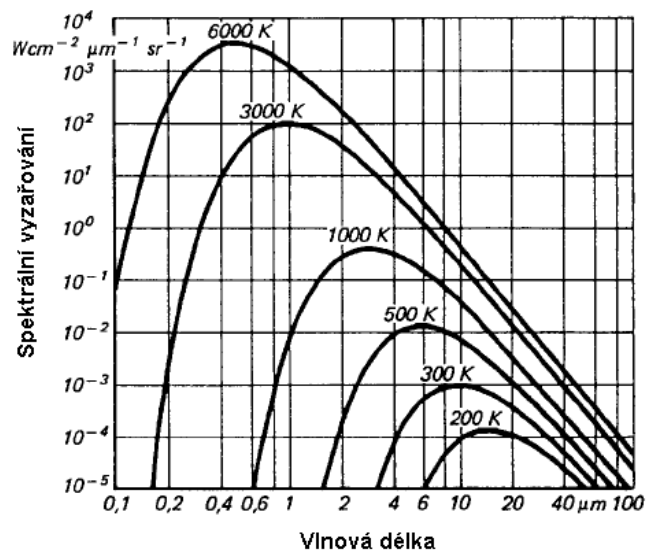
$E_{\lambda 0} [W \cdot m^{-3}]$... spektrální hustota zářivého toku černých objektů do poloprostoru

$T [K]$... teplota objektu

$\lambda [m]$... vlnová délka záření

$c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16} [W \cdot m^{-2}]$... první Planckova vyzařovací konstanta

$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2} [K \cdot m]$... druhá Planckova vyzařovací konstanta



Obrázek 5: Planckův zákon [23]

Wienův zákon [3], [10]

Říká, že s rostoucí teplotou zářiče se posouvá maximální hodnota spektrální hustoty zářivého toku $E_{\lambda 0}$ ke kratším vlnovým délkám. Matematicky to lze popsat rovnicí:

$$\lambda_{max} \cdot T = 2,8978 \cdot 10^{-3} [m \cdot K] \quad (2)$$

Stefan – Boltzmannův zákon [3], [10]

Říká, že hustota zářivého toku každého tělesa, které má nenulovou absolutní teplotu záření, je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty.

$$\text{Vztah pro dokonale černé těleso: } E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \text{ [} W \cdot m^{-2} \text{]} \quad (3)$$

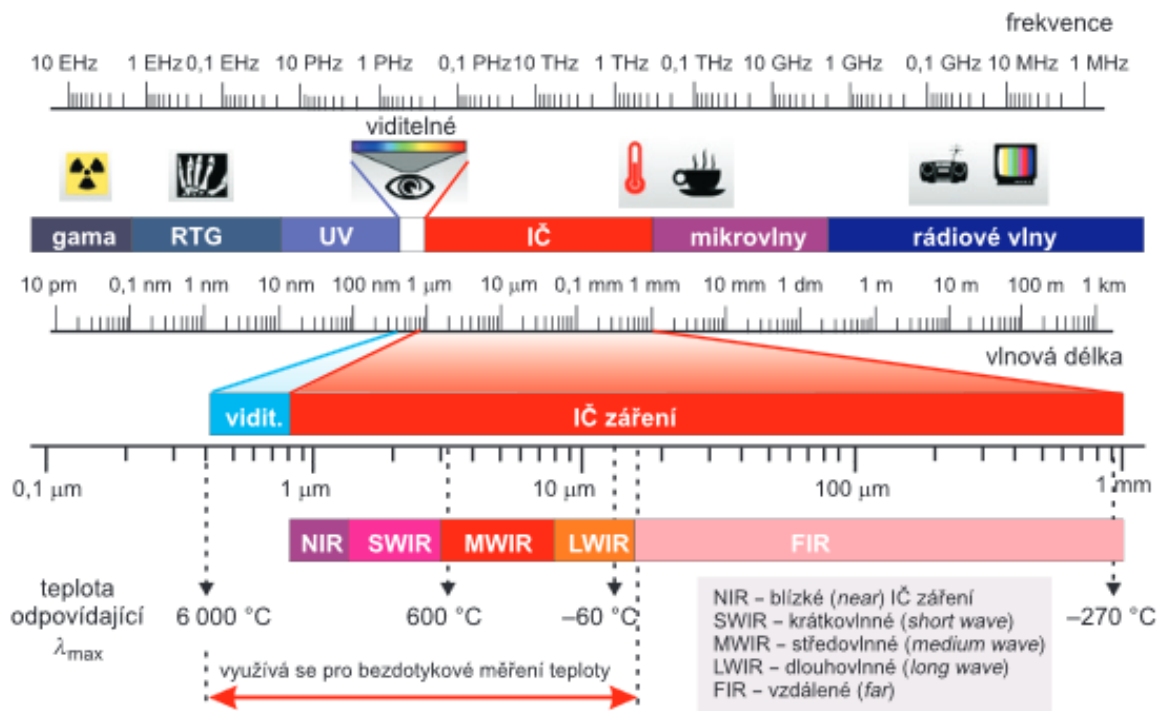
$$\text{Vztah pro šedé těleso: } E = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4 \text{ [} W \cdot m^{-2} \text{]} \quad (4)$$

$E_0 [W \cdot m^{-2}]$... hustota zářivého toku

ε ... emisivita povrchu tělesa

$\sigma_0 = 5,6697 \cdot 10^{-8} [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}]$... Stefan – Boltzmannova konstanta

Všechna tělesa, jejichž teplota je vyšší, než absolutní nula, vyzařují (emitují) elektromagnetické záření. Záření je emitováno v důsledku tepelného pohybu částic hmoty a označuje se jako tepelné záření. Při bezdotykovém měření teploty se využívá elektromagnetické záření o vlnových délkách 0,4 až 15 μm . Toto záření spadá částečně do viditelné oblasti, z větší části do infračervené oblasti spektra. [3]



Obrázek 6: vlnové délky [11]

Tělesa podle způsobu pohlcování tepelného záření dělíme na opticky tenká a tlustá. Opticky tlustá tělesa část dopadajícího záření odrazí a zbytek pohltí. Opticky tenká tělesa část dopadajícího záření odrazí, část pohltí a zbylé záření propustí. Záření propuštěné tělesem prochází beze změny a na druhé straně vystupuje do prostředí. Optické vlastnosti těles závisí na vlnové délce dopadajícího záření. U opticky tenkých těles závisí množství pohlceného záření na materiálu a jeho tloušťce. [3]

Dopadá-li na povrch tělesa záření s intenzitou E , část záření se od povrchu odrazí (E_r), část záření je absorbována (E_a) a část je propuštěna (E_p). Potom můžeme psát rovnici zachování energie:

$$E = E_r + E_a + E_p \quad [W \cdot m^{-2}] \quad (5)$$

Vydělíme-li tuto rovnici intenzitou dopadajícího záření E , dostaneme tři poměry intenzit záření, které se nazývají:

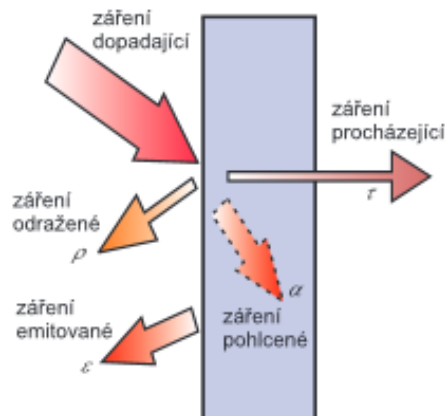
Reflektance	$r = \frac{E_r}{E}$
Absorbance	$a = \frac{E_a}{E}$
Transmitance	$p = \frac{E_p}{E}$

Rovnici (5) lze přepsat do tvaru, který představuje **první Kirchhoffův zákon**:

$$r + a + p = 1$$

Druhý Kirchhoffův zákon konstatuje, že objekt je tak dokonalým zářičem, jak dovede záření pohlcovat, a proto platí: $\varepsilon = a$

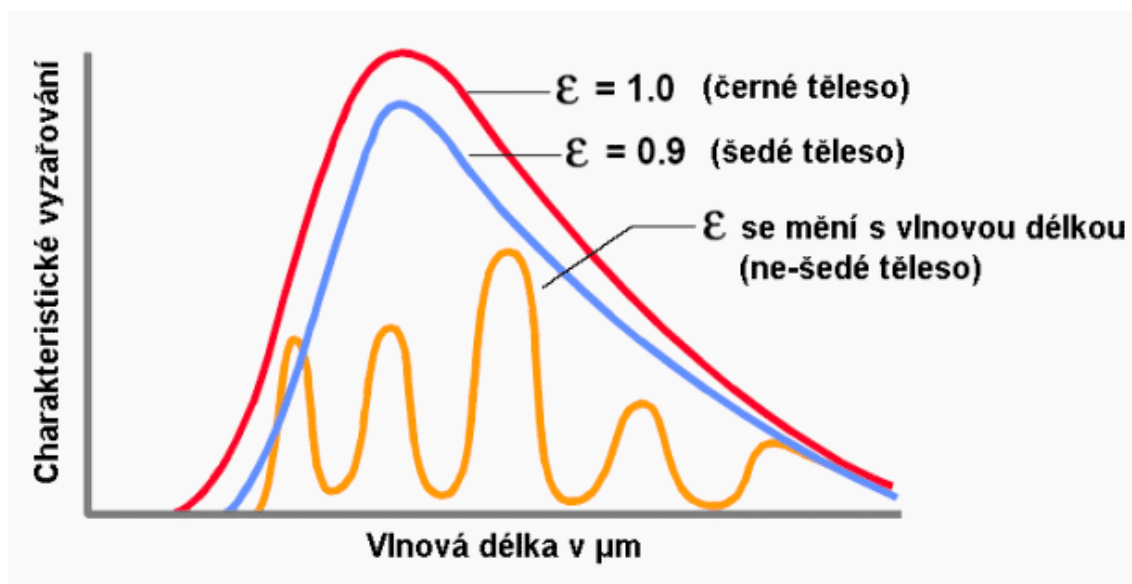
U reálných materiálů je absorbance (pohltivost), transmitance (propustnost) a reflektance (odrazivost) závislá na materiálu a jeho povrchu, teplotě tělesa, vlnové délce a úhlu dopadu záření na povrch tělesa. [3]



Obrázek 7: opticky tenké těleso [11]

Těleso, které veškeré záření pohlcuje, tedy absorpance je rovna jedné, nazýváme černým tělesem.

Černé těleso je idealizovaný povrch, kterým se skutečná tělesa více nebo méně přibližují. Intenzitu vyzařování reálného není jednoduché exaktně určit, proto se reálná tělesa nahrazují šedými tělesy o stejné teplotě povrchu. Dokonalým černým tělesem je pouze vnitřní povrch uzavřené dutiny, kde záření emitované povrchem po mnohonásobném odrazu dopadá zpět na uvažovanou část povrchu dutiny. Model černého tělesa je většinou dutina s dostatečně malým zaměřovacím otvorem proti vnitřnímu povrchu dutiny. Dutiny modelů černých těles mají nejčastěji tvar koule, válce, kužele nebo jejich kombinace. [3]



Obrázek 8: černé těleso [24]

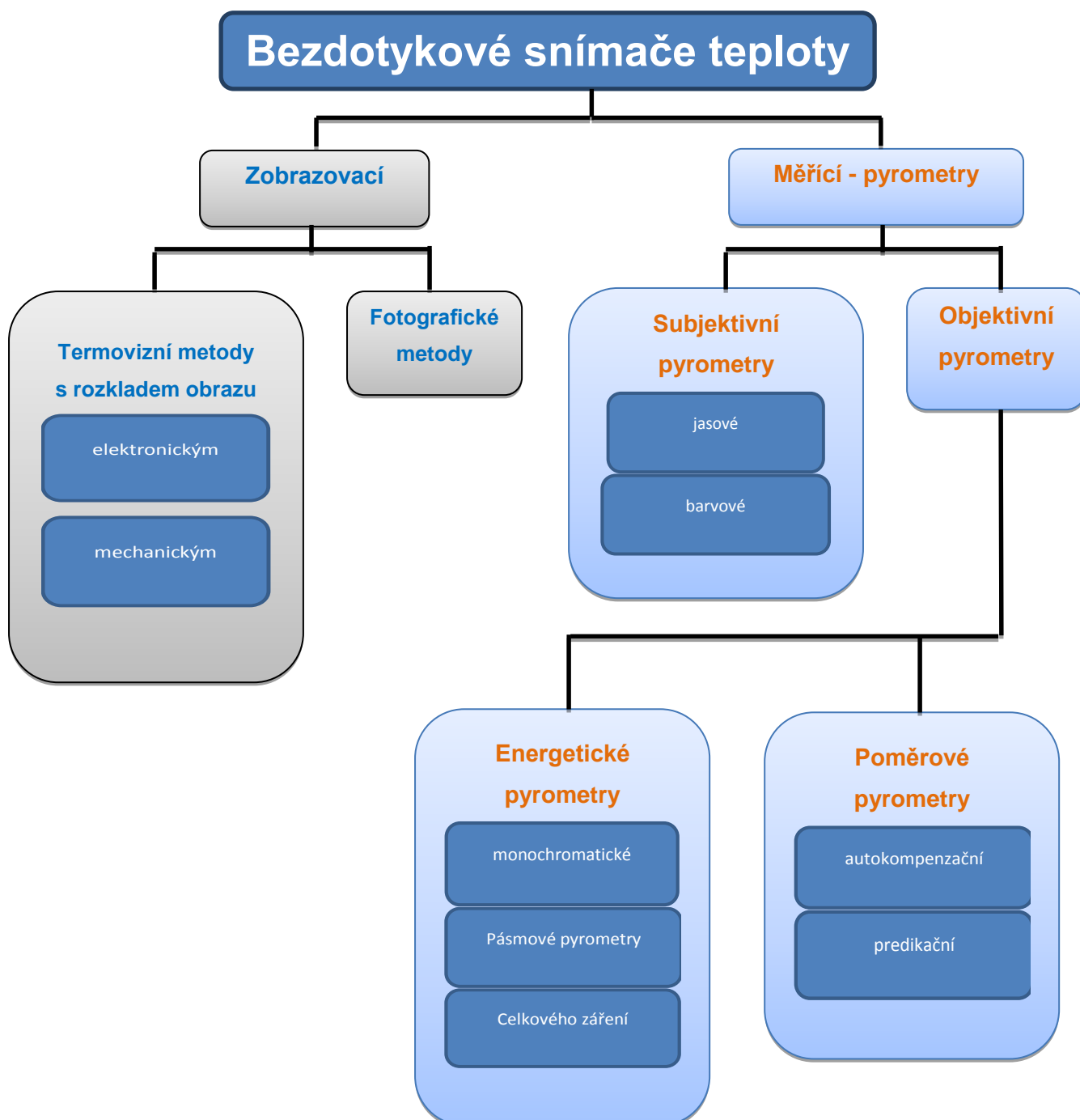
Šedé těleso má menší intenzitu vyzařování než černé těleso při stejné teplotě povrchu, přičemž poměr intenzity vyzařování šedého tělesa k intenzitě vyzařování černého tělesa se nazývá poměrná zářivos nebo také emisivita. [11]

Emisivita je definovaná jako poměr energie vyzařované objektem při dané teplotě k energii vyzařované černým tělesem při stejné teplotě. Emisivita může nabývat hodnot 0 až 1; emisivita černého tělesa je rovna 1. Pro reálná tělesa je emisivita vždy menší než 1. Emisivita závisí obecně na vlnové délce a na teplotě, dále pak na materiálu, kvalitě povrchu a úhlu pozorování. Existují však tělesa, jejichž emisivitu můžeme považovat za konstantní v širokém rozsahu vlnových délek. Takové zářiče označujeme jako šedá tělesa s emisivitou menší než 1 a tato tělesa jsou pro bezdotykové měření nejvhodnější. [11]

Pro stanovení emisivity měřeného objektu jsou různé metody. Emisivitu různých materiálů můžeme vyhledat v příslušných tabulkách. Tabulky emisivity také pomáhají nalézt správné pásmo vlnových délek pro daný materiál a tím zvolit správný měřicí přístroj. V případě měření kovů by se hodnoty v těchto tabulkách měly používat pouze orientačně, protože povrchové podmínky (např. povrchy leštěné, zoxidované nebo zvrásněné) mohou ovlivnit emisivitu více než materiály samy o sobě. [12]

1.2.2 Rozdělení bezdotykových snímačů teploty

V následujícím schématu je uvedeno rozdělení bezdotykových snímačů teploty. Na následujících stranách budou vybrané druhy blíže popsány.



Základní rozdělení snímačů pro bezdotykové měření teplot je provedeno podle způsobu vyhodnocení informace o teplotě zaměřované plochy. Zobrazovací bezdotykové snímače teploty vyhodnocují jednotlivé body zaměřovacího pole zviditelněním tepelného záření předmětů umístěných v jejich zaměřovacím poli. Měřicí bezdotykové snímače teploty indikují teplotu na základě záření celé zaměřované plochy. U nás jsou všeobecně nazývány pyrometry někdy také infračervené teploměry.

Zobrazovací bezdotykové snímače teploty se dále dělí na fotografické a termovizní. Fotografické metody zviditelňují infračervené záření předmětů v zaměřovacím poli zčernáním černobílého fotografického materiálu nebo barevným odstínem barevného fotomateriálu. Termografické snímače, které jsou také nazývány termovize, přivádějí infračervené záření jednotlivých bodů na elektrický signál. Ten je dále zpracováván metodou obdobnou zpracování televizního signálu. [3]

1.2.3 Pyrometry

Subjektivní pyrometry

Mezi subjektivní pyrometry zahrnujeme jasové a barvové. Vyznačují se z hlediska konstrukce tím, že ke zjištění teploty se používá lidské oko, které srovnává dopadající záření se zářením pomocného zářiče.

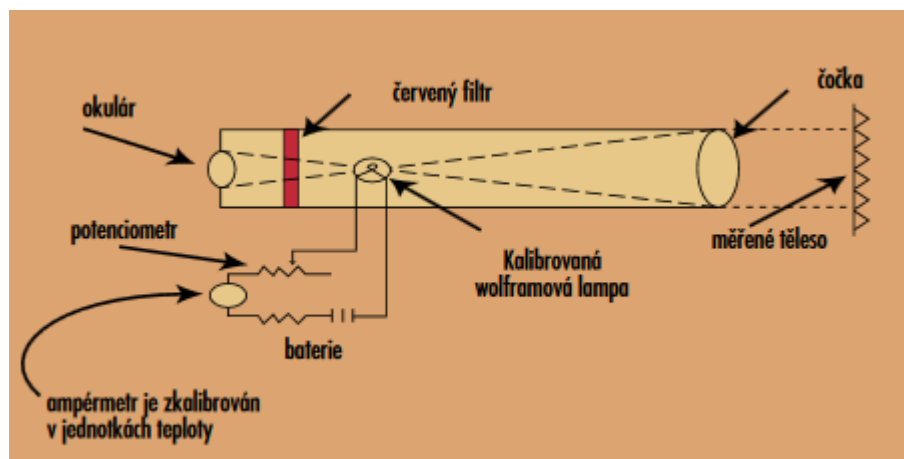
Jasové pyrometry

Principem funkce jasového pyrometru je srovnávání jasu měřeného předmětu s jasnem srovnávacího zářiče, které subjektivně provádí pozorovatel. Tyto pyrometry, jinak také nazývané pyrometry s mizejícím vláknem, využívají k měření teploty většinou úzký spektrální obor záření o vlnové délce $0,65 \mu\text{m}$. V praxi se používají dva způsoby srovnávání jasu srovnávacího zářiče, kterým je vlákno speciální žárovky. Prvním způsobem je změna jasu srovnávacího zářiče pomocí proměnného žhavicího proudu. Druhým způsobem je změna zdánlivého jasu měřeného předmětu pohybem šedého klínového filtru. Průhled hledáčkem jasového pyrometru v různých fázích měření je na obrázku 9.



Obrázek 9: vlákno jasového pyrometru [25]

Při vypnutém napájecím proudu je vlákno pyrometrické žárovky temné. Toto je pro pozorovatele důležité, aby si upřesnil u daného pyrometru tvar i přesnou polohu vlákna žárovky v hledáčku. Okulárem se zaostřuje vlákno žárovky a objektivem se zaostří měřený předmět. Pokud je teplota indikovaná pyrometrem nižší než teplota měřeného povrchu, je vlákno temnější na jasnějším pozadí měřeného předmětu. Pokud je indikovaná teplota vyšší než teplota měřeného povrchu, vlákno je jasnější na temnějším pozadí měřeného povrchu. V okamžiku, kdy jas vlákna pyrometrické žárovky splyne s pozadím měřeného povrchu, je indikovaná teplota rovna zdánlivé teplotě měřeného povrchu. Nevýhodou těchto pyrometrů je možné ovlivnění výsledku měření daný zkušeností měřiče, dále pak jeho fyzickým a psychickým stavem. Vzhledem k tomu, že údaj tohoto typu pyrometru závisí na pozorovateli, je tento typ pyrometru určen spíše pro informativní měření. V případech, kdy je potřeba znát přesný nebo reprodukovatelný údaj teploty, jsou jasové pyrometry nahrazovány objektivními pyrometry, zejména přenosnými pásmovými pyrometry. [3]



Obrázek 10: schéma jasového pyrometru [8]

Barvé pyrometry

Barvé pyrometry využívají pro měření teplot záření dvou vlnových délek ve viditelné oblasti. Teplota se určuje pomocí barevného vjemu, vyvolaného smíšením dvou monochromatických záření nebo pomocí poměrů jasů ve dvou spektrálních oborech. Práce s barvovými pyrometry je značně náročná. Přesnost měření velice závisí na osobě pozorovatele, podstatně více než u jasového pyrometru. To se projevilo i v tom, že pyrometry založené na tomto principu se v průmyslu nerozšířily. [3]

Objektivní pyrometry

U objektivních pyrometrů převádí detektor dopadající záření na elektrický signál, který je dále zpracováván na teplotní údaj.

Monochromatické pyrometry

Monochromatické pyrometry měří teplotu na základě energie dopadajícího záření ve velice úzké oblasti kolem určité vlnové délky. Proto se také někdy nazývají úzkopásmové. Spektrální pásmo těchto pyrometrů je ve většině případů určeno spektrální transmittancí použitého filtru, v některých případech i spektrální citlivostí detektoru a propustností použité optiky nebo kombinací všech těchto složek. Úzkopásmové pyrometry většinou používají pásmo menší než 1 μm . Úzkopásmové pyrometry mohou mít různou podobu od jednoduchých ručních přístrojů přes propracované přenosné přístroje se současným zobrazováním měřeného objektu a jeho teploty. [3], [8]

Pásmové pyrometry

Další skupinou pyrometrů, která odvozuje teplotní údaj z energie záření v určité spektrální oblasti (širší než monochromatické), se nazývají pásmové pyrometry. Spektrální oblast je obvykle omezena spektrální propustností materiálu použité optiky a spektrální citlivostí detektoru. Tyto typy pyrometrů nejčastěji používají jako detektor fotodpor, fotodiodu nebo fotovoltaický článek. Pásmové pyrometry jsou nejrozšířenějšími pyrometry pro měření teplot nad 450°C a i nepočteněji zastoupeným typem ve výrobním programu jednotlivých předních výrobců. [3]

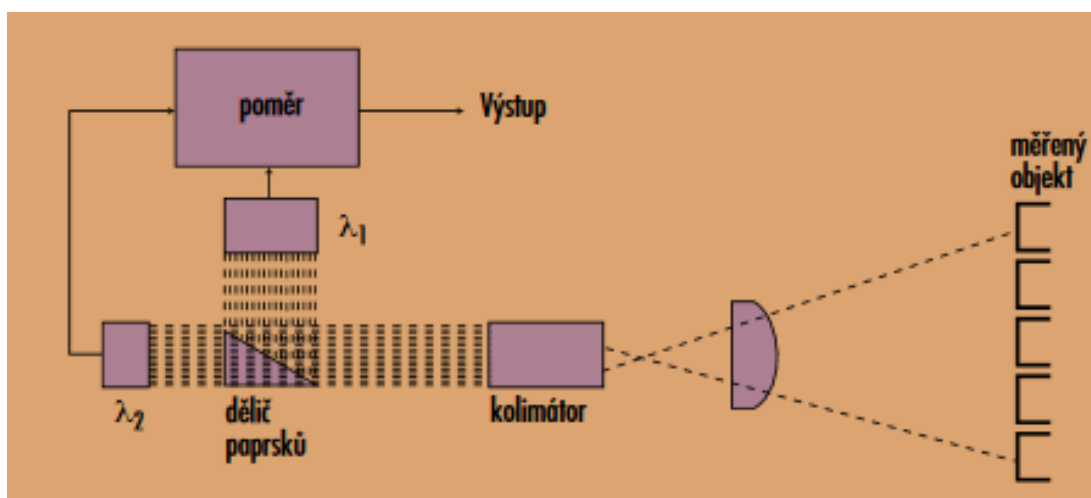
Pyrometry celkového záření

V případě, že pyrometr odvozuje teplotu měřeného předmětu z intenzity záření celé energeticky účinné oblasti tepelného záření, hovoříme o pyrometru celkového záření, jinak také nazývaném totálně radiační pyrometr. Detektorem pyrometrů celkového záření je některý z tepelných detektorů, obvykle termobaterie, bolometr nebo pyroelektrický detektor. [3]

Poměrové pyrometry

Poměrové jinak řečeno dvoupásmové nebo dvoubarevné pyrometry odvozují měřenou teplotu ze dvou intenzit záření na dvou obvykle blízkých vlnových délkách λ_1 a λ_2 . Čidlem poměrových pyrometrů jsou nejčastěji fotodpory, fotočlánky a fotodiody. Požadované spektrální vlastnosti jednotlivých optických kanálů jsou obvykle dosaženy vložením vhodných interferenčních filtrů. Pro měření jsou obvykle voleny spektrální

obory ve viditelné oblasti nebo v blízké infračervené oblasti, takže jednotlivé vlnové délky λ_1 a λ_2 jsou poměrně blízké (například $\lambda_1=0,888 \mu\text{m}$ a $\lambda_2=1,034 \mu\text{m}$). U poměrových pyrometrů teplota závisí jen na poměru dvou měřených energií, nikoliv na jejich absolutních hodnotách. Žádný parametr, který ovlivní obě pásma stejně, jako je například velikost měřeného objektu, nebude mít vliv na výsledek měření teploty. To činí poměrové pyrometry z principu přesnější než jiné teploměry. Poměrový pyrometr může eliminovat chyby způsobené změnou emisivity, povrchovou úpravou a chyby způsobené vlivem prostředí, přes které se měří (vodní pára, prašné prostředí).[3] [8]



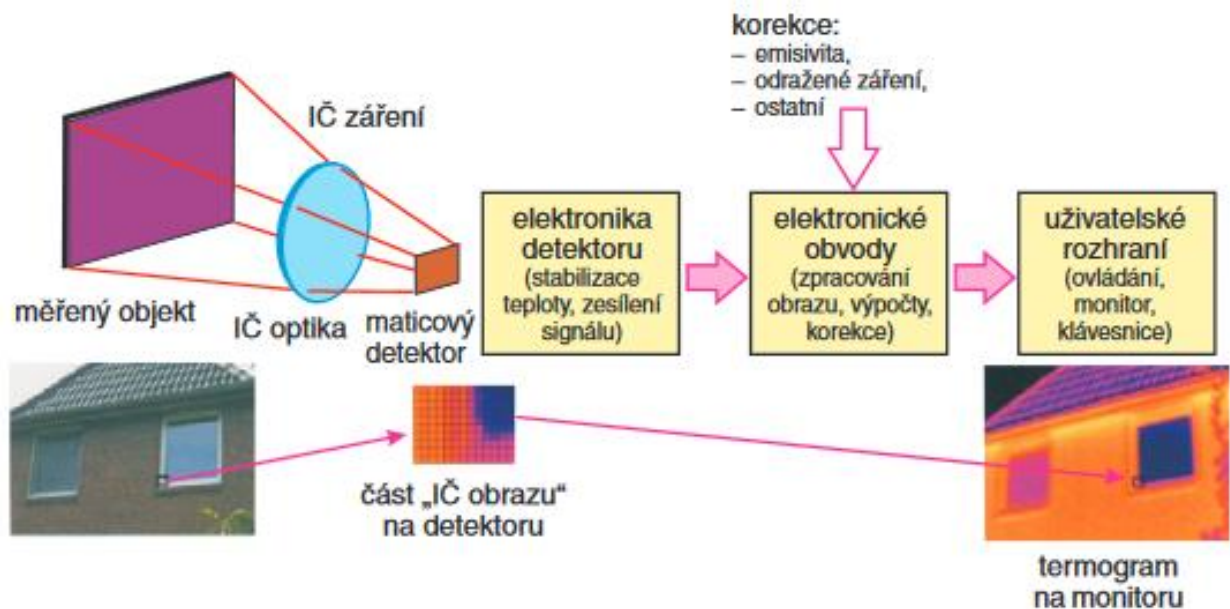
Obrázek 11: schéma poměrového pyrometru [8]

1.2.4 Zobrazovací metody

Zobrazovací metody jsou vhodné pro určování povrchových teplot předmětů, zejména nepřístupných, které by vzhledem k jejich detailnímu kontaktnímu měření bylo finančně neúnosné. Je výhodné zejména v případech, kdy není nutné znát absolutní teplotu měřeného objektu, například při kontrole servisních měření, kdy je nutné znát pouze změny rozložení teplotních polí od poslední kontroly. Příkladem může být kontrola teplotního pole vnějšího pláště pece, kontrola stavu vyzdívky pece, kontrola svodových, izolačních a přechodových odporů na rozvodech vysokého napětí, kontrola tepelně izolačních vlastností stěn budovy a další. [3]

Termokamera

Zásadní rozdíl mezi pyrometrem a termokamerou je ten, že pyrometr určuje průměrnou teplotu v určité oblasti, zatímco termokamera určuje rozložení teploty na povrchu větších částí, popřípadě celých objektů. Konstrukce termokamery je velmi podobná konstrukci klasické kamery či fotoaparátu. Objektiv promítá dopadající tepelné záření na detektor, kde dochází ke změření intenzity. Tato informace je následně digitalizována a převedena na výsledný snímek neboli termogram. Většina současných termokamer pracujících v rozmezí vlnových délek od 8 do 14 μm využívá maticové detektory. Termokamery lze rozdělit na ruční a stacionární. Stacionární termokamery se používají především na trvalý monitoring procesů, bezpečnostní a protipožární aplikace. Ruční termokamery se využívají především k monitorování v terénu. [12] [13]



Obrázek 12: schéma termokamery [12]

2. TPV V OBLASTI TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ NA VYTAVITELNÝ MODEL

2.1 Úvod

Technologie lití na vytavitelný model je nejstarší a zároveň také jednou z nejpokročilejších technologií v oblasti slévárenství. Kořeny technologie na vytavitelný vosk sahají do čtvrtého tisíciletí před naším letopočtem. Je pozoruhodné, že civilizace jako je Čína, Egypt, Mezopotámie či civilizace Aztéků, si tuto metodu osvojili. Metoda byla používána zejména pro složité tvary šperků a dalších výrobků. Technologie na vytavitelný model ale byla široce opomíjena moderním průmyslem. Byla ovšem znovuobjevena na úsvitu dvacátého století při potřebě v zubní profesi pro tvorbu zubních náhrad. Během druhé světové války byla využívána pro snížení velmi vytíženého obráběcího průmyslu, neboť odlitky vyráběné touto metodou jsou takzvaně „near-net-shape“, tedy tvarem velmi podobné finální součásti. Tato metoda tedy umožnila vyrábět tvarově složité díly podobné finálnímu tvaru za použití speciálních slitin, které nemohly být použity při jiných metodách. Po skončení války tato metoda kromě vojenství expandovala do jiných odvětví, se kterými se v dnešní době setkáváme. Postupem doby se tato technologie setkala s řadou inovací v podobě modernizace zařízení, automatizace a robotizace výrobního procesu, tak jak jej známe dnes. [14]

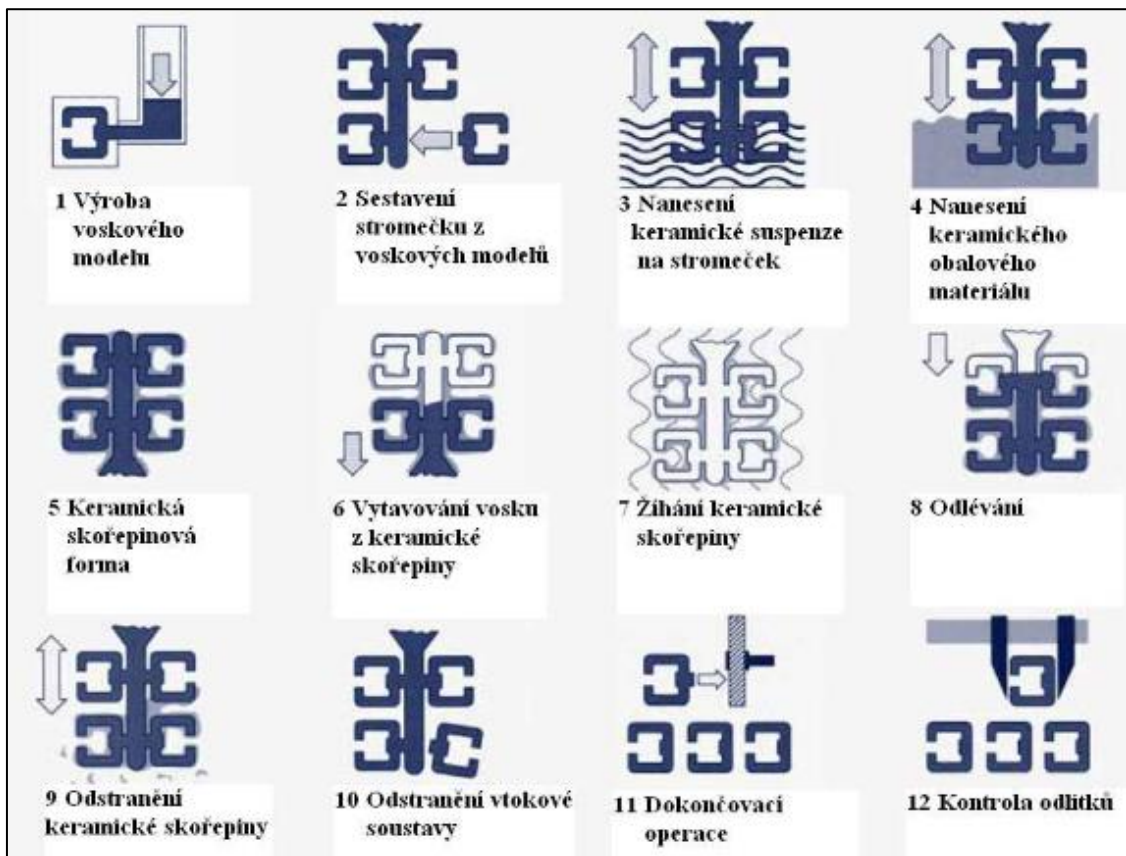
2.2 Podstata technologie Přesného lití na vytavitelný model

Jak již bylo uvedeno v úvodu, technologie přesného lití na vytavitelný model se člení do kategorie „near-net-shape“. Přesné lití lze tedy charakterizovat jako technologii, kterou je možné vyrábět tvarově složité odlitky, jejichž část funkčních ploch již není dále potřeba obrábět, neboť po odlití dosahují požadovaných rozměrových tolerancí a požadované drsnosti povrchu. Ostatní plochy, které je zapotřebí obrábět, mají přídavky relativně malé. Spotřeba času na obrábění je tedy menší, což snižuje s tím spojené náklady oproti jiným způsobům lití. Použití této technologie výroby odlitků je z výše uvedených důvodů opodstatněné zejména u součástí s požadavkem složitého tvaru při použití obtížně obrobitelných materiálů, jejichž výroba jinou technologií by byla velmi nákladná nebo dokonce zcela nemožná. Charakteristickým znakem metody vytavitelného modelu je nedělená forma. Model použitý pro zhotovení formy se vždy zničí vytavením a je tedy pro každou formu nutno použít nový model. Využití odlitků přesného lití je především zastoupeno v oblasti leteckého průmyslu (lopatky, rozvaděče), energetiky (lopatky, segmenty, tepelné štíty, části palivových článků),

zbrojního průmyslu, lékařství (implantáty, kloubní náhrady), v chemickém průmyslu a dalších výrobních odvětvích. [15]

2.3 Proces technologie výroby

V následující kapitole bude blíže popsán postup pro výrobu odlitku na vytavitelný model v návaznosti na schéma výroby.



Obrázek 13: postup výroby přesných odlitků na vytavitelný model [26]

2.3.1 Výroba voskového modelu

Základem pro výsledný odlitek s požadovanou jakostí povrchu a přesností je velmi přesně vyrobená forma pro voskový model. Je zapotřebí, aby forma umožňovala výrobu zdravých modelů s bezvadným povrchem bez staženin, vzduchových bublin, propadlin a ostatních povrchových vad a také zajišťovala požadovanou přesnost rozměrů. Formy se používají jak k výrobě vlastních modelů, tak k výrobě pomocných prvků jako jsou např. vtoky, nálitky či kolektory. Výroba voskových modelů vstřikováním vosku do formy je hlavní metodou výroby voskových modelů. Výroba se uskutečňuje na speciálních vstřikovacích lisech, které vstřikují roztavený vosk pod tlakem. Pro tyto účely jsou používány zejména formy z hliníkových slitin. Při potřebě zajištění dutiny v odlitku se používají keramická jádra, která se vloží do formy, kde dojde k zastříknutí do voskového modelu součásti. Dalším způsobem výroby voskových modelů je gravitační způsob lití. Tento způsob je však méně častý a slouží k výrobě pomocných modelů. Pro docílení požadovaného tvaru se v některých případech po odlisování modelu používá kalibrační přípravek.[15], [16]

Hrotování

Odlisovaný model je zapotřebí dále začistit. Jedná se především o začistění dělicí roviny, místa vtoku, odstranění otřepů, popřípadě zapravení vzniklých bublin na povrchu modelu. Tyto operace se provádějí opravnými vosky.

Sestava vtokové soustavy

Sestavení se provádí po stabilizaci voskového modelu, což je zpravidla 24 hodin po odlisování. V závislosti na velikosti součásti rozlišujeme dva typy sestavení: sestavení jednotlivých modelů a sestavování modelů do stromečku. Sestavování jednotlivých modelů se používá v případě rozměrnějších odlitků. Jsou to převážně odlitky, u nichž velké nároky na kvalitu nebo rozměrovou přesnost neumožňují použití jiné technologie. Při sestavování modelů do stromečku se sestava skládá z většího počtu modelů spojených jednotlivými vtoky s vtokovou soustavou. Vtoková soustava s různými druhy nálitků se vyrábí ve zvláštních formách a na model se připojí pájením nebo lepením. Tvar stromečku ovlivňuje způsob připojení modelů, technika obalování, vytavování, lití a oddělování odlitků od vtokové soustavy. Vtoková soustava často bývá vyrobena z vosku regenerovaného, nikoliv nového, jako je to v případě voskového modelu součástí. [15], [16]

2.3.2 Výroba skořepinových forem

Obalování modelů

Obalování modelů spočívá v opakovaném namáčení modelových stromečků do keramické břečky, posypáváním žáruvzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušením jednotlivých obalů. Tento cyklus se opakuje tolikrát, dokud nemá obal požadovanou tloušťku. Počet vrstev bývá obvykle mezi 5 až 15 obaly. Proces výroby skořepin v moderních provozech bývá automatizován za pomoci robotů a dopravních linek. Formovací hmoty pro výrobu skořepin se obecně skládají z plniva a pojiva. Základní vlastnosti keramických skořepin jsou v první řadě dány charakterem žáruvzdorného materiálu obalové hmoty, méně pak kapalným pojivem. Výběr vhodného žáruvzdorného materiálu by měl být vybírán s ohledem na tepelnou roztažnost, teplotu tavení a chemickou netečnost vůči odlévaným kovům.

Posypávání žáruvzdorným materiálem se provádí fluidně, ponořením do vzduchem načeřeného posypového materiálu. Na první dva lícní obaly, které rozhodují o kvalitě povrchu odlitku, se používá jemný zásypový materiál se zrnitostí většinou 0,1 až 0,25 mm, na další obaly pak 0,25 až 0,5 mm. [15] [16] [17]

Plniva

Na výrobu skořepin se jako žáruvzdorné materiály používají hlavně kysličníky a křemičitany. Pro praktické průmyslové využití se používá především oxid hlinitý a oxid zirkoničitý. Z křemičitanů se využívá nejvíce mulitu, zirkonu, silimanitu a hlavně molochitu. Materiály používané jako plniva do břečky nebo jako posypové materiály mohou i nemusí být stejné. Keramické materiály jsou používány v široké škále kombinací.

Pojiva

Důležitou vlastností, kterou by pojiva měla splňovat, je netečnost při vypalování k žáruvzdornému materiálu i k roztavenému kovu. Dále musí předat po ztuhnutí dostatečnou pevnost jak po vysušení, tak po vypálení. Jako pojiva formovacích hmot se používají především koloidní roztoky oxidu křemičitého, dále také organické sloučeniny hliníku, titanu, zirkonu a některé anorganické sloučeniny. Křemičitanová pojiva jsou buď na lihové, nebo vodné bázi.

Pro primární obaly, nejčastěji první dva obaly, se používá systém založený na vodní bázi, k sušení se používá vzduch. Pro sekundární obaly se používá systém založený na alkoholové bázi. Alkoholová pojiva mají výhodu oproti vodním v rychlejší sušení a

vytvrzování, které je zajištěno působením plynného prostředí amoniaku. Při aplikaci alkoholové břečky a následném působení amoniaku lze další vrstvy nanášet během několika minut.

Při sušení keramických skořepin musí každý obal schnout v klimatizovaném prostoru při konstantních podmínkách. Je zapotřebí zajistit dostatečné proudění vzduchu. Teplota prostředí by se měla pohybovat mezi 20 až 24 °C. Posypané obaly se pak suší krátkou dobu volně na vzduchu, poté se vystaví na krátkou dobu působení plynného čpavku. Následuje odstranění čpavkových par z obalu působením proudu vzduchu, nové namočení, odkapávání, posypání, dokud nedosáhneme požadované tloušťky skořepiny. Po dokončení procesu se skořepina suší dle rozměrů skořepiny 3 až 8 hodin. [15] [16]

Vytavení vosku

Další operací v procesu výroby odlitku je po dokonalém vysušení skořepiny odstranění vosku. Odstranění vosku ze skořepiny se provádí vytavování následujícími způsoby:

- v autoklávu
- za nízké teploty: vytavování se provádí v roztavené a přehřáté hmotě stejného složení jako má hmota modelů
- za vysoké teploty: vytavování se provádí v peci za teploty 900 až 1000°C, tímto způsobem je spojen proces vytavení vosku a vypálení skořepiny; ztráty vosku jsou při použití této metody 10 až 15%
- dielektrickým ohřevem: skořepiny jsou v prvotní fázi zvlhčeny vodou, v následující fázi se umístí do pole s vysokofrekvenční oscilací; vlhká skořepina se rychle ohřeje, vosk se těsně u skořepiny odtaví, čímž vznikne dilatační spára, jež zabrání popraskání skořepiny rozpínajícím se voskovým modelem
- horkým vzduchem: proud horkého vzduchu se zavádí do středu vtoku, ten se protaví dříve než se celý model ohřeje a k odtavování pak dochází z vnitřku.

V současnosti se v drtivé většině používá vytavování pomocí autoklávu. Vytavení modelů se provádí tepelným šokem přehřátou párou. Protože teplota páry závisí na jejím tlaku, používají se zařízení, která pracují s tlaky od 0,3 až 0,6 MPa při teplotě páry od 135 do 165 °C. Skořepiny je zapotřebí v autoklávu umístit tak, aby z nich vosk mohl volně vytékat. Vytavený vosk se zachycuje ve sběrné nádobě a po regeneraci se znovu používá. Výhodou tohoto způsobu odstraňování modelů jsou menší ztráty na modelovém vosku, menší množství popraskaných skořepin a možnost pracovat s tenčími skořepinami. [15] [16]

Vypalování skořepin

Keramické formy je před licím procesem potřeba vypálit. Vypalování se provádí z důvodu, že formy jsou pak schopny odolávat velmi vysokým teplotám a při vhodné zvolené skladbě břečky a posypového materiálu mohou být používány pro velmi širokou oblast. Jak již bylo řečeno, formy se vypalují z důvodu zhutnění struktury keramiky, tedy k dosažení potřebné pevnosti. Při vypalování totiž dochází k převedení amorfní formy vazné vrstvy SiO_2 na formu krystalickou. Dalším důvodem je odstranění posledních zbytků voskových materiálů a těkavých látek ze skořepiny po vytavování. Dalším a neméně důležitým důvodem je předebrát formy na požadovanou teplotu.

K vypalování se používají odporové nebo plynové pece. Vypalování potřebuje kyslík, proto je důležité zajistit jeho dostatek ve vypalovacích pecích k odstranění jakéhokoli zuhelnatěného vosku. V této souvislosti je u odporové pece výhodou použití účinné ventilace, která je zdrojem volně proudícího vzduchu. Mnohem obtížnější je dosažení požadované úrovně kyslíku u plynových pecí, protože plynový hořák má tendenci volný kyslík pohltit. Vypalovací atmosféru je nutno pravidelně kontrolovat, obzvláště pro odlitky z oceli a vysoce legovaných slitin, protože na povrchu formy je potřeba zabránit reakci kovu se zbytkovým uhlíkem z nedostatečného vypálení vosku. Minimální teplota při vypalování by měla být přes 500°C , avšak výhodnější je zvýšit tuto teplotu na 800°C k zajištění rychlého odstranění zbytků.

Vypalování forem při teplotách $500\text{--}800^\circ\text{C}$ není dostačující ke zhutnění struktury keramiky a tím formy nejsou inertní proti roztavenému kovu. Většina sléváren vypaluje formy při teplotách $950\text{--}1100^\circ\text{C}$ pro dosažení inertnosti a vysoké stability. Vyšší teploty vypalování okolo 1500°C jsou používány v procesu usměrněného tuhnutí, kde musí roztavený kov po určitou dobu zůstat tekutý. V praxi je vhodné využívat dvoufázového vypalovacího procesu.

Dvojité vypalování s mezi-ochlazením je výhodné pro vizuální kontrolu vypálené skořepiny. V této části výrobního procesu je možné odhalit trhliny ve skořepině, které zůstaly neodhaleny po vytavení vosku. Pro inspekci trhlín a prasklin se používá kapilární barevné metody. Skořepina se naplní indikační kapalinou, která svou barvou v případě trhlíny tato místa zvýrazní. Po kontrole indikační kapalinou dochází k dalším přípravám skořepiny k následnému vypálení a odlití. Na tomto úseku dochází k dokonalému vyčištění od možných zbylých nečistot uvnitř skořepiny, zaslepení pomocných otvorů sloužících k lepšímu odvodu vytaveného vosku a dle potřeby vycházející z charakteru odlitku, zabalení potřebných míst izolační vatou.

Následně putuje skořepina do předehřívací plynové pece, kde již není vyžadována okysličovací atmosféra. Skořepina založená do předehřívací pece se ohřívá na teploty mezi 850 a 1150 °C, kde čeká na proces lití. [15] [16]

2.3.3 Tavení a odlévání

Tavení a odlévání kovů je pro výrobu kvalitních přesných odlitků jedním z nejdůležitějších procesů celé technologie. Odlévá se zpravidla ihned do žhavých skořepin, bezprostředně po vytažení z vypalovací pece. Jak již bylo uvedeno, zmenší se tím teplotní šok při lití, omezí se vznik vnitřních pnutí ve skořepinách a sníží se nebezpečí praskání. Před litím se do žhavých skořepin většinou vkládají keramické filtry předehřáté na teplotu skořepiny. Odlévání se provádí buď na vzduchu (otevřené lití) nebo ve vakuu. Ve většině sléváren přesného lití na vytavitelný model se používá elektrických indukčních pecí jádrových či bezjádrových nebo vakuových pecí. Tavení a odlévání slitin s nejvyššími požadavky na kvalitu se provádí právě ve vakuu. Ve vakuových pecích se odlévají zejména speciální vysokolegované materiály. [15]

2.3.4 Dokončovací operace

Dokončovací operace jsou jedny z nejpracnějších operací v technologii přesného lití na vytavitelný model. Na prvním místě po odlití dochází k odstranění skořepiny z odlitku. Dále dochází k oddělení odlitků od vtokové soustavy. Podle složitosti součásti je zapotřebí vhodným způsobem odstranit zbylou keramiku. Následuje oddělování vtoků, tryskání a v případě potřeby tepelné zpracování nebo obrábění. [15]

Odstraňování keramiky

Po ztuhnutí kovu je nutno ze stromečku odstranit keramickou vrstvu. Ve většině případů je keramika odstraňována mechanicky. Tuto operaci je možné provádět ručně za pomoci úderů kladivem, je však nutné zajistit, aby nedošlo k poškození odlitků. Účinným způsobem je vibrační oklepávání. Tuto operaci lze označit za nejvíce prašnou a hlučnou ve slévárnách přesného lití na vytavitelný model. V současnosti se proto používá zvukotěsná a prachotěsná kabina, kde je umístěn vibrační stroj či vibrační kladivo. Nově používaným způsobem odstraňování keramické skořepiny je tryskání vysokotlakým paprskem. [15]

Odřezávání odlitků z vtokové soustavy

Ve většině případů jsou odlitky oddělovány z vtokové soustavy kotoučovými nebo třecími pilami. Kotoučové pily jsou dvojího druhu, buď je kotouč fixován na stroji, nebo je kotouč upevněn na zvedáku a přibližuje se k odlitku, který je fixován ve svěráku. [15]

Broušení, dokončování

Ve slévárnách přesného lití je k odstraňování vtoků, zbavování se skvrn, čištění a leštění používána široká škála broušicích zařízení. Mezi typické zařízení patří brusky s výkyvným rámem, horizontální, vertikální, zapichovací brusky, a také velký výběr ručních brusek. Jako brusné médium se používá většinou brusných pásů, které nahrazují brusné kotouče. [15]

Odstranění zbylé keramiky

K odstranění zbylé keramiky, která nejde odstranit mechanicky, ani pomocí tryskání z důvodu nepřístupnosti, se používají chemické metody. Je sice možné odstranit celou skořepinu chemicky, ale takovýto postup je cenově neefektivní. Existují dvě chemické metody: lázeň s rozpuštěnou solí a horká vodní žíravá lázeň.

Lázeň s rozpuštěnou solí

Pro tuto metodu při pracovní teplotě v rozmezí 475 – 600 °C se používá hydroxid sodný. Doba ponoření odlitků je okolo 20 minut. Po solné lázni jsou odlitky opláchnuty a vloženy do neutralizační kyseliny, kde dojde k odstranění okují.

Horká vodní žíravá lázeň

Zde se používají alkalické koncentráty, obvykle s hydroxidem draselným. Pracovní teplota je okolo 80 °C a doba ponoření odlitků je několik hodin.

Obě výše uvedené metody jsou schopny odstraňovat i přístupná keramická jádra. Pro obtížnější, nepřístupná jádra se používá louhovacího autoklávu, kde se používá vodní žíravina nebo kyselina fluorovodíková. [15]

Kontrola odlitků

Postupy a požadavky kontroly jsou většinou vázány na výkresy a dokumenty dodané zákazníkem. Všeobecně kontrola odlitků zahrnuje kontrolu tvaru a rozměrů spojenou s vizuální kontrolou, která má za úkol kontrolovat kvalitu povrchu a vnější nespojitosti. Kontrola rozměrové přesnosti se provádí pomocí mikrometrů, ručních či automatických měřidel, souřadnicových měřicích systémů a 3D automatických měřicích systémů. Trhliny a jiné povrchové vady mohou být zjišťovány pomocí vizuální kontroly, chemického leptání, fluorescenční kapilární metody, zkoušky vířivými proudy a magnetickou zkouškou. Pro zjišťování vnitřních vad nedestruktivní metodou se používají metody penetrační, magnetické, ultrazvukové a rentgenové. Ve slévárnách přesného lití jsou dominantními metodami pro kontrolu odlitků vizuální kontrola, penetrační a rentgenová kontrola. [15]

3. ANALÝZA STÁVAJÍCÍHO PROCESU MĚŘENÍ TEPLIT V PCS A.S

Jak již bylo dříve zmíněno, společnost PCS a.s. se zabývá odléváním přesných odlitků na vytavitelný model. Správná teplota skořepiny a taveniny je jedním z předních a rozhodujících faktorů, které mají zaručit požadovanou kvalitu výrobku. Proto je nezbytně nutné během těchto procesů důsledně dodržovat a kontrolovat teplotu. V následující kapitole bude nastíněna stávající metoda měření na jednotlivých pracovištích licího pole při procesu odlévání. Bude ukázána metodika měření v průběhu procesu lití na úseku otevřeného lití a vakuového lití.

3.1 Otevřené lití

V průběhu procesu lití na otevřeném licím poli vždy pracuje větší počet pracovníků licího pole. Proces začíná natavením vsázky použitím indukční pece. Po natavení požadovaného množství vsázky, přidání potřebných přísad a stažení strusky, dochází k první kontrole teploty taveniny. Při vhození menšího množství ferosilicia do taveniny je zkušený tavič schopen určit přibližnou teplotu taveniny. K přesné kontrole teploty taveniny se používá tyčový termoelektrický snímač. Ve snímačích na otevřeném licím poli je používán termočlánek typu B (PtRh30/PtRh6). Ten je chráněn před taveninou tubicí s uzavřeným koncem z křemičitého skla. Tavič ponoří termočlánek přibližně 3 cm do taveniny a čeká na dosažení maximální naměřené teploty. Naměřená teplota by měla zůstat konstantní přibližně 3 vteřiny. Hodnota naměřené teploty je zobrazovaná na digitálním displeji. Ochranná trubice z křemičitého skla je použitelná maximálně dvakrát. Při překročení tohoto množství použití je veliké riziko prasknutí ochranné trubice a s tím spojené zničení termočlánu. Na obrázku 14 je vidět snímač připravený k použití, kde nová ochranná trubice je navlečena na keramické kapiláře, která od sebe izoluje větvě termočlánu.



Obrázek 14: termočlánek s ochranou trubicí



Obrázek 15: měření taveniny v indukční peci

Po dosažení odpovídající teploty taveniny dává tavič pokyn k přistavení vyhřáté licí pánve. Následně dochází k naklopení indukční pece a vylití taveniny do licí pánve. Během tohoto procesu dochází k vyndání skořepin a jejich ustavení pro následné odlití. V okamžiku, kdy je natavený kov v licí pánvi, dochází k dalšímu měření teploty. Při měření teploty taveniny v licí pánvi je také použit tyčový termoelektrický snímač s termočlánkem typu B. Při měření teploty pracovník ponoří snímač a čeká na pokyn taviče, který sleduje klesající teplotu na displeji. Při dosažení předepsané teploty je snímač ihned vytažen a je zahájen proces lití do skořepiny. Měření teploty v licí pánvi trvá přibližně 25 vteřin, než teplota taveniny klesne na požadovanou hodnotu. Hodnoty naměřených teplot jsou po odlití skořepiny zaneseny do záznamu o licím procesu.



Obrázek 16: měření teploty taveniny v licí pánvi

3.2 Vakuové lití

V případě, že je zapotřebí, aby proces lití proběhl v kontrolovaném prostředí, používají se k tavbě a odlévání indukční vakuové pece. Užití vakua totiž předchází reakcím taveniny s okolní atmosférou. Pracovní tlak ve vakuové peci je v hodnotách 10^{-3} mbar.



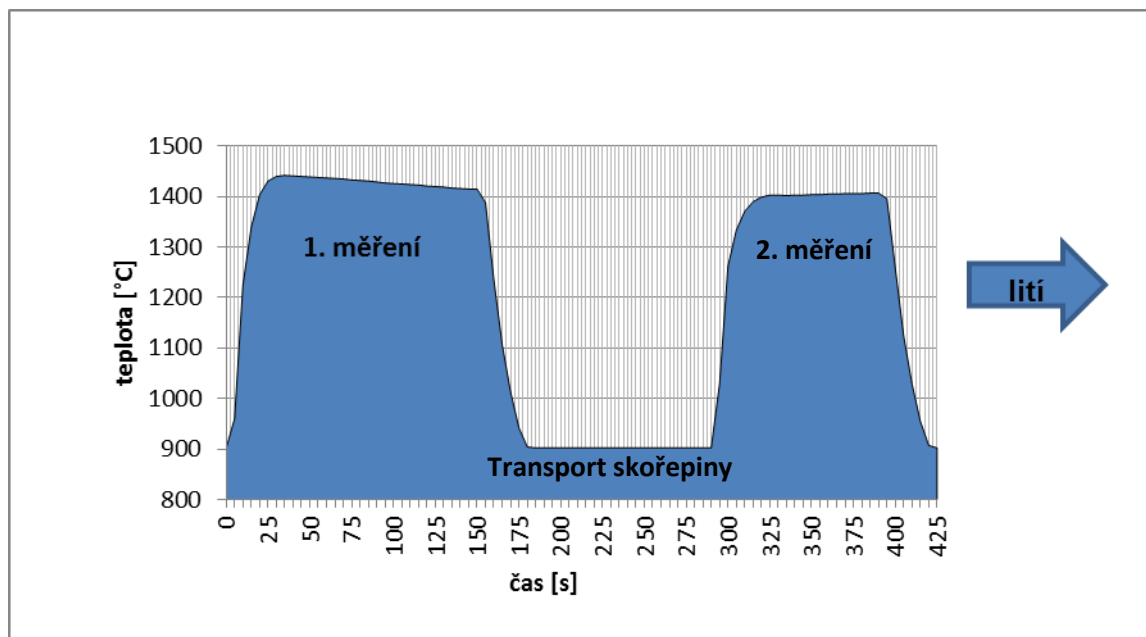
Obrázek 17: vakuová pec

Proces tavení začíná vsazením materiálu pomocí kleští do kelímku ve vakuové peci. Spouštění materiálu do kelímku a měřící sondy je prováděno přes šaržovací ventil. Měření teploty probíhá na stejném principu jako v případě otevřeného lití. Je používán termočlánek typu B (PtRh30/PtRh6) a jako ochrana termočlátku je používána trubice z křemenného skla s uzavřeným koncem. Po natavení potřebného množství kovu se měří teplota taveniny dotykově spuštěním termoelektrického čidla do horní vakuové komory.

Měření teploty probíhá následujícím způsobem:

Obsluha vakuové pece spustí měřící sondu pomocí mechanismu nad hladinu taveniny, kde se sonda nechá po dobu 10 vteřin nahřát z důvodu zamezení možného poškození ochranné trubice vzniklé tepelným šokem. Po nahřátí se sonda ponoří do taveniny, kde pro správné určení licí teploty je nutné počkat, až hodnota na měřicím přístroji dosáhne maxima a ustálí se na požadované licí teplotě. Po dosažení požadované teploty tavič vysune měřící sondu. Následný krok je vyndání skořepiny z předehřívací pece, vložení keramického filtru v případě technologického předpisu a co nejrychlejší transport formy do spodní komory pece.

Po ustavení formy do spodní komory vakuové pece dochází k odsátí spodní komory. Během této doby tavič znovu změří teplotu taveniny. Pokud naměřená teplota odpovídá technologickému předpisu, je měřící sonda vysunuta do horní polohy. Následně je otevřen mezikomorový ventil a dochází k odlití taveniny do skořepinové formy. Po odlití se postupuje dále dle technologického postupu. Celý proces lití na vakuové peci zajišťuje jeden tavič. Součástí pece jsou průzory, které taviči umožňují pozorovat dění v peci při jeho ovládání. Na následujícím grafu 1 je zobrazen záznam průběhu měření teplot:



Graf 1: průběh měření teplot na vakuové peci

4. NÁVRHY NA MĚŘENÍ TEPLOT SKOŘEPIN A TAVENINY

Praktická část této diplomové práce se zabývá problematikou spojenou se stanovenými cíli, které jsou uvedeny v úvodu práce. V následujících kapitolách bude nastíněn účel prováděných experimentů, návrh realizace a použité vybavení.

4.1 Testování bezdotykového měření taveniny na vakuové indukční peci KOPP VSP – 5

V rámci plánované repase vakuové pece KOPP VSP – 5 byl firmou PCS a.s. zadán požadavek na zavedení nového moderního způsobu měření teploty taveniny pomocí bezkontaktního měření. Část praktické části diplomové práce je právě tomuto problému věnován.

Velkým rizikem při měření teploty pomocí termočlánu na vakuové peci je fakt, že v případě poruchy termočlánu v průběhu měření teplot dojde k narušení technologického procesu. V případě zavedení bezkontaktního měření by byl pyrometr kalibrován pouze jednou za čas pomocí ponoření termočlánu a provedení korekce teploty pomocí emisivity. Výhodou je okamžitá kontrola teploty taveniny kdykoliv během procesu tavení.

V rámci řešení tohoto problému jsem kontaktoval dvě tuzemské společnosti: společnost MICRO-EPSILON Czech Republic spol. s r.o. a společnost Workswell s.r.o. zastupující firmu Keller MSR GmbH.

Testování proběhlo se zapůjčenými pyrometry společnosti MICRO–EPSILON [18]:

CT ratio M1 - dvouspektrální poměrový pyrometr

Měřící rozsah: 700°C až 1800°C.
Měřící vlnová délka: 0,7 μm a 1,1 μm
Přesnost: ± 1 °C nebo $\pm 1\%$ z naměřené hodnoty
Opakovatelnost: $\pm 0,5$ °C nebo $\pm 0,5 \%$ z naměřené hodnoty
Rozlišení: 0,1 °C
Optické rozlišení: 40:1



Obrázek 18: CT ratio M1

Výhodou je, že tento pyrometr minimalizuje chyby měření způsobené např. vlivem prachových nečistot, výparů, nízkou emisivitou a částečným zakrytím cílového objektu.

CT laser M5 SF - jednopásmový pyrometr

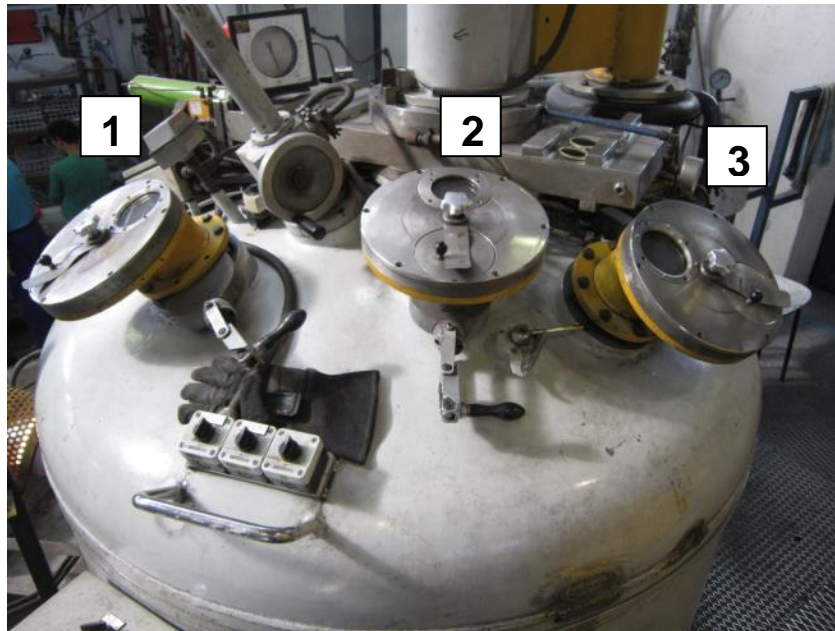
Měřící rozsah: 1000°C až 2000°C
měřící vlnová délka: 525 nm
Přesnost: $\pm 1\%$ z naměřené hodnoty
Opakovatelnost: $\pm 0,5 \%$ z naměřené hodnoty
Rozlišení: 0,2 °C
Optické rozlišení: 150:1



Obrázek 19: CT laser M5

Testování bylo prováděno skrz dva průzory na vakuové peci s označením 2 a 3, viz obrázek 20. Tyto průzory slouží pro sledování průběhu tavení, zakládání materiálu a průběh kontroly teploty. Průzor označený číslem 1 slouží primárně pro sledování průběhu odlévání a pro taviče je velmi důležitý z tohoto důvodu nebyl tento průzor využíván.

Pro správné měření teploty pyrometru je důležité nastavit správnou hodnotu emisivity. Hlavním cílem tohoto experimentu je nastavit hodnotu emisivity tak aby teplota zobrazovaná na displeji pyrometru odpovídala naměřené hodnotě pomocí termočládku.



Obrázek 20: průzory vakuové pece

4.2 Testování ochranných trubic termočlánků na vakuové indukční peci KOPP VSP – 5

Hlavními důvody pokusu o zavedení nových ochranných trubic do procesu měření teploty taveniny na vakuové peci bylo zvýšení počtu použití jednotlivých ochranných trubic. S tím samozřejmě souvisí snaha o snížení nákladů na jedno měření. I přes dodržování výměny ochranné jímký po každé tavbě se stává, že ochrana termočlánku praskne a dojde ke zničení samotného termočlánku. Vlivem může být vnitřní vada ochranné trubičky například v kombinaci s nedostatečným nahřátím nad taveninou před ponořením. Pokud praskne trubice přímo v tavenině, dojde ke zničení termočlánku a je nutné jej neprodleně vyměnit. To je největší problém v případě, kdy je skořepina již v dolní komoře vakuové pece, a nedošlo k naměření dané licí teploty. V tomto případě je nutné skořepinu vyndat a založit znovu do předehřívací pece. Dalším důvodem je snížení pracnosti manipulace pro obsluhu vakuové pece. Je zapotřebí si uvědomit, že obsluha pece při stávajícím způsobu musí připravit jednotlivé trubice pro použití, zdrsnit povrch u ústí jímký a následně tento prostor omotat drátkem pro zajištění proti propadnutí skrz otvor v grafitovém lůžku. Takto musí připravit ochranné trubice pro každou tavbu a mít v zásobě další jako rezervu. Obsluha manipuluje při výměně ochranné trubice s horkými komponenty a je tedy větší riziko možnosti způsobení úrazu při této manipulaci. V případě použití ochranných trubic s vyšší životností by se toto riziko snížilo.

4.2.1 Výběr ochranných trubic k testování

V rámci pokusu o snížení nákladů na měření a usnadnění práce obsluhy liciho pole byl prozkoumán tuzemský a zahraniční trh firem nabízejících ochranné trubice pro termočlánky. Z možných alternativ byly vybrány tři druhy ochranných trubic, které byly v procesu výroby odzkoušeny. Při poptávání po možných alternativách byl u prodejců kladen požadavek na teplotu použití kolem 1600 °C a výbornou odolnost proti náhlé změně teploty. Pro zkoušky byly vybrány trubice z oxidové keramiky Lunit 73 (C610) a Luxal 203 (C709) od firmy Estcom. Dále pak kovokeramické trubice Metamic 829 od firmy Morgan thermal ceramics. Uvedené trubice byly vybrány z důvodu vyhovující maximální teploty použití, vyhovujících rozměrů a přijatelné ceny.

Ochranné trubice termočlánků musely být vybírány i s ohledem na schopnost uložení do grafitového lůžka v měřící hlavici. Tento rozměr byl limitován maximálním vnitřním průměrem do 14 mm. Standardně je v lůžku otvor pro průměr trubice z křemenného skla o vnějším průměru 3,5 mm.

Ochranná trubice z křemičitého skla, která je v současnosti zavedena v provozu, je v lůžku zajištěna proti propadnutí pomocí ovázaného drátku u ústí ochranné trubice, viz obrázek 21. Grafitové lůžko se do měřící hlavy uchycuje pomocí závlačky.



Obrázek 21: grafitové lůžko

Standardně používané ochranné trubice termočlánků pro měření na vakuové peci jsou dodávány firmou Glassunikum v délce 120 mm s průměrem 3,5 mm. Nákupní cena jednoho kusu trubice je 35 Kč. Tyto trubice jsou použitelné pro dvě ponoření do taveniny, tedy jedna trubice je vyřazena po jedné tavně. Na obrázku 22 je vlevo ukázána ochranná trubice před ponořením do taveniny, vpravo pak vyřazená trubice po provedeném měření. Na snímcích je viditelné ovázání drátkem sloužící k uchycení v grafitovém lůžku. Vytvoření tohoto uchycení provádí tavič.



Obrázek 22: ochranná trubice z křemenného skla

Na následujících stranách jsou popsány ochranné trubice termočlánků vybrané pro zkoušení:

Metamic 829 (S363F)

Jedná se o kovokeramický materiál s obsahem Al_2O_3 19 %, Molybden 78 %, ZrO_2 2 %. Maximální teplota uváděná výrobcem je 1900 °C. Vlastnosti materiálu, které výrobce uvádí, jsou následující:

Objemová hmotnost: 7450 kg/ m³

Porozita: 3%

Pevnost v ohybu: 276 MN/ m²

Ochranné trubice Metamic 829 (S363F) byly objednány v rozměrech:

Vnější průměr:	9,5 mm
Vnitřní průměr:	6,4 mm
Průměr příruby:	12,7 mm
Délka:	114,3 mm

Cena jednoho kusu se pohybuje kolem 3000 Kč v závislosti na aktuálním kurzu měny. Výhodou těchto trubic je, že jsou vyráběny s přírubou, tedy není zapotřebí trubici upravovat pro uchycení do lůžka. [19]

Luxal 203 (C709)

Jedná se slinutou korundovou keramiku s obsahem min. 99,7 % Al_2O_3 . Výrobce uvádí použití vhodné do teploty 1800°C.

Cena jednoho kusu: 640 Kč

Ochranné trubice Luxal 203 (C709) byly objednány v rozměrech:

Vnější průměr: 10 mm

Vnitřní průměr: 7 mm

Délka: 120 mm

V následující tabulce jsou uvedené vlastnosti tohoto materiálu [27]:

neprůlinčítost	dokonalá
vahová nasákavost	0 %
objemová hmotnost	min. $3,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
pevnost v ohybu	min. 300 MPa
odolnost proti změnám teploty	min. 150 K
koef. teplotní roztažnosti	20 - 600 °C $7 - 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
elektrická pevnost	min. 17 kV/mm
objemový odpor při teplotě 200 °C	min. $10^{12} \Omega\text{cm}$
objemový odpor při teplotě 600 °C	min. $10^8 \Omega\text{cm}$

Lunit 73 (C610)

Jedná se o slinutou mullitovou keramiku s obsahem Al_2O_3 60 %. Výrobce uvádí použití vhodné do 1550 °C. V následující tabulce jsou uvedené vlastnosti tohoto materiálu [28].

Cena jednoho kusu: 230 Kč

Ochranné trubice Lunit 73 (C610) byly objednány ve stejných rozměrech jako Luxal 203 (C709).

neprůlinčítost	dokonalá
vahová nasákavost	0 %
objemová hmotnost	min. $2,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
pevnost v ohybu	min. 120 MPa
odolnost proti změnám teploty	min. 150 K
koef. teplotní roztažnosti	20 - 600 °C $5 - 6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
elektrická pevnost	min. 24 kV/mm
objemový odpor při teplotě 200 °C	min. $10^9 \Omega\text{cm}$
objemový odpor při teplotě 600 °C	min. $10^5 \Omega\text{cm}$

U ochranných trubic Luxal 203 (C709) a Lunit 73 (C610) nebyla zvolena varianta s tmelenou přírubou. Tyto zkušební vzorky byly pro uchycení do grafitového lůžka upraveny stejným způsobem jako v případě křemenných trubic.

Na zahraničním trhu jsem vyhledal výrobce, kteří nabízejí ochranné trubice termočlánků z dalších materiálů vyhovující požadované teplotě použití. Ty však nebyly zakoupeny k otestování z důvodu vysoké ceny nebo z obav nedostatečné odolnosti proti teplotnímu šoku.

Si-C

Na tuzemském trhu tyto pyrometrické trubice nabízí firma SEEIF ceramics a.s. Tyto trubice jsou k použití do 1700 °C v závislosti na složení. Výrobce bohužel nevyrábí vhodné rozměry pro účely ve vakuové peci. Zahraniční americká firma Arklay S. Richards tento produkt nabízí v potřebných rozměrech pod názvem Hexoloy. Výrobce uvádí maximální teplotou použití 1650 °C a výbornou odolnost proti tepelnému šoku desetkrát vyšší než u korundových trubic. Cena jednoho kusu činí přibližně 15 000 Kč. Z důvodu vysoké ceny nebyl tento materiál testován. [29]

Zr-Y

Trubice z tohoto materiálu také nabízí firma Arklay S. Richards. Výrobce uvádí použití do teploty 2300 °C. Chemické složení materiálu je 89,5 % Zirkon a 10,5 % Yttrium. Výrobce doporučuje k zabránění teplotního šoku ohřev a ochlazování méně než 150 °C za hodinu. Cena trubice je přibližně 12 000 Kč. Z důvodu vysoké ceny a doporučení k zabránění teplotního šoku tento materiál nebyl testován. [29]

4.3 Měření vybraných vzorků skořepin

Pro účely zajištění výzkumu teplotního chování skořepin v závislosti na čase byly vybrány tři typově různé vyřazené skořepiny s rozdílným počtem obalů. Dále pro účely zkoumání byly použity skořepiny na ingoty se shodným počtem obalů a rozdílnou tloušťkou používaného tepelně izolačního materiálu – Sibralu. Jedna tato skořepina byla ponechána bez zábalu, ostatní byly po celém povrchu zabaleny do Sibralu o tloušťce 13 mm, 25 mm a 38 mm.

Skořepiny byly vybrány s následujícím počtem obalů a pracovně označeny následovně:

Skořepina **X** na ingoty: 8 obalů + zábal

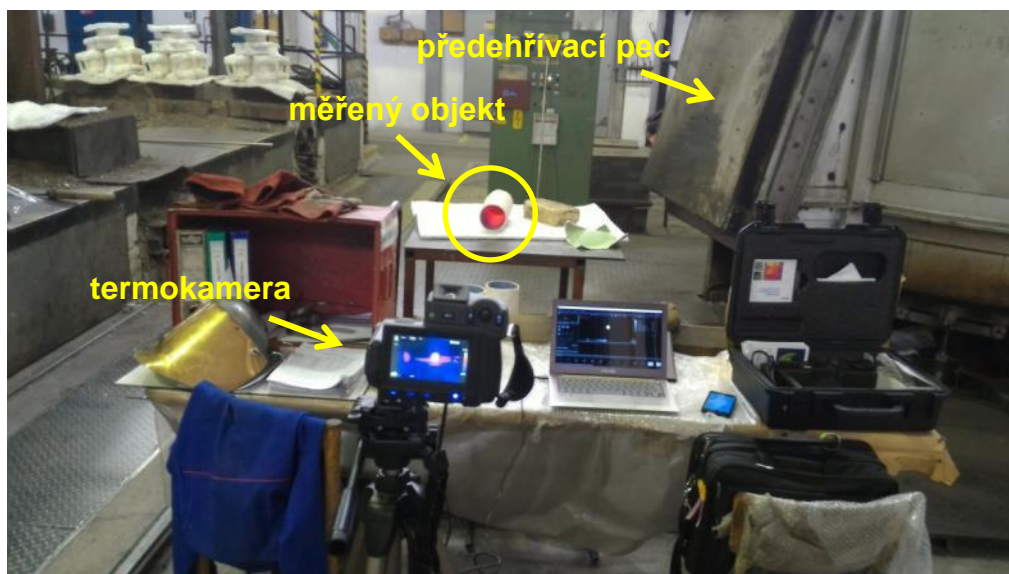
Skořepina **A** typu rozvaděč: 11 obalů

Skořepina **B** čtyř - lopatková : 12 obalů

Skořepina **C** typu segment: 13 obalů

Účel provedení experimentu měření teplot skořepin bylo zjištění teplot, na které se skořepiny ochladí v průběhu transportu a ustavení při odlévání ve vakuové peci. Dle technologického předpisu je důležité, aby pro zajištění odlití bezvadného odlitku byl dodržen čas od vyjmutí skořepiny z předehřívací pece do odlití. Tento čas je zpravidla předepisován maximálně do 4 minut. Po uplynutí této doby se musí skořepina vrátit do předehřívací pece. S tímto souvisí další účel provedení experimentu, tedy určení minimální doby potřebné ke znovu ohřátí na požadovanou předehřívací teplotu. V případě nedodržení stanoveného času pro odlití do skořepiny je nutné nechat skořepinu znovu dostatečně dlouho nahřát. Doba potřebná pro opětovné nahřátí by měla být co nejkratší z důvodu nutnosti udržování teploty taveniny ve vakuové peci. Vlivem zapříčiňujícím nedodržení předepsané doby pro odlití může být komplikace v průběhu technologického procesu, jako například poškození termočlánu před kontrolou teploty těsně před litím.

Pracoviště (viz obrázek 23) bylo uzpůsobeno tak, aby bylo možné teplotní změny měřit v co nejkratším intervalu od vyndání skořepiny z plynové předehřívací pece. Skořepiny byly založeny do pece s takovým předstihem, aby byly dostatečně prohřáté. Měřené skořepiny byly prohřívány v peci minimálně 6 hodin při teplotě 1100 °C.



Obrázek 23: pracoviště měření skořepin

5. OVĚŘENÍ POPSANÝCH METOD MĚŘENÍ TEPLOT

5.1 Testování bezdotykového měření taveniny na vakuové indukční peci KOPP VSP – 5

Pro zajištění procesu měření pomocí zapůjčených pyrometrů bylo potřeba zajistit zafixování polohy pyrometru. Pro tento účel sloužil magnetický držák a svorka používaná pro uchycení laboratorního skla. Pyrometry při měření byly z důvodu napájení a záznamu teplot připojeny k počítači. Pro nastavování parametrů a záznam naměřených teplot byl používán program Compact - conect.



Obrázek 24: uchycení pyrometru

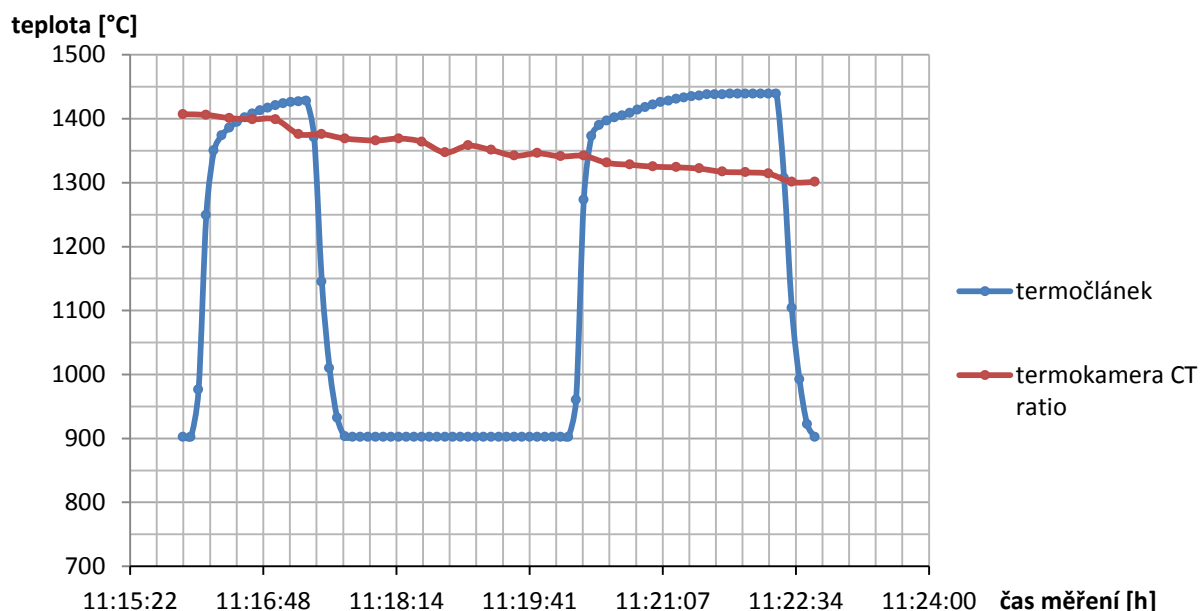
Snahou tohoto experimentu bylo dokázat nastavit hodnotu emisivity tak, aby pyrometr ukazoval shodnou teplotu naměřenou na termočlátku. V rámci tohoto experimentu byly odzkoušeny různé hodnoty emisivity. Při experimentu nedošlo oproti předpokladu k nastavení teploty naměřené na termočlátku. Problémy, které zapříčinily neúspěch experimentu, budou shrnuty na následujících stranách.

Měření s pyrometry CT laser M5 SF a CT ratio M1 se ukázalo pro měření na vakuové peci jako nevhodné. Jako nejvíce problematické se ukázal fakt, že laserové zaměřování měřeného místa nebylo přes průzorová skla vůbec viditelné. Docházelo k odrazení zaměřovacího paprsku a ani při vypnuté peci nebylo měřící místo viditelné. Vzhledem k nemožnosti zaměření přesného místa nebyly výsledky měření úspěšné.

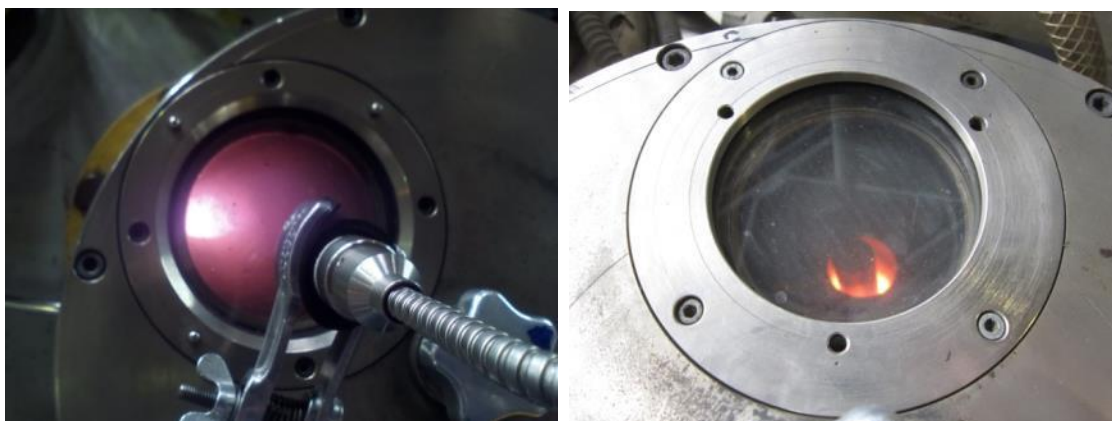
Problémem nastavení pyrometru do požadovaného místa měření je celkem velké omezení výhledu skrz průzor do prostoru tavicího kelímku. Pyrometr musel být zafixován pod značným úhlem od osy průzoru. Tím, že průzory jsou po stranách horní vakuové komory, dochází k částečnému zakrytí hladiny taveniny hranou kelímku.

Měření pomocí pyrometru CT laser M5 SF nebylo možné provést z důvodu, že nebylo možné zjistit, kam laserové zaměřování míří. Tento pyrometr má oproti pyrometru CT ratio M1 celkem masivní tělo a tak ani pouhým odhadem od oka nebylo možné zjistit místo zaměření. Docházelo k naměření nevypovídajících výsledků.

V případě měření s pyrometrem CT ratio M1 bylo možné alespoň částečně odhadnout měřené místo. Pokus o zaměření do taveniny vzhledem k neviditelnosti zaměřovacího bodu probíhal způsobem bez použití zaměřovacího laseru a to pouhým odhadem místa zaměření. Dle návodu byla nastavena hodnota slope na hodnotu 1,06. Hodnota slope vyjadřuje kvocient emisivity překrývajících se vlnových délek. V průběhu měření z mnoha neodpovídajících výsledků vyšla nejbližší naměřená teplota v porovnání se skutečnou teplotou naměřenou termočlánkem při nastavení emisivity na hodnotu 0,3 a slope na hodnotu 0,95. V grafu 2 je vidět, že teplota měření pyrometrem po celou dobu klesá, což může být způsobeno nevhodným zacílením do taveniny. Měření pyrometrem mohlo probíhat na části tavicího kelímku nebo části měřicí tyče.



Graf 2: Porovnání měření termočlánkem a termokamerou CT ratio



Obrázek 25: pohled do prostoru vakuové komory

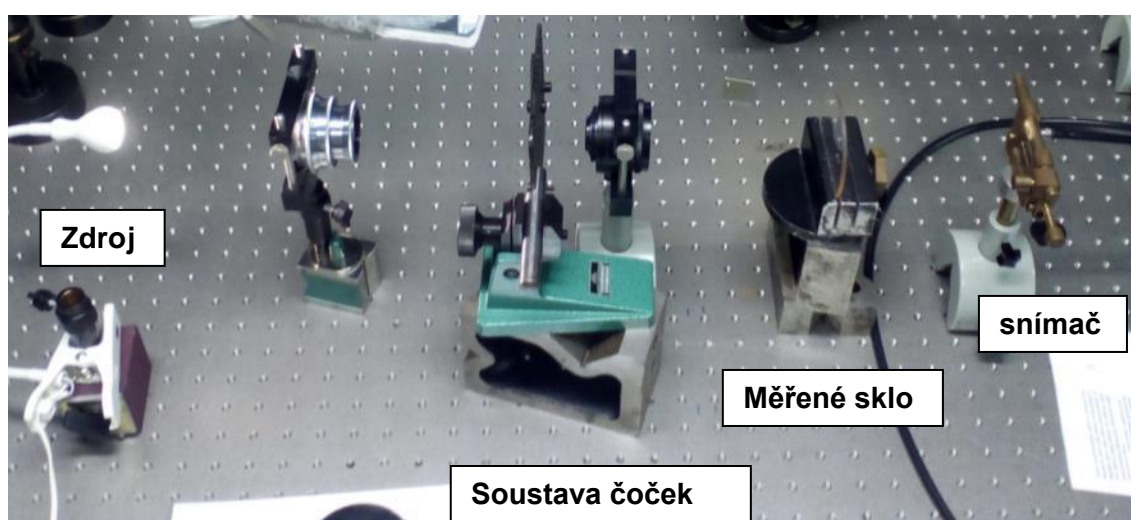
Proces nastavení teploty shodné s teplotou termočlánku byl problematický vzhledem k tomu, že při měření teploty termočlánkem měřící hlavice z velké části zakrývá vnitřní prostor tavicího kelímku. Prostor k měření taveniny v průběhu měření termočlánkem byl tedy ještě více omezen. Nastavování emisivity a kontrola s teplotou termočlánku byla komplikována i z důvodu zkoušení za běžného provozu pece. Pro nastavení vhodné emisivity byl jen velmi krátký čas v průběhu ponoření termočlánku. Záznamy z těchto měření nejsou kompletní z toho důvodu, že při úpravě emisivity musel být v programu zastaven průběh měření.

V procesu tavení na vakuové peci se mění velikost vsázky, v návaznosti na velikosti vsázky se mění velikosti kelímků a tím se mění i výška hladiny v kelímku. Pro správné zaměření taveniny by bylo zapotřebí při měření průzorem při každé takovéto změně nastavit správné místo zaměření a provést kalibraci. Ideálním řešením pro zajištění pevné fixace pyrometru bez nutnosti přestavování polohy pyrometru by bylo zajištění snímání pyrometrem blíže k ose měřící tyče s termočlánkem, tak aby měřící tyč a hrana kelímku neomezovala a nezakrývala místo měření.

Dalším problémem spojeným s měřením na vakuové peci je ten, že v průběhu tavení dochází k napařování kovu na povrch skla. Tato napařená vrstva značně ovlivňuje proces měření. V průběhu měření by tak mohlo docházet ke značnému zkreslení naměřené teploty. Vakuová pec je vybavena otočným systémem pro výměnu průzorových sklíček a klapkou, kterou lze uzavřením zamezit napařování skla. Při vystavení průzorového skla působení prostředí vakuové pece dojde k úplné neprůhlednosti již po pár hodinách. Pro zajištění měření pyrometrem, tak aby nedocházelo ke zkreslování výsledků, by tedy bylo zapotřebí zajistit co nejčistší povrch skla. Řešení tohoto problému pouze pomocí klapky se nezdá úplně ideální z důvodu působení prostředí pece právě z důvodu napařování vrstvy v průběhu měření. Vhodné

řešení tohoto problému by mohlo být zajištěno systémem, který by zajišťoval ofukování průzorového skla pomocí argonu. Tuto informaci jsem obdržel od pracovníků PBS Velká Bíteš, kde je toto řešení aplikováno v rámci bezkontaktního měření teploty na moderních vakuových pecích.

Pro zjištění transmisivity průzorových skel z křemičitého skla v závislosti na stavu povrchu jsem využil spektrometr Ocean optics Redtide s rozsahem měření vlnových délek od 200 nm do 880 nm. Pro tento experiment byla jako zdroj použita led lampa s bílým světlem. Soustava čoček sloužila k usměrnění záření do požadovaného místa. Naměřené hodnoty byly přes spektrometr zpracovány v programu Spectrasuite.



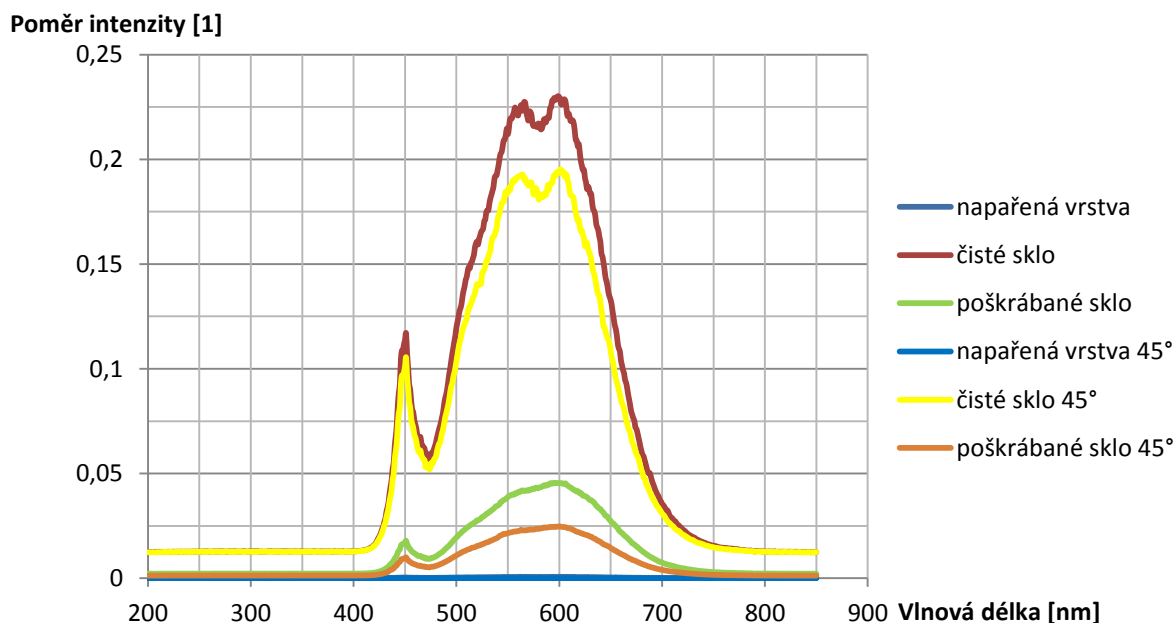
Obrázek 26: měření transmisivity průzorových skel

Testována byla tři průzorová křemenná skla s různým stavem povrchu. Testováno bylo čisté sklo bez mechanického poškození, sklo poškrábané sibalovou vatou a sklo s napařenou neprůhlednou vrstvou. Tyto skla byla testována v kolmém směru na směr záření a pod úhlem 45° .



Obrázek 27: měřená průzorová skla

Z následujícího grafu 3 je patrné, že úhel, pod kterým je měření prováděno, ovlivňuje propustnost. Čisté sklo dosahovalo nejlepších výsledků. Vlivem poškrábání skla došlo k velkému poklesu propustnosti. U skla s napařenou vrstvou kovu je propustnost prakticky nulová. Pro měření transmisivity bohužel nebylo možné zajistit spektrometr s rozsahem zahrnující vlnové délky infračerveného spektra, ve kterém pyrometry pracují. Při zjištění transmisivity skla v infračerveném spektru by se nabízela otázka, zda dochází k lepší propustnosti i v případě napařené vrstvy, která je pro oblast viditelného záření prakticky nulová. Spektrální propustnost napařované vrstvy v infračerveném spektru by mohlo být předmětem dalšího zkoumání. Při prokázání propustnosti v tomto spektru by bylo možné najít vhodný pyrometr, který by měřil i přes pro oko neprůhledné sklo, a odpadla by tím problematika spojená s udržováním průzorového skla v co nejlepší čistotě



Graf 3: Transmisivita průzorových skel

5.1.1 Návrh řešení

K odstranění zásadního problému zaměřování místa by bylo možné použít vhodnější pyrometr s očním zaměřováním, kde pomocí objektivu je možné precizně zaostřit na požadovaný měřený objekt. Odpadá tak nutnost vidět zaměřovací laser. Obsluha by tak i při změně kelímku či výšky hladiny mohla zaměřit novou polohu pro měření. Díky doostřování tak vzniká větší míra opakovatelnosti měření. Na tuzemském trhu takové pyrometry nabízí firma Workswell s.r.o zastupující firmu Keller. Bylo by zapotřebí dalších testů k vyzkoušení vhodného typu pyrometru, ať už jednospektrálního či dvouspektrálního. Jednou z možností by bylo použití ručního přenosného pyrometru, kdy by obsluha měřila přes průzor a ručně držela přístroj. Tato varianta se jeví jako celkem neergonomická vzhledem k tomu, že tavič potřebuje obsluhovat zařízení pece a ručním měřením by pro obsluhu vznikaly zbytečné komplikace. Výhodnější variantou by bylo stacionárně upevnit pyrometr s očním zaměřováním k průzoru s možností upravit a zaaretovat jeho polohu. Obsluha by tak měla volné ruce, byla by možnost v případě výměny kelímku upravit ideální polohu a přenastavit zaostření. Další variantou, kterou nabízí firma Keller, je použití místo očního zaměřovače integrovanou kameru, díky které je možné nastavit místo měření a na obrazovce sledovat průběh dění v peci. Cena za spektrální pyrometr s očním zaměřováním se pohybuje kolem 90 000 Kč. Cena zkoušeného dvouspektrálního pyrometru CT ratio se pohybuje do 70 000 Kč, jednospektrální pyrometr CT laser M5 SF pak do 30 000 Kč.

5.2 Testování ochranných trubic termočlánků na vakuové indukční peci KOPP VSP – 5

5.2.1 Testování Metamic 829 (S363F)

Testováno bylo pět ochranných trubic. Výsledky počtu měření než došlo k poškození je shrnuto níže.

Trubice č. 1:

Počet dosažených měření: **30**

Měřená slitina: Rene 108, Inconel 738LC

Měřená licí teplota: 1440 °C až 1550 °C

Důvodem vyřazení bylo přitavení termočlánku k trubici taveninou vlivem vzniku trhlin.

Došlo ke zničení termočlánku.

Trubice č. 2:

Počet dosažených měření: **73**

Měřená slitina: Rene 108, Inconel 738LC, Inconel 939

Měřená licí teplota: 1410 °C až 1550 °C

Důvodem vyřazení bylo přitavení termočlánku k trubici taveninou vlivem vzniku trhlin.

Došlo ke zničení termočlánku.

Trubice č. 3:

Počet dosažených měření: **24**

Měřená slitina: Rene 108, Inconel 738LC, Inconel 939

Měřená licí teplota: 1410 °C až 1550 °C

Důvodem vyřazení byl vznik trhlin. Nedošlo ke zničení termočlánku

Trubice č. 4:

Počet dosažených měření: **13**

Měřená slitina: Inconel 939

Měřená licí teplota: 1470 °C

Důvodem vyřazení byl vznik trhlin. Nedošlo ke zničení termočlánku.

Trubice č. 5:

Počet dosažených měření: **12**

Měřená slitina: Inconel 939

Měřená licí teplota: 1470°C

Důvodem vyřazení bylo přitavení termočlánku k trubici taveninou vlivem vzniku trhlin.

Nedošlo ke zničení termočlánku.

Na následujícím obrázku 28 jsou ukázky trhlin způsobených ponořením trubic do taveniny:



Obrázek 27: poškozené ochranné trubice vlivem ponoru do taveniny

5.2.2 Testování trubic Lunit 73 (C610) a Luxal 203 (C609)

Pro testování bylo připraveno pět ochranných trubic od každého typu. Trubice byly odzkoušeny ponořením do taveniny o lici teplotě 1450 °C do slitiny Inconel 738 LC.

V případě zkoušení trubice Lunit 73 (C610) byla trubice nad slitinou nahřívána 40 s. Po tomto předehřátí byla vložena do taveniny. Ihned po ponoření došlo k roztržení trubice, kde zbyla pouze část trubice neponořená do taveniny. Došlo k okamžitému zničení termočlánku. Při zkoušení trubice Luxal 203 (C609) byla trubice nad taveninou pro jistotu nahřívána 50 s. Došlo ke změření taveniny, ale po vytažení nad hladinu taveniny došlo k roztržení trubice stejně jako v případě předchozí zkoušky. V tomto případě nedošlo k poškození termočlánku. Výsledkem je u obou trubic jedno měření, a to v případě Lunit 73 (C610) ani nebylo dokončeno. Vzhledem k tomu, že trubice byly nahřívány před ponořením relativně dlouhou dobu a i přes tento fakt došlo k totálnímu poškození trubice, bylo testování dalších trubic z tohoto materiálu přerušeno. V obou případech se jedná o nevyhovující materiál pro účely měření taveniny na vakuové peci i přes dodržení doporučené maximální teploty použití. Trubice i v případě předehřevu evidentně nevydržely teplotní šok při ponoru do taveniny. Na následujících snímcích je vidět stav trubic po jednom měření.



Obrázek 28: poškozená ochranná trubice Lunit



Obrázek 29: poškozená ochranná trubice Luxal

5.2.3 Výsledky měření

Z hlediska nákladů na jedno měření vychází jako nejlepší varianta stávající metoda, tedy používání ochranných trubic z křemenného skla. Cena jednoho kusu trubice je 35 Kč, náklady na jedno měření jsou tedy přibližně 18 Kč. Výsledkem zkoušek trubic Metamic 829 (S363F) je průměrná výdrž trubice 30 měření. Nejdelší výdrž dosáhla trubice č. 2 s počtem 73 měření. Z hlediska nákladů i nejvyšší dosažený počet měření zdaleka nedosahuje na hodnotu potřebnou alespoň k vyrovnání se nákladům na jedno měření při použití trubic z křemenného skla. Při ceně 3000 Kč/kus by bylo zapotřebí dosáhnout 167 měření. Této hodnoty nebylo ani zdaleka dosaženo. Co se týče trubic Lunit 73 (C610) a Luxal 203 (C609), bylo testování po prvním vzorku přerušeno z důvodu poškození již v průběhu prvního měření. V tomto případě z hlediska nákladů při ceně trubice Lunit 260 Kč/ks by bylo potřeba dosáhnout alespoň 15 měření. U trubice Luxal při ceně 640 Kč/ks by bylo potřeba dosáhnout 36 měření.

5.3 Měření vybraných vzorků skořepin

Měření skořepin bylo prováděno pomocí termokamery FLIR T640, viz obrázek 31.

Základní technické parametry [30]:

Rozlišení senzoru: 640 x 480 px

Teplotní rozsah: -40 až +2000 °C

Přesnost: $\pm 2^{\circ}\text{C}$ nebo 2 % z naměřené teploty

Teplotní citlivost: $< 0,03^{\circ}\text{C}$



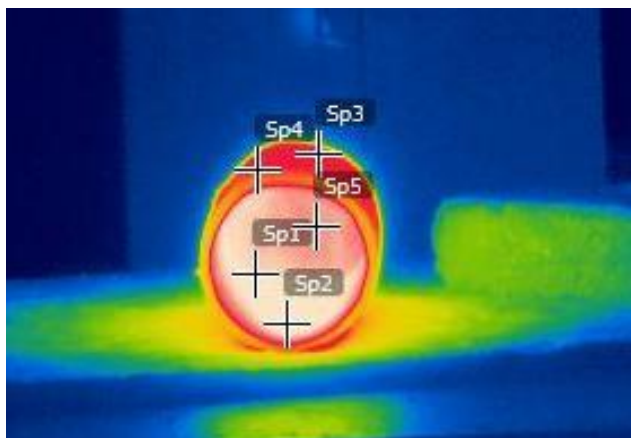
Obrázek 30: termokamera FLIR T640 [30]

Vyhodnocování všech následujících snímků bylo prováděno v programu FLIR Tools při následujícím nastavení:

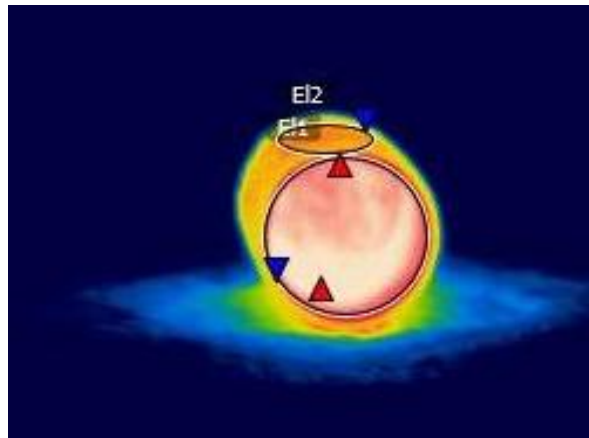
Emisivita:	0,95
Odraživé teplo:	30°C
Frekvence snímků:	2s
Vzdálenost:	2m
Atmosférická teplota:	30 °C
Relativní vlhkost:	50%

5.3.1 Chladnutí skořepiny X bez zábalu – 8 obalů

Vyhodnocování chladnutí skořepiny X bez zábalu bylo provedeno dvěma způsoby. Prvním způsobem, který je vidět na *obrázku 32*, bylo vyhodnocení pomocí zvolených jednotlivých bodů v určitých částech skořepiny. Bylo vybráno pět bodů: tři body pro sledování teploty uvnitř skořepiny a zbylé dva body na vnější části skořepiny. Bod Sp1 leží na vnitřní straně skořepiny přibližně v polovině vzdálenosti od ústí skořepiny. Bod Sp2 leží v blízkosti ústí skořepiny. Bod Sp5 leží na místě dna skořepiny. Body Sp3 a Sp4 leží na vnějším obalu skořepiny. Druhým způsobem vyhodnocení bylo sledování určitého výseku pole, kde je možné sledovat maximum, minimum a průměr sledované oblasti. V tomto případě byly zvoleny k vyhodnocení dvě oblasti viditelné na *obrázku 33*, vnější povrch skořepiny označen E12 a vnitřní dutina skořepiny označena E11.



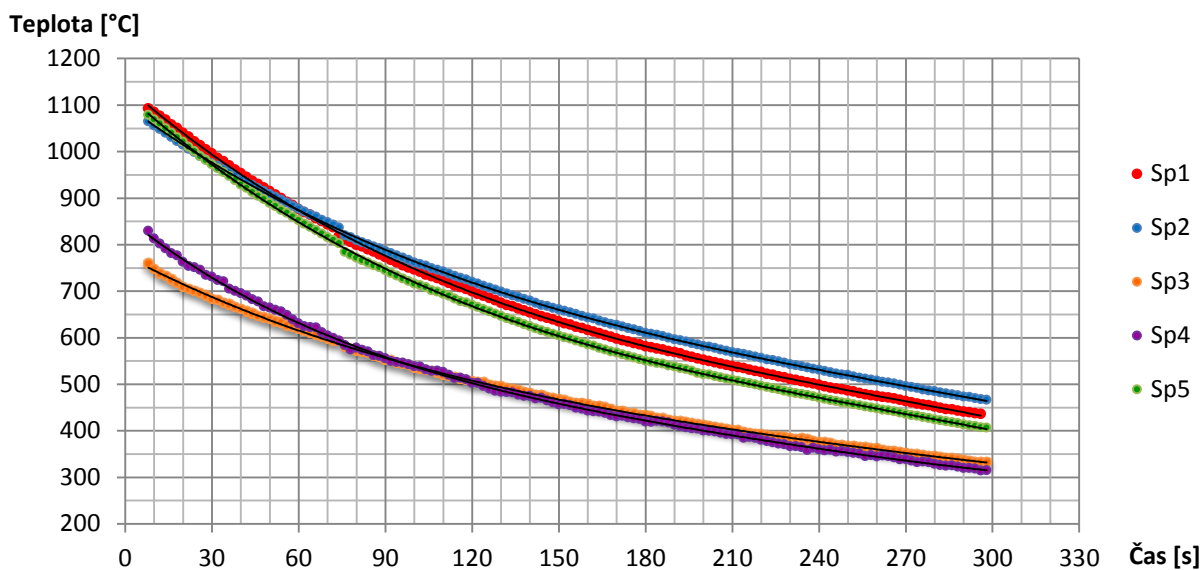
Obrázek 32: vyhodnocení teploty pomocí bodů



Obrázek 31: vyhodnocení teploty pomocí pole

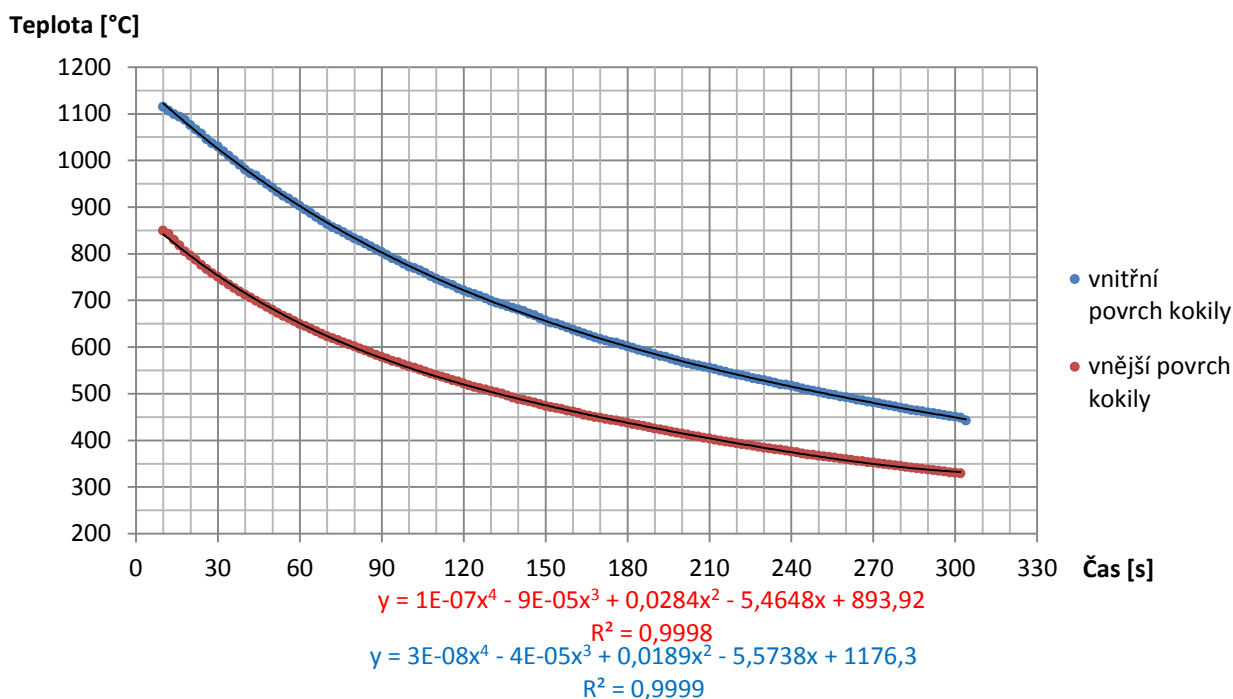
Při porovnání v *grafu 4* je zřejmý velice podobný průběh chladnutí, proto v následujících vyhodnoceních dalších skořepin bude zobrazována průměrná teplota měřených oblastí a to především z důvodu jednoduššího nalezení a porovnání měřené oblasti, než je tomu v případě vyhodnocování pomocí jednotlivých bodů.

Záznam měření je v grafech zaznamenán v čase 10 vteřin od vyndání z pece. Důvodem je problematické snímání požadovaného místa v průběhu vyjímání formy. Z výrobního hlediska je tato hodnota víceméně nepotřebná z důvodu potřebné manipulace a transportu skořepiny na místo, tedy v tomto čase není technicky možné provést odlití.



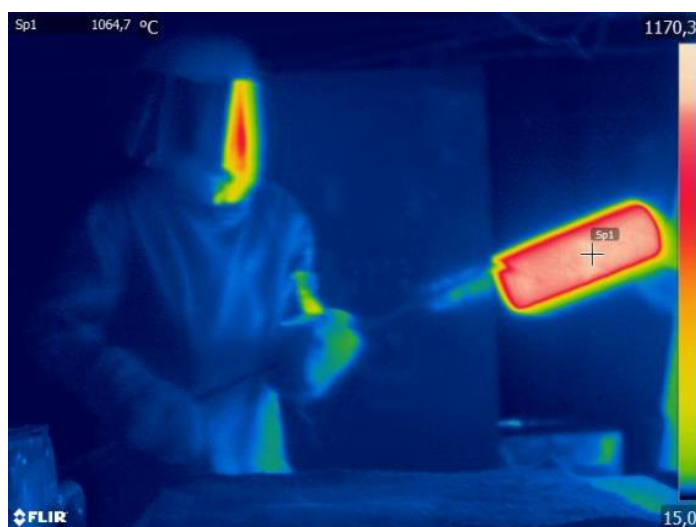
Graf 4: Chladnutí skořepiny X (8 obalů) bez zábalu - vybrané body

Z výsledků je patrný velký teplotní rozdíl mezi vnějším povrchem skořepiny a vnitřní částí. Po vyndání z předehřívací pece je v prvních 10 vteřinách patrný velmi výrazný pokles teploty a to přibližně o 250 °C. Průběh chladnutí popisuje křivka chladnutí v grafu 4 a grafu 5.



Graf 5: Chladnutí skořepiny X (8 obalů) bez zábalu - průměr teploty v dané oblasti

Na obrázku 34 ze záznamu je vidět v čase 2 vteřin od vyndání z pece pokles teploty z hodnoty 1100 °C na hodnotu 1064,7 °C. Průběh chladnutí a velký teplotní rozdíl mezi



Obrázek 33: *Skořepina X* dvě vteřiny po vytažení z pece

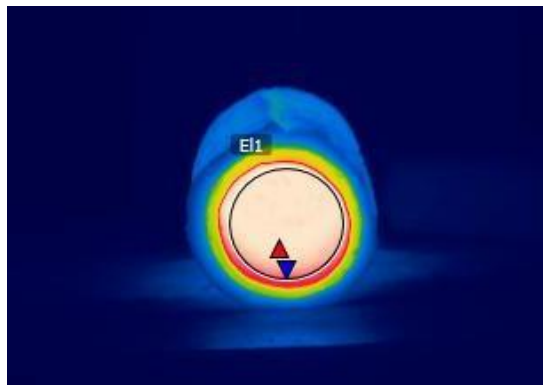
vnitřní a vnější částí skořepiny mohl být také z části způsoben zkreslením výsledku polohou snímání záznamu. Zatímco vnitřní povrch je snímán téměř kolmo vnější povrch není snímán kolmo a vnější plocha skořepiny je mnohem méně viditelná což je zřejmé z obrázků 32 a 33.

V následující tabulce je záznam teplot v závislosti na čase. Dále je v tabulce zaznamenán průměrný pokles teploty v jednotlivých časových rozmezích zvolených po 30 vteřinách.

Chladnutí skořepiny X bez zábalu po časových úsecích							
vnitřní povrch skořepiny X				vnější povrch skořepiny X			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]	čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	1029,20	10 až 30	4,47	30	749,93	10 až 30	4,58
60	902,45	31 až 60	3,89	60	649,16	31 až 60	3,14
90	803,45	61 až 90	3,30	90	578,38	61 až 90	2,36
120	721,43	91 až 120	2,73	120	521,54	91 až 120	1,89
150	656,70	121 až 150	2,16	150	473,25	121 až 150	1,61
180	601,36	151 až 180	1,84	180	437,02	151 až 180	1,21
210	555,13	181 až 210	1,54	210	403,41	181 až 210	1,12
240	516,44	211 až 240	1,29	240	375,65	211 až 240	0,93
270	481,14	241 až 270	1,17	270	351,77	241 až 270	0,80
300	450,05	271 až 300	1,04	300	330,12	271 až 300	0,72

5.3.2 Chladnutí skořepiny X - zábal 13 mm Sibrál

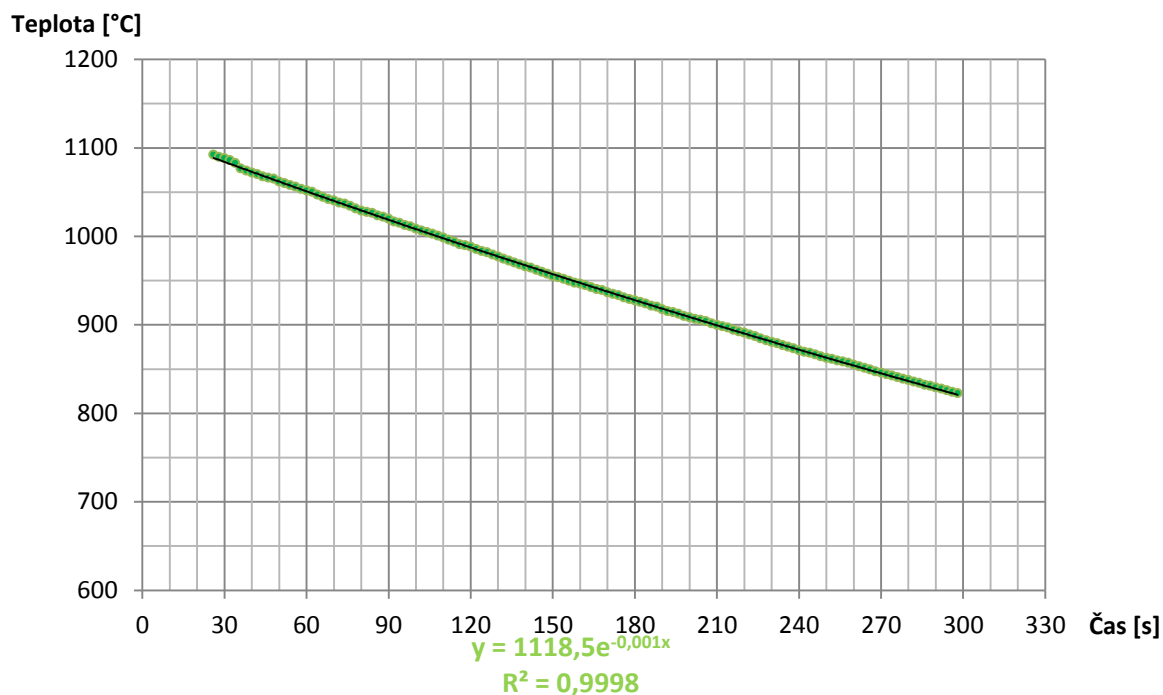
Na rozdíl od předchozího měření bez izolace nenastává při zábalu izolačním materiálem ihned po vyndání z pece k výraznému ochlazení, ale pokles teploty při ochlazování zůstává po celou dobu víceméně konstantní. Teplotní minimum se v měřené oblasti po celou dobu měření vyskytuje u ústí skořepiny, kde dochází k většímu poklesu teplot. To je patrné z obrázku 35, kde modrý trojúhelník značí teplotní minimum a červený trojúhelník značí teplotní maximum dané oblasti.



Obrázek 34: skořepina X se zábalem 13 mm

Oproti skořepině X bez zábalu, kde po 300 vteřinách došlo k ochlazení vnitřní části skořepiny na hodnotu 448 °C, zábal s 13 mm Sibrálovou izolací zůstal po 300 vteřinách na hodnotě 818 °C. Hodnoty 818°C dosáhla skořepina bez zábalu přibližně v 86. vteřině. Z výše uvedeného vyplývá, že aplikací Sibrálu 13 mm se prodloužila doba k dosažení této teploty o 248%.

Chladnutí skořepiny X se Sibrálem 13			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	1088,15	26 až 30	0,97
60	1051,67	31 až 60	1,22
90	1019,73	61 až 90	1,06
120	988,11	91 až 120	1,05
150	954,77	121 až 150	1,11
180	927,52	151 až 180	0,91
210	899,47	181 až 210	0,93
240	871,09	211 až 240	0,95
270	845,66	241 až 270	0,85
300	821,42	271 až 300	0,81



Graf 6: Chladnutí skořepiny X (8 obalů) – zábal Sibral 13 mm

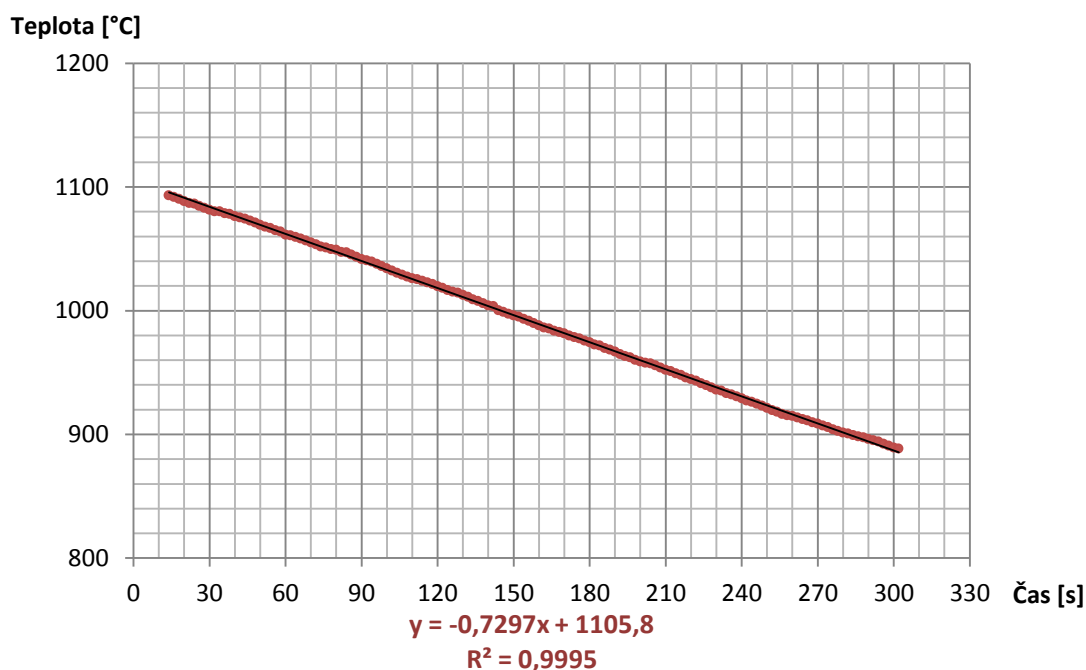
5.3.3 Chladnutí skořepiny X - zábal 25 mm Sibral

Měření a vyhodnocování skořepiny X se zábalem o tloušťce 25 mm bylo prováděno stejným způsobem jako u zábalu 13 mm. Byl sledován průměr vybrané oblasti. Teplotní minimum se opět vyskytovalo u ústí skořepiny.

Použitím Sibralu o tloušťce 25 mm je znovu patrný menší pokles teploty v závislosti na čase. Po vyjmutí z pece stejně jako u předchozího zábalu nedochází při vyjmutí z pece k výraznějšímu ochlazování, průběh chladnutí je více méně konstantní. Záznam hodnot ochlazování je v následující tabulce

Chladnutí skořepiny X se Sibralem 25			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	1081,61	14 až 30	0,72
60	1061,35	31 až 60	0,68
90	1041,62	61 až 90	0,66
120	1019,76	91 až 120	0,73
150	996,22	121 až 150	0,78
180	974,39	151 až 180	0,73
210	952,03	181 až 210	0,75
240	928,99	211 až 240	0,77
270	908,57	241 až 270	0,68
300	889,27	271 až 300	0,64

Zábal s 25 mm Sibralovou izolací zůstal po 300 vteřinách na hodnotě 889 °C. Hodnoty 889°C dosáhla skořepina bez zábalu přibližně v 63. vteřině. Z výše uvedeného vyplývá, že aplikací Sibralu 25 mm se prodloužila doba k dosažení této teploty o 376%



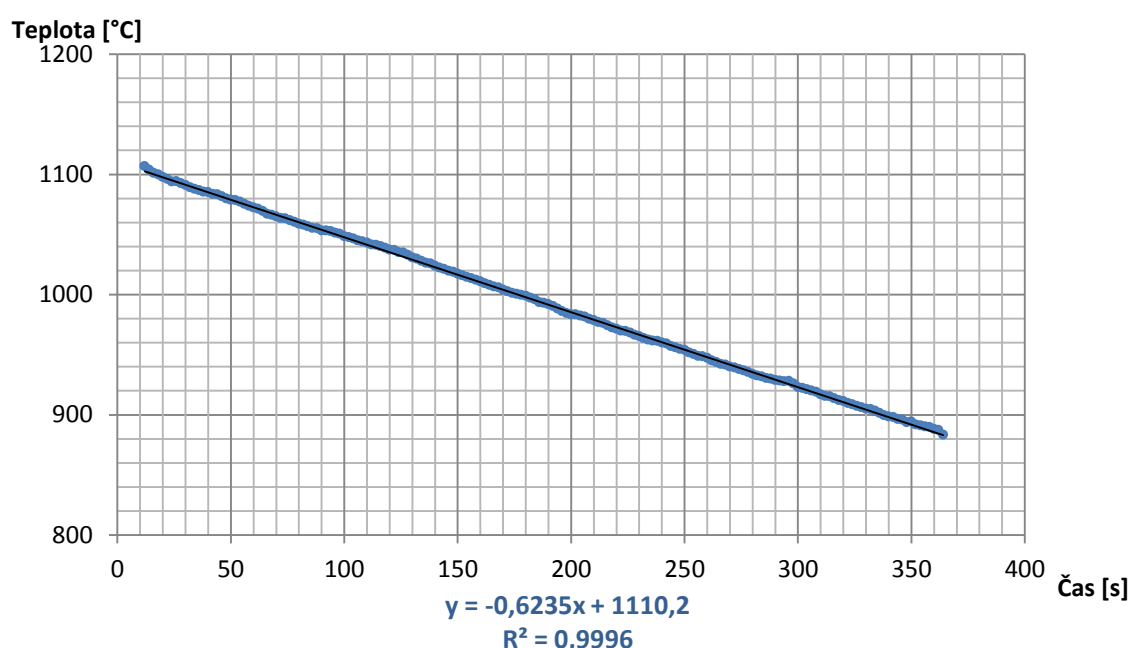
Graf 7: Chladnutí skořepiny X (8 obalů) – zábal Sibral 25 mm

5.3.4 Chladnutí skořepiny X– zábal 38 mm Sibral

Měření a vyhodnocování skořepiny se záballem o tloušťce 38 mm bylo prováděno stejným způsobem jako u předchozích zábalů. Byl sledován teplotní průměr vybrané oblasti. Teplotní minimum se opět vyskytovalo u ústí skořepiny.

Průměrná naměřená teplota v čase 300 vteřin od vyndání z pece je v případě obalení Sibralem 40 mm na hodnotě 923 °C. V případě nezabalené skořepiny tato teplota odpovídá času 55 vteřin. Z výše uvedeného vyplývá, že aplikací Sibralu 40 mm se prodloužila doba k dosažení této teploty o 445%.

Chladnutí skořepiny X se Sibralem 40			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	1090,85	12 až 30	0,88
60	1072,31	31 až 60	0,62
90	1053,15	61 až 90	0,64
120	1037,28	91 až 120	0,53
150	1017,13	121 až 150	0,67
180	998,75	151 až 180	0,61
210	978,63	181 až 210	0,67
240	960,05	211 až 240	0,62
270	940,08	241 až 270	0,67
300	923,03	271 až 300	0,57

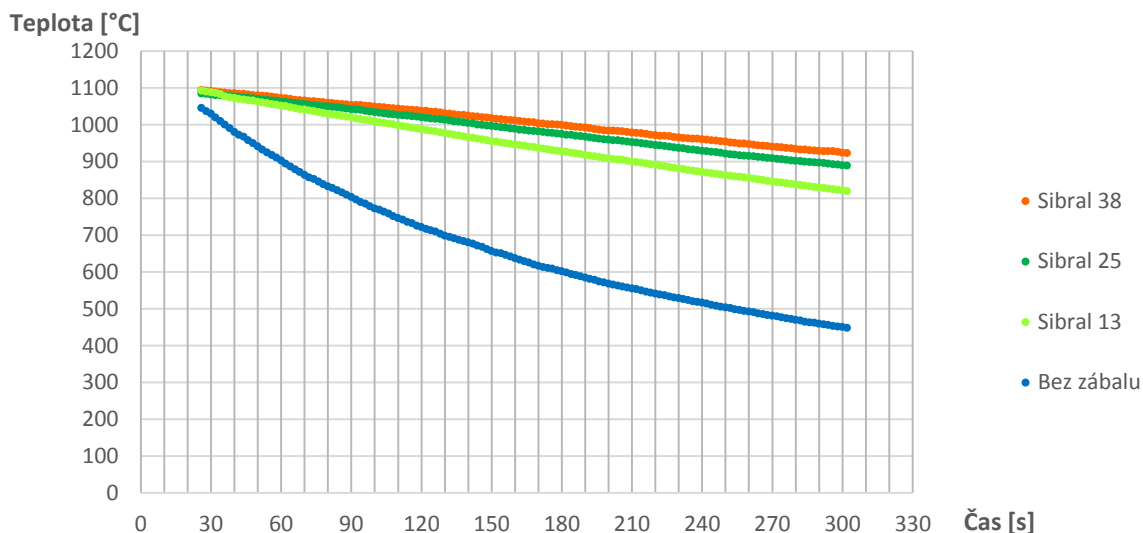


Graf 8: Chladnutí skořepiny X (8 obalů) – zábal Sibral 38 mm

5.3.5 Porovnání chladnutí skořepin X v závislosti na tloušťce zábalu

V této kapitole je v *grafu 9* zobrazeno porovnání průběhu chladnutí skořepin s 8 vrstvami obalu a různou tloušťkou zábalů. Záznam chladnutí je vyhodnocen do 5 minut od vyndání z pece. Z grafu je viditelný rozdíl v poklesu teploty při použití jakékoliv tloušťky Sibralu oproti nezabalené skořepině.

Zatímco po 5 minutách vnitřní část skořepiny bez zábalu klesla na teplotu 450 °C, hodnota se Sibralovým zábalem 13 mm na 821 °C. Zábal s 25 mm Sibralu na 889 °C a zábal s 38 mm na hodnotu 923 °C. Z výsledků vyplývá, že Sibral 25 mm oproti 13 mm udržel v čase 5 minut teplotu o 68 °C vyšší. V případě porovnání Sibralu 13 mm a

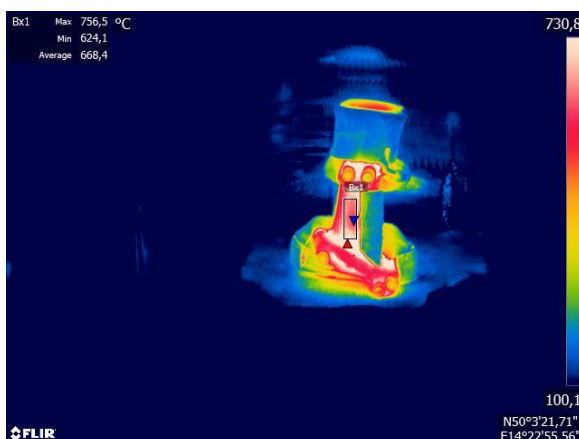


Graf 9: Porovnání jednotlivých zábalů

38 mm hodnota rozdílu 102 °C. Při porovnání Sibralu 25 mm a 38 mm je mezi nimi rozdíl 34 °C.

5.3.6 Chladnutí skořepiny C

Chladnutí skořepiny C bylo provedeno ve dvou variantách. První měření probíhalo ve spodní komoře vakuové pece tak, aby byl co nejdříve simulován technologický proces manipulace, založení a chladnutí do maximálně povolené doby. Skořepina od vyndání z předehřívací pece byla co nejrychleji transportována do spodní vakuové komory, komora byla neprodleně uzavřena a odsáta jako při běžném procesu lití na vakuové peci. Měření průběhu chladnutí ve vakuové peci bylo prováděno zaznamenáním jednotlivých snímků v určité fázi chladnutí. Průběh chladnutí ve spodní komoře vakuové pece nebylo možné zaznamenat průběžným záznamem, proto byly vytvořeny tři snímky. První snímek zaznamenává teploty v okamžiku vyjmutí skořepiny z předehřívací pece, druhý snímek těsně před uzavřením komory, na třetím snímku je zaznamenána teplota bezprostředně po otevření komory. Na následujícím obrázku 36 je zaznamenán moment otevření spodní komory vakuové pece po uplynutí doby 4 minut od vytažení z předehřívací pece.

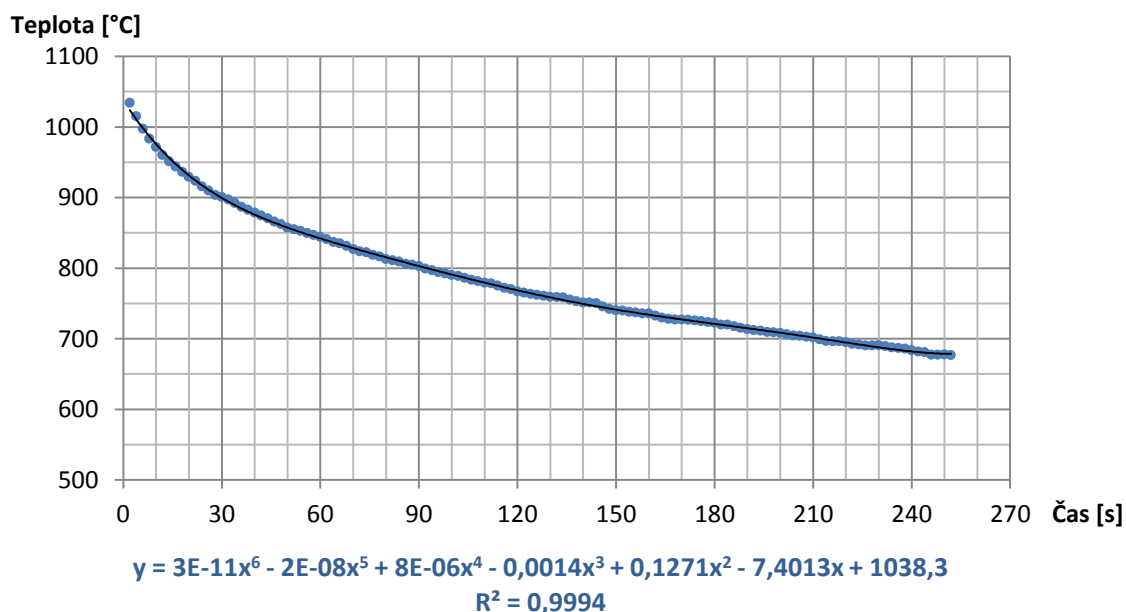


Obrázek 35: vakuová pec – spodní komora

Chladnutí skořepiny C - 13 obalů			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	900,58	2 až 30	4,76
60	843,87	31 až 60	1,89
90	802,88	61 až 90	1,37
120	766,84	91 až 120	1,20
150	740,38	121 až 150	0,88
180	722,41	151 až 180	0,60
210	701,49	181 až 210	0,70
240	683,71	211 až 240	0,59

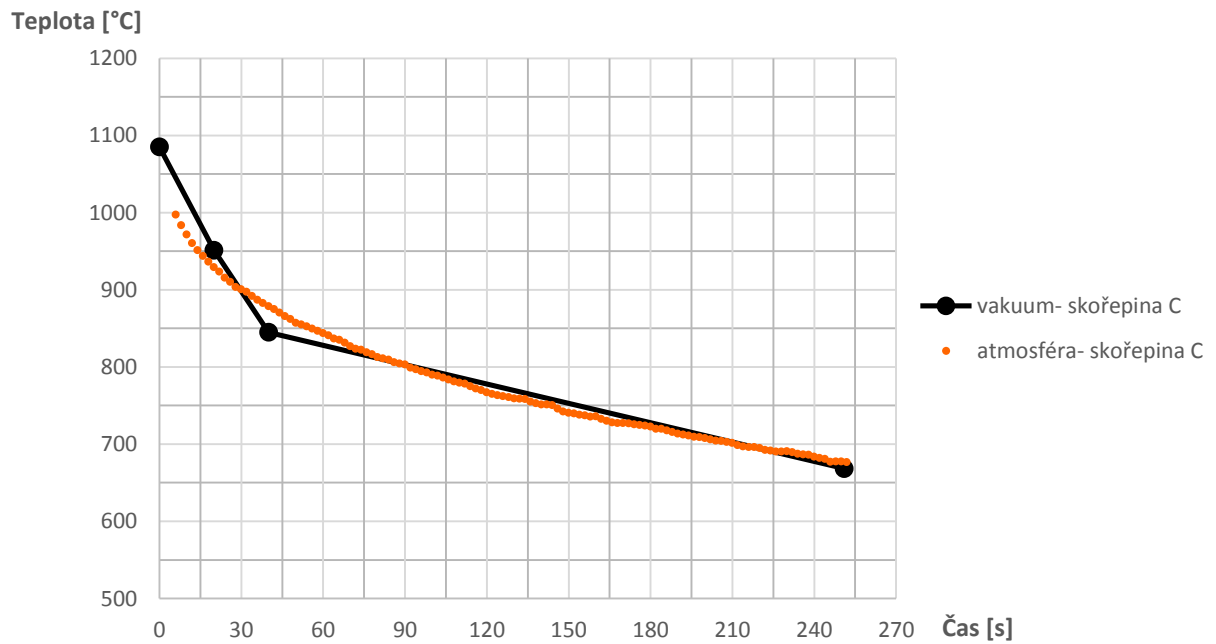
Od vytažení z předehřívací pece do otevření spodní komory vakuové pece uběhlo 251 vteřin a během této doby došlo k ochlazení z 1085 °C na 668 °C. Za tuto dobu tedy skořepina v měřené oblasti zchladla o 417 °C.

Další průběh měření ochlazování skořepiny C probíhal stejně jako v případě testování skořepin X na atmosféře v blízkosti předehřívací pece. Tento záznam byl vytvořen průběžným záznamem v sekvencích po 2 vteřinách. Vyhodnocovaná oblast byla zvolena v části listu lopatky stejně jako v případě chladnutí ve vakuu. Ochlazování skořepiny probíhalo z teploty 1100 °C. V tabulce výše jsou shrnuty naměřené teploty v závislosti na čase a průměrná rychlost ochlazování v daných časových úsecích určených po 30 vteřinách.



Graf 10: Chladnutí skořepiny C

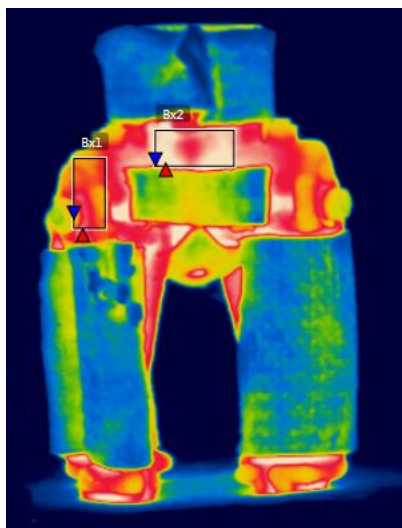
Následující graf ukazuje porovnání chladnutí skořepiny C ve vakuu a na vzduchu. I přes mnohem menší počet bodů zaznamenaných při měření ve vakuové komoře oproti záznamu z ochlazování na vzduchu je patrné, že v čase 251 vteřin, tedy v čase vyndání skořepiny z vakuové pece, jsou hodnoty téměř shodné. V případě chladnutí na vzduchu tato hodnota byla 677 °C v případě chladnutí ve vakuu 668 °C. Lze tedy říci, že v případě chladnutí na vzduchu nebo ve spodní komoře vakuové pece dochází k téměř shodnému průběhu chladnutí.



Graf 11: Porovnání chladnutí ve vakuu a na vzduchu

5.3.7 Chladnutí skořepiny B

Skořepina B s dvanácti obaly byla ochlazována na vzduchu z teploty 1100 °C a vyhodnocení bylo prováděno ve dvou oblastech. V oblasti zámkové části označená na obrázku 38 jako Bx1 a v oblasti pod licí jamkou v oblasti označené Bx2.

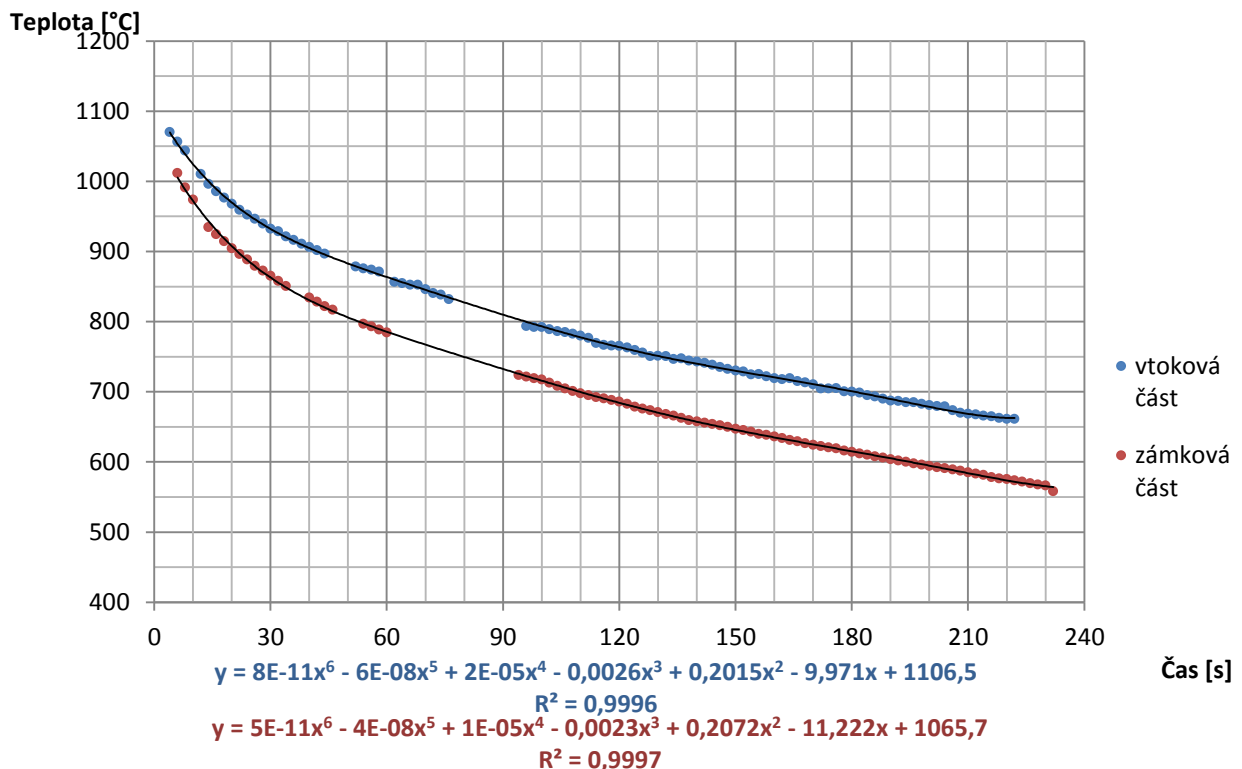


Obrázek 36: termogram skořepiny B

V následující tabulce je záznam teplot v závislosti na čase, dále je v tabulce zaznamenán průměrný pokles teploty v jednotlivých časových rozmezích zvolených po 30 vteřinách.

Chladnutí skořepiny B - 12 obalů							
Oblast pod licí jamkou				Oblast zámkové části			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]	čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	958,88	4 až 30	4,77	30	864,93	6 až 30	5,37
60	878,51	31 až 60	2,15	60	784,35	31 až 60	2,75
90	810,05	61 až 90	2,91	90	733,29	61 až 90	2,03
120	786,29	91 až 120	1,57	120	685,60	91 až 120	1,46
150	746,37	121 až 150	1,20	150	646,87	121 až 150	1,29
180	718,87	151 až 180	1,21	180	614,27	151 až 180	1,09
210	679,31	181 až 210	0,84	210	585,10	181 až 210	0,97

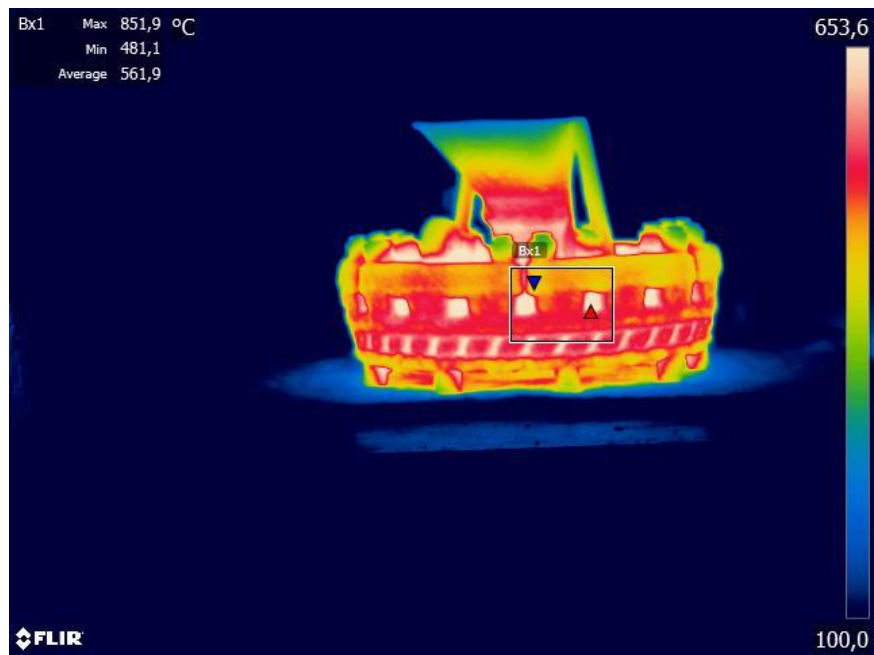
Z grafu je patrné, že průběh chladnutí skořepiny má podobný průběh v obou oblastech. V zámkové části ale dochází k rychlejšímu ochlazování, to je pravděpodobně způsobeno menší tloušťkou skořepiny v této oblasti vlivem vnějšího zaoblení a větším vystavení okolního prostředí v porovnání s nejteplejšími místy a vnitřním zaoblením v místě pod licí jamkou, kde je pravděpodobně větší vrstva skořepiny a také není toto místo tolik vystaveno působení vnějšího prostředí. V grafu je mezi 60 a 90 vteřinami záznam přerušen z důvodu zakrytí termokamery v průběhu měření.



Graf 12: Chladnutí skořepiny B

5.3.8 Chladnutí skořepiny A

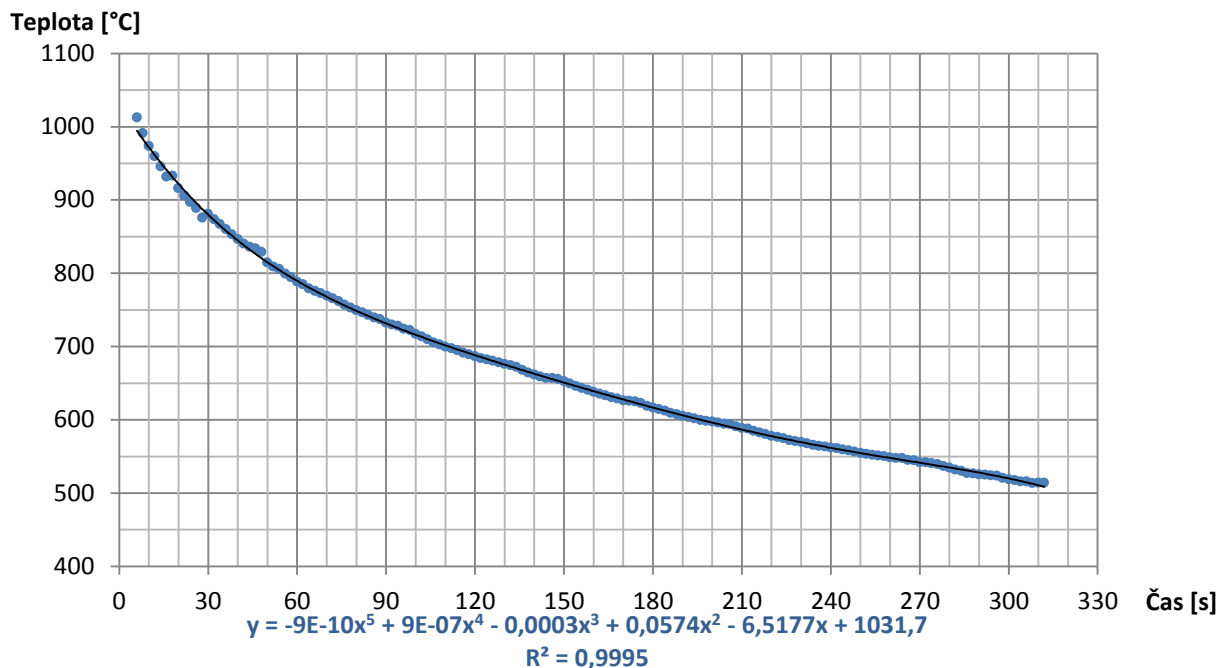
Skořepina A s jedenácti obaly byla měřena v oblasti viditelné na *obrázku 39*. Chladnutí bylo prováděno na vzduchu. Snímek je pořízen v čase 4 minut od vytažení z předehřívací pece. Na snímku je dobře viditelné, jak skořepina chladne nejvíce v odlehlejších místech vystavených okolnímu prostředí. Nejvíce je to patrné v oblasti licí jamky. Oproti tomu k pozvolnějšímu chladnutí dochází v oblasti mezi rozvaděčem a licí jamkou.



Obrázek 37: termogram skořepiny A

V následující tabulce je záznam teplot v závislosti na čase, dále je v tabulce zaznamenán průměrný pokles teploty v jednotlivých časových rozmezích zvolených po 30 vteřinách

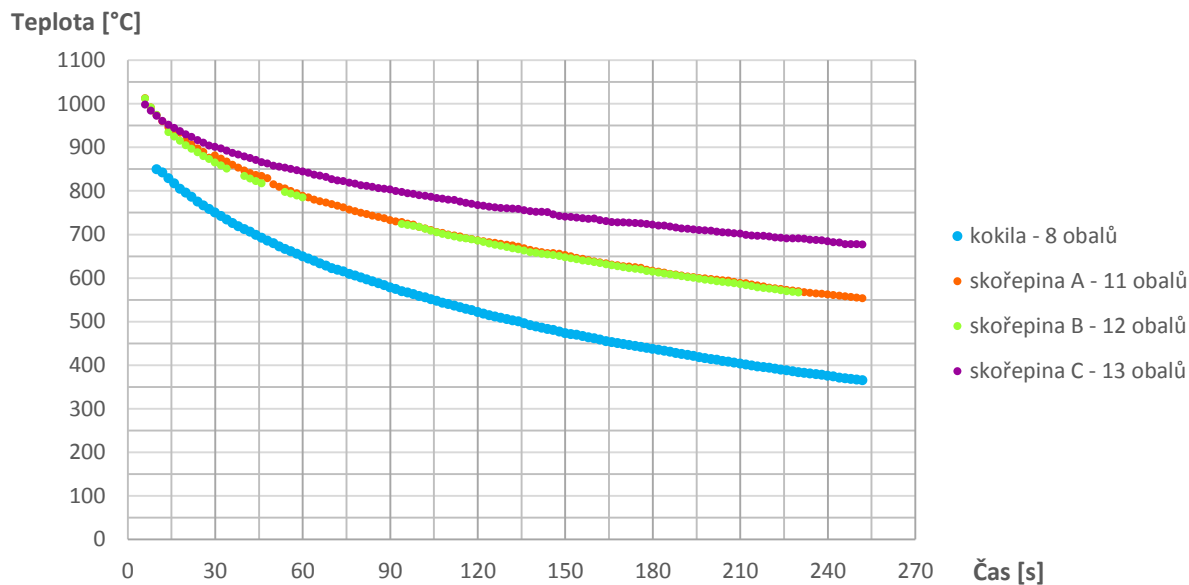
Chladnutí skořepiny A – 11 obalů			
čas [s]	teplota[°C]	časové rozmezí [s]	průměrný úbytek [°C/s]
30	880,88	6 až 30	5,47
60	788,10	31 až 60	3,09
90	732,28	61 až 90	1,86
120	686,25	91 až 120	1,53
150	652,32	121 až 150	1,13
180	616,51	151 až 180	1,19
210	588,51	181 až 210	0,93
240	561,93	211 až 240	0,89
270	541,56	241 až 270	0,68
300	518,54	271 až 300	0,77



Graf 13: Chladnutí skořepiny A

5.3.9 Porovnání skořepin s různým počtem obalů

Na následujícím grafu 15 je shrnutí výsledků naměřených oblastí u skořepin s rozdílnými počty obalů. Je vidět, že s rostoucím počtem obalů klesá rychlost ochlazování. Pokud vezmeme pro porovnání hodnotu 210 vteřin od vytažení z předehřívací pece, rozdíly jsou následující. Skořepina X s 8 obaly je na hodnotě 403 °C oproti tomu skořepina C s 13 obaly na 701 °C. Rozdíl 5 obalů v tomto případě činí rozdíl 298 °C. Skořepina B je na hodnotě 585 °C skořepina A na hodnotě 588 °C. V tomto případě není skoro žádný rozdíl mezi skořepinou s 11 a 12 obaly, to je s největší pravděpodobností způsobeno místem měření. Vyhodnocována je v případě skořepiny B oblast v zámkové části, která chladla nejrychleji. Teplotní rozdíly budou ovlivňovány nejen tloušťkou skořepiny, ale také tvarem skořepiny. V případě skořepiny A a B v porovnání se skořepinou X je rozdíl teplot 182 °C. V porovnání skořepiny A a B se skořepinou C 116 °C.

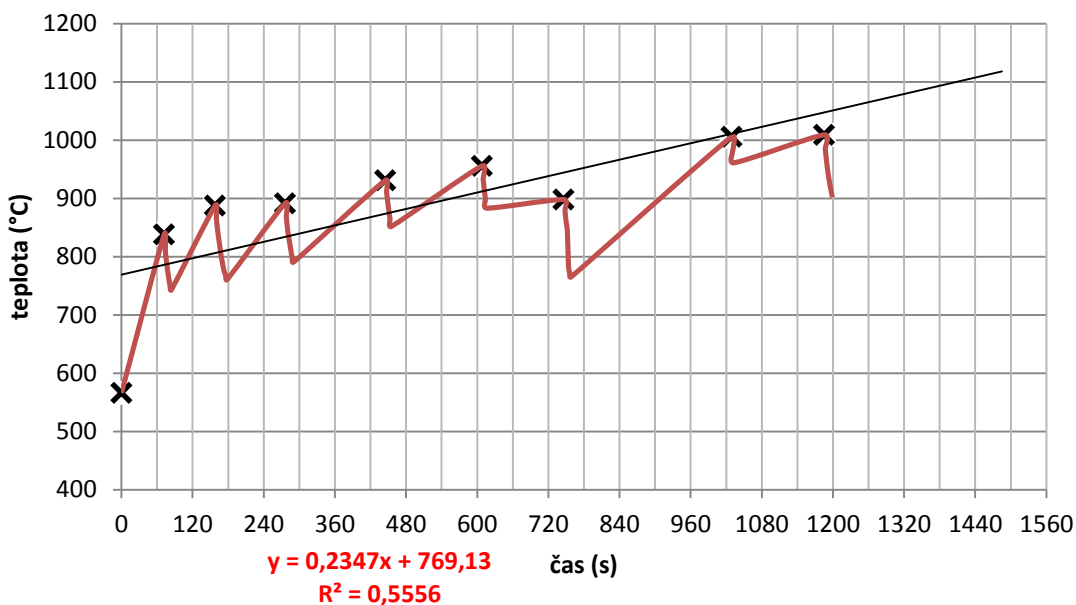


Graf 14: Porovnání chladnutí vrstev skořepin

5.3.10 Ohřev skořepiny B

Sledování průběhu ohřevu skořepiny B bylo uskutečněno po chladnutí skořepiny na vzduchu. Výsledkem tohoto měření mělo být určení doby potřebné k prohřátí skořepiny na teplotu předehřívací pece 1100°C, tak aby mohla být v co nejkratší době znovu použita k odlití. Chladnutí na vzduchu probíhalo 3,5 minuty a po uplynutí této doby byla skořepina vložena zpět do předehřívací pece. V průběhu ohřevu byla skořepina pravidelně vyndávána a měřena její teplota. Teplota skořepiny byla měřena termokamerou se shodným nastavením parametrů jako v předchozích případech měření. Skořepina nebyla měřena přímo v peci vzhledem k tomu, že by docházelo ke zkreslení výsledků měření vlivem prostředí pece. Pro účely měření ohřevu byla skořepina vyjmuta z předehřívací pece osmkrát v různých časových intervalech. První tři měření proběhly přibližně po minutě další tři měření více jak po dvou minutách. Sedmé měření proběhlo téměř po pěti minutách poslední měření přibližně po dvou minutách. Vyhodnocování naměřených teplot bylo prováděno v oblasti nejnižší teploty na povrchu skořepiny a to v místě zámkové části. Předpoklad je takový, že v místě zábalu a uvnitř skořepiny bude vyšší teplota než na povrchu. Pro dostatečné prohřátí bude tedy zapotřebí dosáhnout požadované teploty i v místě s nejnižší teplotou. Před

prvním založením do pece byla teplota v zámkové části na hodnotě 566 °C. průběh teplot naměřených po vytažení z pece jsou zaznamenány v následujícím grafu 15.



Graf 15: Průběh ohřevu skořepiny B v zámkové oblasti

Doba potřebná k celkovému prohřátí skořepiny na požadovanou teplotu se tedy řídila podle místa, které před založením do pece vykazovalo nejnižší teplotu a to právě v místě zámkové části. Zjistit přesnou dobu potřebnou pro dostatečné prohřátí bylo obtížné z důvodu nutnosti vyjmát skořepinu z přehřívací pece. Tím docházelo v průběhu této činnosti k rychlému ochlazení skořepiny v průběhu manipulace a měření. Dalším ovlivňujícím faktorem je i pokles teploty v přehřívací peci z důvodu otevírání pecních dveří vzhledem k častému vyjímání skořepiny. Tyto faktory mají vysoký vliv na přesnost zjištění doby potřebné pro prohřátí skořepiny. Naměřit tedy přesnou hodnotu 1100 °C je velmi obtížné. Pro určení času dosažení teploty 1100°C byly body proloženy lineární spojnicí trendu. Pro zjištění času dosažení požadované teploty byla použita rovnice přímky $y = 0,2347x + 769,13$. Z této rovnice vyplývá, že z teploty 566°C na 1100 °C by teoreticky měla skořepina dosáhnout za 24 minut od založení do pece.

ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR

V první kapitole byly popsány metody možnosti měření teplot. V této kapitole byla popsána problematika měření teplot kontaktním a bezkontaktním způsobem. Cílem této kapitoly bylo komplexní uvedení do této problematiky.

Druhá kapitola se zabývala problematikou technologie přesného lití na vytavitelný model. V této kapitole byly popsány jednotlivé kroky procesu této technologie od zhotovení voskového modelu až po dokončovací operace zhotovených odlitků.

Třetí kapitola popisuje stávající způsob měření teplot na otevřeném licím poli a na vakuovém lití ve společnosti PCS a.s.

V Praktické části této diplomové práce jsem se zabýval třemi hlavními směry, které jsou stanoveny v úvodu práce.

Cílem první části bylo zavedení bezkontaktního způsobu měření na Vakuové indukční peci KOPP VSP-5. Za účelem provedení tohoto experimentu jsem kontaktoval dvě tuzemské společnosti: společnost MICRO-EPSILON Czech Republic spol. s r.o. a společnost Workswell s.r.o zastupující firmu Keller MSR GmbH. Z finančních důvodů nebyly produkty firmy Keller testovány. Experiment byl proveden se zapůjčenými pyrometry CT ratio M1 a CT laser M5 SF od společnosti MICRO-EPSILON. Zkoušky měření prokázaly nevhodnost těchto pyrometrů k účelům měření na vakuové peci KOPP VSP-5 a to především z důvodu značné komplikace při pokusu zacílení do místa měření přes průzorové sklo vakuové pece. V případě dalšího testování bych doporučoval testovat měření taveniny na vakuové peci za použití pyrometru s očním zaměřováním. Zaměřování místa měření pomocí laseru se ukázalo v tomto případě jako nevhodné a to z důvodu značné komplikace způsobené měřením přes průzorové sklo. Pro zavedení bezkontaktního měření do procesu kontroly teplot taveniny na vakuové peci KOPP VSP-5 by také bylo zapotřebí zaměřit se na zajištění čistoty průzorového skla tak, aby nedocházelo vlivem napařování vrstvy kovu na průzorové sklo v průběhu tavení k ovlivňování naměřených výsledků. V rámci zjištění závislosti transmitance průzorových skel na znečištění jsem pomocí spektrometru Ocean optics Redtide provedl testování s rozsahem měření vlnových délek od 200 nm do 880 nm. Z výsledků v *grafu 3 (str. 47)* je patrné, že vliv napařované vrstvy na sklo má značný vliv a v měřeném rozsahu vlnových délek je prakticky nepropustné. Z grafu je také patrný vliv poškrábání skla na transmisivitu a také úhel natočení skla. Bohužel k omezenému vybavení nebyla možnost proměřit celou škálu vlnových délek, na kterých pracují dnes používané pyrometry. Vliv napařené vrstvy na propustnost

v infračerveném spektru spolu se zajištěním vhodné polohy a instalací pyrometru s nutnými technickými úpravami pece za účelem bezproblémového měření by mohlo být předmětem dalšího výzkumu.

Cílem druhé části v návaznosti na testování bezdotykového měření byl pokus o zavedení nové ochrany termočlánu pro měření taveniny ve vakuové peci KOPP VSP – 5. V rámci této části práce jsem provedl průzkum trhu výrobců zabývajících se výrobou ochranných trubic pro termočlánu. Kritériem pro výběr ochranných trubic za účelem testování byla teplota použití kolem 1600°C a dobrá odolnost proti tepelnému šoku. Z úzkého výběru nabízených produktů byly pro účely testování vybrány ochranné trubice Luxal 203 (C709), Lunit 73 (C610) od firmy ESTCOM CZ – oxidová keramika a.s. a Metamic 829 (S363F) od firmy Morgan Thermal Ceramics. Výsledkem testování vybraných ochranných trubic termočlánu je mé doporučení zachování stávajícího způsobu ochrany termočlánu při měření teploty taveniny a to za pomoci ochranných trubic z křemenného skla. Ochranné trubice z křemenného skla z hlediska nákladů na jedno měření vycházejí jako nejvhodnější varianta. Ochranné trubice Luxal 203 (C709) a Lunit 73 (C610) se v průběhu testování na Vakuové peci KOPP VSP-5 ukázaly jako nevhodné. Tyto trubice i přes relativně dlouhou dobu předehřevu nad taveninou nevydržely teplotní šok a v průběhu prvního ponoru došlo k jejich destrukci. V případě ochranných kovokeramických trubic Metamic 829 (S363F) docházelo u jednotlivých trubic k výrazně odlišným délkám životnosti a z hlediska nákladů ani trubice s nejlepší dosaženou hodnotou životnosti se nákladově nepřiblížila trubicím z křemenného skla. Navrhuji zachovat stávající způsob ochrany termočlánu.

Cílem třetí části bylo zkoumání teplotního chování skořepin. Testování bylo prováděno pomocí termokamery FLIR T640. V rámci tohoto experimentu byl zkoumán vliv tloušťky žárovzdorné izolace Sibral na průběh ochlazování. Pro účely testování byly vybrány skořepiny k odlévání ingotů zabaleny do izolačního materiálu Sibral v používaných tloušťkách 13mm, 25mm a 38mm. Měření těchto skořepin probíhalo na vnitřním povrchu. Z *grafu 9 (str. 60)* je patrné, že použitím i nejmenší tloušťky Sibralu 13 mm dochází v daném místě zábalu k výraznému snížení rychlosti ochlazování v porovnání s chladnutím skořepiny bez zábalu. Z *grafu* je dále patrné, že rozdíl mezi použitím Sibralu 13, 25 nebo 48 v závislosti na udržení teploty není příliš zásadní. Další částí testování chladnutí skořepin bylo zjišťování poklesu teploty u vyřazených skořepin s rozdílným počtem obalů. Tyto skořepiny byly měřeny na vnějším povrchu formy ve vybraných oblastech. V *grafu 14 (str. 69)* je porovnání rychlosti chladnutí v závislosti na počtu obalů skořepiny. Z výsledků je patrná závislost zvyšujícího se počtu obalů na

pomalejším průběhu chladnutí. Je však nutno říci, že výsledky jsou oproti skořepinám X shodného tvaru u skořepin A, B a C do jisté míry ovlivněny tvarem skořepiny a zásadní je také dané místo měření. Dále byla zjišťována minimální doba potřebná k ohřevu skořepiny B po 3,5 minutách chladnutí na vzduchu. Měření a následné vyhodnocení ukázalo, že doba potřebná pro ohřátí z teploty 566 °C na teplotu 1100 °C je přibližně 24 minut. Průběh ohřevu je zachycen v *grafu 15 (str. 68)*. Po této minimální době by tedy skořepina B měla být teoreticky znovu dostatečně prohřátá a použitelná k odlití taveniny.

Výsledkem této diplomové práce je neúspěšné ověření možnosti použití bezkontaktního způsobu měření na vakuové peci. Pro účely dalšího testování by bylo zapotřebí trvalejšího testování v podmínkách mimo plný provoz vakuové pece (čas testování byl omezen dobou výpůjčky jeden týden). Dále je výsledkem doporučení zachování používání dosavadních ochranných trubic termočlánků z křemenného skla. Z nabízených a vybraných produktů na trhu nebyly zjištěny vhodnější ochranné trubice termočlánků pro dané použití. Výsledkem měření skořepin jsou pak průběhy ochlazování a ohřevu vybraných testovaných skořepin.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Měření teplot tavenin kovů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2001, (1) [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-teplot-tavenin-kovu.html>
- [2] *Precision investment casting* [online]. 2009 [cit. 2016-05-05]. Dostupné z: <http://www.praquecast.cz/>
- [3] PTÁČEK, Jan, Josef JENČÍK, Miloš ČERNÝ, Milan BOROVIČKA a Bohumil RAMERT. *Měření teploty v průmyslu* Praha: Dům techniky ČSVTS, 1991.
- [4] Přehled principů el. měření teploty. *Automatizace.hw.cz* [online]. Vojáček, 2014 [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [5] DUFF, Matthew a Joseph TOWEY. Two Ways to Measure Temperature Using Thermocouples Feature Simplicity, Accuracy, and Flexibility. In: *Analog.com* [online]. 2010 [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.analog.com/library/analogDialogue/archives/44-10/thermocouple.pdf>
- [6] Úvod do termočlánků. *Omega Engineering* [online]. [cit. 2016-06-12]. Dostupné z: <http://www.omegaeng.cz/prodinfo/thermocouples.html>
- [7] Basics of non contact temperature measurement. *www.micro-epsilon.cz* [online]. [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: www.micro-epsilon.cz/download/products/dat--infrared-basics--en.pdf
- [8] Zpravodaj pro měření a regulaci: bezdotykové měření teploty. *www.omegaeng.cz* [online]. [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_1.pdf
- [9] Přehled principů el. měření teploty: bezdotykové měření teploty. *www.automatizace.hw.cz* [online]. [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykovve>
- [10] PAVELEK, Milan. *Teorie termovizních měření* [online]. , 8 [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/users/pavelek/optika/0700-z01.pdf>

- [11] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 1). *Automa* [online]. 2014, (2), 3 [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/52890.pdf>
- [12] KADLEC, Karel. Teoretické základy bezdotykového měření teploty (část 2). *Automa* [online]. 2014, (2), 3 [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/52662.pdf>
- [13] Konstrukce termokamery. *Termokamera.cz* [online]. [cit. 2016-07-25]. Dostupné z: <http://www.termokamera.cz/princip-a-funkce/konstrukce-termokamery/>
- [14] *An Introduction to the Investment Casting Process* [online]. 2001 [cit. 2016-06-11]. Dostupné z: http://www.hitchiner.com/publications/Intro_to_IC.pdf
- [15] HERMAN, Aleš. *Přesné lití na vytavitelný model* [online]. , 30 [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/419638-Ing-ales-herman-ph-d.html>
- [16] PÍŠA, Václav. *Technologie přesného lití - metoda vytavitelného modelu* [online]. In: . [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/3419296/>
- [17] DOŠKÁŘ, J., GABRIEL, J., HOUŠŤ, M., PAVELKA, M. *Výroba přesných odlitků*. SNTL Praha, 1976
- [18] *Micro-epsilon catalog* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.micro-epsilon.cz/download/products/cat-thermoMETER-Infrared-en.pdf>
- [19] *Metamic pyrometric sheats* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.morganthermalceramics.com/sites/default/files/datasheets/114-35metamics.pdf>
- [20] *Temperature measurement in liquid metal* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/120890434/temperature-wvdp-2000>
- [21] Provedení termočlánků [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmr/0322f-TermoclZapojeni.htm>

- [22] STRÁNSKÝ, Marek. *Měření povrchových teplot ve strojírenství* [online]. 2014 [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=83872
- [23] *Planckův zákon* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.gtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [24] *Černé těleso* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.gtest.cz/bezdotykove-teplomery/bezdotykove-mereni-teploty.htm>
- [25] SEGEŤA, Petr. *Bezdotykové měření teploty* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=52638
- [26] NĚMEC, Jiří. *Zvyšování mechanických vlastností odlitků ze slitin zhotovených metodou vytavitelného modelu* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=56198
- [27] *Estcom* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: Zdroj: <http://www.estcom.cz/cs/produkty/luxal-203/>
- [28] *Estcom* [online]. [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.estcom.cz/cs/produkty/lunit-73/>
- [29] *Thermocouple protection tubes* [online]. AsRichards [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.asrichards.com/markup/Books/Cat16/Catalog%2016/index.html#104/z>
- [30] *FLIR T640 datasheet* [online]. AsRichards [cit. 2016-07-26]. Dostupné z: <http://www.termokamery-flir.cz/wp-content/uploads/Datasheet-FLIR-T640.pdf>