



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Měření teplotních polí skořepin
v technologii vakuového lití

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Krčová Petra

VEDOUcí PRÁCE: doc. Ing. Herman Aleš, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: Výrobní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: Bez specializace

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Krčová** Jméno: **Petra** Osobní číslo: **473462**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření teplotních polí skořepin v technologii vakuového lití

Název diplomové práce anglicky:

The measurement of temperature fields of shell for vacuum casting technology

Pokyny pro vypracování:

1. Úvod
2. Technologie vakuového odlévání - popis procesu, výhody a nevýhody
3. Problematika měření teplot s akcentem využití za vakua
4. Návrh experimentu
5. Realizace experimentu a jeho vyhodnocení
6. Závěr

Seznam doporučené literatury:

dle pokynů vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

doc. Ing. Aleš Herman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením doc. Ing Aleše Hermana, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

Podpis autora

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu této diplomové práce panu doc. Ing. Aleši Hermanovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Mé poděkování patří též společnosti Walter Praguecast, a.s. za spolupráci při získávání údajů pro experimentální část práce. Zejména bych pak ráda poděkovala panu Petru Kozielovi a panu Jiřímu Kočovskému, kteří mi byli při měření velmi nápomocni.

Anotace

Název diplomové práce: Měření teplotních polí skořepin v technologii vakuového lití

Autor práce: Bc. Krčová Petra

Vedoucí práce: doc. Ing Herman Aleš, Ph.D.

Akademický rok: 2021/2022

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 - Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Kolařík Ladislav, Ph.D., IWE

Rozsah práce: 99 stránek, 4 tabulky, 58 obrázků

Klíčová slova: přesné lití, vytavitelný model, skořepina, vakuová pec, termočlánek, křivky chladnutí

Abstrakt: Tato diplomová práce se zabývá měřením teplot chladnutí předehřátých skořepin ve vakuu v technologii přesného lití na vytavitelný model. Měření teplot bylo provedeno pomocí termočlánků a následně byla získaná data zpracována do teplotních závislostí. Získané závislosti byly dále vyhodnoceny a následně budou použity pro simulace a inovace procesu.

Annotation

Title of the final thesis: The measurement of temperature fields of shell for vacuum casting technology

Author: Bc. Krčová Petra

Supervisor: doc. Ing Herman Aleš, Ph.D.

Academic year: 2021/2022

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering

Department: 12133 - Department of Manufacturing Technology

Head of department: doc. Ing. Kolařík Ladislav, Ph.D., IWE

Extent: 99 pages, 4 tables, 58 pictures

Keywords: investment casting, meltable model, shell, vacuum furnace, termocouple, cooling curves

Abstract: This diploma thesis deals with measurement of temperature of cooling of preheated shells in the vacuum in the investment casting on a meltable model. Measurement was realized by using termocouples and than were measured data processed into cooling curves. Cooling curves were evalueted and will be used for simulations and process inovations.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 12 |
| 2. Technologie vakuového odlévání..... | 13 |
| 2.1 Historie | 13 |
| 2.2 Podstata metody | 14 |
| 2.3 Vakuové odlévání | 15 |
| 2.3.1 Vakuové nasávání | 15 |
| 2.3.2 Tavení a gravitační lití ve vakuu | 18 |
| 2.4.3 Protigravitační lití | 19 |
| 2.4 Popis výroby odlitků metodou vytavitelného modelu ... | 21 |
| 2.4.1 Výroba voskových modelů | 22 |
| 2.4.2 Sestavování voskových modelů do stromečku | 26 |
| 2.4.3 Výroba skořepin | 27 |
| 2.4.4 Vytavení vosku a vypalování skořepin | 28 |
| 2.4.5 Odlévání | 29 |
| 2.4.6 Dokončovací operace | 30 |
| 2.4.7 Kontrola | 32 |
| 3. Problematika měření teplot s akcentem využití za vakua... 34 | |
| 3.1 Termoelektrické teplotní snímače | 35 |
| 3.2 Odporové teplotní snímače | 40 |
| 3.2.1 Kovové odporové snímače | 40 |
| 3.2.2 Polovodičové odporové snímače | 42 |

| | | |
|-----|--|----|
| 3.3 | Termografie | 44 |
| 4. | Návrh experimentu..... | 46 |
| 4.1 | Společnost Walter Praguecast | 46 |
| 4.2 | Popis návrhu experimentu | 47 |
| 5. | Realizace experimentu a jeho vyhodnocení..... | 50 |
| 5.1 | Výroba skořepiny | 50 |
| 5.2 | Přípevnění termočlánků a měřicí sestava | 53 |
| 5.3 | Měření teplot holé skořepiny při chladnutí na vzduchu | 55 |
| 5.4 | Měření teplot holé skořepiny při chladnutí ve vakuu . | 61 |
| 5.5 | Měření teplot částečně zabalené skořepiny při chladnutí ve vakuu | 67 |
| 5.6 | Měření teplot zabalené skořepiny ve vakuu | 73 |
| 5.7 | Měření teplot zabalené skořepiny při chladnutí na vzduchu | 79 |
| 6. | Porovnání výsledků..... | 84 |
| 7. | Závěr..... | 88 |
| 8. | Bibliografie..... | 92 |
| 9. | Seznam tabulek..... | 96 |
| 10. | Seznam obrázků..... | 97 |

Seznam zkratek

| | |
|--------|---------------------------------|
| 3D SMS | 3D souřadnicový měřicí stroj |
| CLA | vakuové lití, tavení na vzduchu |
| CLV | vakuové lití, tavení ve vakuu |
| PTC | pozistor |
| NTC | negastor |

Chemické prvky a sloučeniny

| | |
|----|---------|
| O | kyslík |
| N | dusík |
| C | uhlík |
| Ni | nikl |
| Co | kobalt |
| Ti | titan |
| Zn | zinek |
| Si | křemík |
| Cu | měď |
| Pt | platina |
| Rh | rhodium |
| Re | rhenium |

| | |
|--------------------------------|----------------|
| Cr | chrom |
| W | wolfram |
| Fe | železo |
| Al | hliník |
| Mg | hořčík |
| Ge | germanium |
| In | indium |
| SiO ₂ | oxid křemičitý |
| Al ₂ O ₃ | oxid hlinitý |
| K ₂ O | oxid draselný |
| Fe ₂ O ₃ | oxid železitý |
| MgO | oxid hořečnatý |

Seznam použité symboliky

| symbol | [jednotka] | vysvětlení |
|----------------|---------------------------------------|-------------------------------|
| T | [K] | termodynamická teplota |
| t | [°C] | teplota |
| τ | [s] | čas |
| U | [mV] | napětí |
| α | [K ⁻¹] | teplotní součinitel odporu |
| R | [Ω] | odpor při teplotě t |
| R ₀ | [Ω] | odpor při teplotě 0 °C |
| W _t | [-] | poměr odporů |
| I | [W·m ⁻²] | intenzita záření |
| σ | [W·m ⁻² ·K ⁻⁴] | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| ρ | [-] | odrazivost |
| ε | [-] | emisivita |
| N | [mbar/hod] | natékavost |
| Δp | [mbar] | přírůstek tlaku |

1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření teplotních polí skořepin v technologii vakuového lití. Byla vypracována ve spolupráci se společností Walter Praguecast a.s., která sídlí v Praze Radlicích. Společnost se zabývá výrobou odlitků metodou přesného lití na vytavitelný model. Vyrábí převážně lopatky a další součástky pro energetický a letecký průmysl. Společnost se aktuálně zabývá problematikou kritického času lití, při kterém se teplota skořepiny nesníží pod požadovanou teplotu. Jedním z cílů této diplomové práce bylo získání potřebných dat pro další simulace procesu, které budou ve společnosti následně provedeny.

Rešeršní část této diplomové práce se nejprve zabývá technologií vakuového odlévání. Je zde stručně popsána historie a podstata metody. Dále jednotlivé metody vakuového odlévání a podrobnější popis celého procesu. Další kapitola je věnována problematice měření teplot s akcentem využití za vakua. Jsou v ní popsány vybrané možnosti měření teploty.

Experimentální část diplomové práce, jak již bylo zmíněno, byla navržena a provedena ve spolupráci se společností Walter Praguecast a.s.. Experiment spočíval v měření teplotních polí skořepiny v čase po vyndání z předehřívací pece a umístění do vakuové pece. Měření bylo provedeno nejprve na vzduchu pro získání neovlivněného průběhu chladnutí a následně pro nezabalenou, částečně zabalenou a úplně zabalenou skořepinu.

Cíle práce:

- Zmapovat průběh chladnutí skořepiny
- Získat závislost teploty předehřáté skořepiny na čase chladnutí
- Objasnit vliv odsávání vzduchu z dolní komory vakuové pece na teplotu skořepiny
- Získat data pro simulaci procesu

2. Technologie vakuového odlévání

Technologie vakuového odlévání metodou přesného lití na vytavitelný model patří mezi nejmodernější a nejmodernější technologie lití kovů. Řadí se k tzv. near-net-shape technologiím, kdy vznikají odlitky tvarově i rozměrově velmi blízké finálním výrobkům. Metoda vytavitelného modelu neboli „lost wax“ či také „investment casting“ slouží k výrobě přesných a tvarově složitých odlitků, kdy jsou ve srovnání s jinými technologiemi lití kladeny vysoké požadavky na rozměrovou přesnost, kvalitu povrchu, jakost a vnitřní čistotu vyráběné součástky a to za co nejnižších výrobních nákladů. Možné je vyrábět i tak složité tvary, kterých by pomocí jiných technologií, jako je např. obrábění, nebylo možné dosáhnout. Je dosahováno takové přesnosti, že některé funkční plochy již není třeba obrábět a ty, které ano, mají malé přídatky na obrábění. Tím se snižuje jednak čas obrábění, ale také náklady. [1, 2, 3]

Metodou vytavitelného modelu se zabývá mnoho studií a článků, zároveň prochází neustálým vývojem.

2.1 Historie

Použití principu metody vytavitelného modelu lze vysledovat až do roku 5 000 př.n.l., tehdy ji pračlověk používal pro výrobu základních potřeb. Průzkumem bylo zjištěno, že se tato metoda po staletí používala pro výrobu šperků a uměleckých předmětů. Takto vyrobené odlitky byly nalezeny mezi poklady egyptských faraonů, v hrobkách Inků ve Střední a Jižní Americe, ale také na území Evropy, kde pobývali Etruskové (území dnešního Toskánska v Itálii) a Řekové. [2]

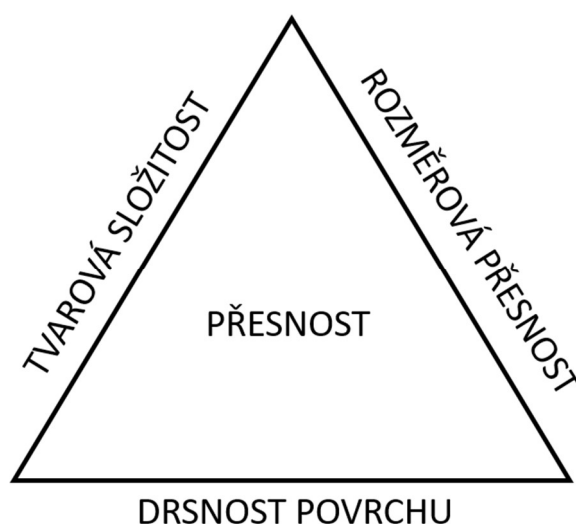
Velký vývoj zaznamenala technologie vytavitelného modelu ve Spojených státech během druhé světové války, kdy stoupla poptávka po přesných a složitých dílech, jako jsou lopatky turbín

pro letecké motory. Díky svým výhodám se během následujících desetiletí metoda vytavitelného modelu dále rozšiřovala do dalších různých odvětví průmyslu. Dnes můžeme touto metodou vyráběné odlitky najít např. ve všeobecném strojírenství, letectví, lékařství, energetice, vojenském a automobilovém průmyslu, ale i ve sportu, kde je tato metoda využívána např. pro výrobu hlav golfových holí. [2]

2.2 Podstata metody

Vakuová metoda přesného lití na vytavitelný model nám umožňuje výrobu součástí s vysokou rozměrovou přesností (IT 13 až IT 9), velkou tvarovou složitostí a velmi dobrou jakostí povrchu (běžně Ra 12,5 až 3,2 μm), v některých případech je možné dosáhnout až Ra 1,6 μm . Je možné díky ní vyrobit součásti velmi složitých tvarů a ze špatně obrobitelných nebo neobrobitelných materiálů. [1, 4]

Hlediska posuzování přesnosti odlitku jsou znázorněny na obr. 1. Díky třem nejdůležitějším vlastnostem odlitku, kterými jsou rozměrová přesnost, jakost povrchu a komplikovanost tvaru, je možné určit referenční bod a také jestli je nutné následné obrábění nebo nikoli. [1]



Obr. 1 Hlediska posuzování přesnosti odlitku [6]

2.3 Vakuové odlévání

Vakuové odlévání je používáno hlavně pro tvarově složitější a náročnější součásti. Díky použití vakua je dosahováno lepší kvality odlitků.

Nejprve je kovový ingot nataven v prostředí vakua v pánvi (kelímku) v komoře indukční pece. Mohou tak být taveny i náročné slitiny a superslitiny používané např. v leteckém průmyslu, které by jinak reagovaly se vzdušným kyslíkem nebo dusíkem a bylo by nemožné nebo velmi obtížné vyrábět z nich zdravé odlitky. Tavení těchto slitin v prostředí vakua také omezuje tvorbu oxidických a nitridových fází v kovu. [5, 6]

Výhody tavení kovu v prostředí vakua: [5]

- Nízké ztráty legujících prvků vlivem oxidace
- Velmi přesné chemické složení kovu
- Velmi přesná regulace teploty
- Nízká úroveň znečištění životního prostředí
- Odstranění stopových prvků s vysokým tlakem par
- Odstranění rozpuštěných plynů, jako je vodík a dusík

Existuje několik metod vakuového lití, v následujících podkapitolách bude několik z nich popsáno.

2.3.1 Vakuové nasávání

Při této metodě je roztavený kov vtahován do formy. Proces plnění dutiny formy je díky tomu kontrolovatelnější a plnění je méně turbulentní. Metoda vakuového nasávání umožňuje tvorbu odlitků s velmi dobrou rozměrovou přesností, čistým vzhledem a s dobrými mechanickými vlastnostmi. [5]

Zapouzdřená a utěsněná forma je umístěna nad tavicí pecí s roztaveným kovem. Na dno formy je zaveden kanálek, vtok nebo hubice, která je ponořena do roztaveného kovu. Vakuum

působící na pouzdro pak způsobí rozdíl mezi tlakem nad taveninou a tlakem uvnitř formy. Tento diferenciální tlak tlačí na roztavený kov a nutí ho vyplnit dutinu formy. Po dokončení tuhnutí odlitku se uvolní vakuum a zbylý tekutý kov ve vtokovém kanálku se vrátí zpět do pece. Díky tomu má tato metoda vynikající výtěžnost kovu a menší vtok k odříznutí. I když se proces může dle zařízení mírně lišit, princip zůstává stejný. [5, 7]

Největší výhodou této metody je klidné plnění dutiny formy na rozdíl od gravitačního lití, kdy může vlivem geometrie dojít k turbulentnímu proudění roztaveného kovu a ke strhávání plynu. [5, 7]

Hlavní výhody vakuového nasávání: [5]

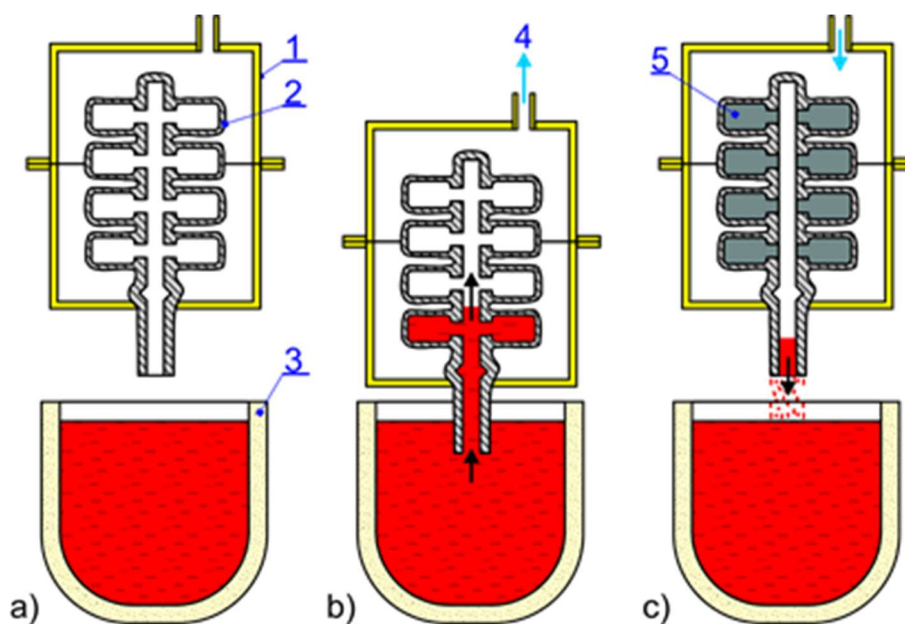
- Řízená rychlost proudění roztaveného kovu do dutiny formy, zlepšuje se celková spolehlivost procesu
- Průtok roztaveného kovu může být zvýšen pro vyplnění dutiny formy rychleji než u gravitačního lití, mohou být plněny tenčí části
- Kov vtahovaný do dutiny formy zesponu pánve, zabrání se vzniku strusky a vměstků
- Kritické změny teploty kovu mohou být lépe řízeny
- Dobrá kvalita povrchu
- Velmi dobrá rozměrová přesnost
- Snadno automatizovatelné

Vakuové nasávání má dvě základní varianty, těmi jsou CLA a CLV. Ty jsou stručně popsány v následujících odstavcích.

CLA

Písmeno A v označení této metody značí, že odlévaná slitina je tavena na vzduchu (Air = vzduch). Pro tavení slitin jsou používány běžné tavicí pece. Na obr. 2 je zobrazena a popsána metoda vakuového nasávání CLA. Metoda je vhodná pouze

pro relativně malé odlitky s tloušťkou stěny menší než 12,5 mm.
[7]



Obr. 2 Vakuové nasávání CLA: a) skořepina v lici komoře, b) aplikace vakua a plnění formy, c) ztuhlé odlitky ve formě,

1 - vakuová komora, 2 - skořepina, 3 - kelímek s roztaveným kovem, 4 - vakuové odsávání, 5 - ztuhlý odlitek [7]

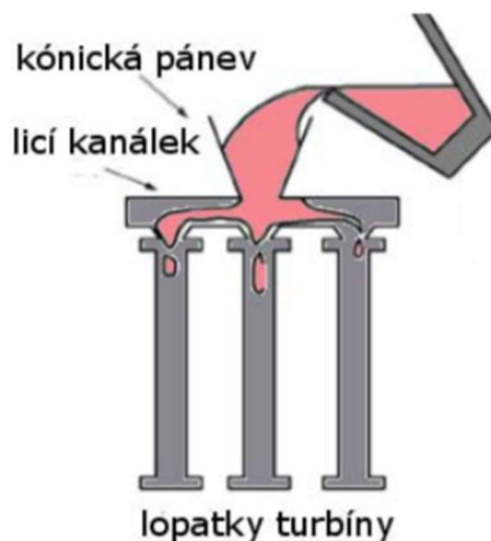
CLV

Oproti CLA metodě se metoda CLV liší ve způsobu tavení odlévané slitiny. Písmeno V v označení této metody značí, že odlévaná slitina je vakuově tavena. Celý proces tavení je prováděn ve vakuu, je použit koncept dvojité vakuové komory. Po natavení slitiny a do ní ponoření plnicího kanálku se tavící komora zaplní argonem. Tím vznikne tlakový rozdíl, který umožňuje, aby vakuum v komoře formy natáhlo kov do dutiny formy. Tato metoda se používá především pro lití na vytavitelný model slitin obsahující reaktivní kovy, jako jsou nikl (Ni), kobalt (Co) a titan (Ti). [7]

Vakuové nasávání se používá pro metody lití do trvalé formy, tlakového lití, lití na vytavitelný model a lití do pískových forem. [5]

2.3.2 Tavení a gravitační lití ve vakuu

Vakuovým tavením a gravitačním odléváním ve vakuu je možné dosahovat velmi kvalitních odlitků i bez nejmenších bublinek plynu. Speciální odlitky ze slitin a superslitin, jako jsou slitiny niklu a titanu používané nejčastěji v leteckém průmyslu, mají velmi přísné tolerance a nejsou přípustné ani minimální bublinky plynu. Titanové a niklové slitiny a superslitiny také reagují se vzdušným kyslíkem nebo dusíkem a je proto nutné je tavit ve vakuu. Další velkou výhodou tavení těchto slitin ve vakuu je omezení tvorby nekovových oxidických a nitridových vměstků v kovu. Vlivem snížení rovnovážného tlaku mezi plynem a taveninou dochází k odstraňování plynů již rozpuštěných v tavenině. Rozpustnost plynů v tavenině stoupá s teplotou, proto během tuhnutí dochází k uvolňování plynů z taveniny, které odcházejí nebo částečně zůstávají v kovu a mohou tvořit plynové bubliny. Snížením parciálního tlaku plynu nad taveninou dojde ke snížení rovnovážného množství plynu rozpuštěného ve slitině. Snížením tlaku tzv. vakuováním v prostoru nad tavicí jednotkou a v odlévacím prostoru se rozpustnost plynu v tavenině výrazně sníží a díky tomu se omezí riziko vzniku bublin v odlitku. Slitiny tavené ve vakuu se velmi často odlévají do skořepinových forem umístěných v tavicí komoře nebo přilehlé vakuové licí komoře. Předehřátá skořepinová forma je umístěna do licí komory, ze které je následně odsán vzduch (tvorba vakua). Ve chvíli, kdy dojde k dosažení stejné úrovně vakua v licí komoře jako v tavicí komoře, se otevře přepážka mezi komorami a tavenina se odlije z licí pánve (kelímku) do připravené formy (obr. 3). [3, 7]

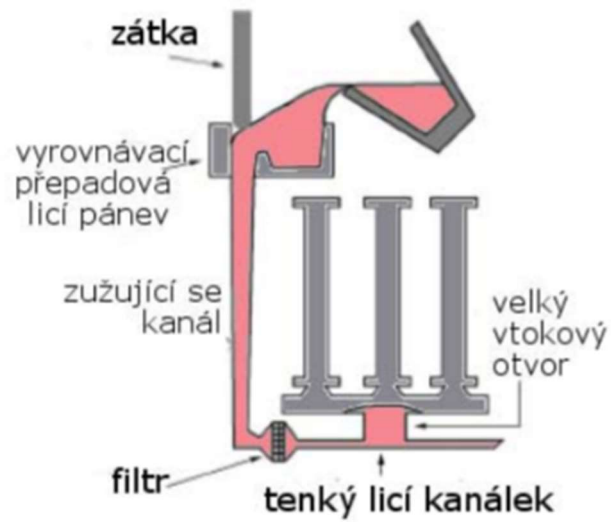


Obr. 3 Gravitační lití lopatek turbíny ve vakuu [8]

2.4.3 Protigravitační lití

Protigravitační lití je možné provádět nejen pomocí vakua, ale také pomocí nízkého tlaku nebo elektromagnetického čerpání. Proces protigravitačního lití bývá vysoce automatizovaný. Ideální odlitek vyrobený touto metodou lití je tenkostěnný odlitek o velkém objemu. Používá se proto pro odlitky určené pro automobilový průmysl, letectví, energetický průmysl a lékařské aplikace. Při protigravitačním lití je nejprve slitina vakuově natavena v horní komoře. Ve druhé komoře se stejnou úrovní vakua je umístěna forma vtokem směrem dolů. Po natavení dojde k propojení obou komor. Zvýšením tlaku na hladinu taveniny vznikne tlakový rozdíl, který způsobí, že dojde k zaplnění formy od spodu stanovenou rychlostí. Tento tlakový rozdíl je možné relativně snadno kontrolovat a regulovat pomocí systému ventilů. Po naplnění formy a ztuhnutí vtoku se vakuum uvolní a přebytečný kov z kanálku a vtoků se vrátí zpět do pece. Díky tomu má tato metoda odlévání velmi dobrou výtěžnost kovu a menší vtok k odřiznutí. Nevýhodou je, že vakuum musí být udrženo, dokud vtok neztuhne. Schéma procesu je zobrazeno na obr. 4. Proces se velmi podobá nízkotlakému

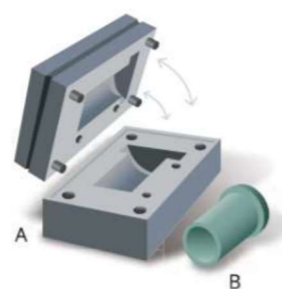
odlívání až na to, že zde jsou hodnoty pracovního tlaku třikrát až čtyřikrát vyšší. [5, 7]



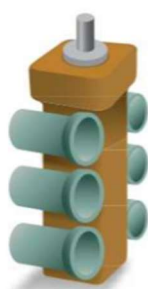
Obr. 4 Protigravitační lití lopatek turbíny ve vakuu [8]

2.4 Popis výroby odlitků metodou vytavitelného modelu

Lití na vytavitelný model je poměrně dlouhý a složitý proces, který se dělí do několika fází a je schematicky zobrazen na obr. 5. Během celého výrobního procesu je nutná kontrola, protože během každé činnosti mohou vznikat komplikace a může být vnesena nepřesnost. [1]



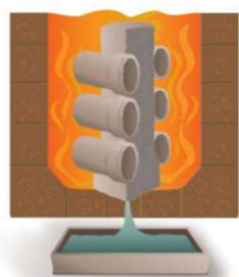
1. Výroba voskových modelů



2. Sestavování voskových modelů do stromečku



3. Výroba skořepin namáčením stromečku do keramické břechky



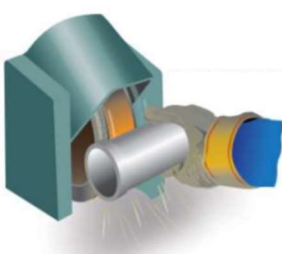
4. Vytavení vosku a vypalování skořepiny



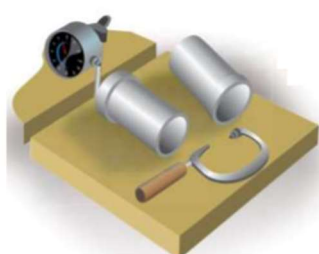
5. Odlévání kovu do skořepiny



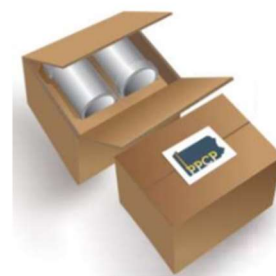
6. Rozbití skořepiny a odříznutí odlitků



7. Broušení a dokončovací operace



8. Kontrola



9. Expedice

Obr. 5 Postup výroby technologií vytavitelného modelu [9]

2.4.1 Výroba voskových modelů

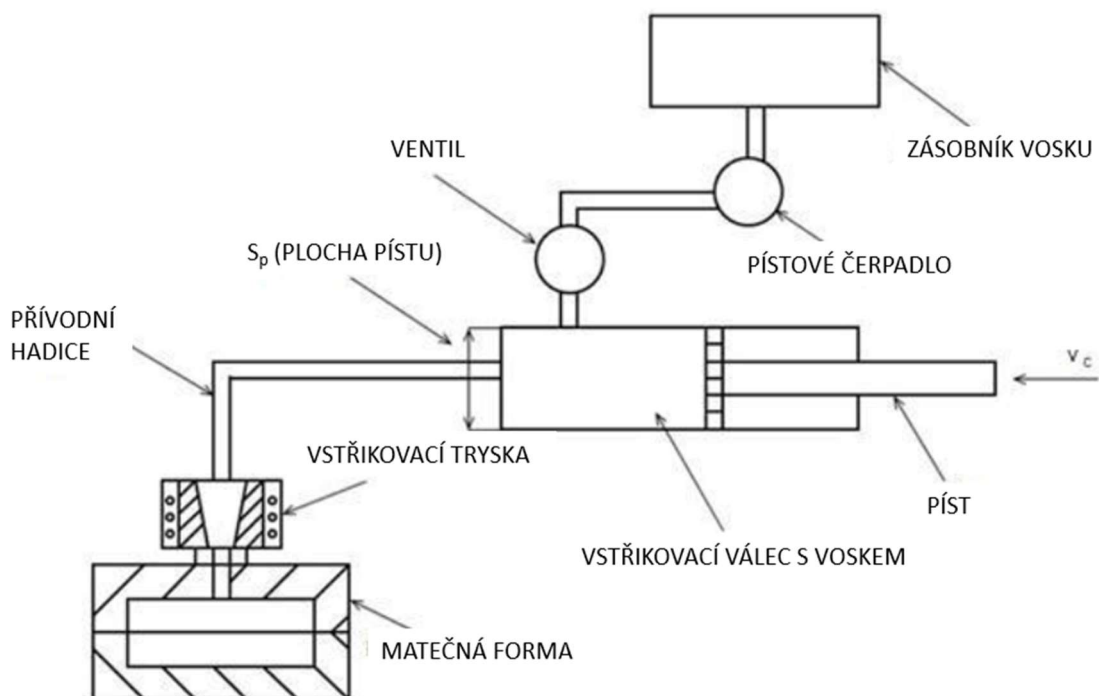
Voskový model má přesnou geometrii vyráběné součásti zvětšenou o přídavky pro kompenzaci vlastního objemového smrštění a smrštění při tuhnutí kovu v keramické formě. Vzniká vstřikováním roztaveného vosku pod tlakem do formy na vstřikovacím lisu (obr. 6). Teplota vosku při vstřikování se pohybuje mezi 55 - 90 °C. Po ztuhnutí vosku je voskový model vyjmut z formy. Pokud se jedná o rozměrnější nebo složitější součást, jako jsou například dlouhé lopatky turbín, kdy má model po vyndání z formy tendenci se vlivem chladnutí deformovat, je model zafixován do tzv. chladicího přípravku, aby si udržel tvarovou přesnost. Takto zafixovaný model je v přípravku ponechán i po několik hodin nebo může být na několik minut ponořen do vody. [3]

Vstřikovací lisy se dělí na tři základní typy podle stavu vosku, se kterým stroj pracuje. Lisy mohou pracovat s roztaveným voskem, kašovitým voskem nebo voskem v tuhé formě. Dnes nejpoužívanější ve slévárnách přesného lití jsou pro svoji jednoduchost vstřikovací lisy pracující s tekutým voskem. Jejich další výhodou je minimální podíl lidských zásahů, které bývají zdrojem nepřesností. Nevýhodou je, že při použití vosků vysokých teplot se zrychluje pracovní cyklus a ve voskových modelech mohou začít vznikat nežádoucí staženiny. Naopak při použití chladnějších vosků mohou v modelech vznikat vzduchové bubliny. Vstřikovací lisy pracující s kašovitým voskem jsou dostupné ve dvou typech. Jedním typem je tzv. kanystr, kdy je kanystr (válec) naplněn tekutým voskem, který je vložen do temperovací pece, dokud vosk nedosáhne požadovaného stavu a následně je kanystr vložen do vstřikovacího lisu. Druhý typ je hybridní stroj, který má zásobník rozdělený na dvě části, kdy horní část zásobníku udržuje tekutý vosk a spodní část vosk ochlazuje a vrací ho do horní části, kde se promíchává ochlazený vosk a tekutý vosk. Nevýhodou tohoto typu stroje je, že k němu musí

být připojen zásobovač tekutého vosku. Nevýhodou obou typů lisu pracujícího s kašovitým voskem je nutnost temperovací pece. Posledním základním typem vstřikovacího lisu jsou lisy pracující s tuhým voskem, v tomto případě jsou používány již ohřáté voskové polotovary. Ty se vkládají do komory lisu. Hlavní nevýhodou těchto lisů je asi 20% ztráta materiálu nutného pro vytvoření dobrého modelu. [1, 3]

Parametry ovlivňující kvalitu voskových modelů: [1, 2, 6]

- Teplota vosku ve vstřikovacím stroji
- Teplota trysky
- Teplota a materiál formy
- Vstřikovací tlak
- Rychlost vstřikování
- Doba vstřikování a dotlak
- Doba chlazení



Obr. 6 Schéma vstřikolisu pro výrobu voskových modelů [10]

Pomocné části jako jsou licí kůl a vtokové kanálky mohou být do forem gravitačně odlévány, protože jejich rozměrová přesnost není tolik důležitá. V případě nutnosti použití jádra je jádro založeno na k tomu určené místo ve formě a na něj je poté vstříknut vosk.

Voskové směsi

Hmota používaná pro výrobu voskových modelů musí splňovat mnoho požadavků. Samotný vosk by nesplňoval všechny požadavky, a proto se používají moderní voskové směsi skládající se z několika komponent. K přírodním a syntetickým voskům se přidávají aditiva a plniva. Novodobý výzkum uvádí, že plnivem mohou být například sójové boby, které snižují smrštění vosku, arabská guma nebo aktivní uhlí. [1, 2]

Vosk používaný pro výrobu modelů by měl mít následující vlastnosti: [2]

- Nízká tepelná roztažnost - vytvoření tvaru s velkou rozměrovou přesností
- Bod tání ne o moc vyšší než teplota okolí - zabránění deformacím a povrchové kavitaci
- Dostatečná pevnost a tvrdost při pokojové teplotě - zabránění poškození při manipulaci
- Hladký a smáčitelný povrch
- Nízká viskozita - pro vyplnění nejtenčích částí formy po natavení
- Snadné vyjmutí modelu z formy po ztuhnutí
- Nízké procento popela
- Odolnost proti oxidaci
- Nezávadnost pro životní prostředí a snadná recyklace
- Nízké náklady

Pro výrobu voskových modelů se používají různé druhy vosků lišící se svým složením a vlastnostmi. Jsou to: [1, 3]

- Vosky na modely
- Vosky na vtoky a vtokové soustavy
- Rekultivované vosky
- Speciální vosky (adhezní, namáčecí, opravný, na jádra, rozpustný)

Formy pro výrobu voskových modelů

Forma pro výrobu voskových modelů hraje významnou roli v celém procesu, protože na její přesnosti a funkčnosti závisí přesnost modelů a výsledných odlitků. Tvar dutiny formy musí mít přesný tvar výsledné součásti. Je nutné, aby dutina formy měla přesné rozměry a velmi kvalitní povrch. Kvalitní formy bývají velice drahé a mají zásadní vliv na kvalitu odlitků.

Volba formy a jejího materiálu se provádí na základě následujících informací: [1]

- Sériovost výroby
- Počet kusů v dávce
- Velikost a složitost odlitku
- Požadavky na kvalitu a rozměrovou přesnost odlitku
- Dostupný vstřikovací lis
- Náklady na výrobu formy

Vhodně zvolená forma by měla umožňovat tvorbu zdravých odlitků bez vad, s dobrou jakostí povrchu, bez staženin a vzduchových bublin, bez povrchových vad a s dostatečnou rozměrovou přesností. Zároveň by měla umožňovat co největší produktivitu, proto je vhodné, aby doba, po kterou musí odstříknutý model zůstat ve formě, byla co nejkratší.

Formy je možné rozdělit podle mnoha kritérií, například podle konstrukce na formy na jeden model, na formy pro odstříknutí více modelů najednou a na výměnné vložky do upínacích stolic lisu. Také je možné formy rozdělit podle použití na formy pro výrobu vlastních modelů a pro výrobu vtoků, vtokových soustav, nálitků a kolektorů. Formy lze rozdělit i podle stupně mechanizace a to na formy s ručním vyjímáním modelů, formy s vyhazovači, formy s jádrem a rozebíratelnými částmi ručně nebo mechanicky a na celkově mechanizované nebo automatizované formy. [1]

Vlastnosti a životnost formy především ovlivňuje její materiál. Formy se nejčastěji vyrábí z oceli a hliníkových slitin, mohou ale být vyrobeny i ze slitin zinku a nízkotavitelných slitin, plastických hmot, sádky nebo kaučuku. S materiálem formy úzce souvisí i technologie výroby. Formy mohou být vyráběné obráběním, odléváním, galvanoplasticky nebo metalizací. [1]

2.4.2 Sestavování voskových modelů do stromečku

Vyrobené voskové modely jsou následně sestavovány do stromečku, který umožňuje odlévat více součástí najednou. Stromeček se skládá z vtokového kůlu, vtokových kanálek a nálitků, které jsou také vyrobeny z vosku. V případě mohutnějších a větších odlitků se sestavují pouze jednotlivé modely, ke kterým je připojena vtoková soustava a nálitky. Spojování je realizováno pájením nebo lepením jednotlivých dílů. Jako pájka nebo lepidlo je používán vosk. [1, 11]

Stromeček by měl být navržen tak, aby mohl být správně obalen a posypán žáruvzdornou směsí. Důležitá je také co nejsnazší manipulace se stromečkem. Také je nutné, aby při otočení stromečku do správné polohy ve vytavovací peci došlo k úplnému vytečení vosku ze skořepiny.

2.4.3 Výroba skořepin

Po sestavení je stromeček opakovaně namáčen do keramické břečky, posypán žáruvzdornou směsí a sušen. Při namáčení musí být stromeček nakláněn a otáčen tak, aby byl dokonale a rovnoměrně obalen. Sušení probíhá mezi jednotlivými obaly. Zavěšené stromečky mohou například procházet tunelem s amoniakem. Po posledním obalu je stromeček zasypán žáruvzdornou keramickou směsí. Počet obalů má na výslednou kvalitu odlitků velký vliv. Při nedostatečném počtu obalů je forma málo pevná a při vypalování, manipulaci nebo při odlití praskne. Naopak pokud je množství obalů příliš velké, forma nepopraská ve chvíli, kdy nalitý kov tuhne, dochází k rozdílnému smršťování odlitku a formy vlivem teploty. Každý obal vytvoří jednu vrstvu skořepiny. Počet vrstev skořepiny se běžně pohybuje mezi 5 a 15. [1, 11]

Na skořepinu jsou kladeny následující požadavky: [2]

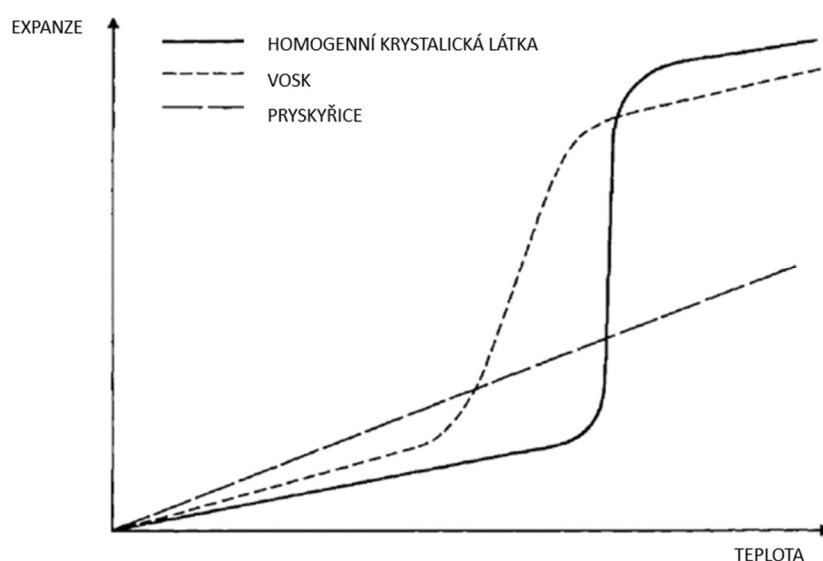
- Dostatečná pevnost v surovém stavu
- Dostatečná pevnost při vypalování
- Vysoká odolnost proti teplotnímu šoku
- Vysoká chemická stabilita
- Dostatečná propustnost formy
- Dostatečná tepelná vodivost

Keramická obalová hmota pro výrobu skořepin se skládá z pojiva a plniva. Plnivo určuje základní vlastnosti hmoty. Vybírá se na základě požadovaných vlastností hmoty jako je teplotní roztažnost, teplota tavení a chemická netečnost. Nejčastěji se jako plniva používají křemičitany. Nejpoužívanějšími písky na obalování jsou molochit, mullit a zirkon. Molochit se skládá přibližně z 54 % oxidu křemičitého (SiO_2), ze 42 % oxidu hlinitého (Al_2O_3) a z malého

množství dalších prvků, např. oxidu draselného (K_2O) a oxidu železitého (Fe_2O_3). Pojiva mohou být na lihové nebo vodní bázi. Roztoky na vodní bázi mají delší dobu sušení a používají se hlavně na primární obaly. Roztoky na lihové bázi mají kratší dobu sušení a lze je vytvrzovat v nádobách nebo tunelech s plynným prostředím amoniaku. Jsou používány především na sekundární obaly a v poloautomatizovaných pracovištích. [1, 2, 12]

2.4.4 Vytavení vosku a vypalování skořepin

Voskový model je ze skořepiny odstraňován vytavováním. Zahřátí skořepiny a natavení vosku musí proběhnout velmi rychle, protože vosk má větší tepelnou roztažnost (obr. 7) a při pomalém zahřívání by došlo k popraskání skořepiny s nižší tepelnou roztažností. Po rychlém zahřátí je vosk nechán vytékat. Pro vytékání vosku bývají na skořepině tzv. vytavovací kolíky, které jsou vyrobeny z vosku a nalepeny na stromeček před obalováním. Před procesem vytavování jsou konce kolíků odříznuty, aby vznikly otvory ve skořepině, kudy vosk může vytékat. [3]



Obr. 7 Křivka expanzního chování vosku, pryskyřice a homogenní krystalické látky [6]

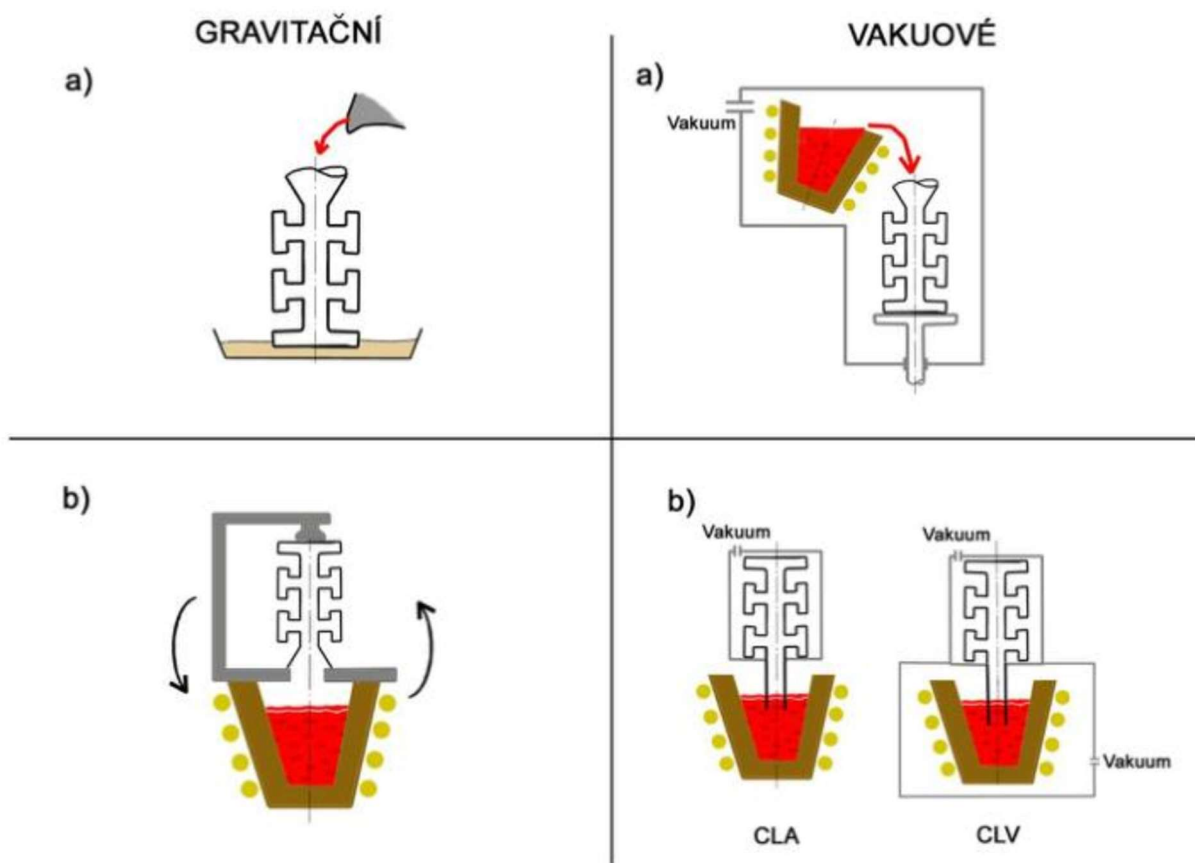
Vytavování voskového modelu se v praxi nejčastěji provádí v autoklávu tepelným šokem, ale lze jej provést několika způsoby. Vytavování lze provádět v peci za vysoké teploty asi 900 až 1 000 °C, při které dojde jednak k vytavení vosku, ale i k vypálení skořepiny. Další možností je vytavování za nízké teploty v roztavené hmotě stejného složení jako modely nebo lze vytavování provést dielektrickým ohřevem. Poslední způsob vytavování vosku je horkým vzduchem, kdy je proud horkého vzduchu zaveden do středu vtoku a dochází k odtavování z vnitřku. [1]

Po vytavení vosku se skořepiny kontrolují, vyplachují a případně opravují žárupevným tmelem. Také jsou v této fázi ucpány a zalepeny vytavovacími otvory. Dále mohou být skořepiny zcela nebo částečně zabaleny do skelné vaty, aby se v požadovaném místě drželo teplo. [3]

Před samotným odléváním jsou skořepiny zavřeny na několik hodin do vytvrzovací pece. Při vytvrzování dojde k odstranění zbytků vosku a těkavých látek, které zbyly po vytavování, dále dochází ke zhutnění struktury a dosažení požadované pevnosti skořepiny a také je forma před litím předehřátá na požadovanou teplotu. Vypalování skořepin probíhá většinou za teplot 950 až 1 100 °C. [1, 2]

2.4.5 Odlévání

Roztavený kov je většinou odléván do skořepiny okamžitě po jejím vytažení z vypalovací pece. Při předehřátí skořepiny dochází k nižším teplotním šokům, vznikají nižší vnitřní pnutí a snižuje se riziko prasklin. Lití je prováděno gravitačně nebo za použití vakua. Gravitační lití může být klasické nebo sklopné. Metody lití za použití vakua se nejčastěji používají základní dvě, a to tavení a gravitační lití ve vakuu a vakuové nasávání (viz obr. 8) Lití za použití vakua se používá pro odlitky s vyššími požadavky na kvalitu. [10]



Obr. 8 Gravitační odlévání: a) klasické, b) sklopné, vakuové odlévání: a) tavení a gravitační lití ve vakuu, b) vakuové nasávání [10]

2.4.6 Dokončovací operace

Tato část výrobního procesu tvoří jednu z pracovně nejnáročnějších oblastí sléváren přesného lití na vytavitelný model. Uvádí se, že tyto dokončovací operace tvoří kolem 27% hodinové práce zaměstnanců sléváren. Do této oblasti patří rozbití a odstranění skořepiny a případně tepelné izolace formy (např. skelná vata), oddělení odlitků, tryskání, broušení, loužení keramických jader, tepelné zpracování a dokončovací operace. [6]

Nejprve je z odlitku odstraněna většina keramického pláště. Odstraňování bývá obvykle provedeno mechanicky. Vibrační kladiva uvolňují keramiku a na odlitcích jí ulpívá relativně malé množství. Tato operace patří mezi nejprašnější a nejhluchější

operace celého procesu, přestože se v posledních letech rozmáhají zvukotěsné a prachotěsné vylamovací skříně. [6]

Dále jsou odlitky odděleny od vtokové soustavy pomocí rozbrušovacího kotouče nebo třecí pily a hrubě otryskány od zbytků žáruvzdorného materiálu formy. Následuje odřezání vtoků a čištění abrazivním tryskáním ocelovými broky nebo křemičitým pískem.

Řezací stroje se dělí na dva základní typy: [6]

- Stroje s pevnými koly, kde je práce přiváděna na kolo
- Stroje s řezným zdvihem, kde je kolo přiloženo k upnutému obrobku

Žáruvzdorný materiál formy lze také odstranit chemicky, nejběžnější chemické metody čištění využívají soli (hydroxid sodný) rozpuštěné v lázni s teplotou mezi 500 - 600 °C nebo alkalické koncentráty (hydroxid draselný) v horké žíravé vodní lázni, která má teplotu kolem 800 °C. Po chemickém čištění musí být odlitky důkladně opláchnuty vodou. Běžně se ale keramický plášť z převážné části odstraňuje nejprve jiným způsobem a až následně chemicky. Odstranění celého keramického pláště chemicky by bylo velmi neefektivní a neekonomické. Solné lázně a horké vodné žíravé roztoky slouží také k odstranění žáruvzdorných keramických jader. Pro složité odlitky s těžko přístupnými jádry je možné využít louhování v autoklávu. Vysokotlaké a přerušované tlakové autoklávové systémy umožňují úspěšné odstranění i těch nejsložitějších jader. [1, 6]

Mezi dokončovací operace také patří tepelné zpracování odlitků a obrábění.

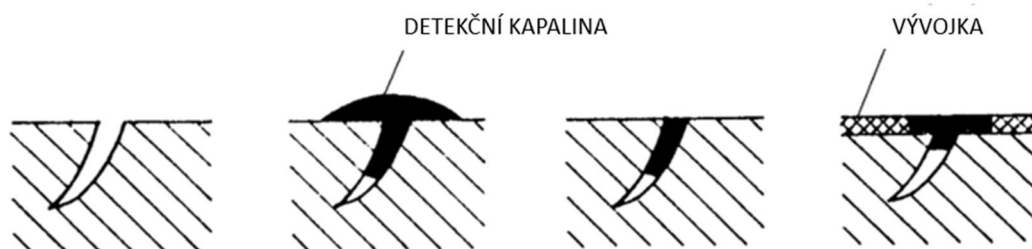
2.4.7 Kontrola

Kontrola je velmi důležitou součástí procesu. Vyrobena součást musí splňovat požadavky uvedené na výrobním výkrese a specifické požadavky zákazníka a podle toho se také stanovují kontrolní metody.

U výrobků lze obecně kontrolovat rozměrovou a geometrickou přesnost, vnější nečelivost a kvalitu povrchu. Dále také materiálové, chemické a mechanické vlastnosti a je možné provádět i další kontrolu pomocí různých nedestruktivních zkoušek, včetně zkoušky těsnosti. [6]

Mezi metody kontroly rozměrové správnosti odlitků patří měření mikrometrem, měření ručními a automatickými měřidly, měření na souřadnicových strojích a na 3D SMS. Správnost rozměrů je nevyhnutelných požadavkem na odlitky prémiové kvality vyráběné metodou přesného lití na vytavitelný model a je zejména důležitá pro odlitky, které budou následně vysokorychlostně obráběny. [6]

Kvalita povrchu je kontrolována a určována pomocí detekce povrchových trhlin a jiných povrchových nedokonalostí, které lze detekovat velkým množstvím metod. Mezi tyto metody patří v první řadě vizuální kontrola, která je nejlevnější a nejsnazší. Dále pak chemické leptání, penetrační zkoušky (obr. 9), kontrola metodou vířivých proudů a magnetických rozptylových toků, která dokáže odhalit i vady těsně pod povrchem. Všechny tyto zkoušky vyžadují relativně hladký a čistý povrch. [6]



Obr. 9 Schéma penetrační zkoušky pro zjišťování povrchových vad [13]

Pro detekci vnitřních vad v odlitcích se nejčastěji používá radiografie a kontrola ultrazvukem. Radiografie poskytuje podrobnou kontrolu a je možné tak identifikovat vady nacházející se v odlitku. Kontrola ultrazvukem není tak univerzální jako radiografie a je vhodná spíše pro jednodušší odlitky. Ultrazvukem je možné měřit i rozměry, jako je tloušťka stěn v místech, kam není možné se dostat pomocí jednoduchých měřidel.

[4, 6]

3. Problematika měření teplot s akcentem využití za vakua

Teplota je jednou z nejdůležitější fyzikálních veličin v průmyslu a je proto žádoucí ji správně a přesně měřit. V oblasti slévárenství je měření teplot důležité zejména pro získání skutečných parametrů lícího procesu a určení kritických parametrů, kdy je možné zaručit výrobu kvalitních odlitků bez vad. V případě přesného lití na vytavitelný model je to zejména skutečná teplota formy, při které je kov odlit do formy. S tím souvisí mezní čas, do kdy musí dojít k odlití, aby forma po vyndání z předehřívací pece nezchladla pod krajní teplotu. Při předehřátí skořepiny mezi správné rozmezí teplot dochází k nižším teplotním šokům, vznikají nižší vnitřní pnutí a snižuje se riziko prasklin.

Základní dělení způsobů měření teploty je na dotykové a bezdotykové. V případě dotykového měření je měřidlo v přímém kontaktu s měřeným objektem. Při bezdotykovém měření měřidlo zachycuje infračervené záření o určité vlnové délce vyzařované tělesem. V prostředí vakua teoreticky není možné měřit bezdotykově, protože po vyčerpání vzduchu se vlny nemají jak šířit. V praxi nelze dosáhnout úplného vakua a vždy zůstane alespoň minimum vzduchu přítomno. Bezdotykové měření se pro vakuové aplikace zatím nepoužívá.

Teplotu v prostředí vakua lze měřit několika různými typy snímačů. Všechny tyto snímače pracují na stejném principu, kterým je sledování změn některé fyzikální charakteristiky. [14]

Rozdělení dotykových snímačů teploty: [15]

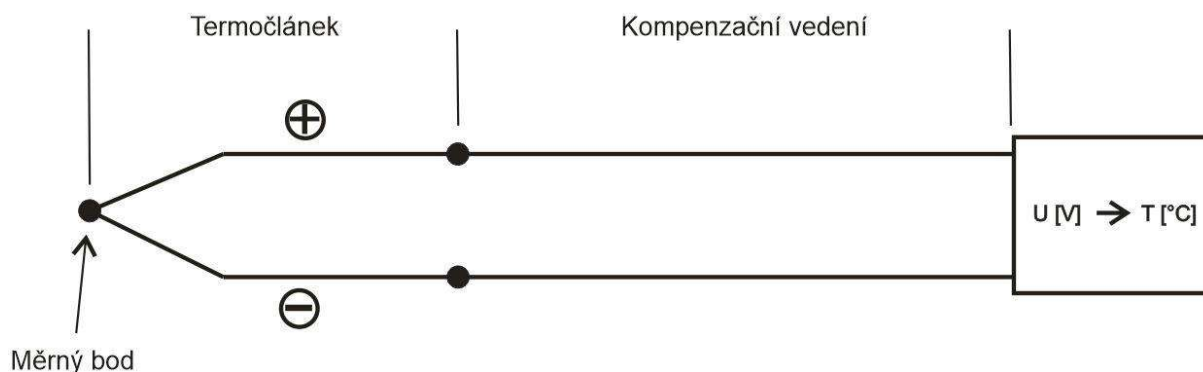
- Termoelektrické teplotní snímače
- Odporové teplotní snímače
- Dilatační teplotní snímače
- Speciální dotykové teplotní snímače

V technické praxi jsou nejčastěji využívány 2 druhy snímačů, které mohou pracovat i v prostředí vakua. Těmi jsou termočlánky a odporová teplotní zařízení a budou jim věnovány následující kapitoly. [14]

3.1 Termoelektrické teplotní snímače

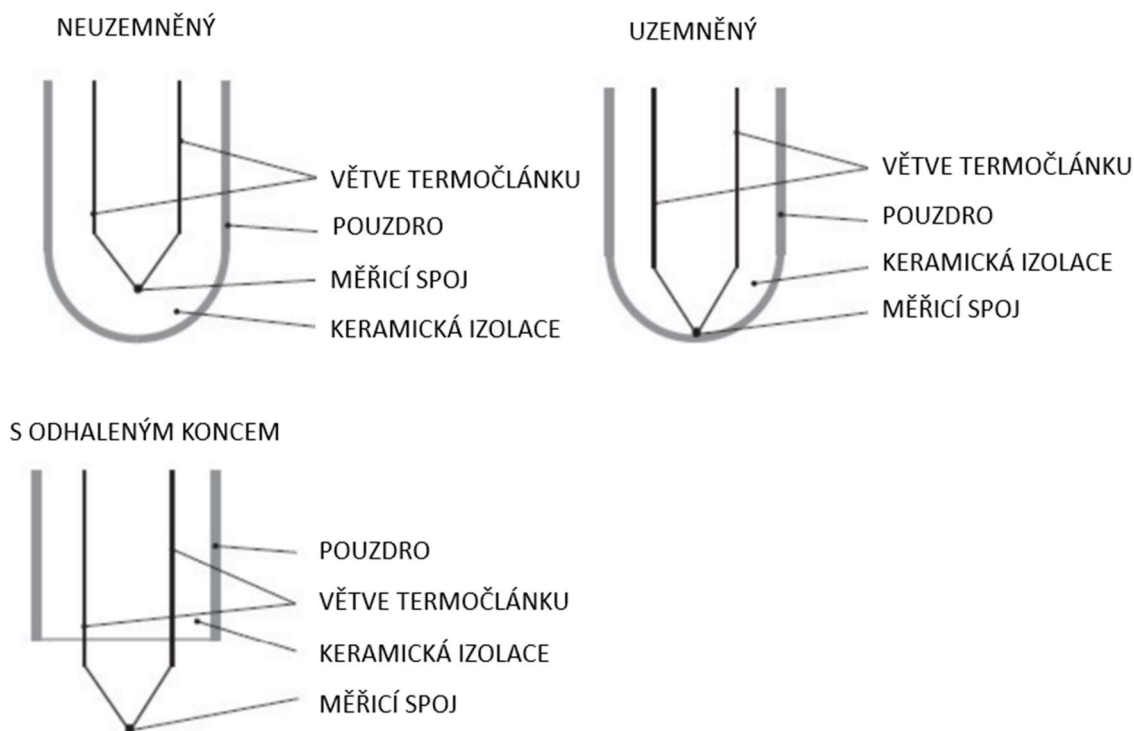
Měření teploty pomocí termoelektrických teplotních snímačů neboli termočlánků patří mezi nejpoužívanější metody měření teploty. Jejich funkce a tolerance specifikuje norma ČSN EN 60584-1 vydaná v květnu 2014. Výrobní tolerance a značení prodlužovacího a kompenzačního vedení udává norma ČSN EN 60584-3 ed.2 vydaná v listopadu 2021.

Základní konstrukce termočlánku je velmi jednoduchá. Jedná se o dva dráty z různých kovů a slitin, které jsou na jednom konci spojeny k sobě a na druhém konci jsou nechány rozpojeny. Termočlánky bývají často uloženy v ochranném pouzdře, které má za úkol termočlánek chránit před vlivy okolního prostředí. Pouzdro (plášť) bývá nejčastěji kovové nebo keramické. Volný nespojený konec termočlánku je dále napojen do měřicího přístroje přímo nebo přes vedení (obr. 10). Vedení je vyrobeno ze značně levnějších materiálů než termočlánek a je izolováno polymerními materiály nebo kompozity. Izolace chrání vedení před zvýšenou teplotou a vlivy okolního prostředí. [14]



Obr. 10 Schéma měření pomocí termočlánku [16]

Termočlánek opatřený ochranným pouzdrům může být trojího typu a to s odhaleným koncem, uzemněný nebo neuzemněný. V případě termočlánu s odhaleným koncem je spoj termočlánekových drátů (měřicí spoj) mimo pouzdro a je tak vystaven působení okolního prostředí. Tento typ má nejkratší dobu odezvy, ale má také omezené použití. Nelze jej použít v korozivních prostředích a za zvýšeného tlaku. V případě uzemněného termočlánu je spoj termočlánekových drátů přivařen k ochrannému pouzdrům. Následkem toho je doba odezvy delší než u termočlánu s odhaleným pouzdrům, ale má širší využití. Doporučuje se použití pro měření teplot statických i proudících korozivních kapalin a plynů a pro vysokotlaké aplikace. Neuzemněné termočlánu mají termočlánekové dráty od pouzdra elektricky izolovány pomocí prášku (např. MgO). Tento typ termočlánu se využívá především pro měření teplot v korozivním prostředí. Jednotlivá provedení měřicího konce termočlánu jsou zobrazeny na obr. 11. [14]

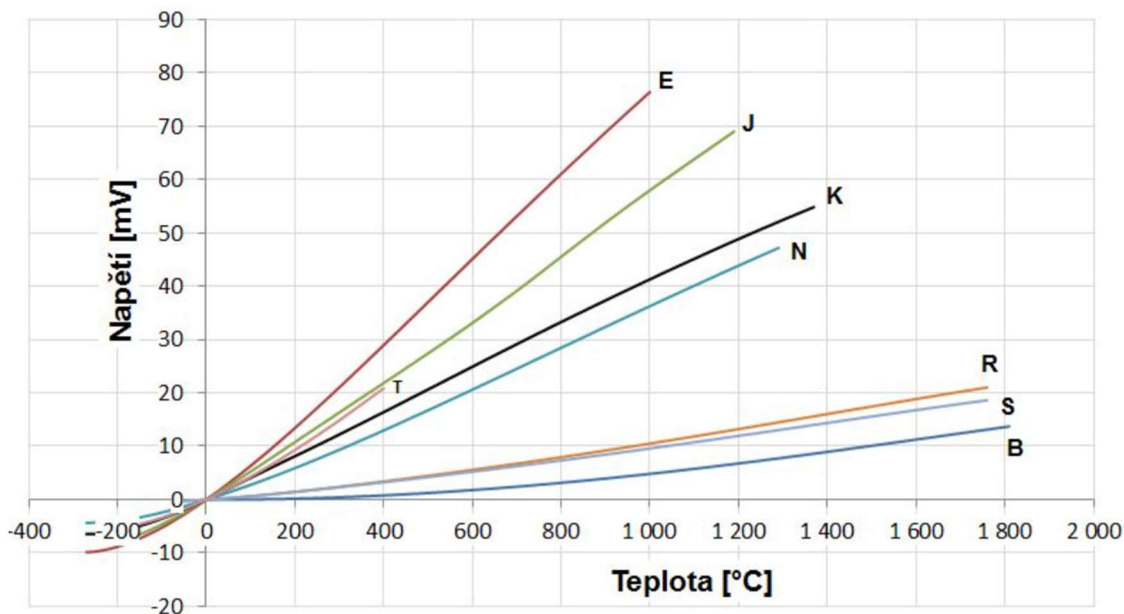


Obr. 11 Provedení měřicího konce termočlánu [17]

Napětí vzniklé na termočlátku v místě měření je k voltmetru nebo měřicí stanici přivedeno pomocí prodlužovacího nebo kompenzačního vedení a spojovacím vedením. Prodlužovací vedení má shodné složení jako samotný termočlánek z obecných kovů. Pro termočlátky ze vzácných kovů je určeno kompenzační vedení, které je vyrobeno z obecných kovů. Kompenzační i prodlužovací vedení mají stejné termoelektrické vlastnosti jako termočlánek, ale mají omezené použití většinou do 200 °C, výjimečně i o něco vyšší. Spojovací vedení může, ale nemusí, být použito. Nejčastěji bývá z mědi. [15]

Princip měření je velmi jednoduchý. Při měření je využíván tzv. Seebeckův jev. Seebeckův (termoelektrický) jev je schopnost materiálu generovat napětí za přítomnosti teplotního gradientu a přeměňovat tak tepelnou energii na elektrickou. To znamená, že změna teploty na spojeném (měrném) konci se projeví změnou teploty na konci studeném. Hodnotu napětí U zaznamenává voltmetr a pohybuje se v řádu desítek mV v závislosti na použitém termočlátku. V případě použití termočlátku typu E, J, K a N je naměřené napětí vyšší a měří se nižší teploty než při použití termočlátek typu R, S a B. Z charakteristiky použitého termočlátku, viz obr. 12, je následně možné odečíst teplotu v měřeném bodě odpovídající známé hodnotě napětí. [14, 16, 18]

Největšími výhodami termočlátek jsou lineární charakteristika závislosti napětí na teplotě, velký rozsah měřených teplot a malý průměr sondy odpovídají aplikaci a typu termočlátku. Nevýhodou je malá citlivost díky malým hodnotám výstupního napětí. [14]



Obr. 12 Porovnání charakteristik termočlánků [16]

Obecnými požadavky na termočlánky jsou: [19]

- Vysoký koeficient teplotního napětí
- Lineární průběh napětí
- Stálost termoelektrických vlastností v čase
- Mechanická a chemická odolnost
- Odolnost proti korozi
- Použití v širokém rozsahu teplot

Kombinací materiálů termočlánků je nespočet a volba vhodného typu termočlánku závisí na teplotním rozsahu, chemické odolnosti termočlánku nebo materiálu pláště, odolnosti proti otěru a vibracím a také na požadavcích na instalaci (omezený prostor). V následující tabulce (tab. 1) jsou uvedeny základní typy termočlánků a jejich oblast použití. Maximální měřicí rozsah závisí na průměru termočlánekového drátu a může se dle výrobce mírně lišit.

Tab. 1 Nejčastěji používané typy termočlánků [20]

| Typ | Měřicí rozsah [°C] | Kombinace materiálů | Použití |
|-----|-----------------------|---|--|
| B | 0 až 1 700 | Pt, 30%Rh - Pt, 6%Rh | pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení |
| C | 0 až 2 300 | W, 5%Re - W, 26%Re | pro měření vysokých teplot, křehký |
| D | 0 až 2 300 | W, 3%Re - W, 25%Re | pro měření vysokých teplot, křehký |
| E | -200 až 950 | Ni, 10%Cr - Cu, 45% Ni | všeobecné použití, pro měření středních a nižších teplot |
| G | 0 až 2 300 | W - W, 26%Re | pro měření vysokých teplot, křehký |
| J | -210 až 1 200 | Fe - Cu, 45%Ni | pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře |
| K | -200 až 1 250 | Ni, 10%Cr - Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si | všeobecné použití v oxidační atmosféře |
| N | -270 až 1 300 | Ni, 14%Cr, 1,5%Si - Ni, 4,5%Si, 0,1%Mg | nový typ, náhrady typu K |
| R | -50 až 1 750 | Pt, 13%Rh - Pt | velmi přesný, pro vyšší teploty |
| S | -50 až 1 750 | Pt, 10%Rh - Pt | velmi přesný, pro vyšší teploty |
| T | -270 až 400 | Cu - Cu, 45%Ni | všeobecné použití pro nižší teploty, odolný vlhkosti |

3.2 Odporové teplotní snímače

Odporové teplotní snímače jsou stejně jako termočlánky jedním z nejpoužívanějších způsobů měření teploty v průmyslu. Využívají závislost elektrického odporu materiálu na teplotě. Tato závislost je vyjádřena teplotním součinitelem odporu α [K^{-1}]. Základní rozdělení odporových teplotních snímačů je na kovové a polovodičové podle materiálu použitého rezistoru. Odporové teplotní snímače jsou složeny z drátu nebo destičky, jádra a pláště. Jádro a plášť bývá nejčastěji ze skla nebo keramiky. Samotné snímače se často ještě umísťují do ochranné jímky. [15]

3.2.1 Kovové odporové snímače

Princip kovového odporového snímače spočívá v závislosti velikosti odporu kovu na teplotě. Při zvyšující se teplotě dochází v krystalické mřížce kovu k rostoucímu počtu srážek volných elektronů a kladně nabitých iontů, to má za následek růst odporu. Tato závislost lze vyjádřit aproximační rovnicí pomocí polynomu [21]

$$R = R_0 (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 + \dots), \quad (3.1)$$

kde R [Ω] je odpor při teplotě t [$^{\circ}C$], R_0 [Ω] je odpor při teplotě $0^{\circ}C$ a A , B a C jsou materiálové konstanty uvedené v normě ČSN EN 60751. V technické praxi se běžně vystačí s polynomem 2. stupně. Při popisu snímačů se také používá tzv. poměr odporů W_t [-] [21, 22]

$$W_t = R / R_0, \quad (3.2)$$

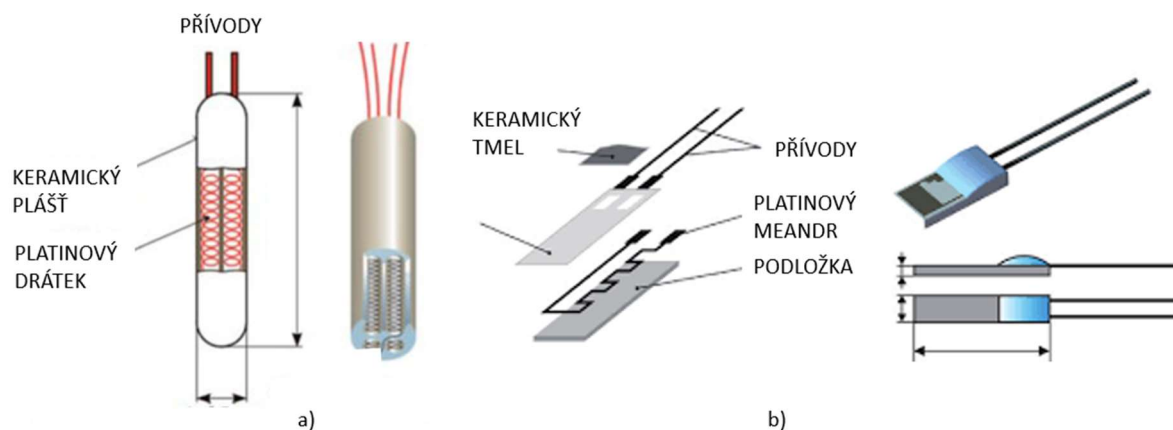
kde R [Ω] je odpor při teplotě t [$^{\circ}C$] a R_0 [Ω] je odpor při teplotě $0^{\circ}C$.

Kovové odporové teplotní snímače mají nejčastěji drátek z platiny, niklu nebo mědi. Platinové snímače mají největší měřicí rozsah a jsou proto využívány i do aplikací měření vysokých teplot. Niklové snímače jsou určeny pro výrazně nižší měřené teploty, ale oproti platinovým snímačům mají výhodu rychlejší odezvy a vyšší citlivosti. Porovnání měřicích rozsahů a odporů je uvedeno v tab. 2. [21, 22]

Tab. 2 Porovnání nejpoužívanějších kovových odporových snímačů teploty [21, 22]

| Materiál snímače | Základní odpor R_0 [Ω] | Poměr odporů W_t [-] | Měřicí rozsah [$^{\circ}\text{C}$] |
|------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| Pt | 100 | 1,385 | -200 až 850 |
| Ni | 100 | 1,618 | -60 až 180 |
| Cu | 100 | 1,426 | -200 až 200 |

Odporové snímače teploty jsou tvořeny rezistorem vinutým z kovového drátku nebo plošným rezistorem, viz obr. 13. V případě rezistorů tvořených drátkem je drátek o průměru 0,01 až 0,05 mm spirálově stočený kolem jádra a uložený v keramickém nebo skleněném pouzdře. Běžně se vyrábí s odporem R_0 100 až 500 Ω . Plošné rezistory jsou vyráběny technikou tenkých nebo tlustých vrstev a vinutí je nahrazeno vrstvou platiny nebo niklu nanesenou na nosné destičce z keramiky. Tlustovrstvá technologie spočívá v nanášení platiny ve formě pasty na podklad a následné tepelné stabilizaci a laserovém nastavení hodnoty R_0 . Tenkovrstvá technologie spočívá v napařování nebo napařování vrstvy platiny ve vakuu. Oproti drátkovým rezistorům mají rychlejší odezvu, větší odpor a jsou levnější. Výhodou drátkových rezistorů je větší časová stálost a odolnost proti vibracím. [22, 23]



Obr. 13 a) Drátový odporový měřicí rezistor, b) Plošný odporový měřicí rezistor [21]

Nejčastěji používané platinové kovové odporové snímače teploty se podle normy ČSN IEC 751 dělí do dvou tříd přesnosti. Každá třída platí pro daný rozsah teplot a platí pro ni tolerance, viz tab. 3. Toleranční třída A je přesnější než toleranční třída B. [22]

Tab. 3 Toleranční třídy platinových odporových snímačů teploty [22]

| Třída | Rozsah teplot [°C] | Tolerance [°C] |
|-------|--------------------|--------------------------|
| A | -200 až 650 | $\pm (0,15 + 0,002 t)$ |
| B | -200 až 850 | $\pm (0,3 + 0,005 t)$ |

3.2.2 Polovodičové odporové snímače

Polovodičové odporové snímače teploty fungují na principu změny odporu, která je zapříčiněna teplotní závislostí koncentrace nosičů náboje. Dělí na termistory a monokrystalické snímače. Termistory se dále dělí na negastory (NTC - Negative Temperatur Coefficient) a pozistory (PTC - Positive Temperature Coefficient). Princip termistorů spočívá v závislosti odporu

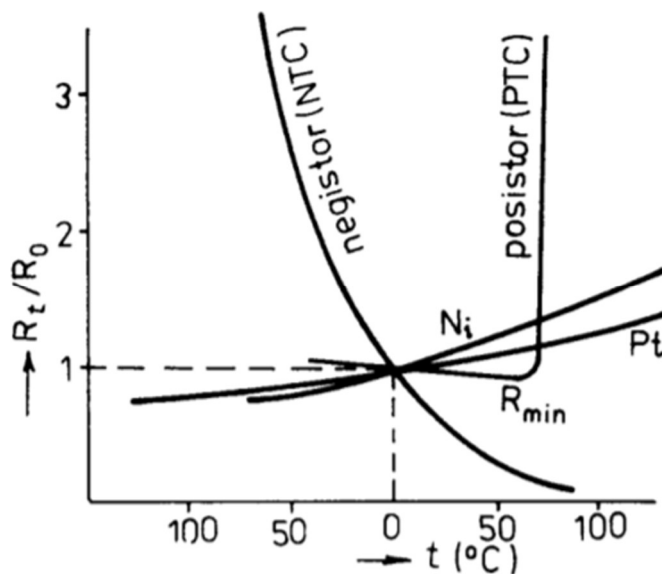
materiálu na teplotě způsobené závislostí koncentrace volných nosičů náboje na teplotě. [23]

Negastory (NTC) mají běžný měřicí rozsah od -50 do 150 °C, ale při výrobě pomocí práškové technologie lze snížit dolní hranici rozsahu až do -250 °C nebo zvýšit horní hranici až na $1\ 000$ °C. Prášková technologie spočívá v lisování směsi oxidů případně karbidů kovů. Dále je možné negastory vyrábět tenkovrstvou technologií. Tím je možné hranice rozsahu posouvat, ne však tolik jako při výrobě práškovou technologií. Negastory se vyznačují záporným teplotním koeficientem, to znamená, že s rostoucí teplotou jejich odpor klesá. Závislost odporu na teplotě je exponenciální. Nevýhodou je menší časová stálost a poškození při přehřátí. Negastory se nejčastěji používají jen pro malé rozsahy teplot např. při měření teploty chladicí kapaliny v automobilech nebo při měření teploty větracích a klimatizačních zařízení. [23, 24]

Pozistory (PTC) mívají měřicí rozsah od 60 do 180 °C. Na rozdíl od negastorů mají kladný teplotní koeficient. Nejprve odpor mírně klesá, při dosažení referenční teploty začne prudce narůstat a pro vysoké teploty opět klesá. Pozistory se vyrábí z polykrystalické feroelektrické keramiky jako je např. BaTiO_3 . Využívají se nejčastěji jako dvoustavové snímače, kdy signalizují překročení přípustné teploty. [23, 24]

Monokrystalické polovodičové snímače teploty fungují na principu změny pohyblivosti volných nosičů náboje se změnou teploty. Při zvyšování teploty se bude pohyblivost nosičů snižovat, tím klesne vodivost a vzroste odpor. Typický měřicí rozsah bývá od -50 do 150 °C. Mezi výhody těchto snímačů patří hlavně linearita. Vyrábí se nejčastěji z křemíku (Si), ale mohou být i z germania (Ge), india (In) a dalších. [23, 24]

Na obr. 14 je zobrazeno porovnání závislosti odporu na teplotě vybraných kovových odporových snímačů teploty (Ni, Pt) a polovodičových odporových snímačů teploty (NTC, PTC).



Obr. 14 Teplotní závislost odporu vybraných odporových snímačů teploty [15]

3.3 Termografie

Infračervená termografie umožňuje mapování teplotních polí zkoumaného objektu. Termokamera zachytává infračervené záření vyzařované tělesem a vizualizuje ho v podobě infračervených snímků (termogramů). Termokamera neměří přímo teplotu, ale na základě rovnice termografie ji stanovuje. Využívá přitom Planckova vyzařovacího zákona a Stefan-Boltzmannova zákona

$$I = \sigma \cdot T^4, \quad (3.3)$$

kde I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je intenzita záření, σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$] je Stefan-Boltzmannova konstanta a T [K] je termodynamická teplota.

Jedním z nejdůležitějších parametrů při měření termokamerou je emisivita. Emisivita je schopnost materiálu tepelně vyzařovat. Není konstantní po celém povrchu a je funkcí teploty a vlnové délky. Maximální hodnota emisivity je 1 a této hodnoty dosahuje pouze černé těleso. Čím vyšší je hodnota emisivity,

tím více tepelného záření je těleso schopno při dané povrchové teplotě vyzařit. Dalším důležitým parametrem je odrazná zdánlivá teplota. Ta charakterizuje okolní tepelné záření, které se od povrchu tělesa odráží. Mezi emisivitou a zdánlivou odraznou teplotou platí vztah

$$\rho = 1 - \varepsilon, \quad (3.4)$$

kde ρ [-] je odrazivost a ε [-] je emisivita pozorovaného tělesa. Z tohoto vztahu vyplývá, že čím menší je emisivita, tím větší vliv bude mít odrazivost. To má vliv především na přesnost měření. [25]

Termografie je velmi perspektivní obor měření teplot. V současné době se využívá čím dál více. Pro měření teplot těles v prostředí vakua se zatím nepoužívá kvůli několika nevyřešeným otázkám. Teorie říká, že dokonalé vakuum je vzduchoprázdno a neobsahuje žádné částice hmoty ani záření. Termokamery zachytávají infračervené záření, které by se v případě dokonalého vakua nemělo jak šířit a dostat se tak od tělesa k termokameře. V technické praxi se nikdy dokonalého vakua nedosahuje, a proto se infračervené záření bude šířit, i když pravděpodobně omezeně. Otázkou také je, co se stane se zařízením, pokud bude umístěno do prostředí vakua. Riziko poškození je zejména u čoček a baterie termokamery. Dalším problémem je pak omezený prostor vakuové pece, kdy termokamery musí být relativně blízko měřeného objektu a je proto nutný velmi široký úhel záběru termokamery. Problém pak může nastat i díky teplu vyzařovanému tělesem, které blízko umístěnou termokameru může poškodit. Problematika měření termokamerou v prostředí vakua by proto měla být tématem dalšího výzkumu, tato práce se mu ale dále věnovat nebude.

4. Návrh experimentu

Experiment byl navržen ve spolupráci se společností Walter Praguecast a.s., která se věnuje výrobě odlitků metodou přesného lití na vytavitelný model. Experiment byl zvolen tak, aby byl jednak zajímavý pro tuto práci a zároveň měl pozitivní přínos pro společnost Walter Praguecast. Společnost aktuálně řeší problematiku rychlosti odlití kovu do předeřáté skořepiny. Časová prodleva mezi vyjmutím skořepiny z předeřívací pece a odlitím kovu vzniká transportem a manipulací se skořepinou. Hlavním úkolem experimentu bylo zjistit teplotní závislosti předeřáté skořepiny na čase a to hlavně za sníženého tlaku ve vakuové peci. Pro společnost bylo také důležité určit, jaký vliv má odsávání vzduchu z dolní komory vakuové pece na teplotu skořepiny. Bylo plánováno data dále použít pro simulace procesu, na základě kterých by dále bylo možné proces vylepšit.

4.1 Společnost Walter Praguecast

V roce 1911 založil pan Josef Walter akciovou společnost Walter a spol., aby ve své továrně získal financování rozvoje výroby automobilů. Společnost vyráběla luxusní automobily Walter Royal. Vývoj a výroba leteckých motorů se rozběhly po roce 1922, kdy řízení společnosti převzala rodina Kumperů. Známost značky dále rostla a byla spojována s přesnými a kvalitními výrobky. V roce 1949 došlo ke změně jména společnosti na Motorlet. V roce 1995 se stal obchodním ředitelem společnosti pan Michal Černý a začal společnost směřovat k návratu k původní značce. Turbovrtulové motory se na přelomu tisíciletí prodávali do USA, kde byly používány nejčastěji do práškovacích letadel a letadel protipožární služby. Výroba leteckých motorů byla následně prodána společnosti General Electric a značná část původní továrny se začala přestavovat v novou rezidenční a kancelářskou čtvrt. Společnost Walter Praguecast tak zůstala jediným

pokračovatelem původní značky. Společnost se zabývá výrobou přesných odlitků kriticky namáhaných statorových a rotorových dílů plynových turbín (obr. 15). Rodina Černých vlastní slévárnu od podzimu 2020 a vrátila jí do názvu jméno původního zakladatele. [3]



Obr. 15 Typické výrobky společnosti Walter Praguecast [3]

4.2 Popis návrhu experimentu

Náplní navrženého experimentu bylo měření teplotních polí přehřáté skořepiny v dolní komoře vakuové pece. Cílem bylo blíže poznat celý proces a zjistit, jaký vliv má odsávání vzduchu z dolní komory pece na průběh teploty skořepiny a závislost teploty skořepiny na čase. Experimentem také měla být získána data pro simulaci procesu. Simulace jsou v současné době důležité pro usnadnění a urychlení vývoje nových dílů a jejich zavedení do výroby, proto je nutné mít správně odladěné parametry, aby simulace co nejlépe odpovídala skutečnosti.

Jako nejvhodnější způsob měření teploty bylo zvoleno měření pomocí termočlánků (viz kapitola 3). Bylo navrženo, že termočlánky budou připevněny ke skořepině ve vybraných místech a spojeny s měřicí stanicí pomocí vedení protaženého vhodným otvorem do vakuové pece. Bylo nutné vedení v otvoru pece dobře utěsnit. Velikost otvoru určovala maximální množství termočlánků, pro které je do vakuové pece možné protáhnout vedení. Plánováno bylo několik měření. Prvním měřením bylo měření teplot holé skořepiny při chladnutí na vzduchu. Další měření byla plánována ve vakuové peci. Bylo plánováno měření holé skořepiny, následně částečně zabalené skořepiny a nakonec zcela zabalené skořepiny při chladnutí ve vakuu. Skořepina byla zabalena Sibralem různé tloušťky. Posledním plánovaným měřením bylo měření zabalené skořepiny na vzduchu.

Tab. 4 Plánovaná měření

| Plánovaná měření | | |
|-------------------|-----------|--------|
| skořepina - zábal | prostředí | |
| | vzduch | vakuum |
| holá | ✓ | ✓ |
| částečně zabalená | - | ✓ |
| zabalená | ✓ | ✓ |

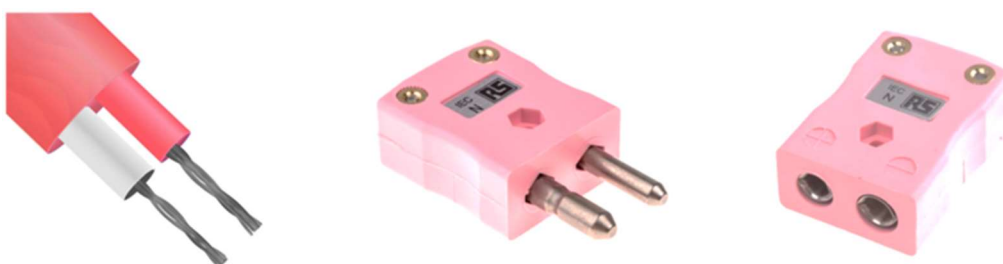
Termočlánky byly vybrány drátové, typu N s měřicím rozsahem -270 až 1 300 °C. Složení termočlánků typu N je NiCroSil - NiSil a vyznačují se vysokou termoelektrickou stabilitou a oxidační odolností.

Pro sběr dat byla vybrána měřicí stanice Ahlborn Almemo 5690-2M (obr. 16), která zvládne zaznamenávat data pro velké množství termočlánků současně.



Obr. 16 Měřicí stanice Ahlborn Almemo 5690-2M [26]

Protože by měřicí stanice nezvládla tlak vakua a nemůže být umístěna do vakuové pece, bylo nutné navrhnout vhodné termočláňkové vedení s možností rychlého zapojení termočláňků. Pro rychlé zapojování termočláňků byly vybrány klasické termočláňkové konektory. Vybrané příslušenství pro termočláňky typu N je na obr. 17. Dle normy ICT je zbarveno růžově a dle normy ANSI zbarveno hnědě.



Obr. 17 Termočláňkové vedení a konektor pro připojení [27]

5. Realizace experimentu a jeho vyhodnocení

Experiment byl realizován ve spolupráci se společností Walter Praguecast a.s.. Z důvodu utajení firemního „know-how“ nejsou uvedeny přesné parametry vybrané součásti a pouze vybrané parametry výroby skořepiny. Podrobný popis jednotlivých operací procesu a možností jejich provedení jsou uvedeny v kapitole 2.4. Experiment se skládal z výroby skořepiny, připevnění termočlánků, následných několika měření a jejich vyhodnocení.

5.1 Výroba skořepiny

První fází experimentu byl výběr dílu vhodného pro experiment. Díl neměl být moc velký, aby forma nebyla těžká a manipulace s ní nebyla příliš náročná. Zároveň bylo potřeba, aby na díl šly dobře a pevně připevnit termočlánky. Pro získání informací o vlivu umístění dílu na stromečku bylo vhodné, aby v sestavě stromečku bylo použito rameno místo kruhového kolektoru, který se v současnosti používá čím dál více kvůli stejným parametrům lití pro všechny díly na stromečku. Pro menší složitost bylo vhodné zvolit díl bez jádra. Jako nejvhodnější díl byla proto zvolena lopatka turbíny pro energetický průmysl. Lopatka na délku měří kolem 350 mm. Přesné informace ani rozměry nebudou uvedeny z důvodu utajení „know-how“ společnosti Walter Praguecast.

Nejprve byly za pomoci vstřikovacího lisu odstříknuty voskové modely do kovové formy, dále byly ochlazeny a byla provedena 3D kontrola rozměrů, viz kapitola 2.4.1. Pro experiment bylo možné použít modely, které neprošly rozměrovou kontrolou a byly by jinak recyklovány, protože skořepina měla být použita pouze pro účely experimentu a nebylo plánováno do ní odlévat kov. Následně byly voskové modely upraveny pro potřeby experimentu (viz obr. 18). Červeným

opravným voskem byly zaslepeny díry, které byly pro experiment zbytečné a komplikovaly by tvar modelu a tedy i skořepiny.



Obr. 18 Lopatka turbíny pro energetický průmysl

Za použití vybraných dílů vtokové soustavy byly voskové modely lopatek sestaveny do stromečku. Postup sestavování stromečků je zachycen na obr. 19 a je popsán v kapitole 2.4.2. Sestavený stromeček je na obr. 20. Stromeček se skládá z licí jamky, ramene, kanálek a vytavovacích kolíků. Sestaveny byly dva stromečky pro případ, že by při některé z dalších operací došlo k poškození jednoho z nich.



Obr. 19 Lepení voskových modelů lopatek na vtokovou soustavu



Obr. 20 Sestavený stromeček

Sestavené stromečky dále pokračovaly na obalování, kde bylo několik počátečních obalů provedeno ručně v břečce na vodní bázi (viz obr. 21), následující obaly byly provedeny na robotizovaném pracovišti v břečce na alkoholové bázi (viz obr. 22). Obaly provedené na robotu byly sušeny v amoniakovém tunelu. Podrobný postup je popsán v kapitole 2.4.3. Počet obalů byl 13 a výsledná tloušťka skořepiny byla 8 ± 1 mm.



Obr. 21 Stromeček po počátečních obalech v břečce na vodní bázi



Obr. 22 Stromeček po obalu v břečce na alkoholové bázi

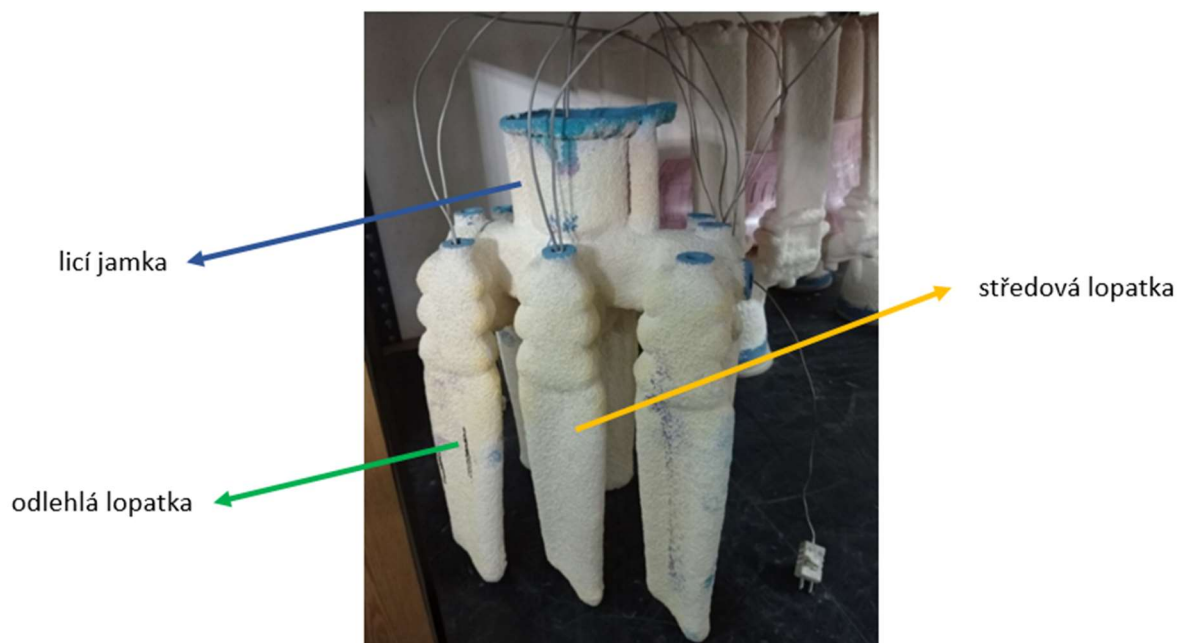
Následující operací bylo vytavování vosku, popsané v kapitole 2.4.4. Nejprve byly odřezány konce vytavovacích kolíků a následně byly stromečky umístěny do autoklávu, kde došlo k vytavení vosku. Skořepiny po vytavení vosku pokračovaly na vypalování do vypalovací pece. Hotové skořepiny připravené k další přípravě jsou na obr. 23. Skořepiny nebylo oproti zvyklosti potřeba vyplachovat a kontrolovat na praskliny detekční kapalinou, protože měly sloužit pouze pro tento experiment. Praskliny nebo malé vady by nijak nenarušily měření.



Obr. 23 Připravené skořepiny

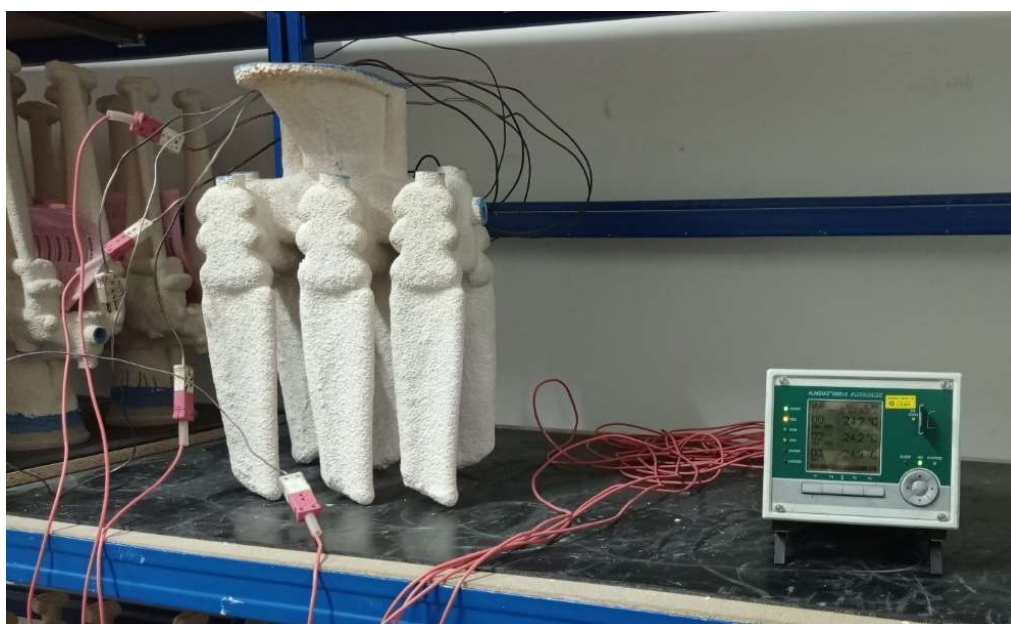
5.2 Připevnění termočlánků a měřicí sestava

Pro experiment byly vybrány termočlánky typu N, které se ve společnosti Walter Praguecast používají i pro jiné aplikace a byly snadno dostupné. Složení N termočlánků je NiCroSil - NiSil, jsou použitelné do 1 300 °C a jejich hlavní výhodou je vysoká odolnost proti oxidaci při vysokých teplotách. Použito bylo pět termočlánků o průměru 3 mm a jeden o průměru 2 mm. Tyto termočlánky byly pomocí keramického žáruvzdorného lepidla připevněny na jednu z vyrobených skořepin do vybraných míst měření. Zvolena byla tři místa měření, na dně vtokové jamky a na dně listu středové a odlehlé lopatky. Všechna místa měření byla opatřena dvěma termočlánky pro případ, kdy by jeden z termočlánků selhal, aby bylo možné zapojit místo něj duplicitní. Skořepina s termočlánky a označenými místy měření je na obr. 24. Měření budou současně 4 termočlánky, protože pro více nebylo možné protáhnout vedení otvorem do dolní komory vakuové pece. Jako místo, pro které budou měřeny oba termočlánky, bylo vybráno dno listu odlehlé lopatky.



Obr. 24 *Skořepina opatřená termočládky*

Na obr. 25 je zobrazeno zapojení celé měřicí soustavy mimo vakuovou pec. Konektory termočládků byly použity standartní normalizované. Byly vyrobeny z odolného termoplastu naplněného skelným vláknem a použitelné do teploty 220 °C. Termočládkové vedení bylo dlouhé 4 m. Průměr vedení byl 3,5 mm, jednotlivé prameny byly o průměru 0,2 mm. Materiál izolace byl použit PVC s použitelností do 105 °C.



Obr. 25 *Měřicí sestava*

5.3 Měření teplot holé skořepiny při chladnutí na vzduchu

Nejprve bylo provedeno měření holé skořepiny při chladnutí na vzduchu. Protože nebylo nutné, aby termočláňkové vedení bylo připraveno ve vakuové peci, byl měřen průběh teplot při chladnutí i ohřevu skořepiny. Celá sestava byla nejprve připravena před předehřívací pec s nastavenou teplotou $1\ 100 \pm 20\ ^\circ\text{C}$. Bylo odstartováno měření a následně byla skořepina zastrčena do pece a termočláňky byly protaženy pod vraty, viz obr. 26 a 27. Vrata byla zajištěna zarážkou, aby vznikla malá mezera pro průchod termočláňků. V případě, že by vrata nebyla zajištěna, došlo by k ustřižení termočláňků. I přes netěsnost vrat si pec udržovala nastavenou teplotu a nedocházelo k poklesu teploty pod požadovanou hranici.



Obr. 26 Skořepina v předehřívací peci



Obr. 27 Skořepina v předehřívací peci se zajištěnými vraty

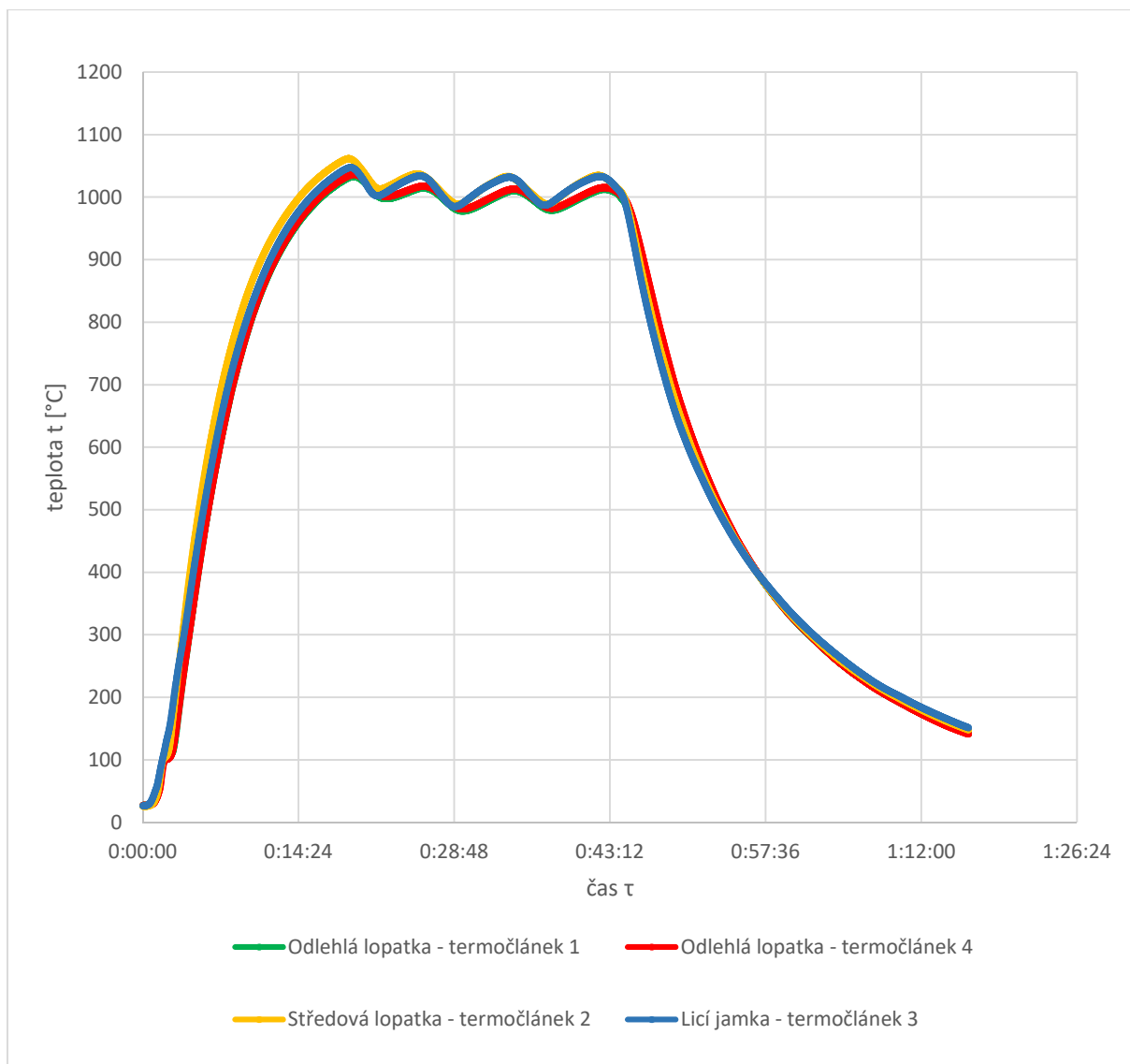
Skořepina byla v peci ponechána, dokud teplota na termočláncích stoupala. Po 20 minutách ohřevu začala teplota skořepiny stoupat a opět klesat podle teploty v peci, která se pohybovala mezi horní a spodní nastavenou hranicí. Skořepina byla z pece vyjmuta po 43 minutách ohřevu a následně byla na vozíku ponechána chladnout, viz obr. 28.



Obr. 28 Chladnoucí holá skořepina se zapojenými termočlánci

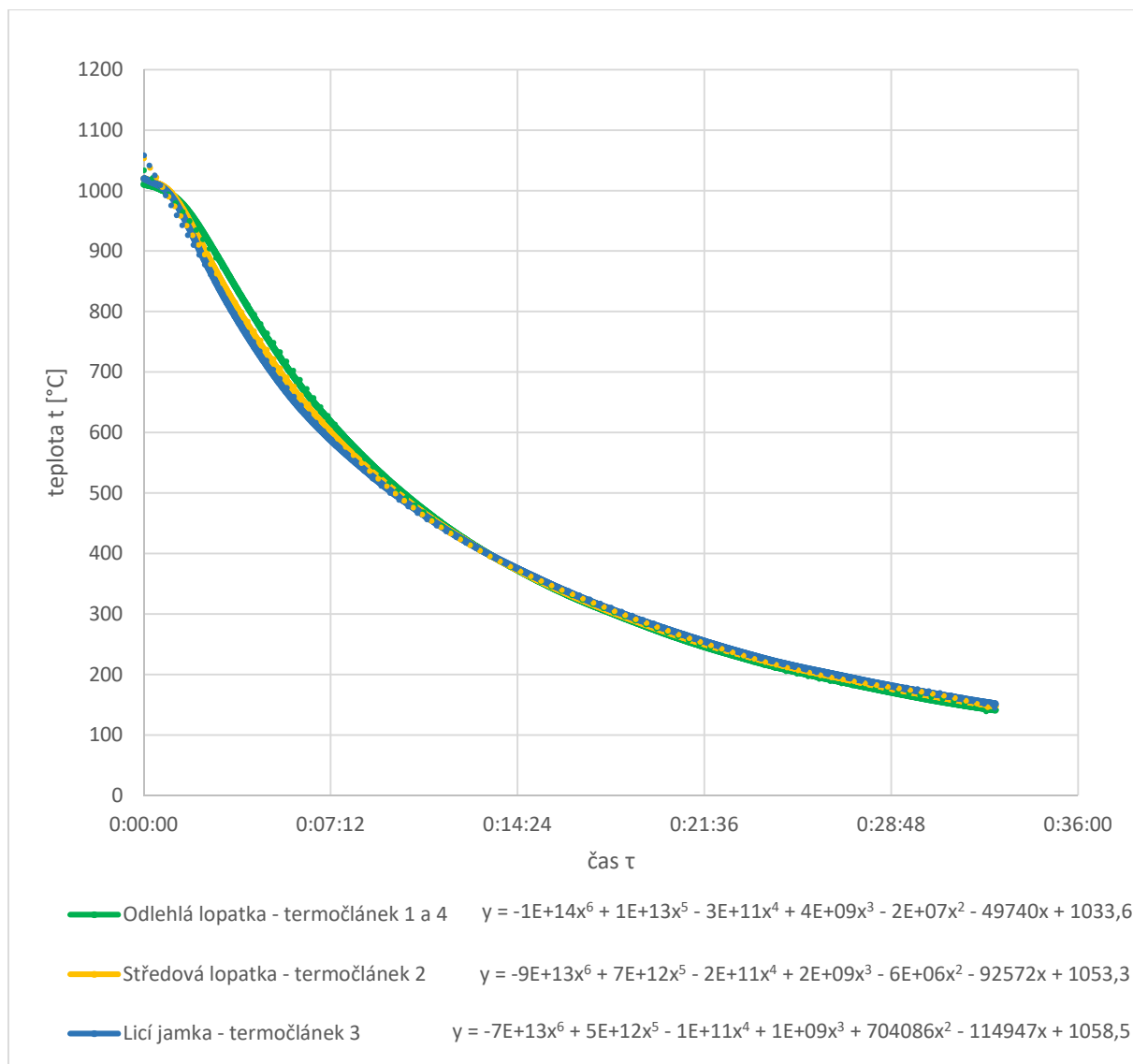
Měřením byla získána křivka ohřevu a chladnutí, která je zobrazena na obr. 29. Na křivce je velmi dobře viditelné kolísání teploty skořepiny podle teploty pece. Teploty nad 1 000 °C dosáhla skořepina v měřených místech již v čase 0:16:28. Nejvyšší teplota byla dosažena ve všech měřených bodech po cca 19 minutách ohřevu.

Termočlánek 1 a termočlánek 4, které byly umístěny na dno listu odlehlé lopatky, naměřily velmi podobné hodnoty. Rozptyl hodnot byl v rozmezí nepřesnosti měření termočlánců. Data získaná z termočlánců 1 a 4 byla zprůměrována a dále bylo pracováno s těmito hodnotami. Termočlánek 2 byl umístěn na dno listu středové lopatky a termočlánek 3 byl umístěn na dno licí jamky.



Obr. 29 Průběh ohřevu a chladnutí holé skořepiny na vzduchu

Z křivek chladnutí na obr. 30 je viditelné, že všechna měřená místa skořepiny měla po vyjmutí z pece velmi podobnou teplotu a průběh chladnutí byl také velmi podobný. Žádné z měřených míst skořepiny nechladlo oproti ostatním místům výrazně rychleji či pomaleji. Křivky a jejich rovnice byly získány proložení hodnot polynomem 6. stupně. I přes použití takto vysokého polynomu je z obr. 30 patrné, že v čase 0:00:00 jsou mezi křivkou a naměřenými hodnotami rozdíly cca 30 °C. Křivka se s naměřenými hodnotami vyrovná cca do 1 minuty po začátku chladnutí.



Obr. 30 Chladnutí holé skořepiny na vzduchu

Rovnice pro odlehlou lopatku získaná proložením zprůměrovaných dat získaných termočlánekem 1 a 4 je

$$t = -1E+14\tau^6 + 1E+13\tau^5 - 3E+11\tau^4 + 4E+09\tau^3 - 2E+07\tau^2 - 49\,740\tau + 1\,033,6. \quad (5.1)$$

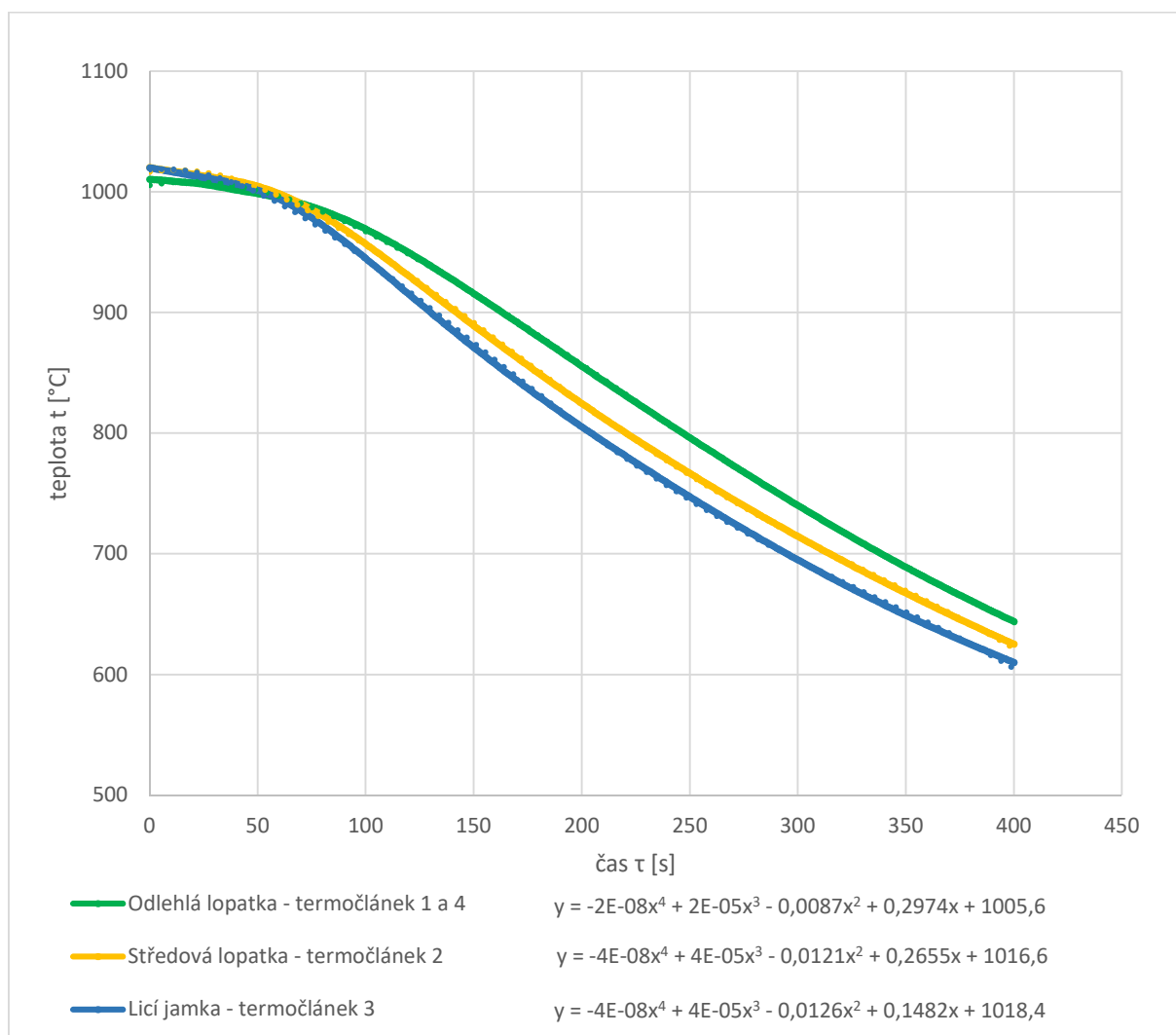
Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánekem 2 je

$$t = -9E+13\tau^6 + 7E+12\tau^5 - 2E+11\tau^4 + 2E+09\tau^3 - 6E+06\tau^2 - 92\,572\tau + 1\,053,3. \quad (5.2)$$

Rovnice pro lící jamku získaná proložení dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = - 7E+13\tau^6 + 5E+12\tau^5 - 1E+11\tau^4 + 1E+09\tau^3 + 704\,086\tau^2 - 114\,947\tau + 1\,058,5. \quad (5.3)$$

Na obr. 31 je zobrazeno prvních 400 sekund chladnutí skořepiny po vyndání z přehřívací pece. Zpravidla lití probíhá do 4 minut (240 sekund) po vyndání, žádoucí je, aby lití proběhlo co nejrychleji.



Obr. 31 Počátek chladnutí holé skořepiny na vzduchu

Z obr. 31 je patrné, že skořepina po vyjmutí z přehřívací pece chladne prvních cca 50 sekund velmi pozvolně, následně chladne rychleji a vypadá téměř lineárně. Nejvhodnější

se ukázalo proložení hodnot polynomem 4. stupně. Ten je přijatelně přesný a zároveň jednodušší než polynom 6. stupně, kterým bylo nutné proložit hodnoty celého průběhu chladnutí, viz obr. 30, aby bylo dosaženo žádoucí přesnosti. Následující rovnice platí v intervalu 0 až 400 sekund.

Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = - 2E-08\tau^4 + 2E-05\tau^3 - 0,0087\tau^2 + 0,2974\tau + 1\ 005,6. \quad (5.4)$$

Rovnice křivky chladnutí středové lopatky platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = - 4E-08\tau^4 + 4E-05\tau^3 - 0,0121\tau^2 + 0,2655\tau + 1\ 016,6. \quad (5.5)$$

Rovnice křivky chladnutí licí jamky platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = - 4E-08\tau^4 + 4E-05\tau^3 - 0,0126\tau^2 + 0,1482\tau + 1\ 018,4. \quad (5.6)$$

5.4 Měření teplot holé skořepiny při chladnutí ve vakuu

Stejně jako při předchozím experimentu byla skořepina opatřená termočlánky ohřívána v peci s nastavenou teplotou $100^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$. Skořepina byla v peci ohřívána přibližně hodinu a teplota v peci při vyjmutí skořepiny dosáhla 1060°C . Mezitím bylo do spodní komory vakuové pece protaženo vedení revizním otvorem. Vedení a průchodka z vnější strany komory je na obr. 32. Vedení bylo pečlivě utěsněno pomocí teflonové těsnicí pásky. Na obr. 33 je vidět vakuová pec s protaženým vedením do dolní komory. Místo průchodky z vnitřní strany komory je na obr. 33 žlutě zvýrazněno. Vedení bylo izolováno proti sálání tepla ze skořepiny pomocí skelné vaty Sibal.



Obr. 32 Utěsnění vedení termočlánků ve vakuové peci



Obr. 33 Vakuová pec připravená k experimentu

Na peci byla provedena zkouška natékavosti dolní komory pece. Touto zkouškou se ověřuje těsnost vakuové pece. Nejprve byla dolní komora pece vyčerpána na mezní tlak a následně byl při uzavřeném vakuovém ventilu měřen přírůstek tlaku za čas.

Pro účely této práce byla natékavost vakuové pece určena pomocí vztahu

$$N = \Delta p / \tau \text{ [mbar/hod]}, \quad (5.7)$$

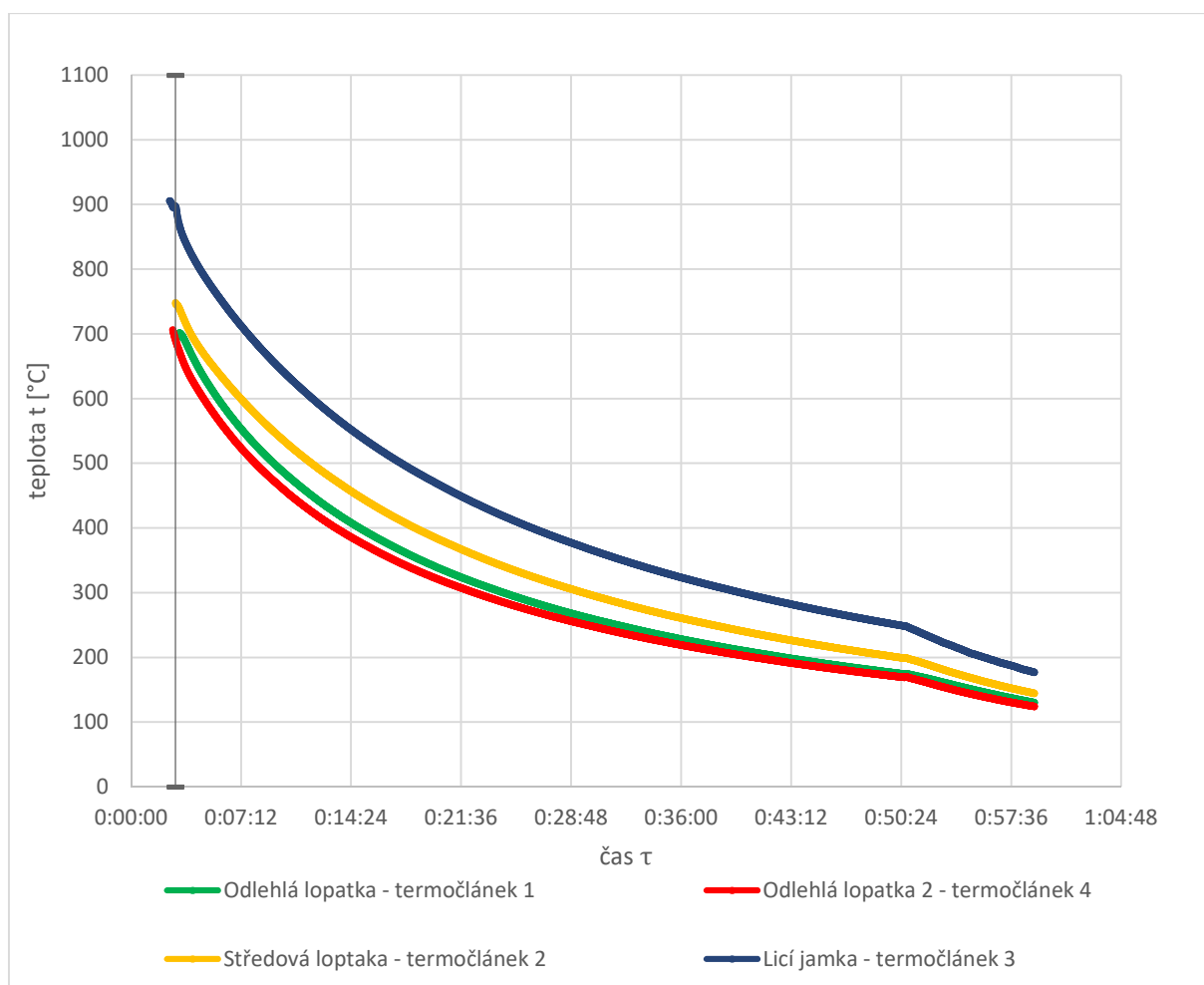
kde Δp je přírůstek tlaku a τ je čas. Použitá vakuová pec má běžně natékavost 25,64 mbar/hod. Při protažení vedení do pece a utěsnění páskou byla natékavost pece výrazně vyšší a to 2 986,98 mbar/hod. Při experimentu byla ponechána zapnutá pumpa, která po celou dobu udržovala tlak v komoře 78,25 mbar.

Po přibližně hodině ohřevu byla skořepina vyjmuta z předehřívací pece a usazena do dolní komory vakuové pece. Konektory termočlánků byly zapojeny a bylo zahájeno měření. Následně byla uzavřena vrata vakuové pece a spuštěno odsávání vzduchu. Po vyjmutí skořepiny z předehřívací pece byly všechny úkony prováděny v co nejkratším čase. Jako počáteční stav měření byl zvolen čas vyjmutí skořepiny z předehřívací pece. Po cca 50 minutách měření byla vakuová komora zavzdušněna a byla otevřena vrata. Měření bylo ukončeno po 10 minutách měření s otevřenými vraty. Měření již výrazně zchladlé skořepiny při otevřených vratech vakuové komory je na obr. 34.



Obr. 34 Měření teplot výrazně zchladlé skořepiny

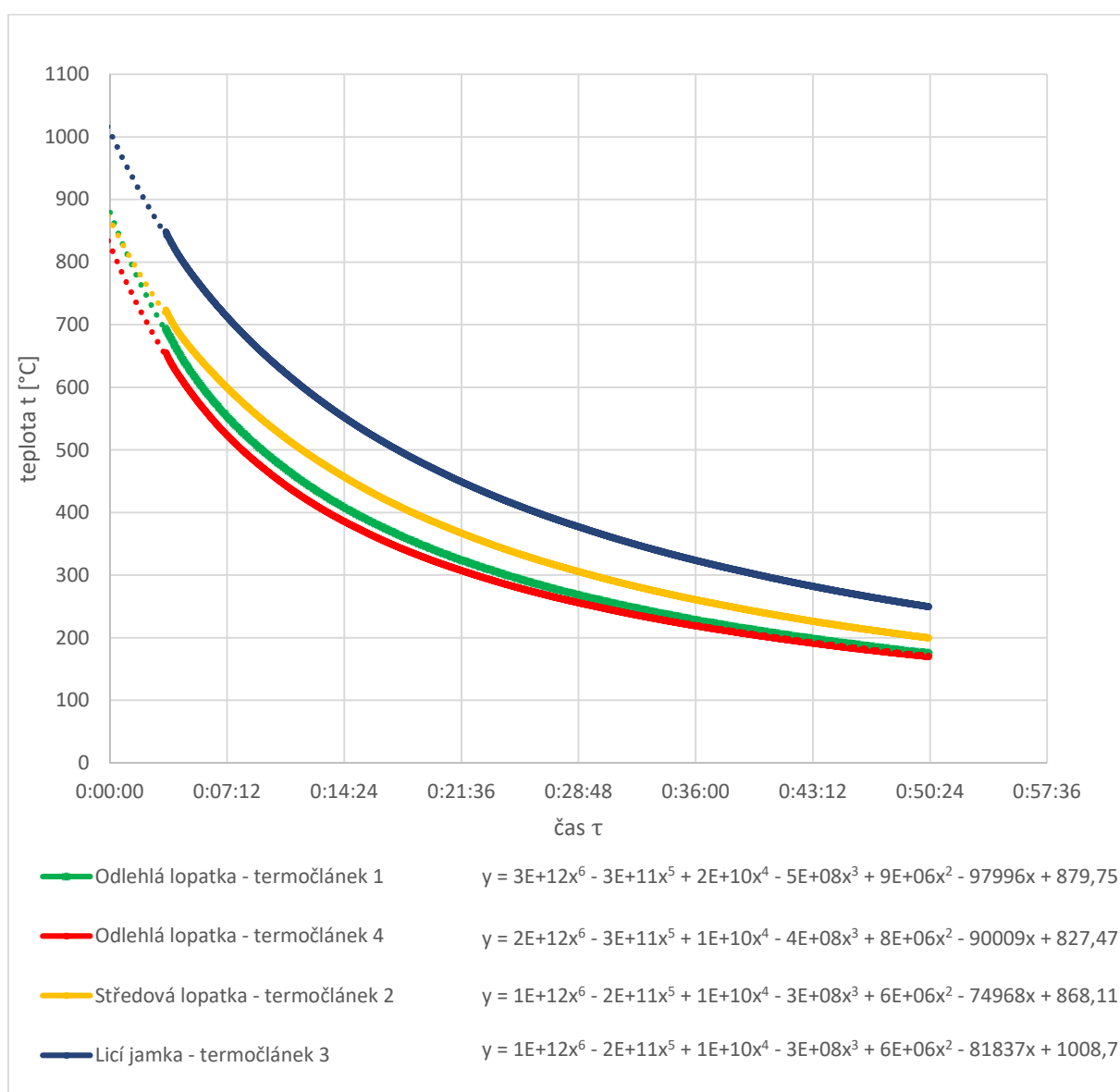
Termočlánek 1 byl umístěn do spodní části lopatky odlehlé od středu formy. Termočlánek 4 byl duplicitním k termočláнку 1. Odlehlá lopatka byla nejdůležitějším měřeným místem, protože bylo předpokládáno, že v ní dochází k nejvýraznějším teplotním změnám. Termočlánek 2 byl umístěn do středové lopatky a termočlánek 3 do licí jamky, kde by měla po celou dobu chladnutí zůstat nejvyšší teplota. Na obr. 35 je vidět průběh chladnutí skořepiny ve všech třech vybraných místech.



Obr. 35 Průběh chladnutí holé skořepiny ve vakuu

Počátek měření a čas 0:00:00 byl zvolen vyjmutí skořepiny z předehřívací pece. Následoval transport skořepiny do komory vakuové pece a zapojení termočláneků. K zapojení všech termočláneků došlo v čase 0:02:54. Vrata vakuové komory byla uzavřena v čase 0:03:26 a odsávání bylo započato v čase 0:03:34.

Vakuová komora byla odsáta na hodnotu tlaku 78,25 mbar a na této hodnotě byl tlak držen. Po 47 minutách měření byla komora zavzdušněna a vrata komory otevřena. Na obr. 35 je tento okamžik velmi patrný, křivky chladnutí začaly klesat rychleji. Bylo zjištěno, že po odsátí vzduchu je teplotní spád mírnější. Ve vakuu skořepina chladla pomaleji než na vzduchu. Nejvyšší teplota se po celou dobu měření udržela v licí jamce, jak bylo žádoucí. Teplota odlehlé lopatky spadla nejrychleji, postupně se její teplota začala vyrovnávat s teplotou středové lopatky.



Obr. 36 Chladnutí holé skořepiny ve vakuu od zavření po otevření vrat

Termočlánky 1 a 4 měly naměřit stejné hodnoty. Z křivek je patrné, že se hodnoty v okamžiku zavření vrat liší téměř o 40 °C. Je tedy pravděpodobné, že se při transportu jeden z termočlánků ve skořepině uvolnil a nedotýkal se skořepiny. To by znamenalo, že měřil teplotu okolního vzduchu a získané výsledky by nebyly správné. Uvolněný termočlánek by měl měřit nižší teploty, díky špatnému šíření tepla při nízkém tlaku. Proto je předpokládáno, že se uvolnil termočlánek 4. Postupně se naměřené hodnoty srovnaly a jejich rozdíl nebyl vyšší než 6 °C.

Na obr. 36 jsou zobrazeny křivky chladnutí skořepiny od uzavření vrat v čase 0:03:26 až po jejich otevření v čase 0:50:20. Získaná data byla proložena křivkou, jejíž rovnice je polynom 6. stupně a která co nejpřesněji kopírovala průběh závislosti teploty t na čase τ . Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky získaná z dat termočlánku 1 je

$$t = 3E+12\tau^6 - 3E+11\tau^5 + 2E+10\tau^4 - 5E+08\tau^3 + 9E+06\tau^2 - 97\,996\tau + 879,75. \quad (5.8)$$

Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánkem 2 je

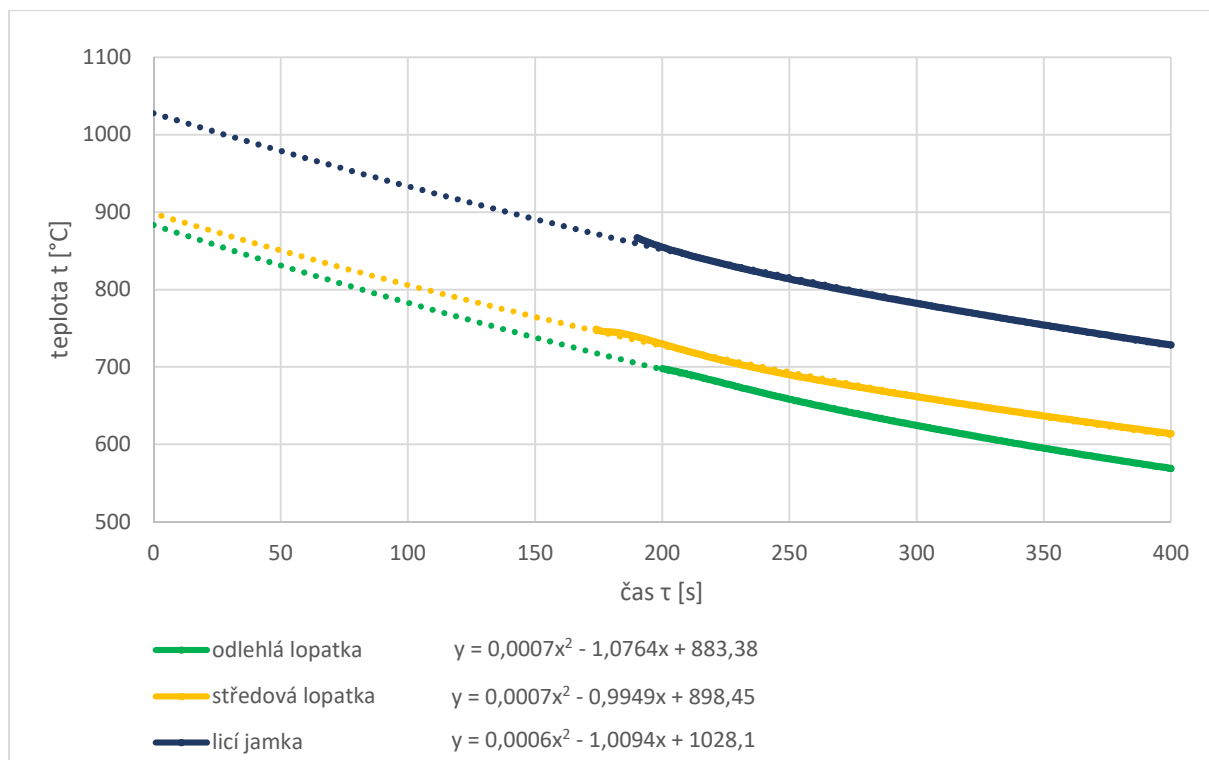
$$t = 1E+12\tau^6 - 2E+11\tau^5 + 1E+10\tau^4 - 4E+08\tau^3 + 6E+06\tau^2 - 74\,968\tau + 868,11. \quad (5.9)$$

Rovnice pro lící jamku získaná proložením dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = 1E+12\tau^6 - 2E+11\tau^5 + 1E+10\tau^4 - 3E+08\tau^3 + 6E+06\tau^2 - 81\,837\tau + 1\,008,7. \quad (5.10)$$

Z rovnic je také možné vyčíst teplotu skořepiny při vyjmutí z předehřívací pece v čase 0:00:00. V předehřívací peci byla teplota 1 060 °C, jak bylo zjištěno předchozím měřením, skořepina teploty v peci nedosáhne a její teplota začne po dosažení svého maxima kolísat stejně jako teplota v peci.

Na obr. 37 je zobrazeno prvních 400 sekund chladnutí holé skořepiny. Tyto počáteční hodnoty bylo možné proložit polynomem 2. stupně. Prvních několik minut je v technologii přesného lití stěžejních. Ve srovnání s rovnicemi získanými proložením všech dat jsou zjištěné počáteční teploty vyšší.



Obr. 37 Počátek chladnutí holé skořepiny

Byly tak získány následující rovnice s platností pouze v intervalu od 0 do 400 sekund.

Rovnice křivky chladnutí pro odlehlou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = 0,0007 \tau^2 - 1,0764\tau + 883,38. \quad (5.11)$$

Rovnice křivky chladnutí pro středovou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = 0,0007 \tau^2 - 0,9949\tau + 898,45. \quad (5.12)$$

Rovnice křivky chladnutí pro licí jamku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = 0,0006 \tau^2 - 1,0094\tau + 1\,028,1. \quad (5.13)$$

5.5 Měření teplot částečně zabalené skořepiny při chladnutí ve vakuu

Nejprve byly termočlánky znovu pevně připevněny do skořepiny pomocí keramického lepidla, protože se při předchozím měření některé z nich uvolnily. Uvolnění mohlo být způsobeno při neopatrné manipulaci se skořepinou nebo vlivem objemových změn při chladnutí. Následně byla skořepina na vybraných místech zabalena skelnou vatou Sibrál o tloušťce 25 a 40 mm, viz obr. 38 a 39. Sibralem 40 mm byla zabalena licí jamka, celá vtoková soustava a listy byly zabaleny Sibralem 25 mm.



Obr. 38 Sběrná skořepina částečně zabalená Sibralem



Obr. 39 Sběrná skořepina částečně zabalená Sibralem

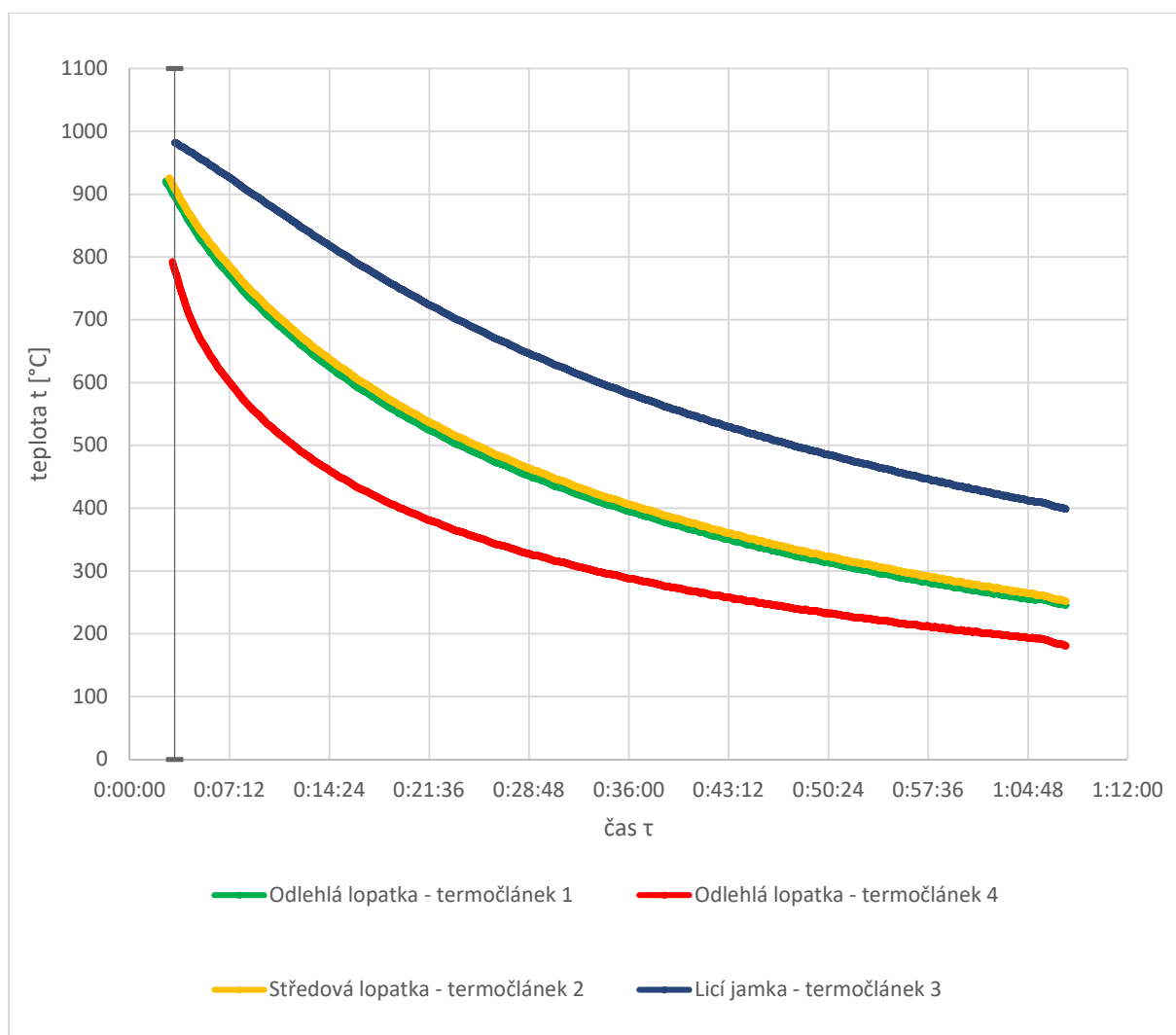
Skořepina byla vložena do předehřívací pece a hodinu předehřívána. Teplota v peci dosáhla 1 054 °C. Vrata byla zajištěna, aby nedošlo k porušení termočlánků. Na obr. 40 je vidět vsouvání skořepiny do pece. Vlivem pootevřených vrat je předehřev náročnější, dochází k pomalejšímu náběhu předehřívací pece na požadovanou teplotu a větší spotřebě plynu.



Obr. 40 Vsouvání skořepiny do předehřívací pece

Další příprava na měření probíhala stejně jako při předchozím měření. Termočlánekové vedení bylo protaženo do vakuové komory a izolováno proti sálání tepla skelnou vatou Sibal. Vedení bylo v otvoru utěsněno teflonovou páskou a netěsnost pece byla určena pomocí zkoušky natékavosti. Natékavost byla spočítána stejně jako u předchozího měření a byla 2 139,44 mbar/hod. Po celou dobu měření byla zapnutá pumpa, která udržovala v dolní komoře vakuové pece tlak 73,65 mbar.

Termočlánek a místa měření zůstala stejná jako u předchozích měření. To znamená, že termočlánek 1 a 4 byly umístěny na dně listu odlehlé lopatky, termočlánek 2 měřil teplotu na dně listu středové lopatky a pomocí termočlánek 3 byla měřena teplota ve spodní části licí jamky. Časová závislost poklesu teploty je zobrazena na obr. 41.

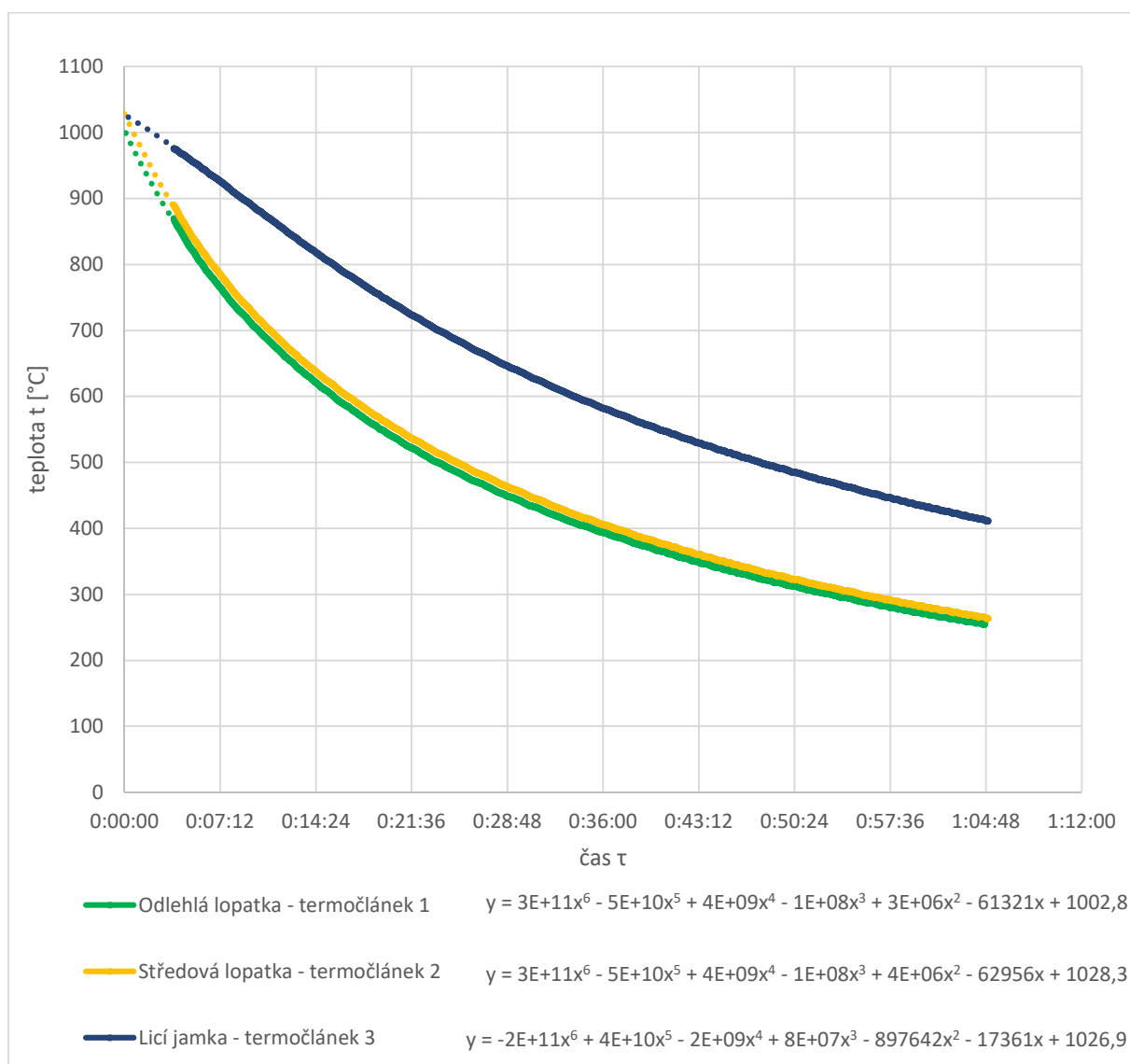


Obr. 41 Chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu

Jako počáteční čas nula byl zvolen čas vyjmutí ohřáté skořepiny z předehřívací pece. K zapojení všech termočláneků došlo v čase 0:03:14, následovalo zavření vrat dolní komory vakuové pece a odsávání bylo spuštěno v čase 0:03:57. V komoře pece bylo dosaženo tlaku 73,65 mbar. K zavzdušnění dolní komory a otevření vrat nastalo v čase 1:04:57 a tento okamžik je na obr. 41 dobře rozpoznatelný.

Z obr. 41 je patrné, že nejvyšší teplotu si dle očekávání udržovala licí jamka. Teploty středové lopatky a odlehlé lopatky měřené termočlánekem 1 byly velmi podobné. Středová lopatka si udržovala teplotu vyšší oproti odlehlé lopatce asi o 14 °C.

Termočlánkem 1 a 4 měly být získány stejné hodnoty, po celou dobu měření však termočlánek 4 ukazoval hodnoty výrazně nižší než by měly být. Po ukončení měření a otevření vrat vakuové komory bylo zjištěno, že došlo k uvolnění termočlátku, který tak měřil teplotu okolí. To je patrné i z průběhu křivky chladnutí. Jak je známo v dokonalém vakuu se teplo sáláním nešíří, v případě tohoto experimentu však není dosahováno skutečného vakua, a proto k sálání tepla dochází. S daty získanými tímto termočlánkem proto nebude dále pracováno.



Obr. 42 Chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu od zavření po otevření vrat

Na obr. 42 jsou vidět křivky chladnutí s počátkem v čase zavření vrat komory vakuové pece 0:03:42. Křivky končí v čase zavzdušnění a otevření vrat 1:04:57. Získaná data byla opět proložena polynomem 6. stupně a průběh byl vyjádřen následujícími rovnicemi.

Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky získaná z dat termočlánku 1 je

$$t = 3E+11\tau^6 - 5E+10\tau^5 + 4E+09\tau^4 - 1E+08\tau^3 + 3E+06\tau^2 - 61\,321\tau + 1\,002,8. \quad (5.14)$$

Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánkem 2 je

$$t = 3E+11\tau^6 - 5E+10\tau^5 + 4E+09\tau^4 - 1E+08\tau^3 + 4E+06\tau^2 - 62\,956\tau + 1\,028,3. \quad (5.15)$$

Rovnice pro licí jamku získaná proložením dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = -2E+11\tau^6 + 4E+10\tau^5 - 2E+09\tau^4 + 8E+07\tau^3 + 897\,642\tau^2 - 17\,361\tau + 1\,026,9. \quad (5.16)$$

Z rovnic a obr. 42 je vidět, že teplotní spád licí jamky byl mnohem pozvolnější než teplotní spád obou lopatek. Z počátku došlo u obou lopatek k nejprudšímu poklesu teploty, který se postupně snižoval vlivem snížení tlaku v komoře pece a snížením rozdílu teplot s okolím.

Stejně jako u předchozího měření byla vytvořena závislost z dat prvních 400 sekund měření, viz obr. 43. Tato data byla opět proložena polynomem 2. stupně a byly získány následující rovnice. Platnost rovnic je v intervalu 0 až 400 sekund.

Rovnice křivky chladnutí pro odlehlou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

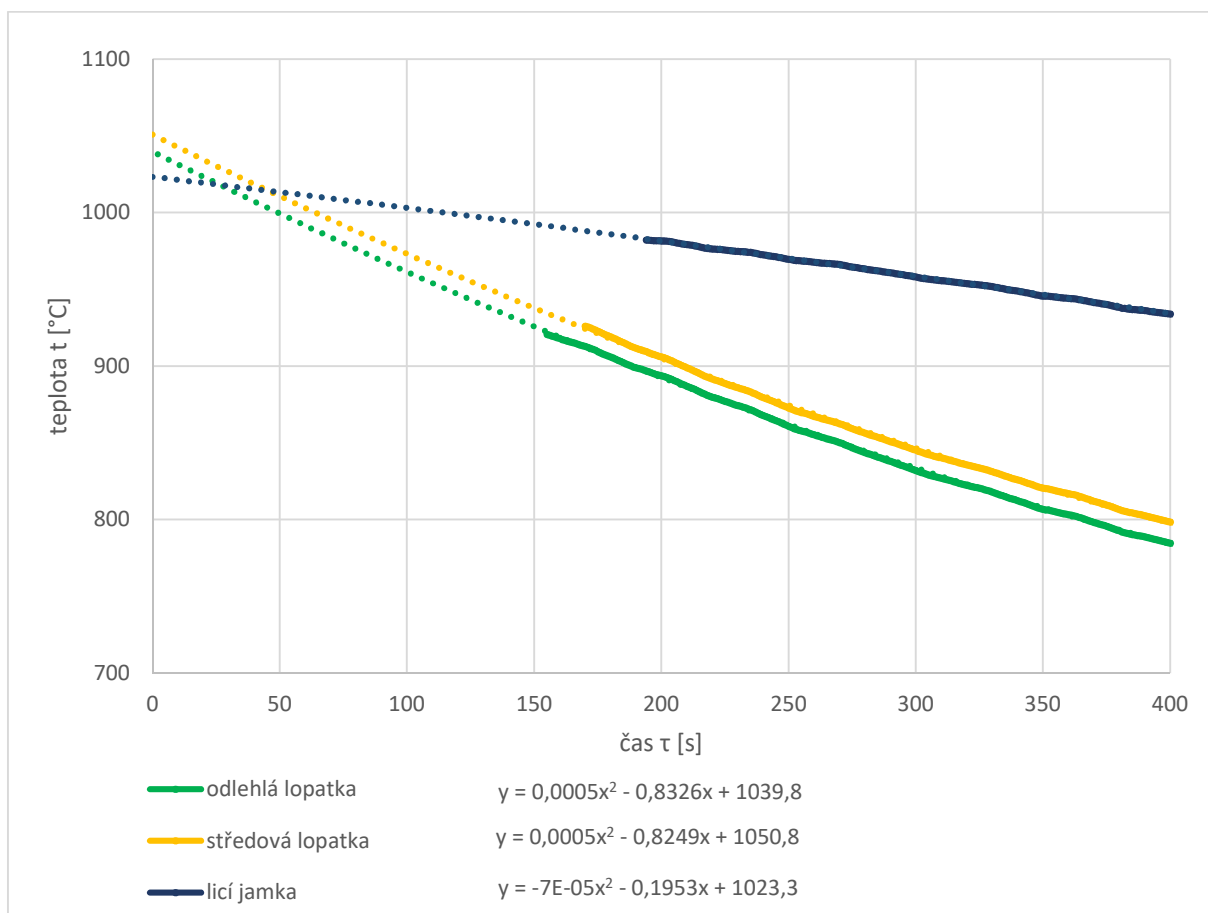
$$t = 0,0005\tau^2 - 0,8326\tau + 1039,8. \quad (5.17)$$

Rovnice křivky chladnutí pro středovou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = 0,0005\tau^2 - 0,8249\tau + 1\,050,8. \quad (5.18)$$

Rovnice křivky chladnutí pro licí jamku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = -7E-05\tau^2 - 0,1953\tau + 1\,023,3. \quad (5.19)$$



Obr. 43 Počátek chladnutí částečně zabalené skořepiny

5.6 Měření teplot zabalené skořepiny ve vakuu

Pro měření byla opět použita stejná skořepina, u které byla nejprve provedena kontrola termočlánků, zda jsou všechny stále funkční a pevně drží ve skořepině. Následně byla celá skořepina zabalena do skelné vaty Sibral o tloušťce 13 mm. Tento způsob balení skořepiny se nazývá balení do „mimina“ a je zachycen na obr. 44 a 45.



Obr. 44 Skořepina zabalená do „mimina“



Obr. 45 Skořepina zabalená do „mimina“

Další postup byl stejný jako u předchozích měření. Nejprve byla skořepina umístěna do předehřívací pece, kde byla po dobu asi 1,5 hodiny ohřívána. Teplota v peci dosáhla 1 066 °C. Čas ohřívání skořepiny v předehřívací peci byl zvolen delší z důvodu pomalejšího prohřívání zabalené skořepiny. Mezitím bylo do spodní komory pece opět protaženo a utěsněno vedení termočlánků a byla změřena natékavost pece. Natékavost byla v tomto případě 1 056,16 mbar/hod. Po dobu měření byl v dolní komoře pece udržován tlak 73,99 mbar.

Předeřtátá skořepina byla transportována do spodní komory vakuové pece, kde byly zapojeny termočlánky. Vrata komory byla uzavřena v čase 0:04:17 a odsávání bylo spuštěno v 0:04:30. V čase 1:27:41 byla spodní komora opět zavzdušněna a následovalo otevření vrat. Na obr. 46 a 47 je vidět celé zapojení po otevření vrat komory.

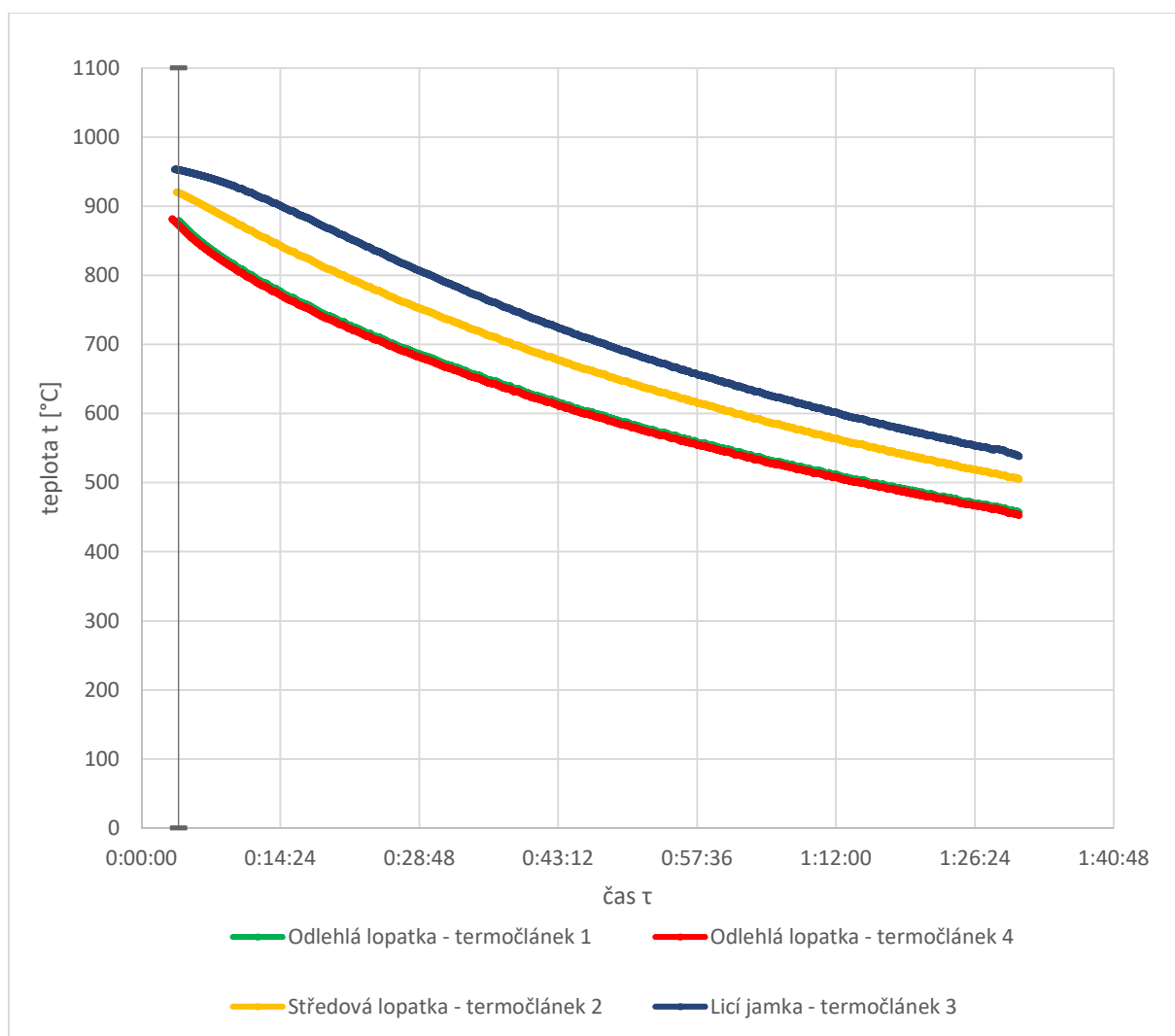


Obr. 46 Měření teplot v dolní komoře vakuové pece



Obr. 47 Zapojení termočlánků v dolní komoře vakuové pece

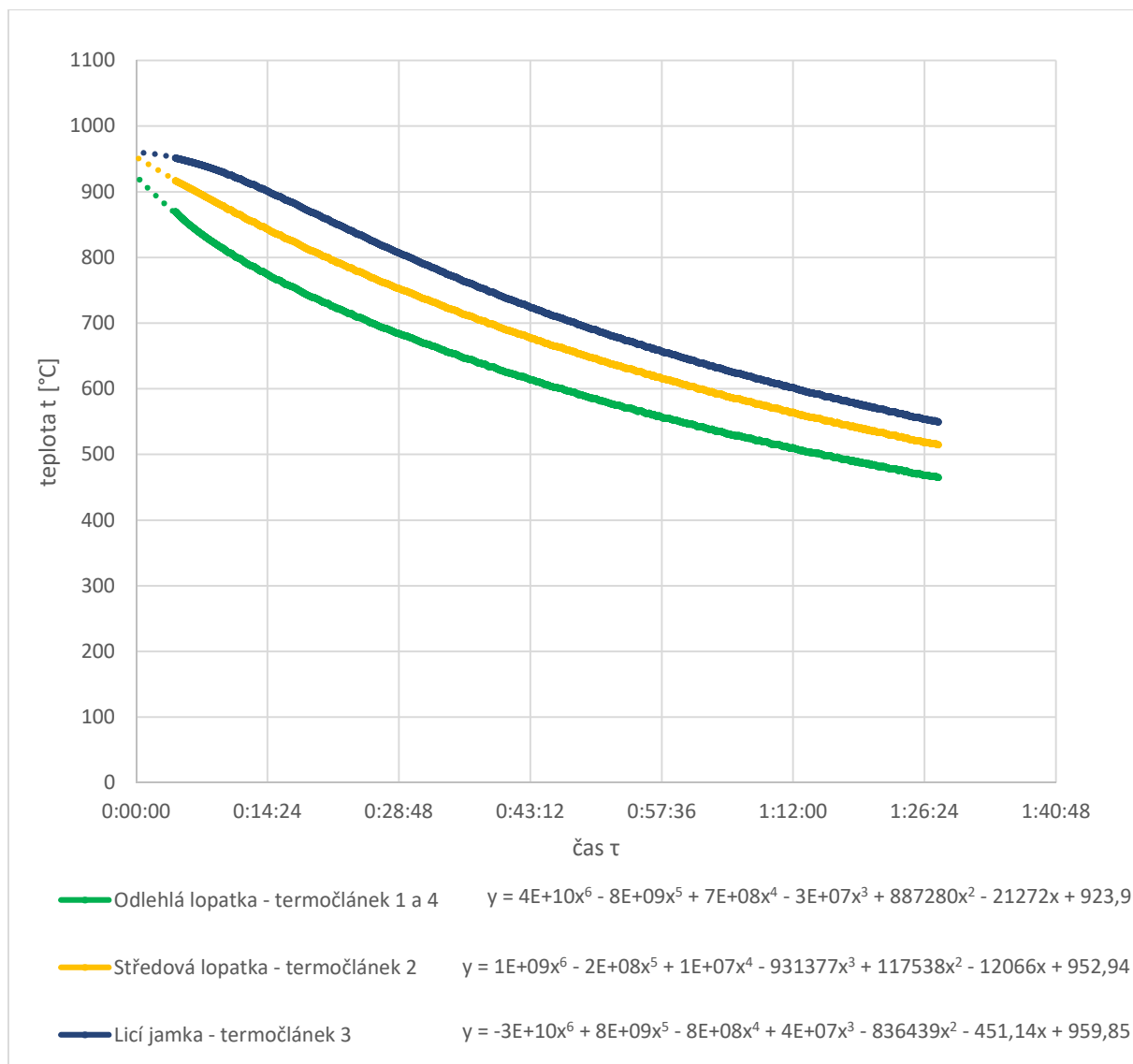
Na obr. 48 je vidět celý průběh chladnutí zabalené skořepiny. Je patrné, že průběh je oproti předchozím měřením značně mírnější. Termočlánek 4, který opět duplikoval termočlánek 1, v tomto měření přinesl smysluplné výsledky. Rozdíl teplot získaných termočlánekem 1 a termočlánekem 4 nepřesahoval rozdíl 4 °C. Tato hodnota je v rámci tolerance měření termočlánky typu N. Termočlánky typu N třídy přesnosti 2 s měřicím rozsahem do 1 200 °C běžně měří s přesností $\pm 2,5$ °C.



Obr. 48 Chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu

Na křivkách chladnutí zobrazených na obr. 48 je vidět počáteční rychlejší teplotní spád odlehlé lopatky, který se po odsátí vzduchu zmírní. Všechny termočláanky byly zapojeny v čase 0:03:51. Křivky se začínají tvarově blížit lineárnímu průběhu. Na konci křivek je opět vidět prudší pokles teplot po zavzdušnění komory a otevření vrat.

Data pro odlehlou lopatku získaná termočláanky 1 a 4 byla zprůměrována a byly získány střední hodnoty. Další křivka chladnutí zobrazená na obr. 49 a následně použitá při porovnání výsledků byla sestavena z těchto středních hodnot.



Obr. 49 Chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu od zavření do otevření vrat

Na obr. 49 jsou zobrazeny křivky chladnutí s počátkem v čase 0:04:17 zavření vrat spodní komory vakuové pece. Křivky končí v čase 1:27:55, kdy jsou vrata komory zavzdušněna a otevřena. Křivky byly vytvořeny proložením dat polynomem 6. stupně.

Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky získaná z průměru dat termočlánek 1 a 4 je

$$t = 4E+10\tau^6 - 8E+09\tau^5 + 7E+08\tau^4 - 3E+07\tau^3 + 887\,280\tau^2 - 21\,272\tau + 923,9. \quad (5.20)$$

Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánkem 2 je

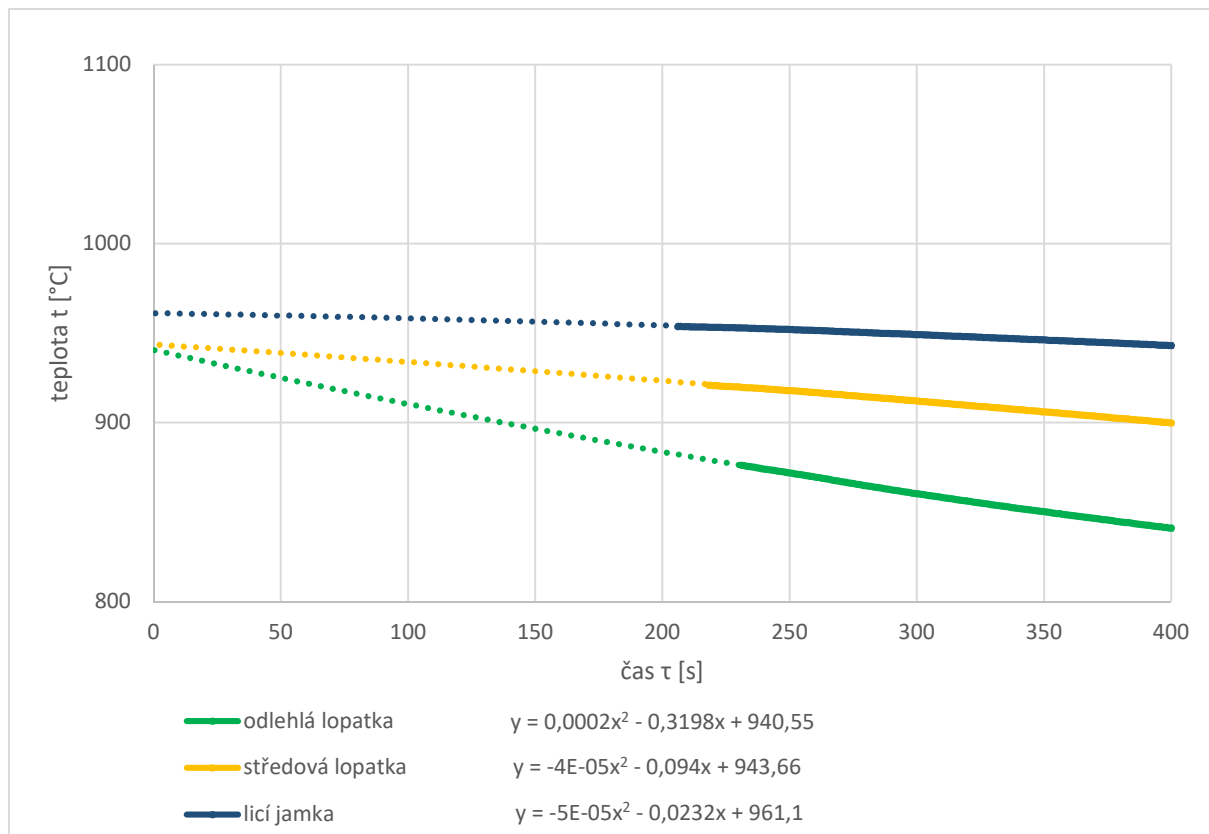
$$t = 1E+09\tau^6 - 2E+08\tau^5 + 1E+07\tau^4 - 931\,377\tau^3 + 117\,538\tau^2 - 12\,066\tau + 952,4. \quad (5.21)$$

Rovnice pro licí jamku získaná proložením dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = -3E+10\tau^6 + 8E+09\tau^5 - 8E+08\tau^4 + 4E+07\tau^3 + 836\,439\tau^2 - 451\tau + 959,9. \quad (5.22)$$

Ze získaných rovnic lze vyčíst, že při vyjmutí zabalené skořepiny z predehřivací pece byla částečně zabalená i zcela zabalená skořepina rovnoměrněji prohřátá než holá skořepina.

Na obr. 50 je zobrazen počátek chladnutí zabalené skořepiny. Jedná se o prvních 400 sekund měření. Získaná data byla proložena polynomem 2. stupně a byly získány následující rovnice. Platnost rovnic je v intervalu 0 až 400 sekund.



Obr. 50 Počátek chladnutí zabalené skořepiny

Rovnice křivky chladnutí pro odlehlou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = 0,0002\tau^2 - 0,3198\tau + 940,55. \quad (5.23)$$

Rovnice křivky chladnutí pro středovou lopatku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = -4E-05\tau^2 - 0,094\tau + 943,66. \quad (5.24)$$

Rovnice křivky chladnutí pro licí jamku platná v intervalu 0 až 400 sekund je

$$t = -5E-05\tau^2 - 0,0232\tau + 961,1. \quad (5.25)$$

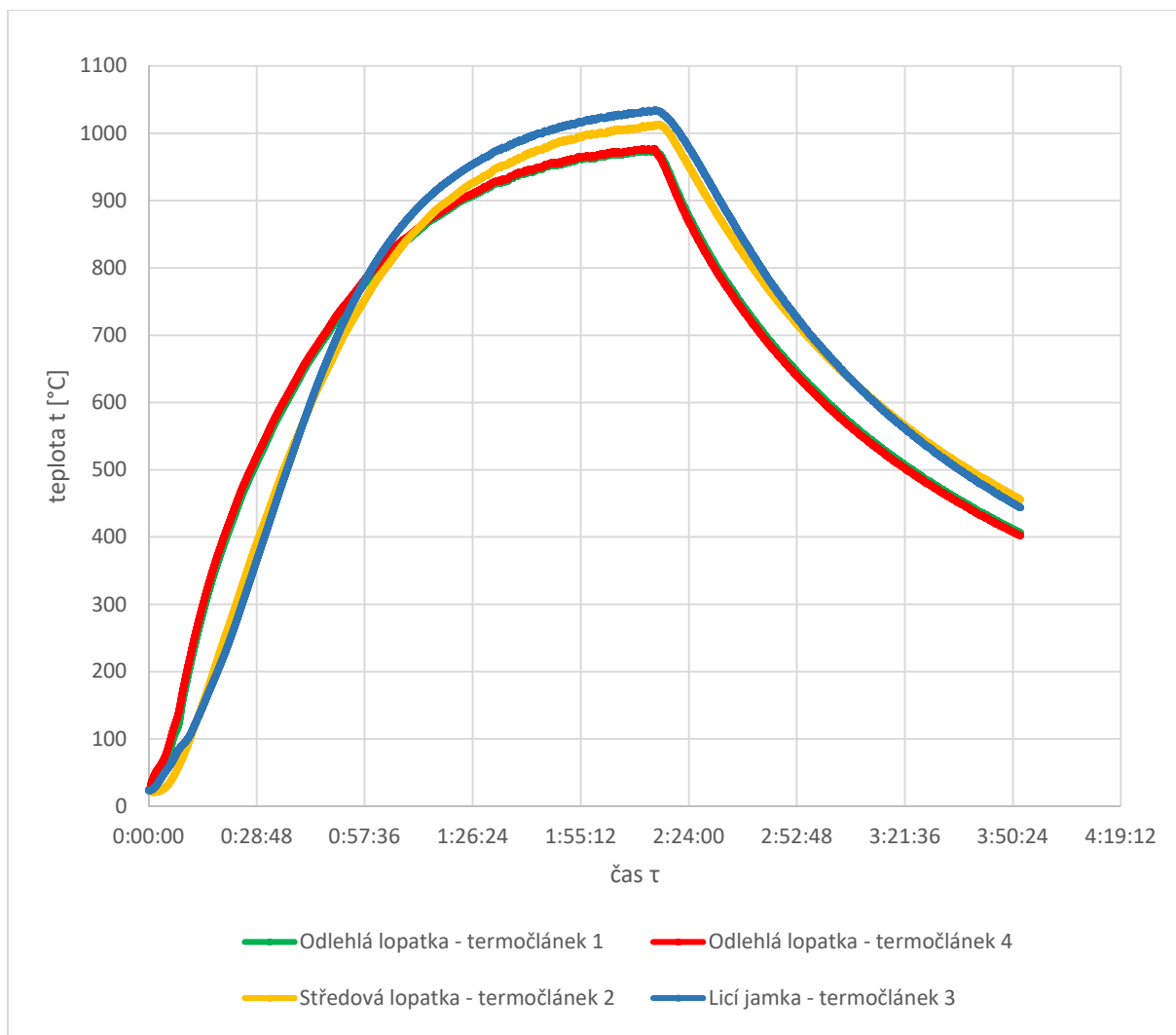
5.7 Měření teplot zabalené skořepiny při chladnutí na vzduchu

Jako poslední bylo měřeno chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu. Skořepina byla stejně jako u předchozích měření vložena do předehřívací pece s nastavenou teplotou 1100 ± 20 °C. Protože stejně jako u měření holé skořepiny při chladnutí na vzduchu odpadla instalace termočlánekového vedení do vakuové pece, bylo možné měřit i průběh ohřevu skořepiny. Měření je zachyceno na obr. 51 a celý průběh ohřevu a chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu je na obr. 52.



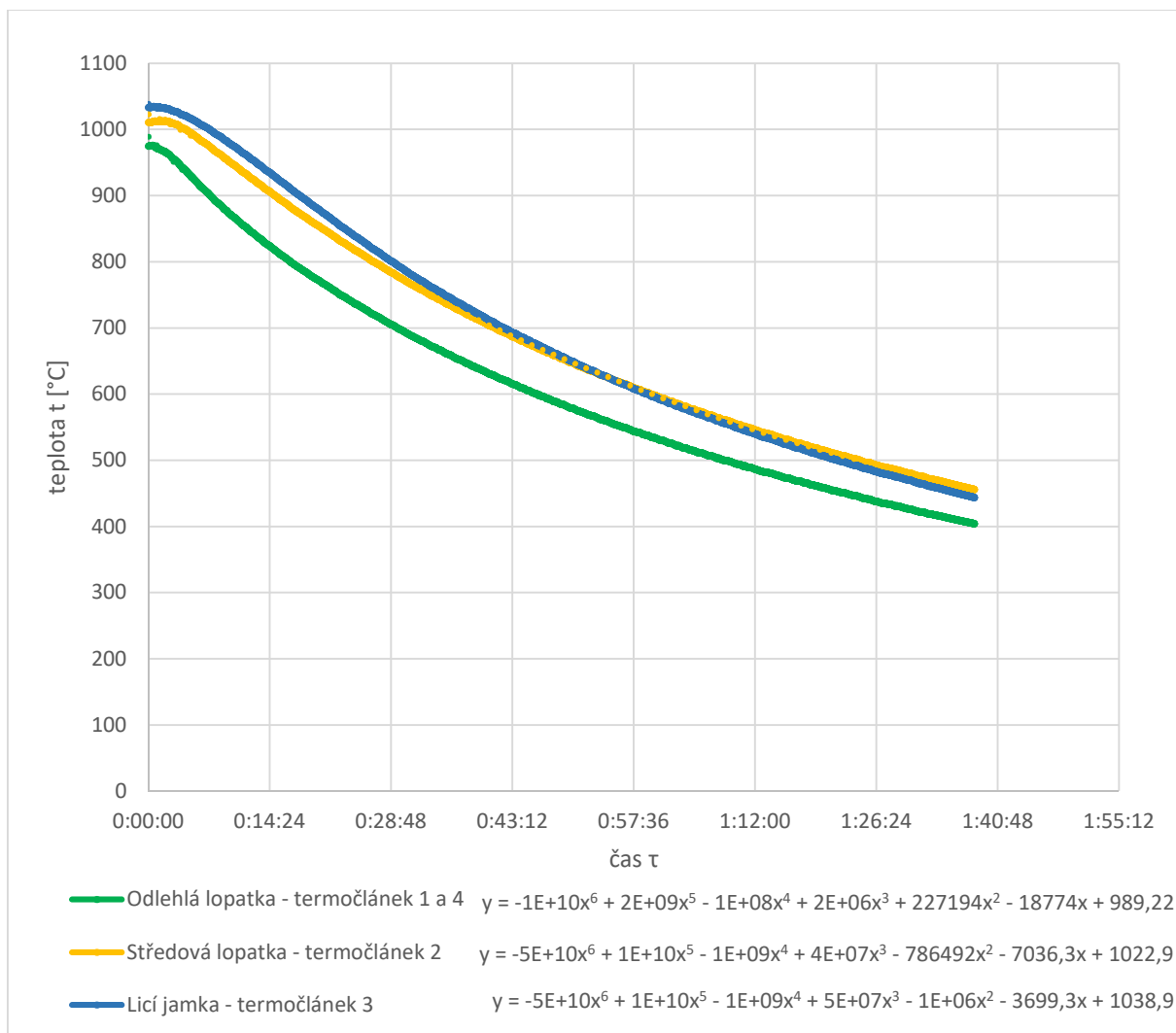
Obr. 51 Chladnoucí zabalená skořepina se zapojenými termočládky

Rozmístění a číslování termočládků bylo stejné jako u všech předchozích měření. Termočládky 1 a 4 byly umístěny na dno odlehlé lopatky. Hodnoty získané těmito termočládky byly zprůměrovány a dále bylo pracováno s těmito hodnotami. Termočládek 2 byl umístěn na dno listu středové lopatky a termočládek 3 byl umístěn na dno licí jamky.



Obr. 52 Průběh ohřevu a chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu

Ohřev zabalené skořepiny byl ukončen v čase 2:14:20, kdy se nárůst teploty skořepiny téměř zastavil. Z obr. 51 je také patrné, že nedocházelo k rovnoměrnému ohřívání všech měřených míst skořepiny. Z počátku rostla rychleji teplota odlehlé lopaty oproti středové lopatce a licí jamce. Při překročení teploty cca 800 °C a čase ohřevu cca 1 hodina nastal nejrychlejší nárůst teploty licí jamky. O něco pomaleji rostla teplota středové lopatky. Na konci ohřevu měla nejvyšší teplotu licí jamka a naopak nejnižší teplotu měla odlehlá lopatka.



Obr. 53 Chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu

Na obr. 53 je zobrazeno chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu. Získaná data byla proložena polynomem 6. stupně, který průběh chladnutí poměrně dobře popisuje. Získány tak byly následující rovnice.

Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky získaná z průměru dat termočlánek 1 a 4 je

$$t = - 1E+10\tau^6 + 2E+09\tau^5 - 1E+08\tau^4 + 2E+06\tau^3 + 227\,194\tau^2 - 18\,774\tau + 989,22. \quad (5.26)$$

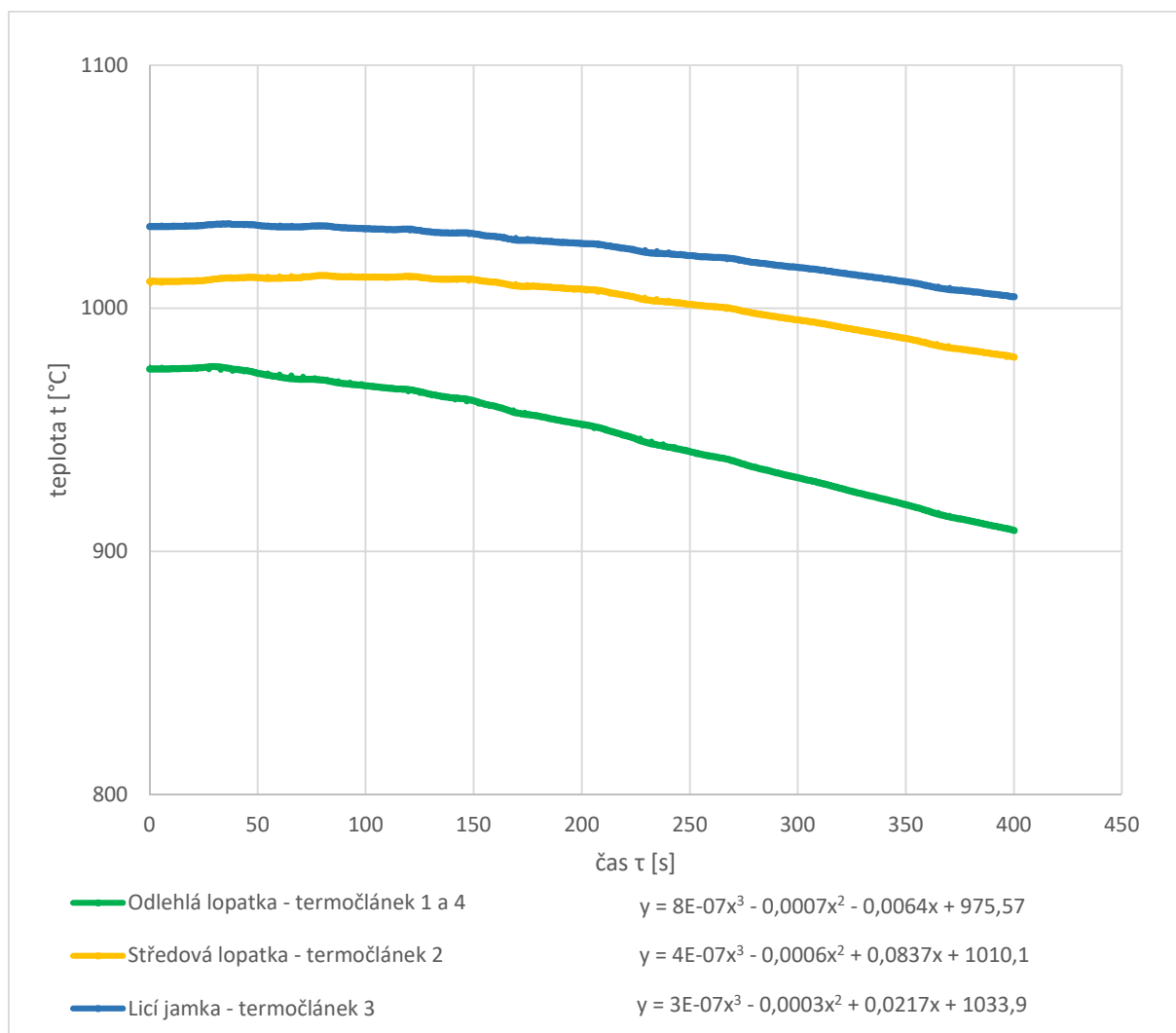
Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánekem 2 je

$$t = - 5E+10\tau^6 + 1E+10\tau^5 - 1E+09\tau^4 + 4E+07\tau^3 + 786\,492\tau^2 - 7\,036,3\tau + 1\,022,9. \quad (5.27)$$

Rovnice pro licí jamku získaná proložením dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = - 5E+10\tau^6 + 1E+10\tau^5 - 1E+09\tau^4 + 5E+07\tau^3 + 1E+06\tau^2 - 3\,699,3\tau + 1\,038,9. \quad (5.28)$$

Dále byla oddělena data pro prvních 400 sekund a ta byla proložena co nejjednodušším, ale zároveň odpovídajícím polynomem, viz obr. 54. Nejvhodnějším se ukázal polynom 4. stupně, který dostatečně dobře kopíroval průběh hodnot. Z obr. 54 je také dobře vidět rozdíl počátečních teplot. Nejteplejší byla licí jamka a měla počáteční teplotu 1 034 °C. Nejchladnější byla odlehlá lopatka s počáteční teplotou 976 °C.



Obr. 54 Počátek chlazení zabalené skořepiny na vzduchu

Rovnice křivky chladnutí odlehlé lopatky získaná z průměru dat termočlánku 1 a 4 je

$$t = + 8E-07\tau^3 - 0,0007\tau^2 - 0,0064\tau + 975,57. \quad (5.29)$$

Rovnice pro středovou lopatku získaná proložením dat získaných termočlánkem 2 je

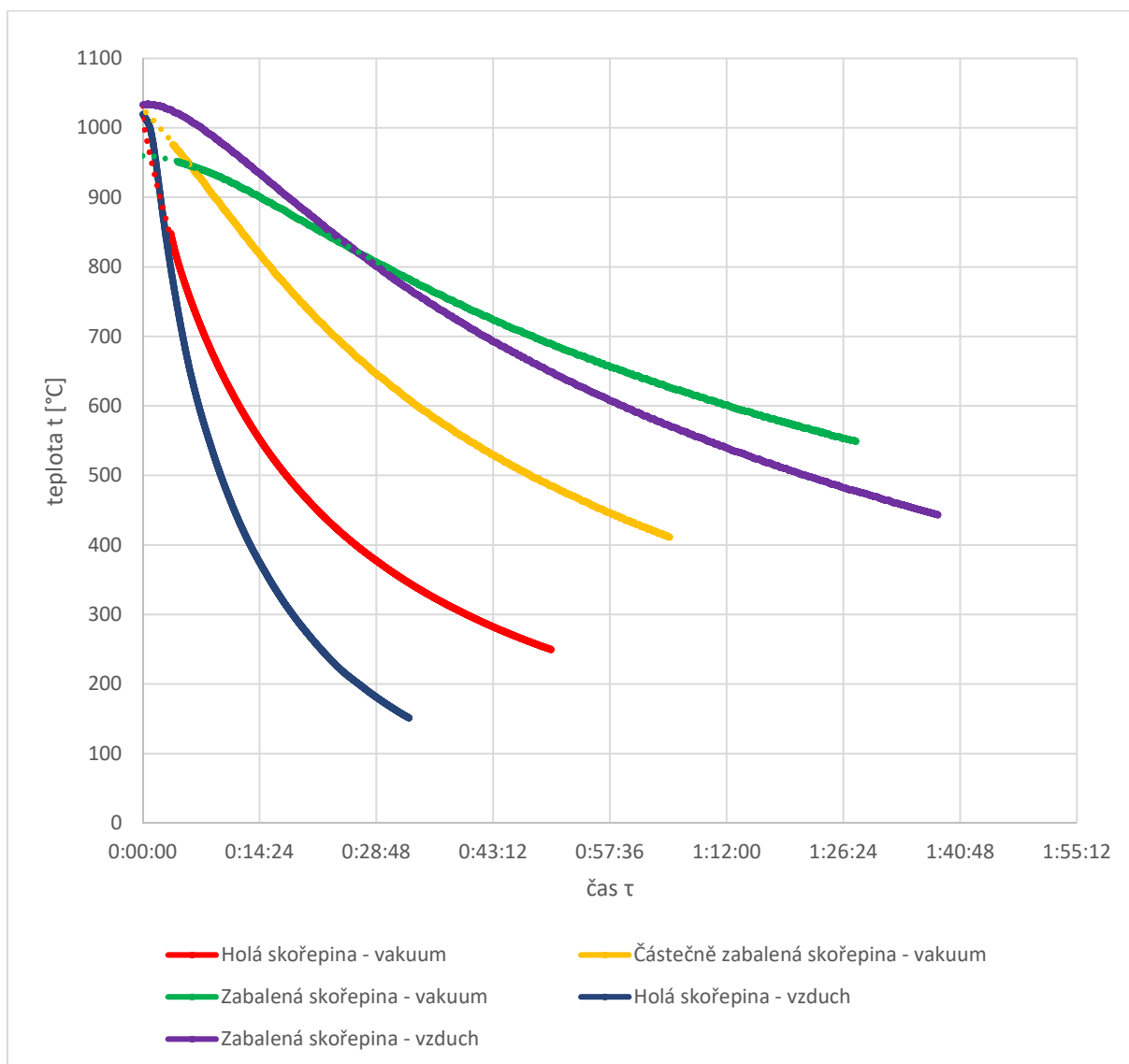
$$t = + 4E-07\tau^3 - 0,0006\tau^2 - 0,0837\tau + 1\,010,1. \quad (5.30)$$

Rovnice pro licí jamku získaná proložením dat získaných termočlánkem 3 je

$$t = + 3E-07\tau^3 - 0,0003\tau^2 - 0,0217\tau + 1\,033,9. \quad (5.31)$$

6. Porovnání výsledků

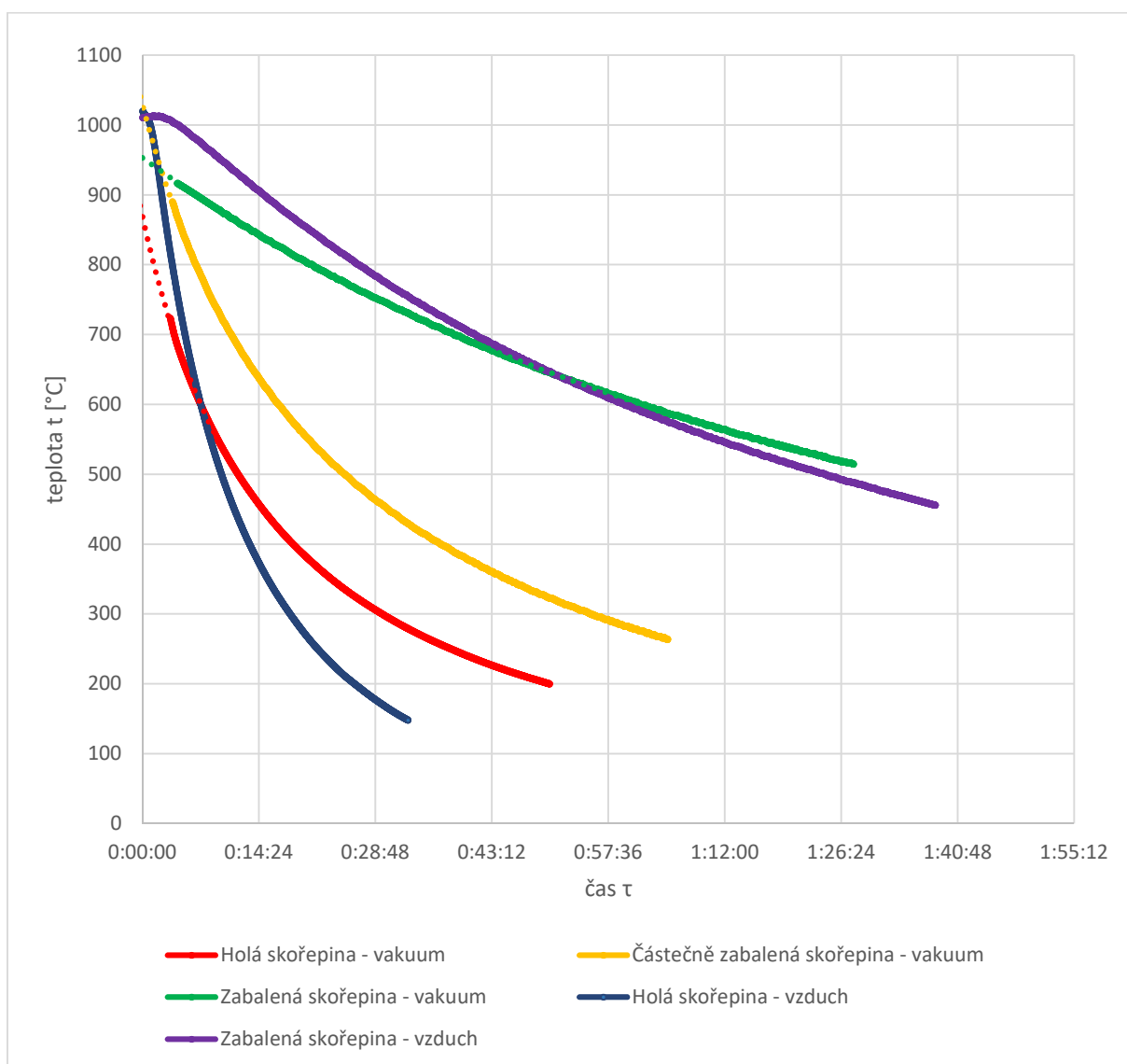
Data získaná všemi měřeními byla rozdělena pro jednotlivá místa měření a následně byla vzájemně porovnána. Porovnáním výsledků získaných měřeními pro jednotlivá místa skořepiny bylo zjištěno, že výrazně nejpomaleji chladne zabalená skořepina. Nejvyšší teplota se při všech měřeních držela v licí jamce.



Obr. 55 Průběhy teplot v licí jamce

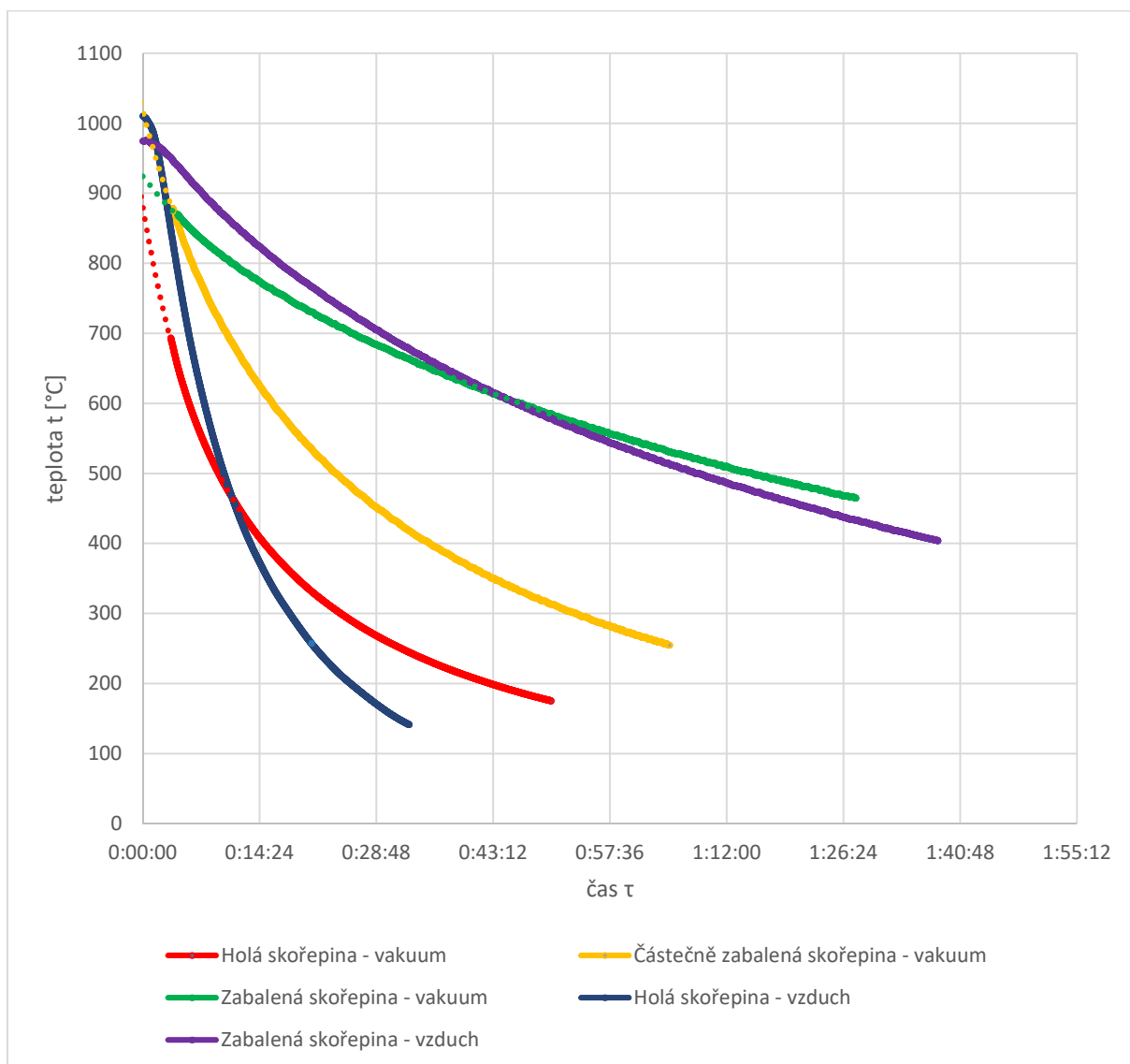
Na obr. 55 je vidět, jak se teploty v licí jamce při jednotlivých měřeních lišily. Přestože zabalená skořepina byla pro měření ve vakuu předeřhřáta na nejnižší teplotu, udržovala si během měření teplotu nejvyšší, její teplotní spád

byl ve vakuu nejpomalejší. Teplota holé skořepiny klesala i ve vakuu velmi rychle. U částečně zabalené skořepiny byla skelnou vatou Sibral zabalena licí jamka, vtoková soustava a část listů lopatek. Vlivem zabalení vtokové jamky je křivka chladnutí částečně zabalené skořepiny tvarově podobnější křivce chladnutí zabalené skořepiny. Holá skořepina na vzduchu chladla oproti ostatním měřením velmi rychle. Zabalená skořepina na vzduchu chladla značně rychleji než ve vakuu, ale oproti částečně zabalené skořepině ve vakuu chladla mírně pomaleji.



Obr. 56 Průběhy teplot ve středové lopatce

Ve středové lopatce (obr. 56) byl oproti licí jamce nevýraznější rozdíl v průběhu chladnutí částečně zabalené skořepiny, kdy v případě licí jamky byla tvarově mezi křivkami chladnutí ve vakuu holé skořepiny a zabalené skořepiny. V případě středové lopatky byla křivka chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu tvarově velmi podobná křivce chladnutí holé skořepiny ve vakuu. Křivka chladnutí holé skořepiny na vzduchu klesá dle očekávání oproti ostatním křivkám velmi strmě. Křivka chladnutí zabalené skořepiny při chladnutí na vzduchu klesá nejpozvolněji hned za křivkou chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu.



Obr. 57 Průběhy teplot v odlehlé lopatce

Odlehlá lopatka chladla při všech měřeních nejrychleji a jednotlivé průběhy jsou na obr. 57. Průběh křivky chladnutí holé a částečně zabalené skořepiny ve vakuu byl stejně jako u středové lopatky tvarově velmi podobný. Podobnost je zapříčiněna tím, že listy lopatek byly zabaleny pouze z jedné strany a ovlivnění tak nebylo velmi výrazné.

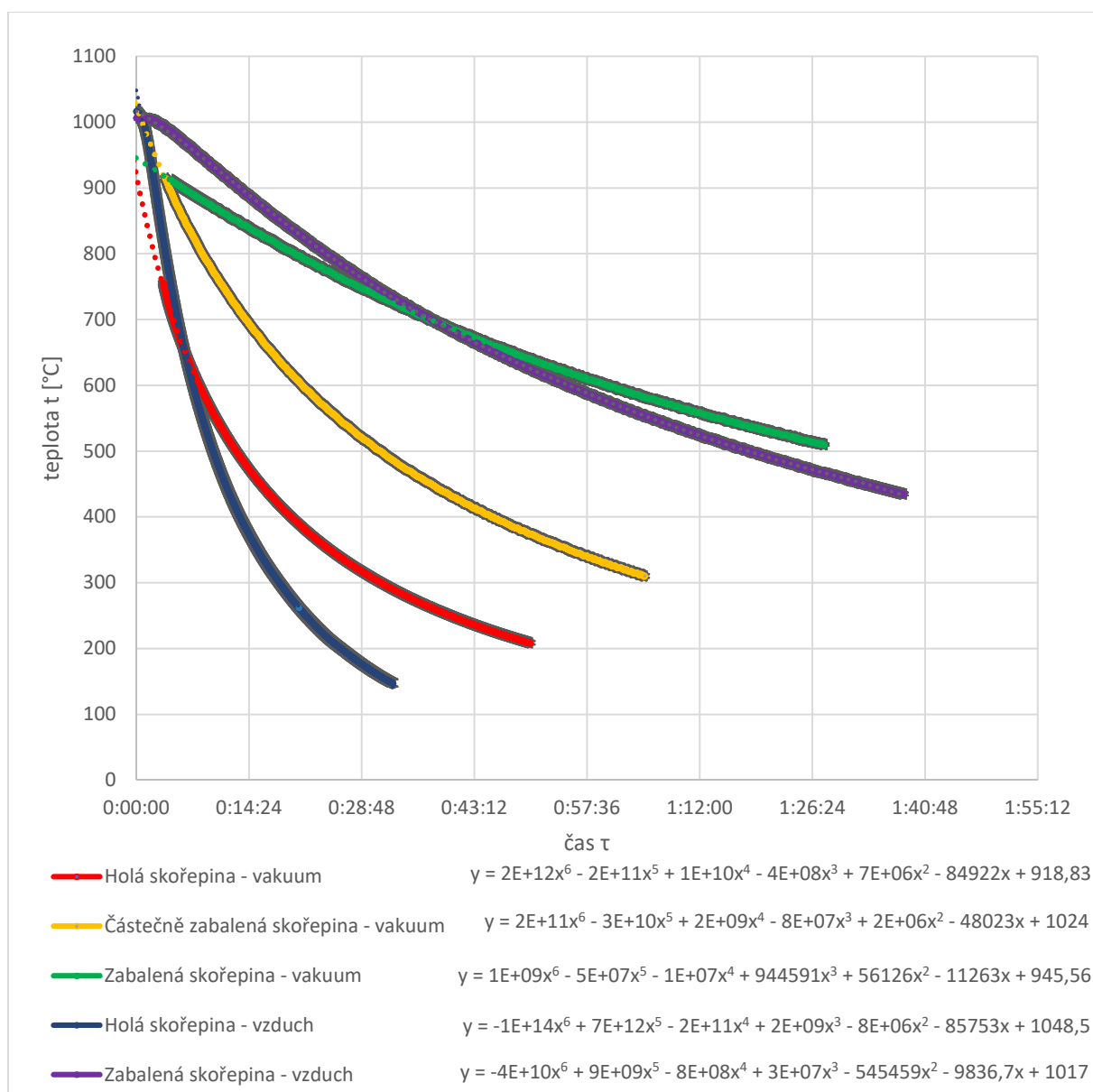
Z křivek je patrné, že skořepina chladne ve většině případů ve vakuu nebo za sníženého tlaku pomaleji než na vzduchu. Výjimku tvoří zabalená skořepina, která i na vzduchu chladla velmi pomalu. Také je z porovnání těchto křivek viditelné, jak výrazný vliv má Sibalový obal na průběh chladnutí. Obal výrazně zpomaluje chladnutí skořepiny jak ve vakuu, tak na vzduchu.

7. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo prozkoumat proces chladnutí skořepin v technologii přesného lití na vytavitelný model. Důležité bylo zejména chladnutí skořepin za sníženého tlaku, ale pro porovnání bylo třeba zkoumat i chladnutí skořepin na vzduchu. Mezi další cíle patřilo získání závislosti teploty skořepiny na čase chladnutí, objasnění vlivu odsávání vzduchu z dolní komory vakuové pece a také získání dat pro zpřesnění simulace procesu. Všechny cíle této práce byly splněny.

Experimentální část práce byla provedena ve spolupráci se společností Walter Praguecast a.s.. Měření bylo provedeno na skořepině pro odlévání turbinových lopatek pro energetický průmysl. Na stromečku bylo umístěno 6 součástí, které byly umístěny na vtokovou soustavu s ramenem. Měření byla provedena pomocí termočlánků typu N. Teploty skořepin byly měřeny pro tři místa, která byla zvolena na základě požadavků společnosti. Jednalo se o dno listu odlehlé a středové lopatky a o dno licí jamky. Na tato místa byly pomocí keramického lepidla připevněny termočlánky. Měřena byla nejprve holá skořepina, následně částečně zabalená skořepina a naposledy byla měřena zabalená skořepina do tzv. „mimina“.

Měření bylo zjištěno, že teplotní spád je dle očekávání během prvních několika minut největší, viz obr. 58. Sibalový zábal má na rychlost chladnutí skořepiny výrazný vliv. Nezabalená skořepina chladla na vzduchu i ve vakuu velmi rychle. Ze získaných teplotních závislostí je také patrné, že za sníženého tlaku, kdy dochází k obtížnějšímu šíření tepla, chladne skořepina pomaleji. Odsávání vzduchu z dolní komory vakuové pece nemá na teplotu skořepiny výrazný vliv, skořepina chladne nejrychleji během transportu z předeřívací pece do komory vakuové pece. Během odsávání vzduchu začne skořepina chladnout pomaleji, to je způsobeno i snížením její teploty a tím teplotního rozdílu s okolím, viz obr. 58.



Obr. 58 Průměrné křivky chlazení skořepiny

Z obr. 58 je také patrné, že křivka chlazení zabalené skořepiny ve vakuu měla téměř lineární průběh a zabalená skořepina chladla velmi pomalu ve srovnání s ostatními. Rychleji chladla zabalená skořepina na vzduchu, ale teplotní spád nebyl prudký v porovnání se zbylými třemi měřeními. V případě holé skořepiny na vzduchu a ve vakuu a částečně zabalené skořepiny ve vakuu byl pokles teploty v prvních několika minutách velmi prudký. V případě holé skořepiny dochází ke ztrátě požadované teploty dříve, než je skořepina transportována do komory pece. Naopak u zabalené skořepiny bylo problémem přehřát skořepinu

na požadovanou teplotu, skořepina dosáhla vysoké teploty, která dále kolísala podle kolísající teploty předehřívací pece. Při transportu do vakuové pece nedošlo k poklesu teploty pod požadovanou hranici.

Na obr. 58 jsou také šedě zobrazeny standardní chyby měření pro jednotlivé křivky. Standardní chyby ukazují přesnost měření a z obr. 58 je patrní, že měření bylo poměrně přesné a je velmi pravděpodobné, že získaná data jsou správná. Rovnice průměrné křivky chladnutí holé skořepiny ve vakuu je

$$t = 2E+12\tau^6 - 2E+11\tau^5 + 1E+10\tau^4 - 4E+08\tau^3 + 7E+06\tau^2 - \\ - 84\,922\tau + 918,83. \quad (7.32)$$

Rovnice průměrné křivky chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu je

$$t = 2E+11\tau^6 - 3E+10\tau^5 + 2E+09\tau^4 - 8E+07\tau^3 + 2E+06\tau^2 - \\ - 48\,023\tau + 1\,024. \quad (7.33)$$

Rovnice průměrné křivky chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu je

$$t = 1E+09\tau^6 - 5E+07\tau^5 - 1E+07\tau^4 + 944\,591\tau^3 + 56\,126\tau^2 - \\ - 11\,263\tau + 945,56. \quad (7.34)$$

Rovnice průměrné křivky chladnutí holé skořepiny na vzduchu je

$$t = - 1E+14\tau^6 + 7E+12\tau^5 - 2E+11\tau^4 + 2E+09\tau^3 - 8E+06\tau^2 - \\ - 85\,753\tau + 1\,048,5. \quad (7.35)$$

Rovnice průměrné křivky chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu je

$$t = - 4E+10\tau^6 + 9E+09\tau^5 - 8E+08\tau^4 - 3E+07\tau^3 + 545\,459\tau^2 - \\ - 9\,836,7\tau + 1\,017. \quad (7.36)$$

Účinným způsobem, jak dopravit skořepinu do komory vakuové pece při požadované teplotě by bylo zmenšení vzdálenosti přehřívací a vakuové pece a snížení lidského faktoru. Rychlost a zručnost slévače má na délku transportu značný vliv. Ideálním řešením by byla automatizace transportu, kdy by byla skořepina přesunuta z přehřívací pece přímo do komory vakuové pece bez kontaktu s pokojovou teplotou okolí.

Získaná data budou následně použita ve společnosti Walter Praguecast a implementována do simulačního SW ProCAST. Nicméně tyto simulace nemohou být v této práci použity a spadají do „know-how“ společnosti. Pokud simulace procesů blízce odpovídá skutečnosti, je možné urychlit vývoj nových dílů a jejich zavedení do výroby, ale také upravit stávající procesy tak, aby byly vyráběny přesnější a kvalitnější díly.

8. Bibliografie

[1] HERMAN, Aleš. Lití na vytavitelný model [online]. , 30 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: <https://adoc.pub/ing-ale-herman-phd.html>

[2] PATTNAIK, Sarojrani, D. Benny KARUNAKAR a P.K. JHA. Developments in investment casting process—A review. Journal of Materials Processing Technology [online]. 2012, 212(11), 17 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S09240136120101823?casa_token=DD24orSMwJ4AAAAA:2UrsoF-LXHD-WPdx0aqFNBluyE8KaW35LI8MJfFZdVGKVBbwSLgoO9HEkvRXby-N2hNEF4enJQ

[3] Walter Praguecast [online]. [cit. 2022-03-10]. Dostupné z: <https://www.praguecast.cz/cs>

[4] HLUCHÝ, Miroslav, Jan KOLOUCH a Rudolf PAŇÁK. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia, 2001. ISBN 80-7183-244-8.

[5] Vacuum casting: Part One. Total Materia [online]. 2011 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kt&n&NM=277>

[6] BEELEY, Peter R. a Robert F. SMART. Investment Casting. London: The Institute of Materials, 1995. ISBN 978-0-901716-66-8.

[7] Vacuum pressure casting. Slovenská technická univerzita v Bratislavě: Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave [online]. 2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: https://zlievarenstvo.mtf.stuba.sk/?page_id=1016&lang=en

[8] Doc. Dr. Ing. LOSERTOVÁ, Monika. Technologie speciálních slitin [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z:

http://katedry.fmfi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/03_Materialov%C3%A9_inzenyrstvi/07_Technologie_specialnich_slitin/Losertova_Technologie_specialnich_slitin.pdf.

[9] PENNSYLVANIA PRECISION CAST PARTS. Investment casting [online]. 2015 [cit. 2022-01-04]. Dostupné z: <http://ppcpinc.com/investment-castings>

[10] Prof. Ing. HORÁČEK, Milan, CSc. Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu: Přednáška pro 2.ročník magisterského studia oboru 23-32-8 slévárenské technologie předmětu „Technologie slévání II“ [online]. 2014 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/joelle/v-roba-p-esn-ch-odlitk-technologie-vytaviteln-ho-modelu>

[11] Is it Worth it? The Benefits of Investment Casting. Reliance Foundry [online]. [cit. 2022-02-02]. Dostupné z: <https://www.reliance-foundry.com/blog/benefits-investment-casting#gref>

[12] HANSEN, Tony. Molochite. In: DIGITALFIRE: Reference library [online]. [cit. 2022-04-26]. Dostupné z: <https://digitalfire.com/material/molochite>

[13] MATĚJKA, Matěj. Zkoušení materiálu: Defektoskopie a technologické zkoušky [online]. 2016 [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8563761-Zkouseni-materialu-defektoskopie-a-technologicke-zkousky.html>

[14] Jakar Electronics [online]. 2022 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.jakar.cz>

[15] SVOBODA, Jiří. Termodiagnostika: Učební texty. 2012.

[16] Ardotech [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <http://www.ardotech.cz/>

[17] Flexi TEMP® 60 Plášťové odporové a termoelektrické snímače teploty. In: MARWEB: Priemyselné meranie a regulácia [online]. [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://marweb.sk/prilohy/Snimace%20%20teploty/termoelektricke>

[%20snimace/flexi%20temp%2060%20plastove%20odporove%20a%20termo elektricky%20snimac%20teploty.PDF](#)

[18] Termoelektrický jev. Fyzikální ústav Akademie věd České republiky [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/vyzkum/vyzkumna-temata/termoelektricky-jev>

[19] Termočláňkové snímače teploty. Günther [online]. [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/9971048d-273a-9133-eb5e-ebfa35d7d1a8?Edition=cz>

[20] Termočláňky: konstrukce, využití a účinnost. E-konstruktor: Portál pro strojní konstruktéry [online]. 2014 [cit. 2022-04-04]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclanky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>

[21] KADLEC, Karel. Snímače teploty do prostředí se zvýšenými požadavky na hygienu a sanitaci. AUTOMA [online]. 2018, 2018, 2018(5) [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-teploty-do-prostredi-se-zvysenymi-pozadavky-na-hygienu-a-sanitaci-2018-05-0-11488/>

[22] SMUTNÝ, Lubomír. Snímače teploty - současný stav a směry vývoje. AUTOMA [online]. 2007 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://automa.cz/cz/casopis-clanky/snimace-teploty-soucasny-stav-a-smery-vyvoje-2007-05-34041-2168/>

[23] KOHOUT, Luděk. Snímače teploty. In: Ing. Luděk Kohout [online]. 2002 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <http://www.edumat.cz/texty/teplota.pdf>

[24] VOJÁČEK, Antonín. Přehled principů el. měření teploty - 1. díl. Automatizace.hw.cz [online]. 2014 [cit. 2022-04-14]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>

[25] SOVA, Jan. Bezdotykové měření teplotních polí II. Aldebaran Bulletin: Týdeník věnovaný aktualitám a novinkám

z fyziky a astronomie [online]. AGA (Aldebaran Group for Astrophysics), 2017, 15(19) [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://www.aldebaran.cz/bulletin/2017_19_erm.php

[26] Ahlborn: Přesná německá měřicí technika [online]. [cit. 2022-04-29]. Dostupné z: <https://www.ahlborn.cz/>

[27] RS: Elektronické komponenty [online]. [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/>

9. Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Nejčastěji používané typy termočlánků [20]..... | 39 |
| Tab. 2 Porovnání nejpoužívanějších kovových odporových snímačů teploty [21, 22]..... | 41 |
| Tab. 3 Toleranční třídy platinových odporových snímačů teploty [22]..... | 42 |
| Tab. 4 Plánovaná měření..... | 48 |

10. Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Hlediska posuzování přesnosti odlitku [6]..... | 14 |
| Obr. 2 Vakuové nasávání CLA: a) skořepina v licí komoře, b) aplikace vakua a plnění formy, c) ztuhlé odlitky ve formě,.. | 17 |
| Obr. 3 Gravitační lití lopatek turbíny ve vakuu [8]..... | 19 |
| Obr. 4 Protigravitační lití lopatek turbíny ve vakuu [8].... | 20 |
| Obr. 5 Postup výroby technologií vytavitelného modelu [9]... | 21 |
| Obr. 6 Schéma vstřikolisu pro výrobu voskových modelů [10].. | 23 |
| Obr. 7 Křivka expanzního chování vosku, pryskyřice a homogenní krystalické látky [6]..... | 28 |
| Obr. 8 Gravitační odlévání: a) klasické, b) sklopné, vakuové odlévání: a) tavení a gravitační lití ve vakuu, b) vakuové nasávání [10]..... | 30 |
| Obr. 9 Schéma penetrační zkoušky pro zjišťování povrchových vad [13]..... | 32 |
| Obr. 10 Schéma měření pomocí termočlátku [16]..... | 35 |
| Obr. 11 Provedení měřicího konce termočlátku [17]..... | 36 |
| Obr. 12 Porovnání charakteristik termočládků [16]..... | 38 |
| Obr. 13 a) Drátový odporový měřicí rezistor, b) Plošný odporový měřicí rezistor [21]..... | 42 |
| Obr. 14 Teplotní závislost odporu vybraných odporových snímačů teploty [15]..... | 44 |
| Obr. 15 Typické výrobky společnosti Walter Praguecast [3]... | 47 |
| Obr. 16 Měřicí stanice Ahlborn Almemo 5690-2M [26]..... | 49 |
| Obr. 17 Termočládkové vedení a konektor pro připojení [27].. | 49 |
| Obr. 18 Lopatka turbíny pro energetický průmysl..... | 51 |
| Obr. 19 Lepení voskových modelů lopatek na vtokovou soustavu | 51 |
| Obr. 20 Sestavený stromeček..... | 51 |
| Obr. 21 Stromeček po počátečních obalech v břečce na vodní bázi | 52 |

| | | |
|---------|--|----|
| Obr. 22 | Stromeček po obalu v břečce na alkoholové bázi..... | 52 |
| Obr. 23 | Připravené skořepiny..... | 53 |
| Obr. 24 | Skořepina opatřená termočládky..... | 54 |
| Obr. 25 | Měřicí sestava..... | 54 |
| Obr. 26 | Skořepina v předehřívací peci..... | 55 |
| Obr. 27 | Skořepina v předehřívací peci se zajištěnými vraty. | 55 |
| Obr. 28 | Chladnoucí holá skořepina se zapojenými termočládky. | 56 |
| Obr. 29 | Průběh ohřevu a chladnutí holé skořepiny na vzduchu. | 57 |
| Obr. 30 | Chladnutí holé skořepiny na vzduchu..... | 58 |
| Obr. 31 | Počátek chladnutí holé skořepiny na vzduchu..... | 59 |
| Obr. 32 | Utěsnění vedení termočládků ve vakuové peci..... | 61 |
| Obr. 33 | Vakuová pec připravená k experimentu..... | 61 |
| Obr. 34 | Měření teplot výrazně zchladlé skořepiny..... | 62 |
| Obr. 35 | Průběh chladnutí holé skořepiny ve vakuu..... | 63 |
| Obr. 36 | Chladnutí holé skořepiny ve vakuu od zavření po otevření vrat..... | 64 |
| Obr. 37 | Počátek chladnutí holé skořepiny..... | 66 |
| Obr. 38 | Skořepina částečně zabalená Sibralem..... | 67 |
| Obr. 39 | Skořepina částečně zabalená Sibralem..... | 67 |
| Obr. 40 | Vsouvání skořepiny do předehřívací pece..... | 68 |
| Obr. 41 | Chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu..... | 69 |
| Obr. 42 | Chladnutí částečně zabalené skořepiny ve vakuu od zavření po otevření vrat..... | 70 |
| Obr. 43 | Počátek chladnutí částečně zabalené skořepiny..... | 72 |
| Obr. 44 | Skořepina zabalená do „mimina“..... | 73 |
| Obr. 45 | Skořepina zabalená do „mimina“..... | 73 |
| Obr. 46 | Měření teplot v dolní komoře vakuové pece..... | 74 |
| Obr. 47 | Zapojení termočládků v dolní komoře vakuové pece.... | 74 |
| Obr. 48 | Chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu..... | 75 |
| Obr. 49 | Chladnutí zabalené skořepiny ve vakuu od zavření do otevření vrat..... | 76 |
| Obr. 50 | Počátek chladnutí zabalené skořepiny..... | 77 |

| | |
|---|----|
| Obr. 51 Chladnoucí zabalená skořepina se zapojenými termočlánky | 79 |
| Obr. 52 Průběh ohřevu a chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu | 80 |
| Obr. 53 Chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu..... | 81 |
| Obr. 54 Počátek chladnutí zabalené skořepiny na vzduchu..... | 82 |
| Obr. 55 Průběhy teplot v licií jamce..... | 84 |
| Obr. 56 Průběhy teplot ve středové lopatce..... | 85 |
| Obr. 57 Průběhy teplot v odlehlé lopatce..... | 86 |
| Obr. 58 Průměrné křivky chladnutí skořepiny..... | 89 |