



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OPTIMALIZACE VLASTNOSTÍ 3D TIŠTĚNÝCH MODELŮ PRO TECHNOLOGII LITÍ DO KERAMICKÝCH SKOŘEPIN

OPTIMIZATION OF PROPERTIES OF 3D PRINTED PATTERNS FOR THE TECHNOLOGY OF CASTING INTO
CERAMIC SHELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Radim Štěpán

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Radim Štěpán**
Studijní program: Slévárenská technologie
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Optimalizace vlastností 3D tištěných modelů pro technologii lití do keramických skořepin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

3D tištěné modely jsou základem tzv. hybridních technologií výroby odlitků do keramických skořepin. Vlastnosti modelů mají vliv na vznik trhlin při výrobě keramických skořepin ve fázi vypalování modelu. Roztažnost modelů, typ výplně modelů, podíl vzduchu v tištěném modelu, způsob vypalování jsou parametry, které trhliny ovlivňují a je nutné je pro daný materiál a technologii optimalizovat.

Cíle diplomové práce:

- rozbor možných vlivů na vznik trhlin v keramických skořepinách při použití hybridní technologie,
- praktické zkoumání a analýza vlivů jednotlivých parametrů na vznik trhlin v keramických skořepinách ve fázi vypalování modelu,
- návrh doporučení k eliminaci vzniku trhlin.

Seznam doporučené literatury:

KUMAR, P., I.P.S. AHUJA and R. SINGH. A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process, Asian Review of Mechanical Engineering, Vol. 2 No. 2, 2013, pp. 49 - 55. ISSN 2249-6289.

BEELEY, P.R., R.F. SMART. Investment Casting. 2 ed. London: The Institute of Materials, 2009, 486 s. ISBN 1-906540-57-8.

GEBHARDT, A., J.S. HÖTTER. Additive Manufacturing [online]. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co., 2016 [cit. 2021-10-20]. ISBN 978-1-56990-582-1. Dostupné z: doi:10.3139/9781569905838

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá optimalizací 3D tištěných modelů pro technologii lití do keramických skořepin. V práci je popsána hybridní technologie přesného lití a ucelený proces výroby keramických skořepin. Během vytavování 3D tištěných modelů vzniká problematika praskání skořepiny. Ta je řešena optimalizací tištěného modelu - množstvím vnitřní výplně modelu a odvzdušněním dutiny modelu. Optimalizované parametry byly úspěšně ověřeny na praktickém modelu kříže meče.

Klíčová slova

hybridní technologie přesného lití, přesné lití, keramická skořepina, 3D tisk, model, keramická suspenze, vytavování, žíhání

ABSTRACT

This thesis is focused on optimizing the 3D printed patterns used for investment casting into ceramic shells technology. The technology of hybrid investment casting and complete process of ceramic shells manufacturing is described in this thesis. During the burnout of the 3D printed pattern a problem with shell cracking arises. This problem was solved by optimizing the 3D printed pattern – the amount of pattern infill and venting the pattern cavity. The optimizations were successfully verified on the sword guard pattern.

Key words

hybrid investment casting, investment casting, ceramic shell, 3D printing, pattern, ceramic slurry, burnout, firing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTĚPÁN, Radim. *Optimalizace vlastností 3D tištěných modelů pro technologii lití do keramických skořepin*. Brno, 2022. 67 s. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139952>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Optimalizace vlastností 3D tištěných modelů pro technologii lití do keramických skořepin vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Bc. Radim Štěpán

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Vladimíru Krutišovi za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ondřeji Štočkovi, který mi asistoval při experimentálních pokusech ve školní laboratoři.

Zvláštní poděkování patří mé rodině, která mě při dosavadních studiích podporovala.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Technologie přesného lití	10
1.1 Výroba vytavitelného modelu	10
1.2 Sestavování licích sestav	10
1.3 Namáčení modelů v keramické suspenzi	11
1.4 Posyp žáruvzdorným materiálem	12
1.5 Sušení jednotlivých vrstev.....	12
1.6 Vytavení modelu a žíhání skořepiny	13
1.7 Lití kovu do skořepiny.....	13
1.8 Odstranění skořepiny.....	14
1.9 Apretace odlitku	14
2 Hybrid Investment Casting (HIC)	15
2.1 Návrh a softwarová příprava 3D modelu	15
2.2 Technologie 3D tisku - Fused Deposition Modeling (FDM)	15
2.3 Vytavení modelu ze skořepiny	16
2.4 Vliv tepelné dilatace 3D tištěných modelů na porušení skořepin	16
2.5 Zařízení Cyclone – MK technology	18
3 Výroba a zkoušky keramických skořepin.....	20
3.1 Vstupní suroviny pro výrobu keramických skořepin	20
3.2 Zkoušky keramické suspenze	21
3.2.1 Měření teploty.....	22
3.2.2 Měření viskozity keramické suspenze	22
3.2.3 Měření pH pojiva keramické suspenze.....	23
3.2.4 Kontrola množství bakterií v suspenzi	23
3.2.5 Měření hustoty suspenze.....	23
3.2.6 Destičková zkouška – Plate weight testing.....	24
3.2.7 Test obsahu žáruvzdorných látek (Total Solids)	24
3.2.8 Test množství pevných látek v pojivu (Binder Solids).....	26
3.3 Zkoušky keramické skořepiny.....	28
3.3.1 Měření pevnosti v ohybu – MOR (Modulus Of Rupture)	28
3.3.2 Tepelná roztažnost skořepiny	28
3.3.3 Měření prodyšnosti skořepiny	28
3.4 Obalování 3D tištěných modelů	29
4 Zkoušky materiálu Polymaker PolyCast	31
4.1 Dilatometrie.....	31
4.2 Dilatometrie materiálu Polymaker PolyCast	32
4.3 Diferenciální skenovací kalorimetrie	33
4.3.1 Tepelná kapacita	33
4.3.2 Teplota skelného přechodu	34
4.3.3 Teplota krystalizace	34
4.3.4 Teplota tání	34
4.3.5 Křivka DSC	35

4.4	Termická analýza materiálu Polymaker PolyCast.....	35
4.5	Měření množství zbytkových popelovin	39
4.5.1	Měření množství zbytkových popelovin materiálu Polymaker PolyCast.....	39
5	Vytavování modelu z keramické skořepiny	42
5.1	Způsoby vytavování keramických skořepin za nízkých teplot.....	42
5.2	Způsoby vytavování keramických skořepin za vysokých teplot.....	43
5.3	Vytavování keramických skořepin ve školní slévárně	44
5.4	Praskavost keramických skořepin při vytavování 3D tištěných modelů popsána v odborné literatuře.....	44
5.5	Problematika termické expanze ideálního plynu uvnitř dutiny modelu	45
5.6	Experimentální vytavování odvzdušněných modelů s 0 % výplní.....	46
6	Teorie přenosu tepla v keramické skořepině	48
6.1	Příprava experimentálního měření teplot během vytavování modelu ze skořepiny....	50
6.1.1	Princip funkce termočlánků	52
6.2	Experimentální měření teplot během vytavování modelu ze skořepiny	52
6.3	Vyhodnocení teplotních spádů	54
7	Žihání keramických skořepin	55
7.1	Žihání keramických skořepin na bázi SiO ₂	55
7.2	Žihání keramických skořepin na bázi aluminosilikátů	56
8	Praktická optimalizace 3D tištěného modelu	57
8.1	Ověření teoretických znalostí při optimalizaci modelu.....	57
8.2	Seznam použitých modifikací tištěných modelů	60
	ZÁVĚR.....	61
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	63
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	65
	SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

Technologie přesného lití je jedna z nejstarších metod výroby odlitků. Hybridní technologie přesného lití (HIC) je moderní inovovaná technologie přesného lití. Oproti konvenční, běžně používané metodě přesného lití nemusí být vyrobena matečná forma pro výrobu vytavitelných nebo spalitelných modelů. V hybridní metodě jsou modely tištěny na 3D tiskárnách. Mohou být vyrobeny ze světlem vytvrditelných pryskyřic, spékaných prášků nebo termoplastů. Tisk modelů má za následek velmi významné snížení počátečních finančních a časových nákladů na zhotovení prototypů. Nemusí jít ani o výrobu prototypů, nýbrž o odladění technologie a tvaru modelu pro výrobu matečné formy. HIC je nedílnou součástí technologie Rapid Prototypingu. V kombinaci s rychlou výrobou keramických skořepin na zařízení Cyclone od MK technology nabízí naprosto revoluční časy ve zhotovení odlitků. Technologií přesného lití se jednotlivé odlitky vyrábějí „na hotovo“. Dokončovací operace je snaha minimalizovat.

V dnešní době je tendence vyrábět tvarově složité odlitky a vyrábět je za co nejkratší časy. Výrobu takových modelů nám tato hybridní technologie se svou vysokou efektivitou nabízí. Avšak každá technologie má své limity a je nutností je optimalizovat. Jako je například optimalizace 3D tištěných modelů pro technologii přesného lití do keramických skořepin. Během vytavování tištěného modelu z keramické skořepiny dochází k tvorbě trhlin na povrchu skořepiny. Možné vlivy na tvorbu trhlin budou v práci zkoumány a detailně popsány.

Práce dokumentuje dosavadní poznatky popsané v odborné literatuře z hlediska optimalizace 3D tištěných modelů. V práci je popsán ucelený proces 3D tisku modelu a výroby keramických skořepin. Teoretické předpoklady tvorby trhlin jsou ověřeny na praktických pokusech a vliv optimalizací zhodnocen. Popsány jsou i teplotní analýzy ohřevu skořepiny v průběhu vytavování modelu, dilatometrie, diferenciální skenovací kalorimetrie, termogravimetrie, množství zbytkových popelovin po vytavování a žíhání materiálu používaného pro 3D tisk modelů – Polymaker Polycast. V závěru práce je zdokumentována optimalizace na praktickém modelu kříže meče.

1 TECHNOLOGIE PŘESNÉHO LITÍ

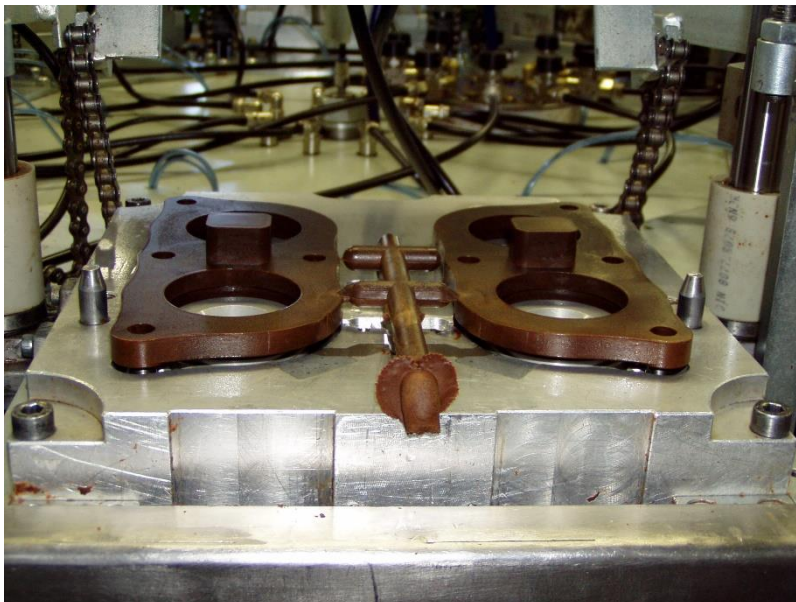
Technologie přesného lití je jednou z nejstarších metod. Byla používána již několik tisíc let před naším letopočtem, dokazují to nálezy odlitků z tehdejších dob. Jejím rozvoji přispělo období druhé světové války, kdy přesnost odlitků litých do pískových forem nedosahovala potřebovaných parametrů. Bylo tedy nutné hledat jiné možnosti, které by tyto nedostatky doplňovaly - zrychlily, zvýšily kvalitu a přesnost odlévaných dílů.

Metoda se využívá pro výrobu odlitků takzvaně na „hotovo“. Tyto odlitky je tendencí navrhovat tak, aby byly minimálně opracovávány, čímž se snižuje doba výroby odlitků, a i náklady spojené s jejich obráběním. Způsob výroby odlitků je tedy velmi výhodný i z hlediska tvarové složitosti. Dnes se využívá s výhodou u tvarově velmi složitých dílců v lékařství, leteckém, automobilovém a kosmickém průmyslu, atd. [2]

1.1 Výroba vytavitelného modelu

Výroba vytavitelného modelu je závislá na volbě materiálu, který použijeme. V dnešní době bývají nejčastěji používány vosky. Modely musejí být navrženy s co nejvyšší přesností a kvalitou. Je tedy nutná jejich důkladná kontrola, neboť jsou předpokladem pro finální kvalitu odlitků. Z nekvalitně vyrobeného modelu nikdy nebude kvalitní odlitek.

Modely jsou v sériové výrobě zastříkovány do forem (obr. 1) nebo mohou být lity gravitačně, v tekutém stavu, tzn. nad teplotou likvidu vosku. Za teplot těsně pod teplotou likvidu vosku je nutné použít nízký tlak k vyplnění dutin matečné formy. Použitý tlak bývá cca 0,5 – 1 MPa. Další možností je větší snížení teploty vosku, kdy je v kašovitém stavu vtlačěn do dutiny matečné formy při tlaku 2,5 – 5 MPa. Pro výrobu modelů se používá výhradně vosků panenských a k výrobě vtokových kúlů je možné použít vosk regenerovaný. [2]



Obr. 1 Voskový model po vytažení z matečné formy. [3]

1.2 Sestavování licích sestav

Vyrobené voskové modely je potřeba nechat odstát a následně sestavit do tzv. stromečků. Tyto stromečky by měly zajišťovat maximální efektivitu výroby. Stromeček se nazývá vtokový kúl osazený modely z vytavitelného materiálu. Tyto modely mohou být ke vtoku lepeny speciálními lepidly nebo natavením shodného druhu vosku mezi modelem a vtokovou

soustavou, na obr. 2. Stromečky je možné stavět do vertikálních (viz obr. 3) nebo horizontálních etáží. Dále je nutné zvolit vhodné umístění modelů, tak aby bylo snadné odřezávat odlitky z vtoku. Sestavování většinou vykonávají ženy, protože je potřeba velké přesnosti a hlavně trpělivosti při lepení. [2]



Obr. 2 Připravená sestava k lepení stromečku.



Obr. 3 Dva hotové stromečky.

1.3 Namáčení modelů v keramické suspenzi

Stromečky před namáčením do keramické suspenze je potřeba odmastit. Dále se namáčejí do keramické suspenze pod různými úhly, aby suspenze zatekla do všech zákoutí i složitých modelů. Poté je nutné nechat suspenzi ze stromečku dostatečně okapat, na obr. 4. Keramická suspenze se skládá z pojiva a plniva. Pojiva jsou koloidní roztoky, buď na bázi alkosolů, od kterých je dnes z hygienických důvodů tendence odstupovat, nebo hydrosolů. Plniva jsou na bázi křemenné, žáruvzdorné moučky. Je nutné docílit dokonalého obalení částic žáruvzdorné moučky pojivem při míchání a odchodu vzduchových bublin ze suspenze. Bubliny se do suspenze dostávají při zásypu moučkou. Vyváženost množství pojiva a plniva je zjišťována při kontrolních zkouškách suspenze. Primární suspenzí se myslí ta suspenze, která se používá na první obal a zajišťuje kvalitu povrchu odlitku. Sekundární, nebo-li zesilovací suspenzí je myšleno použití jiné suspenze na výrobu dalších obalů keramické skořepiny, které zajišťují prodyšnost skořepiny. [2]



Obr. 4 Namáčení modelu do keramické suspenze.

1.4 Posyp žáruvzdorným materiálem

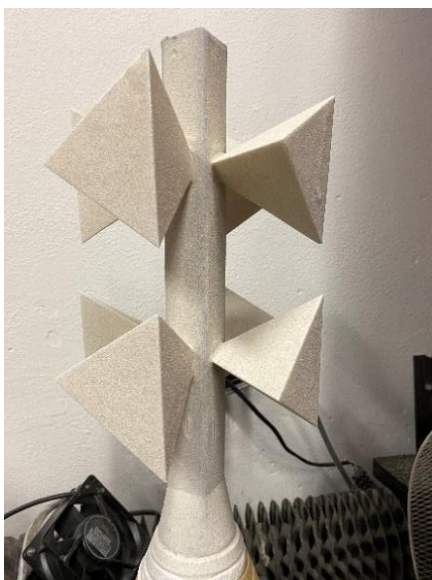
Hlavními hodnotícími parametry skořepiny je vysoká žáruvzdornost a stálost při velmi vysokých teplotách. Dále by tyto materiály neměly reagovat se slitinou. Posypový žáruvzdorný materiál je specifický pro každý obal. Obaly dělíme na primární a zpevňující (skundární). Primární obal by měl mít optimální žáruvzdorné vlastnosti a nízkou tepelnou dilataci. Zpevňující obaly spíše lepší prodyšnost, tedy i hrubší zrno. Vysoce žáruvzdorné materiály jako například ZrO_2 jsou i velmi drahé, a tak je snahou je používat v minimální možné míře. Posyp může být fluidní nebo sprchový, viz obr. 5. [2]



Obr. 5 Sprchový posyp modelu žáruvzdorným materiálem.

1.5 Sušení jednotlivých vrstev

Jednotlivé vrstvy skořepin se nechávají schnout zhruba 8 hodin při konstantní teplotě a vlhkosti. Ve firmách tomu jsou uzpůsobena celá pracoviště, mohou být vylepšena o systémy proudění vzduchu. Hlavním aspektem doby sušení je tvarová složitost stromečku. Detail sušení obalů ve školní laboratoři, viz obr. 6 a 7.



Obr. 6 Sušení primárního obalu.



Obr. 7 Sušení zesilovacího obalu.

1.6 Vytavení modelu a žihání skořepiny

Vytavování modelu ze skořepiny může být prováděno za vysoké nebo nízké teploty. Hlavním cílem při vytavování modelu je minimalizace jeho dilatace. Tedy aby nedocházelo k větší tepelné dilataci modelu, než je velikost skořepiny. Používá se jednoduchého principu, kdy se přehřeje svrchní vrstva modelu, která je v kontaktu s primárním obalem a nechá se odkapávat. Vznikne takzvaná dilatační spára, která zabrání porušení skořepin. Vyrovnává menší a pomalejší dilataci obalů skořepiny.

Žiháním skořepiny je proces slinování jednotlivých obalů keramické skořepiny. Za následek má zpevnění skořepiny a spálení zbytků vytaveného modelu. Skořepina umístěná v žihací peci viz obr. 8. [2]



Obr. 8 Keramická skořepina uvnitř žihací pece.

1.7 Lití kovu do skořepiny

Lití slitin kovů je možné provádět za atmosférického tlaku (na obr. 9) nebo tlaků snížených. Dále je možné lít do studených nebo vyhřátých skořepin po žihání, teplota skořepiny bývá okolo 700 °C. Při použití materiálů z SiO_2 je vhodné lít do skořepin vyhřátých, aby nedošlo při chladnutí k popraskání v důsledku transformace křemene při teplotě 573 °C. [2]

Během a po lití hraje velkou roli faktor ochlazování skořepiny. Rychlost ochlazování způsobuje charakteristickou mikrostrukturu odlitku. Intenzivně ochlazované odlitky ve skořepině budou mít strukturu jemnozrnnou. Odlitky ze skořepiny obalené izolačními materiály ji budou mít hrubozrnnější. Rychlost ochlazování skořepiny a odlitého kovu lze zvýšit i snížením počtu obalových vrstev skořepiny. [4]



Obr. 9 Lití kovu do keramické skořepiny. [3]

1.8 Odstranění skořepiny

Odstranění skořepiny se provádí otlukáním a vybíjením. Pro hůře přístupná místa a jádra lze zbytky skořepiny vytryskat nebo rozpouštět horkými louhy, špatně přístupná místa viz obr. 10. Odstranění skořepiny musí být důkladné, aby se nestalo, že by při obrábění nůž narazil na zrna skořepiny, došlo by k okamžitému otupení a znehodnocení obráběcího nástroje. [2]



Obr. 10 Odstraňování skořepiny z odlitku.

1.9 Apretace odlitku

Apretací odlitků se rozumí jejich odstranění z vtokového kůlu a očištění od všech nečistot spojených s jejich výrobou, následuje expedice odlitku. [2]



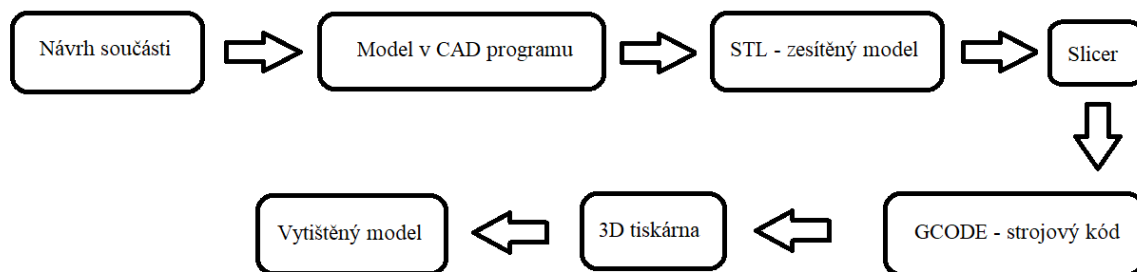
Obr. 11 Odlitek a oddělená vtoková soustava.

2 HYBRID INVESTMENT CASTING (HIC)

Metoda hybrid investment casting, zkráceně HIC je hybridní metodou přesného lití. Jedná se o vylepšenou metodu, kdy je snahou minimalizovat časy a náklady pro výrobu prototypů odlitků. Proces snížení výrobních časů je takzvaný Rapid Prototyping (RP). Vytavitelné modely jsou vyráběny aditivní technologií na 3D tiskárně z plastových nebo pryskyřičných materiálů. Tato technologie se s výhodou používá pro menší série odlitků, eliminuje vysoké náklady spojené s výrobou forem pro voskové modely. [4]

2.1 Návrh a softwarová příprava 3D modelu

Nejprve je nutné mít návrh součásti, jak by měla vypadat a jaké má mít parametry. Návrh se následně vymodeluje ve vhodném počítačovém 3D CAD programu. Tento 3D model se musí konvertovat na soubor STL (Standard Triangle Language). Soubor STL má definovaný povrch modelu ve tvaru trojúhelníku, čím více trojúhelníků model popisuje, tím je model tvarově přesnější. Se soubory STL dále pracují Slicery, programy pro nastavení jednotlivých parametrů 3D tisku. Slicer je konvertor STL souboru na soubor GCODE, dojde k rozřezání modelu po jednotlivých vrstvách. Každá jmenovitá vrstva má přesně definované parametry pro software 3D tiskárny. Soubor GCODE obsahuje strojový kód. Nastavitelné parametry u metody FDM tisku - teplota tiskové desky a trysky, rychlost tisku, ofuk výtisku a chlazení vyhřívaného bloku trysky, počet okrajových vrstev modelu, tvar a množství výplně modelu, orientace modelu, podpory, atd. [4; 5]



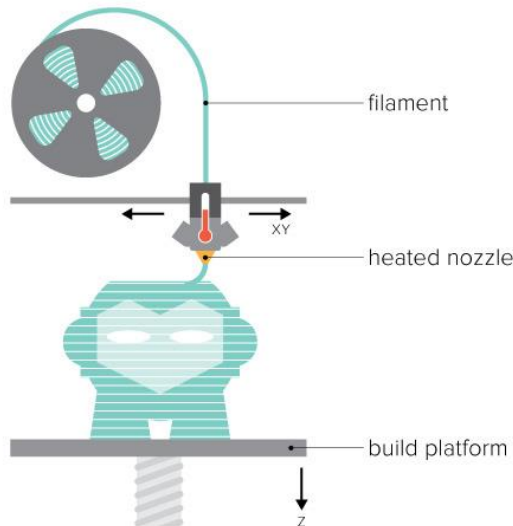
Obr. 12 Grafické znázornění procesu od návrhu po výtisk.

2.2 Technologie 3D tisku - Fused Deposition Modeling (FDM)

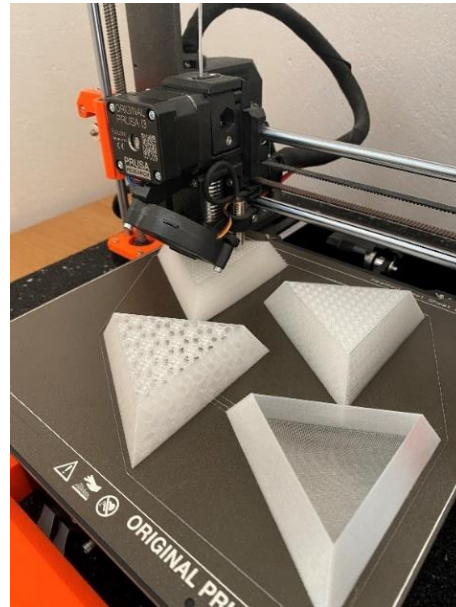
Aditivní technologie 3D tisku se v dnešní praxi používá vcelku běžně v jakémkoliv průmyslu. Technologie FDM tiskáren spočívá v extruzi nataveného plastu z trysky, která opisuje přesně definovanou trajektorii, dle strojového kódu, princip na obr. 13. Opisováním trajektorií vytváří vrstvu po vrstvě a jako finální produkt vzniká trojrozměrný tištěný model. Tisková doba je závislá na rychlosti pohybu tiskové trysky, množství extrudovaného materiálu, rychlosti extruze a objemu materiálu pro vytvoření hotového modelu.

Natavovaná struna termoplastu se nazývá filament, který je navinut na cívce, z které se během tisku odvíjí. Filament je dopravován ozubenými koly do extruderu. Extruder je hliníkový blok s chladičnými žebry, na které je vháněn chladič vzduch ventilátory a je zakončen vyhřívanou tryskou. Tryska má přesně definovaný průměr. Průměr trysky je šířka výsledné vrstvy modelu, výška této vrstvy se nastavuje ve Sliceru. Obvyklá výška vrstvy bývá mezi 0,1 – 0,2 mm. Čím je výška vrstvy vyšší, tím klesají časové náklady spojené s tiskem, ale zároveň klesá i kvalita vnější struktury tištěného modelu. Nedostatky vzniklé drsností povrchu je možné brousit brusnými papíry nebo leptat vhodnými přípravky. Modely na bázi ABS se leptají acetony, PVB se leptají izopropylalkoholy.

Množství a tvar výplně modelu je variabilní. Záleží na specifikacích, na co bude model použit a jak bude mechanicky zatěžován. Pro technologii HIC je velkým problémem fakt, že při vytavování modelu z dutiny skořepiny dochází k jeho objemové expanzi. Tato tepelná roztažnost bývá zpravidla větší, než je tepelná expanze skořepiny a dochází k pnutí v obalech skořepiny, což může mít za následek praskání skořepin. Vhodný materiál by měl začít měknout již při nižších teplotách a bortit se sám do sebe. S nižším množstvím použitého materiálu klesá zbytkové množství popelovin po vytavení. [4]



Obr. 13 Princip technologie 3D tisku FDM. [6]



Obr. 14 3D tisk experimentálních vzorků.

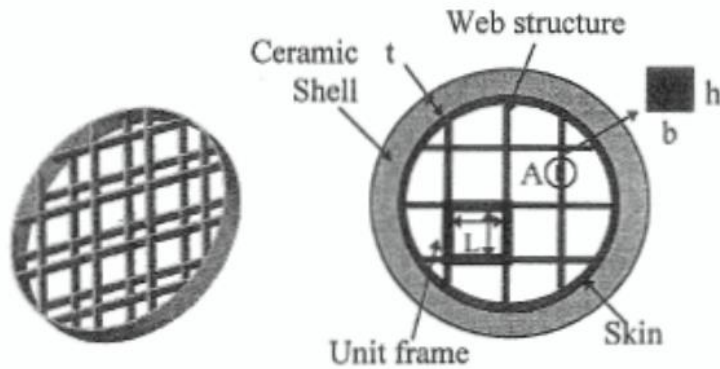
2.3 Vytavení modelu ze skořepiny

Konvenční metoda přesného lití s vytavitelnými modely z vosku, obvykle používá autoklávování. Hybridní technologie přesného lití vytavuje/spaluje model při teplotách nad 600 °C, kdy se z těchto teplot pokračuje na 1000 °C, aby se skořepina vyžihala. Natavený kov se lije obvykle do teplé skořepiny. Někdy se skořepiny nechávají vychladnout, kontrolují se z hlediska trhlin a vyplachují od zbytkových popelovin. [4]

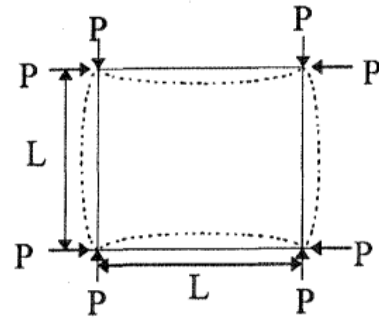
2.4 Vliv tepelné dilatace 3D tištěných modelů na porušení skořepin

Tepelná dilatace 3D tištěných modelů zásadně ovlivňuje praskavost keramických skořepin. Což má za následek vytváření napětí na povrch skořepiny, která při překročení hraničního napětí na povrch skořepiny praská.

Pokud je materiál schopen měknout a bortit se, dojde k dramatickému poklesu napětí na povrch skořepiny. Teplotu, při které dochází k měknutí a borcení modelu nebo modelové výplně označíme T_b . Tato hodnota je i závislá na množství a tvaru výplně vzorku. Objemnější vzorky odolávají a měknou až při vyšších teplotách. Detail borcení vnitřní struktury vytavovaného modelu je zachycen na obrázcích 15 a 16.



Obr. 15 Řez modelem a skořepinou. [7]



Obr. 16 Deformace liniové struktury výplně pod zatížením. [7]

Skelný přechod materiálů je charakterizován teplotou, kdy se mění jeho vnitřní struktura. Se změnou vnitřní struktury materiálu úzce souvisí mechanické vlastnosti. Pod teplotou skelného přechodu se materiál chová jako křehký a tvrdý, nad teplotou skelného přechodu se chová jako pružný. Se změnou vnitřní struktury souvisí i schopnost tepelné akumulace materiálu. Tepelná akumulace je definována jako množství tepla, které je potřebné přivést pro oteplení vzorku o 1 K. Vynesením závislosti tepelného toku a teploty vzorku získáme graf, kde je možné odečtení plynulého přechodu mezi nižší a vyšší tepelnou akumulací materiálu. Ve středu, inflexním bodu tohoto plynulého přechodu se odečítá teplota skelného přechodu. Pod teplotou skelného přechodu zkoumaný materiál akumuluje podstatně méně tepla, nad touto teplotou naopak. Teplota skelného přechodu se označuje T_g a problematika s ní spojená v kap. 4.3.2. [8]

Poslední z posuzovaných teplot je teplota, při které posuzované napětí dosáhne vyšší hodnoty, než je MOR skořepiny, v kap. 3.3.1 detailněji vysvětlen pojem MOR. Tato teplota se označuje T_u a pokud je menší než T_g a T_b , tak dochází vždy k prasknutí skořepiny, obrázek 17. Teplota boulení/borcení vzoru/modelu je teplota, při které k těmto stavům deformace vytavovaného modelu dochází. Teplota skelného přechodu se stanovuje experimentálně na přístroji pro měření Diferenciální Skenovací Kalorimetrie DSC. Odolnost skořepin je závislá na množství a kvalitě obalů. Čím více má skořepina obalů, tím je pevnější, ale také klesá její prodyšnost, dále je možnost přidání aditivních prvků do suspenze. [7]



Obr. 17 Vzorek prasklé skořepiny.

2.5 Zařízení Cyclone – MK technology

Dříve se k výrobě keramických skořepin používaly výhradně pojiva na bázi alkosolů, které je v dnešní době tendence vytlačovat a nahrazovat hydrosoly. Tyto pojiva na vodní bázi zlepšují kvalitu bezpečnosti práce, ekologii a ekonomii výroby. Všechna pro mají i své proti, které způsobuje problematiku vysoušení jednotlivých vrstev skořepin. Při klasickém obalování jednotlivých vrstev se nechává skořepina sušit 8 hodin. Proto byla snaha vyvinout efektivní zařízení pro automatizaci a tím i urychlení výroby skořepin. Tím je například zařízení Cyclone od společnosti MK – technology, které pro sušení vrstev využívá sušící komory. V komoře je obal vystaven intenzivnímu proudu vzduchu a infračervenému záření. Snižuje se doba sušení až na pouhých 30 minut, celková doba výroby skořepiny je již v řádech hodin. V porovnání skořepiny s pojivy na bázi hydrosolů byla celková doba výroby skořepiny týden a s pojivy na bázi alkoholů 2-3 krát rychlejší.



Obr. 18 Zařízení Cyclone od společnosti MK technology. [9]

Dnešním trendem je celkově redukovat výrobní časy a hlavně u metod RP. Při výrobě skořepiny je až 95 % času vynaloženo jen k sušení. Takže je snahou do směsi přidávat co nejméně vody, jak je to jen možné a maximalizovat vysoušecí časy. Pro zařízení byla navržena komora s proudícím vzduchem o rychlosti $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, model se skořepinou se pomalu otáčí a je tedy ofoukávání rovnoměrné. Proudící vzduch ochlazuje model, ale to je vyřešeno montáží infračervených zářičů, které udržují konstantní teplotu v komoře na $25 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Aby nedocházelo k přehřívání komory bylo aplikováno odvětrávací zařízení. Pro lepší regulaci a přesné nastavení teplot. Rychlejší vysoušení skořepin má za následek a výhodu vyšší pevnost skořepiny. Tím se dají ušetřit vrstvy skořepiny, je tedy možné jich použít méně, vůči běžné metodě při sušící době 8 hodin.

Zařízení obsahuje dva sprchové bubny se žáruvzdorným materiálem a dvě nádrže s keramickou suspenzí. Transport skořepiny je po lineárním vedení, skořepinou otáčí servomotor. Kompletní pohyb skořepiny je regulován programovatelným logickým automatem – PLC s dotykově ovládaným panelem. Jedná se o plně automatickou linku pro výrobu keramických skořepin s revolučními časy zhotovení skořepin, viz tab. 1. [10]

Tab. 1 Časový harmonogram automatu Cyclone. [10]

Čas [h]	Sled fází
0:00	Voskový model
0:30	1. vrstva
1:00	2. vrstva
1:30	3. vrstva
2:00	4. vrstva
2:30	5. vrstva
3:00	6. vrstva
3:30	7. vrstva
4:30	Vytavená skořepina
6:00	Vyžíhaná skořepina
7:00	Vytlučený odlitek

3 VÝROBA A ZKOUŠKY KERAMICKÝCH SKOŘEPIN

Kapitola popisuje složení materiálů pro výrobu skořepin a jejich zkoušky, aby se maximalizovala využitelnost surovin. S vyšším využitím materiálů klesají náklady spojené s přípravou nové keramické suspenze a roste konkurenceschopnost firmy.

3.1 Vstupní suroviny pro výrobu keramických skořepin

Ve školní slévárně jsou používány dva typy keramických suspenzí, na vodní bázi. Jejich složení a vlastnosti jsou popsány v tabulkách 2 a 3, cílové míšící poměry v tab. 4.

Tab. 2 Složení měřených suspenzí. (Archiv školní slévárny)

	Suspenze
Pojivo (primární)	Primcote® binder
Plnivo (primární)	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
Vlákna (primární)	NE
Posyp (primární)	Zirkon – 50/150
Pojivo (zesilovací)	Wexcoat® 24
Plnivo (zesilovací)	Ranco-Sil™ 4 – fused silica – 200mesh
Vlákna (zesilovací)	WEXPERM® FIBRES
Posyp (zesilovací)	Molochite 16/30

Tab. 3 Vlastnosti použitých pojivových systémů. (Archiv školní slévárny)

Vlastnost	Primcote® binder	Wexcoat® 24
Základní báze	Koloidní silika	Koloidní silika
Celkový obsah pevných částic (včetně SiO ₂)	30 hmot. %	23,5 – 24,5 hmot. %
Velikost částic	10 nm	10 nm
Nylonová vlákna velikost	Bez vláken	1-1,6 mm
pH při 25 °C	10,6	10,2 – 10,5
Hustota	1,18 g.cm ⁻³	1,153 – 1,161 g.cm ⁻³

Tab. 4 Cílové hodnoty pro míchání 10 litrů keramické suspenze. (Dle dat výrobce)

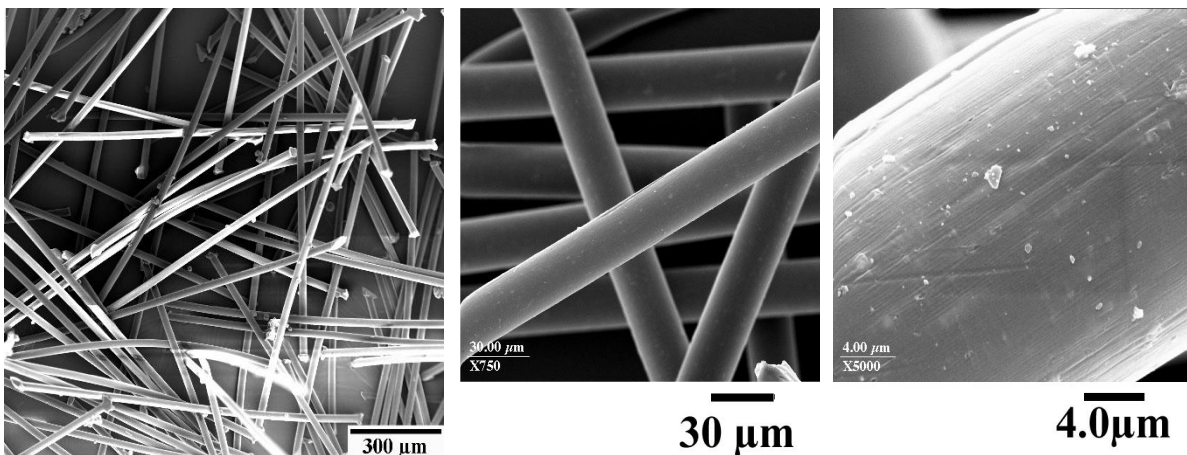
Použití	Primcote® binder [l]	Ranco-Sil™ 4 – fused silica [kg]	Wexcoat® 24 [l]	Ranco-Sil™ 4 – fused silica [kg]
Primární suspenze	5,65	11,47	-	-
Zesilovací suspenze	-	-	6,66	8,8

Doporučený obsah vláken je dodavatelem stanoven na 15 g nylonových vláken (do 1,6 mm) na jeden litr zesilovací suspenze. Nylonová vlákna na obr. 19, detailní analýza na obr. 20.

Nylonová vlákna se vmíchávají do pojiva snadno a vzniká dobře strukturovaná hmota. V pojivu se i dobře mísí a nevznikají shluky vláken. Celý proces trvá pár sekund. Moučka se dále přidává přibližně po 30-50 sekundách od rozmíchání vláken v pojivu. Nejvhodnějším způsobem míchání nové suspenze je postupné přisypávání moučky a pomalé rozmíchávání, aby se netvořily aglomeráty moučky a nedocházelo k narušení struktury vláken a jejich shlukování.



Obr. 19 Struktura nylonových vláken. (vlevo - jemné mletí pro primární suspenzi, vpravo - vlákna do 1,6 mm určená pro zesilovací suspenzi), (Archiv školní slévárny)



Obr. 20 SEM analýza nylonových vláken 1 mm. (Archiv školní slévárny)

3.2 Zkoušky keramické suspenze

Keramická suspenze se musí kontrolovat, respektive mělo by to být v zájmu každého pracoviště. Pokud by se suspenze netestovala, chovala by se nepředvídatelně. Z kontrolních hodnot se zjišťuje aktuální stav, jestli složení jednotlivých surovin je ve vhodném poměru. Cílem pracoviště by mělo být si udržovat suspenzi v co nejlepším stavu, dlouhodobé udržování „zdravé“ suspenze je levnější a slévárna je konkurenceschopnější.

Z technického hlediska stav suspenze ovlivňuje schopnost smáčet model a zesilovat obaly. Ze špatné suspenze nevzniknou kvalitní skořepiny. Klesá kvalita odlitků a zvyšují se náklady na jejich opravy nebo zmetkování. [11]

3.2.1 Měření teploty

Měření teploty keramické suspenze spočívá v kontaktním měření, kdy se teploměr ponoří do suspenze a hodnota se odečte ze stupnice teploměru. Teplota by se měla pohybovat v intervalu 24 - 28 °C. Zvyšováním teploty klesá viskozita suspenze a zhoršuje se její krycí schopnost. [11]

3.2.2 Měření viskozity keramické suspenze

Kontrola viskozity suspenze se určuje nabráním do specifického kalíšku, kde je v nejhlubší části dírka, kterou směs vytéká. Doba do vytečení suspenze z nádoby se měří. Pokud suspenze vyteče moc rychle je málo viskózní a je nutné přidat plniva, křemičité moučky. Pokud je výtok pomalý, je suspenze moc hustá, a proto se přidává destilovaná voda. Správnou viskozitou keramické suspenze je zabezpečeno dobrého smáčení modelu při vhodné tloušťce obalu. [11]

Měření je prováděno pomocí Fordova a Zahnova poháru. Pro keramické suspenze se zesilovacími vlákny se používá pohárku W800 FlowCup.

Praktické měření ve školní laboratoři:

Měření viskozity primární suspenze bylo měřeno pomocí Zahnova pohárku velikosti 5, viz obr 21. Naměřená doba výtoku z pohárku byla 25 sekund. Což odpovídá optimální hodnotě, která by se měla pohybovat v intervalu od 23 - 26 sekund. Experimentálně bylo provedeno měření i na Fordově pohárku, kde výtaková doba byla 47 sekund.

Měření viskozity zesilovací suspenze bylo provedeno obdobně, jen muselo být použito pohárku W800 FlowCup, doba výtoku byla 25 sekund, optimální hodnota je 23 - 26 sekund. Metoda FlowCup pro měření suspenzí s vlákny spočívá na měření doby od zahlédnutí vyššího hrotu pohárku do doby, než je viditelný nižší hrot, který se objeví vlivem výtoku suspenze. Experimentálně bylo změřeno i na Zahnově pohárku, výtok trval 8 sekund.



Obr. 21 Měření viskozity, Zahnův pohárek (průměr výtoku 5 mm).

3.2.3 Měření pH pojiva keramické suspenze

Hodnota pH se měří ponořením elektrod pH metru do odebraného pojiva, které je odděleno od žáruvzdorné moučky. Zjišťujeme na stupnici (0-14), jak se roztok chová, jestli kyselý (0-7) nebo zásaditě (7-14). Keramické suspenze je snaha udržovat na nebo nad hodnotou 9,2 pH. Nevhodná hodnota pH má za následek nižší životnost suspenze. Přidáním křemičité moučky pH klesá, suspenze gelovatí. [11]

3.2.4 Kontrola množství bakterií v suspenzi

Kontroluje se množství bakterií obsažených v suspenzi. Přemnožením bakterií klesá kvalita a klesá i pH, bakterie ze sebe vylučují kyselou látku. Měření se provádí za pomoci speciálních živných pásek. Jako u měření pH je nutné odseparovat žáruvzdorné plnivo od pojiva. Do pojiva se následně pokládá živný pásek, který se nechá inkubovat. Pásek signalizuje množství bakterií v pojivu. Pásky se porovnají s etalony. [11]

3.2.5 Měření hustoty suspenze

Měřením celkové hustoty keramické suspenze všech obsažených látek můžeme porovnávat s očekávanou hustotou a hodnotit případné rozdíly. Pokud je hustota vyšší, suspenze obsahuje větší množství pevných a žáruvzdorných látek, je-li hustota nižší, v suspenzi je málo pevných a žáruvzdorných látek. Jmenovitá hustota úzce souvisí s viskozitou, a tudíž schopností obalovat model. Měření je možné provádět vázkovou hodnotou. Zvážením prázdného odměrného válce s objemem 100 ml, následně se do válce nalije 100 ml keramické suspenze a válec se znovu váží. Celková hmotnost se dělí 100, výsledkem je měrná hustota keramické suspenze, dle vztahu 3.1. [11]

$$\rho = \frac{m_{Pl} - m_v}{100}, \quad (3.1)$$

- kde: ρ - hustota suspenze [$\text{g} \cdot \text{ml}^{-1}$],
 m_v - hmotnost prázdného válce [g],
 m_{Pl} - hmotnost válce se 100 ml suspenze [g].

Praktické měření ve školní laboratoři:

Měření hustoty primární suspenze spočívalo v navážení prázdného odměrného 100 ml válce na laboratorní váze. Hmotnost prázdného odměrného válce činila $m_v = 127,62$ g. Následně se do válce nalilo 100 ml suspenze a válec s obsahem měl hmotnost $m_{1Pl} = 307,83$ g.

Výsledná měrná hustota primární suspenze byla vypočtena dle vztahu (3.1):

$$\rho_1 = \frac{307,83 - 127,62}{100} = 1,80 \text{ [g} \cdot \text{ml}^{-1}\text{]}$$

Měření hustoty sekundární suspenze bylo obdobné. Hmotnost prázdného odměrného válce činila $m_v = 135,92$ g. Následně se do válce nalilo 100 ml sekundární suspenze, válec s obsahem měl hmotnost $m_{2Pl} = 297,06$ g, viz obr. 22.

Výsledná měrná hustota sekundární suspenze byla vypočtena dle vztahu (3.1):

$$\rho_2 = \frac{297,06 - 135,92}{100} = 1,61 \text{ [g} \cdot \text{ml}^{-1}\text{]}$$



Obr. 22 Vážení hmotnosti odměrného válce se 100 ml keramické suspenze.

3.2.6 Destičková zkouška – Plate weight testing

Destičková metoda reprezentuje schopnost keramické suspenze pokrýt a přilnout na voskový model. Schopnost nabalovat se na voskový model je ovlivněna množstvím a velikostí žáruvzdorných složek v suspenzi. Při zkoušení se používají mosazné destičky normované velikosti, buď 150x150 mm nebo 75x75 mm. Nejprve se vysuší a očistí od nečistot a zváží. Hmotnost se zapíše a plátek se celý namáčí do odebraného vzorku keramické suspenze. Je namáčen shodnou dobu pro všechna měření. Po vytažení se zavěsí na váhu a spouští se stopky. Každých 15 sekund se opisuje do záznamníku váha po dobu 3 minut, nebo do té doby, než se naváží během tří intervalů shodná hmotnost. Během vážení nesmí být v místnosti průvan, aby se vzorek nevysušoval. Naměřené hodnoty se vykreslují do grafů a vyhodnocují. [11]

3.2.7 Test obsahu žáruvzdorných látek (Total Solids)

Testování se provádí za účelem zjištění množství žáruvzdorných látek v keramické suspenzi. Optimální množství zlepšuje syrovou pevnost skořepiny. Pokud by obsahovala velké množství těchto látek, snižuje praskání při vytavování. Naopak malé množství žáruvzdorných látek způsobuje oslabení vyžíhané i syrové skořepiny. Složení se doladí přidáním žáruvzdorné moučky nebo vody.

Měření se provádí vázkovou metodou, přesně se zváží kalíšek pro odběr vzorků a hodnota se zapisuje. Následně se zváží kalíšek se vzorkem keramické suspenze, též se hodnota zapíše. Dále se kalíšek se vzorkem dá do vyhřáté trouby na 180 °C na dobu jedné hodiny. Po vyjmutí zkušební kalíšku se vzorkem z pece se váží a hodnota znovu zapisuje. Vztah (3.2) popisuje poměr žáruvzdorných látek obsažených v keramické suspenzi. [11]

$$TS = \frac{m_{kal+x+T} - m_{kal}}{m_{kal+x} - m_{kal}}, \quad (3.2)$$

- kde: TS - obsah žáruvzdorných látek v suspenzi [%],
 m_{kal} - hmotnost prázdného kalíšku [g],
 m_{kal+x} - hmotnost kalíšku se suspenzí [g],
 $m_{kal+x+T}$ - hmotnost kalíšku se suspenzí po vypékání v peci [g].

Praktické měření ve školní laboratoři:

Měření obsahu žáruvzdorných látek primární suspenze bylo provedeno zvážením dvou prázdných alobalových kalíšků. Druhý kalíšek se použil jako krycí vrch. Vrchní kalíšek se označil, aby se po vypékání vzorek poznal. Dále se kalíšek naplnil zhruba z 1/3 a zvažil. Dále se kalíšek s obsahem dal do vyhřáté pece na 180 °C a dobu jedné hodiny. Hmotnost prázdného kalíšku s vrškem $m_{kal} = 2,39$ g, hmotnost s prim. suspenzí $m_{kal+1} = 18,06$ g a kalíšek se žáruvzdorným obsahem $m_{kal+1+T} = 15,29$ g, na obr. 23.

Obsah žáruvzdorných látek v primární suspenzi dle vztahu (3.2):

$$TS_1 = \frac{15,29 - 2,39}{18,06 - 2,39} = 82,3 \text{ [%]}$$

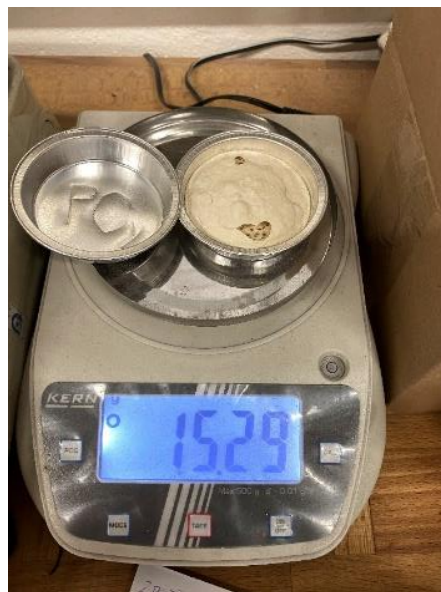
Optimální TS se u polymerových pojiv pohybují v rozsahu 78-82% primární suspenze.

Měření obsahu žáruvzdorných látek zesilovací suspenze bylo provedeno obdobným vážením. Hmotnost prázdného kalíšku s vrškem $m_{kal} = 2,39$ g, s obsahem $m_{kal+2} = 11,8$ g a kalíšek se žáruvzdorným obsahem $m_{kal+2+T} = 8,86$ g.

Obsah žáruvzdorných látek v sekundární suspenzi dle vztahu (3.2):

$$TS_2 = \frac{8,86 - 2,39}{11,81 - 2,39} = 68,7 \text{ [%]}$$

Optimální hodnota TS pro sekundární suspenzi nebyla výrobcem uvedena.



Obr. 23 Vážení hmotnosti kalíšku po vypékání (180 °C/ 60 min) se vzorkem primární suspenze.

3.2.8 Test množství pevných látek v pojivu (Binder Solids)

Testování se provádí za účelem zjištění množství pevných látek v keramické suspenzi. Malé množství pevných látek oslabuje skořepinu a stává se tedy snadněji porušitelná. Zjišťuje se množství obsaženého SiO₂. Jednotlivá zrna pojiva pozitivně ovlivňují vaznost. Avšak je třeba zabezpečit optimální množství, aby nedocházelo ke snižování vaznosti, a tedy oslabení skořepiny vůči praskání. Doladění složení se provádí buď přidáním destilované vody nebo plniva.

Testování je prováděno odebráním vzorku keramické suspenze do odběrné nádoby. Vzorek se vloží do odstředivacího zařízení, kde jsou vzorky odstředovány po dobu 30 minut při 3000 ot/min. Vzorky se slíjí do nové nádoby a nechají se podruhé odstředit. Z odstředěného pojiva se odebere vzorek 10 ml do odběrné baňky, která se s obsahem váží. Dále se dopočítá měrná hmotnost odstředěného pojiva dle vztahu (3.3). Z grafu (obr. 25 a 26) se určí množství pevných látek obsažených v suspenzi dle vypočítané měrné hustoty. Tento graf by měl být v technickém listu pojiva pro kontrolu optimální hodnoty. [11]

$$SG = \frac{m_{xb} - m_b}{V_{ref}}, \quad (3.3)$$

- kde: SG - měrná hmotnost [g·ml⁻¹],
 m_b - hmotnost prázdné odměrné baňky [g],
 m_{xb} - hmotnost odběrné baňky se suspenzí [g],
 V_{ref} - referenční objem odběrné baňky [ml].



Obr. 24 Vzorky umístěné v odstředivacím zařízení (Rotofix 32 A).

Praktické měření ve školní laboratoři:

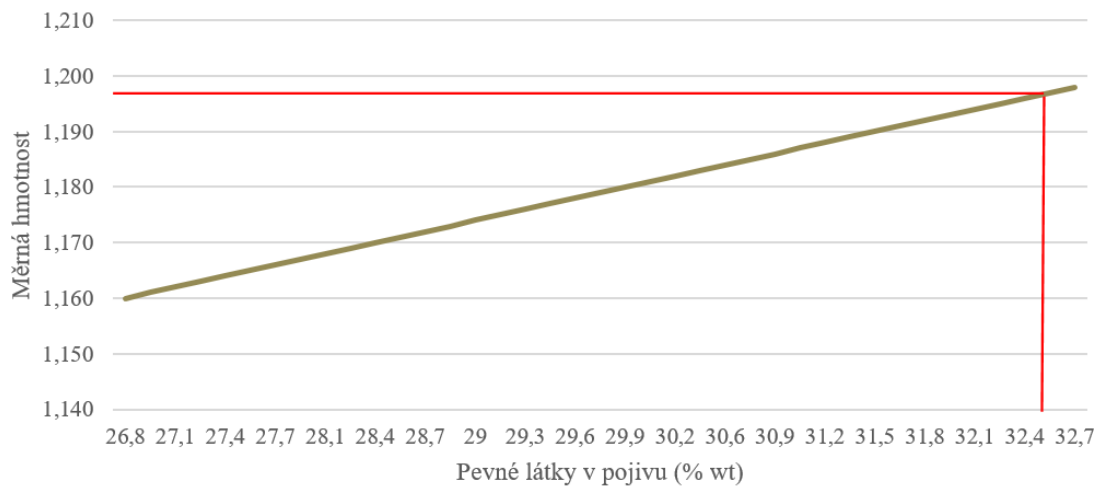
Měření množství pevných látek v pojivu primární suspenze bylo provedeno nabráním zkoumané keramické suspenze do zkumavek. Do čtyř zkumavek se nabralo cca 45 ml keramické suspenze. Tyto zkumavky se umístily do odstředivky, tak aby byla zabezpečena vyváženost disku odstředivacího zařízení. Zařízení se nastavilo na 3000 ot/min po dobu 30 minut. Po 30-ti minutovém cyklu se do nové zkumavky slilo odstředěné pojivo. Tento slitek

se znovu dal na dobu 30 minut při 3000 ot/min odstředit. Odstředěný zbytek pojiva se slil do kádinky. Z kádinky se odlilo 10 ml pojiva do odměrné baňky. Baňka byla zvážena prázdná a s 10 ml odstředěného pojiva. Hmotnost prázdné baňky činila $m_b = 10,55$ g a hmotnost plné $m_{1b} = 23,19$ g. Referenční objem kalibrovaného kalíšku je 10,56 ml.

Měrná hmotnost odstředěného primárního pojiva, dle vztahu (3.3):

$$SG_1 = \frac{23,19 - 10,55}{10,56} = 1,197 \text{ [g} \cdot \text{ml}^{-1}\text{]}$$

Binder solids - primární suspenze



Obr. 25 Závislost měrné hmotnosti na množství pevných látek v pojivu pro suspenzi PrimCote. (% wt = hmot. %), (Archiv školní slévárny)

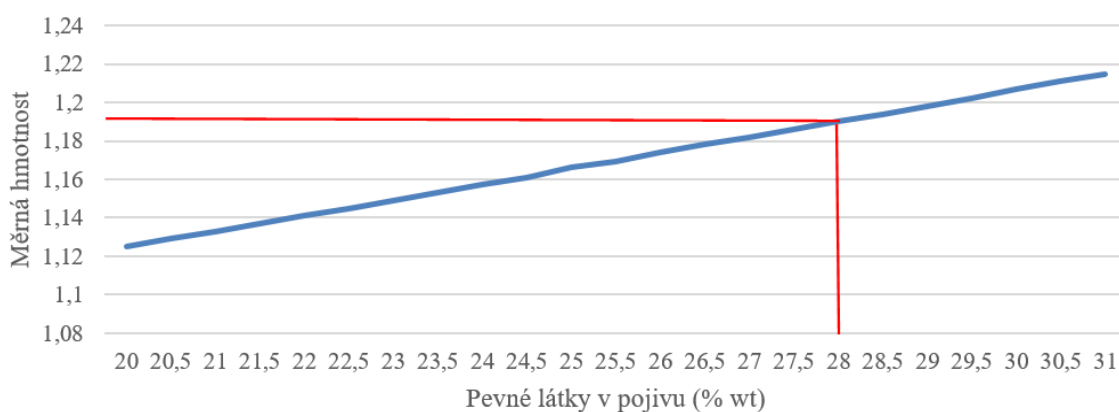
Obsah pevných látek v pojivu PrimCote, dle obr. 25: BS = 32,5 [hmot. %].

Měření množství pevných látek v pojivu zesilovací suspenze bylo provedeno jako u primární. Hmotnost prázdné baňky činila $m_b = 10,55$ g a hmotnost plné $m_{2b} = 23,12$ g.

Měrná hmotnost odstředěného sekundárního pojiva, dle vztahu (3.3):

$$SG_2 = \frac{23,12 - 10,55}{10,56} = 1,190 \text{ [g} \cdot \text{ml}^{-1}\text{]}$$

Binder solids - sekundární suspenze



Obr. 26 Závislost měrné hmotnosti na množství pevných látek v pojivu pro suspenzi WexCoat. (% wt = hmot. %), (Archiv školní slévárny)

Obsah pevných látek v pojivu WexCoat, dle obr. 26: BS = 28,0 [hmot. %].

Doporučený obsah pevných částic pro primární suspenzi je v rozmezí 28,8 - 30,8 hmot. %. Naměřené a odečtené hodnoty odpovídají množství pevných látek BS = 32,5 hmot. %. Doporučený obsah pevných částic pro sekundární suspenzi je v rozmezí 25,5 - 26,5 hmot. %. Naměřené a odečtené hodnoty odpovídají množství pevných látek BS = 28,0 hmot. %. Hodnoty množství pevných látek v suspenzích byly odečteny z grafů na obr. 25 a 26. Během obou provedených měření byl zjištěn vyšší podíl pevných částic v obou suspenzích. Zvýšený obsah pevných látek v pojivu může zapříčinit vyšší pevnost skořepiny, ale nižší prodyšnost.

3.3 Zkoušky keramické skořepiny

Zkoušky keramických skořepin se dělají, aby se zjistilo, jak se bude skořepina chovat za zvýšených teplot a při mechanickém namáhání.

3.3.1 Měření pevnosti v ohybu – MOR (Modulus Of Rupture)

Měření pevnosti skořepiny v ohybu se provádí za syrova, za tepla a po odlití. Pevnost v ohybu se zjišťuje, kvůli vnitřní termické expanzi vytavitelného modelu, který expanduje a vytváří tlak na obal skořepiny. Pokud je tlak na obal dostatečně velký, dojde k porušení skořepiny a popraskání. Měření pevnosti za syrova zohledňuje mechanické vlastnosti skořepiny při manipulaci s obaleným stromečkem před jakýmkoliv tepelným zpracováním. Měření pevnosti za tepla zohledňuje mechanické vlastnosti skořepiny při odlévání kovu. Měření pevnosti po odlití kovu do skořepiny prezentuje schopnost se rozpadat. Po odlití by rozpadavost měla být co nejsnazší, šetří se tím náklady na vytloukání odlitků ze skořepiny.

Měření se provádí tříbodovým namáháním vzorku skořepiny. Principem zkoušky je odběr vzorků se stálou šířkou vrstvy. Vzorkům se změří tloušťka stěn. Vzorky pokládáné na dvě podpory, primárním obalem směrem k podporám jsou namáhány tahem. Namáhají se do té doby, než je vzorek porušen. Během měření jsou zaznamenávány a vyhodnoceny hodnoty pevnosti a průhybu. Z maximální hodnoty zatížení se dopočte pevnost v ohybu dle vztahu (3.4). [11]

$$MOR = \frac{3 \cdot \text{zatížení při lomu} \cdot \text{rozteč podpor}}{2 \cdot \text{šířka vzorku} \cdot \text{tloušťka vzorků}^2} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] \quad (3.4)$$

3.3.2 Tepelná roztažnost skořepiny

Tepelná roztažnost skořepin je dána koeficientem tepelné roztažnosti materiálu. Materiály s vyšším koeficientem vůči těm s nižším při stejném oteplení více expandují. S tím velmi úzce souvisí problematika termické expanze vytavitelného modelu a skořepiny při vytavování modelu ze skořepiny. Keramické materiály mají nižší koeficient roztažnosti, než má vytavitelný model a vzniká tlak na obal skořepiny. Pnutí může být tak vysoké, až dojde k prasknutí skořepiny.

Měření tepelné roztažnosti neboli dilatace se provádí dilatometry. Ze skořepiny se odřežou malé vzorky, které se umístí do keramické nádoby. Nádoby se vzorky se vloží do programovatelné pece. Pec se nastavenou rychlostí ohřívá až do maximální naprogramované teploty. Během ohřevu vzorku počítač snímá dilataci vzorků a vyhodnocuje ji. Výsledkem je relativní roztažnost materiálu (keramické skořepiny) v závislosti na teplotě. [11]

3.3.3 Měření prodyšnosti skořepiny

Měření prodyšnosti skořepiny se provádí, aby se zjistil průtok plynů obaly skořepiny během odlévání. Prodyšnost je závislá na velikosti a množství pevných částic skořepiny.

Kulaté materiály jako zirkon se vyznačují vyšší pevností, ale nižší prodyšností. Hranaté posypové materiály vykazují prodyšnost skořepin lepší.

Vzorek pro měření se vyrábí připevněním pingpongového míčku na keramickou trubičku. Míček s trubičkou se obalí skořepinou a vyžihá. Na keramickou trubičku se připevní hadice od laboratorního kompresoru, který zobrazuje a zaznamenává aktuální hodnoty napětí. Z hodnot napětí lze dopočítat dle vzorce průtok vzduchu skořepinou. Měření se provádí za pokojové a zvýšené teploty. [11]

3.4 Obalování 3D tištěných modelů

Jako experimentální a teoretický vzorek byla vybrána třístranná pyramida s délkou strany 100 mm. Tvar pyramidy byl volen z hlediska ostrých hran, tedy vysokého potenciálu iniciace trhlin, vlivem tvaru modelu. Modely pyramid se tiskly na tiskárně Průša i3 MK3 z materiálu Polymaker PolyCast. Materiál Polymaker Polycast byl speciálně navržen pro hybridní technologii přesného lití. Teplota tiskové trysky 210 °C, teplota tiskové plochy 60 °C, výška vrstvy 0,2 mm a styl vnitřní výplně tištěného modelu byl volen „Gyroid“. Struktura, která má propojen celý vnitřní objem vzduchu uvnitř modelu. Lepení nebo připevňování pyramid na vtokové, voskové kúly spočívalo v tom, že se na seříznuté hraně pyramidy natavil vosk, který smočil tuto plochu a nechal se ztuhnout. Opětovným prohřátím styčných ploch na kúlu a pyramidě se k sobě tyto plochy přimáčkly do té doby, než natavený vosk zcela ztuhl. Po zatuhnutí modelu na voskovém kúlu se připevňovaly další modely v etážích. Na voskových kúlech byly poznamenány římskými číslicemi druhy výplní modelů.

V prvních pokusech se experimentovalo se vzorky s 0 %, 10 %, 20 % a 30 % vnitřní výplně tištěného modelu. Bylo použito 6 vnějších obalů, aby skořepina byla slabší a byla vyšší šance na tvorbu trhlin. Ve školní slévárně se obvykle používá 8 a více obalů. Při vytavování se prokázalo, že k praskání skořepin dochází při nižším množství vnitřní výplně modelu. Prvotní ideou praskavosti skořepin byla teorie o termické expanzi vzduchu uvnitř uzavřeného modelu skořepiny během vytavování. Vzduch uzavřený v dutině modelu expanduje, až model vytvoří na obal skořepiny takové napětí, že skořepina praskne.

Výrobce materiálu na konkrétní dotaz, kolik použít vnitřní výplně modelu pro optimální vlastnosti modelu během vytavování odpověděl, že vhodné množství vnitřní výplně modelu je 5-8 %. V dalších experimentech už bylo používáno pouze modelů s 0 %, 5 % a 8 % výplně. Byly vyrobeny 3 testovací sestavy s celkem 20 modely. Z toho bylo 10 kusů s 0 % výplní, 5 kusů s 5 % výplní a dalších 5 kusů s 8 % výplní. Po vytavení modelů ve tvaru pyramid bylo zřejmé, že popraskaly pouze vzorky s 0 % výplní, viz obr. 27. Ostatní zůstaly bez prasklin během procesu vytavování 3D tištěného modelů ze skořepin.

Myšlenka tepelné expanze vzduchu uvnitř modelu byla částečně ověřena další zkouškou, kdy se na vtokový kúl s modely připevnila keramická trubička, která měla konec přilepený k modelu. Viz obrázky 28 a 29. Spoj trubičky s modelem byl slepený tak, aby vzduch uzavřený v dutině modelu byl propojen s okolní atmosférou pece během vytavování. Model byl takzvaně odvzdušněn. Do pláště modelu se vytvořil otvor o průměru 1 mm. Při vytavování takto upraveného modelu nedošlo k porušení skořepiny. Poznotek byl tedy takový, že odvzdušněná skořepina neměla problém s praskavostí. Skořepina bez odvzdušnění musela mít alespoň 5 % vnitřní výplně modelu, aby nedošlo k tvorbě trhlin na povrchu keramické skořepiny.



Obr. 27 Dva různé stromečky s rozpraskanou skořepinou v místech, kde byly modely s 0 % výplní, bez odvzdušnění.



Obr. 28 Skořepina s modely o výplni 0 %, 5 %, 8 % a odvzdušněný 0 %.



Obr. 29 Detail na odvzdušněný model, který byl přilepen na keramickou trubičku.

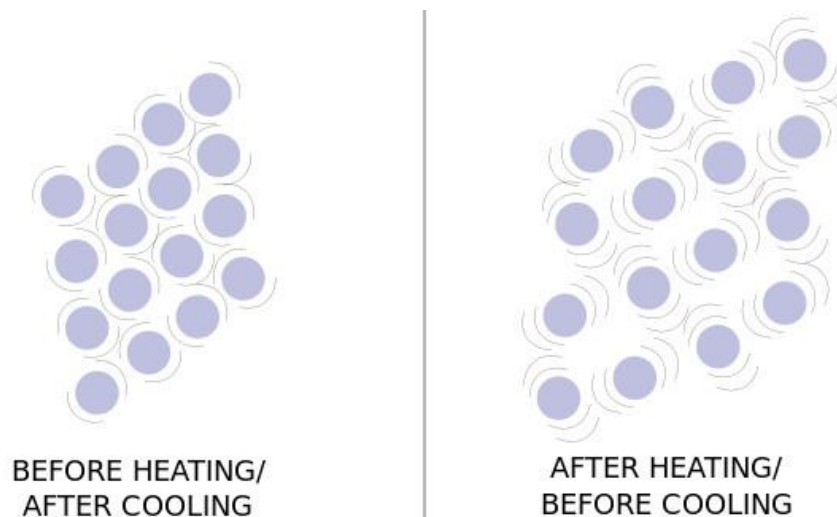
4 ZKOUŠKY MATERIÁLU POLYMER POLYCAST

Kapitola popisuje metody a zkoušky prováděné na materiálu Polymer PolyCast. Materiál je využíván v této práci pro optimalizaci a výrobu 3D tištěných modelů pro hybridní technologii přesného lití.

4.1 Dilatometrie

Dilatometrie je obor zabývající se studováním materiálů, které jsou fyzikálně nebo chemicky namáhány a jsou u nich měřeny objemové změny. Termická expanze neboli změna rozměrů měřeného objektu v závislosti na teplotě okolí předmětu. Vlastnost tepelné roztažnosti je velmi podstatná pro funkčnost různých technických konstrukcí. Nevhodným návrhem expanze součásti může dojít až k úplnému zničení celého zařízení, ve kterém součást pracuje za určitých teplot. V našem případě prasknutí skořepiny. Hodnota termické expanze se počítá z koeficientu tepelné roztažnosti daného materiálu. Z nichž vyhodnotíme o kolik bude objekt expandovat při zvoleném rozdílu teplot. Čím vyšší je hodnota koeficientu termické expanze, tím více bude materiál expandovat při stejném rozdílu teplot.

Zvyšováním teploty se objekt zahřívá. Přijímané teplo se ukládá v atomech, v podobě kinetické energie. Atomy materiálu se chvějí a působí proti silám meziatomovým, obr. 30. Se zvyšujícím se ohřevem materiálu se atomy chvějí čím dál více. Koeficient termické expanze je pro každý materiál jedinečný a je dán fyzikálními vlastnostmi zkoumaného materiálu.



Obr. 30 Chvění atomů po zahřátí (vpravo). [9]

Materiály vykazující nejnižší koeficient termické expanze jsou krystaly. Jejich struktura je jednotná a špatně snášejí tepelné šoky nebo vlivy působení ostatních těles s jinou termickou roztažností na svůj povrch. Dochází pak k rozrušování například keramických skořepin vlivem působení objektů s vyšší teplotní expanzí, než je ta skořepiny. Naopak nejnižší koeficienty termické expanze mají materiály se slabými mezimolekulárními vazbami, polymery. Větší objemová roztažnost je způsobena snazším překonáním mezimolekulárních sil, a tedy při stejné změně teplot dojde k většímu rozkmitání atomů a zvětšení objemu vzorku.

Měřicí zařízení se nazývá dilatometr. V běžné praxi si jako nejjednodušší dilatometr můžeme představit rtuťový teploměr. Rtuť obsažená v nádobce expanduje dle okolní teploty teploměru, při vyšší teplotě okolí objem rtuti roste a při nižší teplotě okolí zase naopak objem rtuti se zmenšuje.

Dilatometrů je více druhů, starší provedení funguje na principu kapacitním, kdy je jedna kondenzátorová deska se vzorkem pohyblivá a expanzí vzorku se přibližuje k desce druhé. Novější metodou je laserové měření, vzorek je neustále laserem přeměřován a je vyhodnocován jeho objem. V poslední době je nejužívanějším dilatometrem optický, pracuje na principu měření odchylek mezi jednotlivými fotografiemi velikosti vzorku.

Kapaliny a plyny se v celém objemu chovají při tepelné expanzi shodně, avšak pevné vzorky nikoliv. Jsou závislé na rozpoložení a tvaru vzorku. Například kovová tyč bude na délku expandovat mnohonásobně více než v průměru. Je možné tedy předpokládat vlivu koeficientu lineární tepelné roztažnosti, nikoliv objemové tepelné roztažnosti.

Výpočet délky prodlouženého vzorku je ekvivalent počáteční délky vzorku a lineární souvislosti mezi počáteční délkou vzorku, koeficientu tepelné roztažnosti zkoumaného materiálu a změně teplot, při které k expanzi došlo. Dle vztahu (4.1).

$$L = L_0 + L_0 \cdot \alpha \cdot dT, \quad (4.1)$$

kde: L - délka vzorku po tepelné expanzi [mm],
 L_0 - počáteční délka vzorku [mm],
 α - koeficient tepelné roztažnosti [K^{-1}],
 dT - rozdíl počáteční a koncové teploty vzorku [$^{\circ}C$].

Ze vzorce (4.1) lze dále vyjádřit hodnota koeficientu termické expanze, lineárního charakteru, daného materiálu. Je nezbytné vědět rozdíl teplot, při kterých k rozměrové expanzi došlo, počáteční rozměr a nominální rozměr po změně teploty.

$$\alpha = \frac{L-L_0}{L_0 \cdot dT} [K^{-1}] \quad (4.2)$$

Obdobného vztahu lze určit i pro objemové změny vzorku. Výpočet objemové termické expanze krychlového vzorku by se počítal dle vztahu (4.3).

$$V = L^3 = (L_0 + L_0 \cdot \alpha \cdot dT)^3, \quad (4.3)$$

kde: V - objem vzorku po tepelné expanzi [mm^3].

Zjišťování koeficientů termické expanze je důležité z hlediska volby materiálu a jeho použití v praxi. Běžně můžeme vidět různé dilatační spáry, aby nedošlo k porušení součástí staveb, strojů atd. Tyto spáry jsou k vidění na různých betonových a mostových konstrukcích. [12]

4.2 Dilatometrie materiálu Polymaker PolyCast

Naměřené hodnoty dilatometrie slévárenského vosku a filamentu Polymaker Polycast, viz příloha číslo 1. Koeficienty termické expanze vzorků se mění v jednotlivých teplotních úsecích. Měření bylo provedeno z pokojové teploty $25^{\circ}C$ na teplotu $107^{\circ}C$, kdy se vzorek z materiálu Polymaker Polycast přestal chovat specificky a být měřitelný. Materiál během teploty $74^{\circ}C$ mění charakter své tepelné roztažnosti, tato teplota koresponduje s teplotou skelného přechodu, T_g . Další méně výrazné změně tepelné roztažnosti dochází v okolí teploty $93^{\circ}C$. V porovnání s voskem, má materiál PolyCast nižší koeficient tepelné roztažnosti až do teploty okolo $74^{\circ}C$. Pro vosk je z grafu naměřených hodnot zřejmé, že jeho koeficient tepelné roztažnosti v okolí teplot nad $60^{\circ}C$ rapidně klesá. Způsobeno překonáním teploty tavení vosku.

4.3 Diferenciální skenovací kalorimetrie

Diferenciální skenovací kalorimetrie, zkráceně DSC je metoda zkoumající tepelné vlastnosti zkoumaného materiálu. Určuje, při jaké teplotě zkoumané materiály začínají tát, prochází skelným přechodem a krystalizují. Všechny tři jevy jsou spojeny se změnou tepelného toku zkoumaného materiálu.

Metoda měření spočívá v konstantní rychlosti ohřívání nádob. Rychlost ohřívání bývá 10 K/min, řízeno procesorem. Jedna nádoba slouží jako referenční, druhá obsahuje zkoumaný vzorek a z obou je vyhodnocován počítačem tepelný tok skrz nádoby. Referenční nádoba je prázdná, tedy vůči této se porovnává změna tepelného toku v nádobě se vzorkem. Rozdíl tepelného toku nádoby se vzorkem je způsoben fázovými přeměnami zkoumaného materiálu během ohřívání nebo chlazení. Do grafu se vynáší výsledný rozdíl tepelného toku v závislosti na teplotě. [8; 13]

Data nalezeny v technických listech dodávaných k materiálu Polymaker PolyCast, viz příloha číslo 2:

- Teplota skelného přechodu 70 °C.
- Teplota prvotního rozkladu a poklesu hmotnosti > 280 °C.
- Teplota samovznícení > 380 °C.

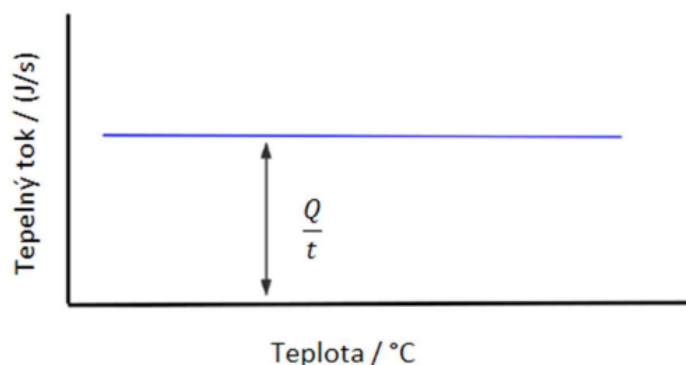
4.3.1 Tepelná kapacita

Tepelná kapacita C_p vyjadřuje množství dodaného tepla Q v závislosti na změně teploty vzorku ΔT , dle vztahu (4.4). Respektive množství dodaného tepla pro ohřátí vzorku o 1 K. Tepelný tok je množství dodávaného tepla vzorku za čas [J/s]. Rychlost ohřevu vzorku je závislost změny jeho teploty za čas [K/s].

$$C_p = \frac{\frac{Q}{t}}{\frac{\Delta T}{t}} = \frac{\text{tepelný tok}}{\text{rychlost ohřevu}} = \frac{Q}{\Delta T}, \quad (4.4)$$

kde: C_p - tepelná kapacita [J·K⁻¹],
 Q - teplo [J],
 ΔT - změna teploty [K],
 t - čas [s].

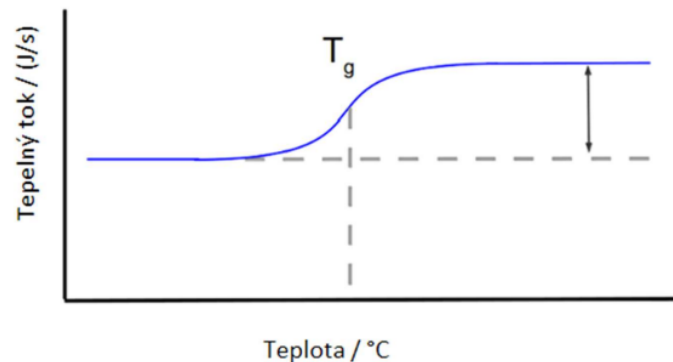
Uvažujeme-li, že je tepelná kapacita C_p konstantní, bude nezávislá na teplotě. Průběh také bude konstantní, obr. 31. [8; 13]



Obr. 31 Průběh DSC křivky, ve kterém materiál neprochází žádnou změnou. [8]

4.3.2 Teplota skelného přechodu

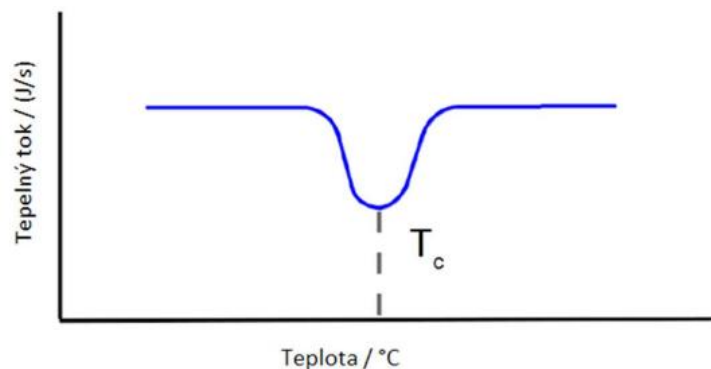
Teplota skelného přechodu ovlivňuje mechanické vlastnosti materiálu, kdy se materiál stává pružným. Pod teplotou skelného přechodu bývá materiál tvrdý a křehký. Ohřevem vzorku na a nad teplotu skelného přechodu, křivka závislosti tepelného toku na teplotě reprezentuje plynulý nárůst na vyšší hodnotu tepelného toku. Vzorek průchodem teplotou skelného přechodu mění svou tepelnou kapacitu. Inflexní bod spojnic změny tepelného toku se označuje, jako teplota skelného přechodu T_g , na obr. 32. [8; 13]



Obr. 32 Průběh DSC křivky při skelném přechodu T_g . [8]

4.3.3 Teplota krystalizace

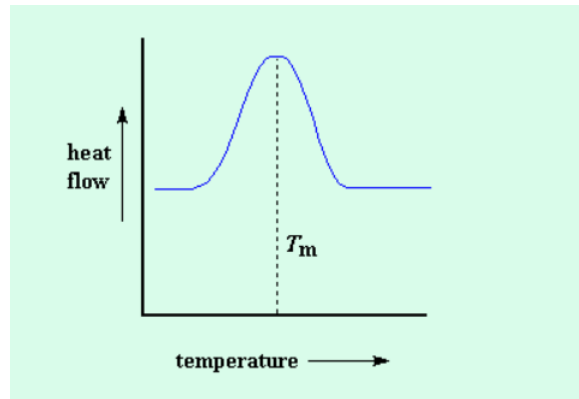
Teplota krystalizace je charakterizována významným poklesem množství dodávaného tepla. Z naměřené DSC křivky lze odečíst teplota krystalizace vzorku T_c . Nachází se ve špičce záporného vrcholu křivky, na obr. 33. Zároveň pokud křivka tuto špičku obsahuje, znamená to, že vzorek je schopen krystalizovat. Vzorek během krystalizace sám produkuje teplo, jde tedy o exotermický děj. [8; 13]



Obr. 33 Průběh DSC křivky při teplotě krystalizace T_c . [8]

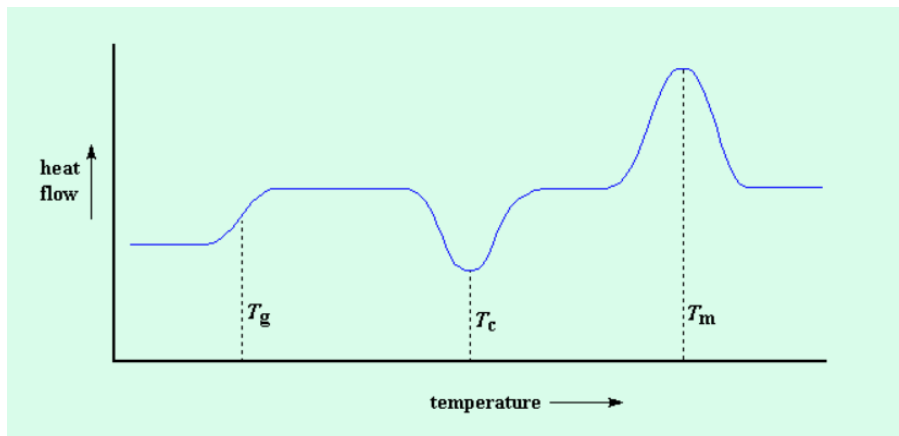
4.3.4 Teplota tání

Budeme-li dále zahřívát vzorek, dojdeme do bodu, kdy dochází k tání zkoumaného materiálu. Tepelný tok se bude zvyšovat, ale teplota vzorku zůstane téměř konstantní. Dochází k endotermickému ději v materiálu. Vzorek toto teplo absorbuje, a tak vzniklou energii spotřebovává na tání. Na DSC křivce se tento děj projevuje jako kladný vrchol. Teplota tání T_m se nachází ve špičce vrcholu DSC křivky na obr. 34. [8; 13]

Obr. 34 Průběh DSC křivky při teplotě tání T_m . [13]

4.3.5 Křivka DSC

Na obr. 35 je prezentována ideální křivka DSC, která vykazuje všechny již zmíněné parametry. V prvním inflexním bodě křivky se nachází teplota skelného přechodu zkoumaného vzorku T_g . Ve špičce prvního minima se nachází teplota krystalizace zkoumaného materiálu T_c a v maximu teplota tání zkoumaného materiálu T_m . [8; 13]



Obr. 35 Celkový teoretický průběh DSC křivky se všemi popsányi změnami. [13]

4.4 Termická analýza materiálu Polymaker PolyCast

Experimentální měření materiálu Polymaker PolyCast bylo provedeno v materiálové laboratoři na Masarykově Univerzitě v Brně. Chemické složení zkoumaného materiálu PVB (Polyvinyl butyral).

Naměřené data byly zaznamenány do grafů a pod jednotlivými grafy jsou slovní komentáře k naměřeným hodnotám.

Křivky termogravimetrie (TG) prezentují změnu hmotnosti analyzovaného vzorku v závislosti na teplotě analyzovaného vzorku.

Derivace křivky termogravimetrie (DTG) prezentují změnu hmotnosti analyzovaného vzorku v závislosti na teplotě analyzovaného vzorku.

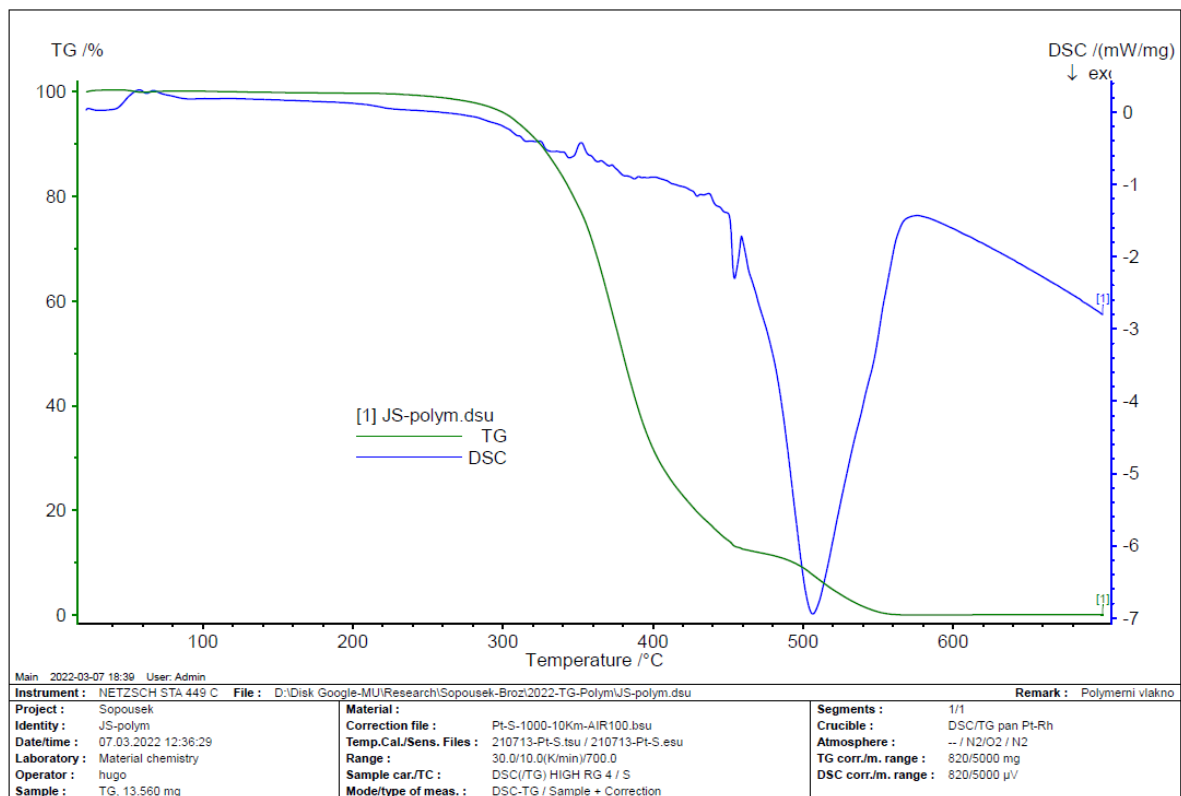
Křivka diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC) prezentuje změny tepelného toku analyzovaného vzorku.

Měření simultánní termickou analýzou DSC + TG

Přístroj: STA Netzsch 409 Jupiter

ohřev 10 K/min, atmosféra syntetický vzduch, 30-700 °C

hmotnost měřeného vzorku 13,56 mg



Obr. 36 Křivky DSC + TG.

Interpretace naměřených dat:

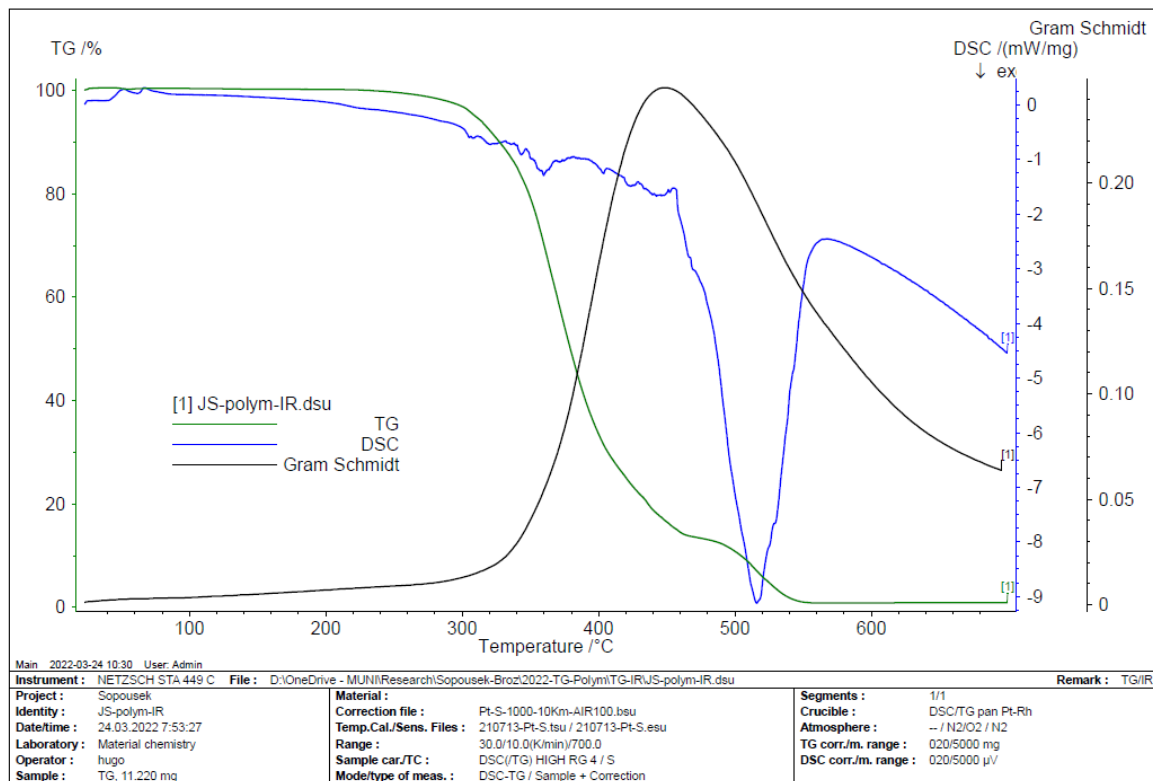
- 25 – 300 °C materiál nevykazuje zvlášť výrazné změny hmotnosti.
- 70 °C materiál prochází teplotou skelného přechodu (T_g) na křivce DSC.
- Od 300 °C dochází k výraznému poklesu hmotnosti doprovázeného nestabilitou tepelného efektu. Naměřená data korespondují s daty v technických listech výrobce materiálu.
- 450 – 480 °C dochází ke stagnaci hmotnosti, kterou lze vidět na křivce TG, stagnace koresponduje se špičkou tepelného efektu při 450 °C na DSC křivce.
- 480 °C konec stagnace hmotnosti a její následný pokles.
- Finální pokles hmotnosti vzorku je doprovázen výraznou exotermní špičkou v rozmezí teplot 475 – 505 °C.
- Maximální teplota hoření je při 505 °C.
- Počátek hoření je v okolí teploty 300 °C s maximem v 505 °C.
- Při teplotě 550 °C hmotnost analyzovaného vzorku se blíží nule.

Měření simultánní termickou analýzou DSC + TG + Gram Schmidt

Přístroj: Netzsch 449 Jupiter

ohřev 10 K/min, atmosféra syntetický vzduch, Pt kelímek, 20-700 °C

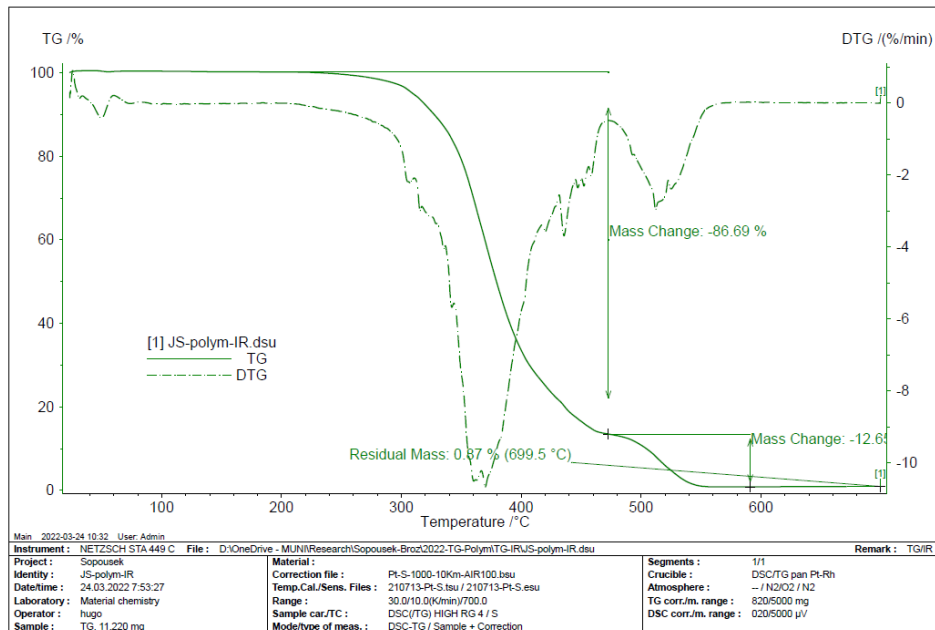
hmotnost měřeného vzorku 11,22 mg



Obr. 37 Křivky DSC + TG + Gram Schmidt.

Interpretace naměřených dat:

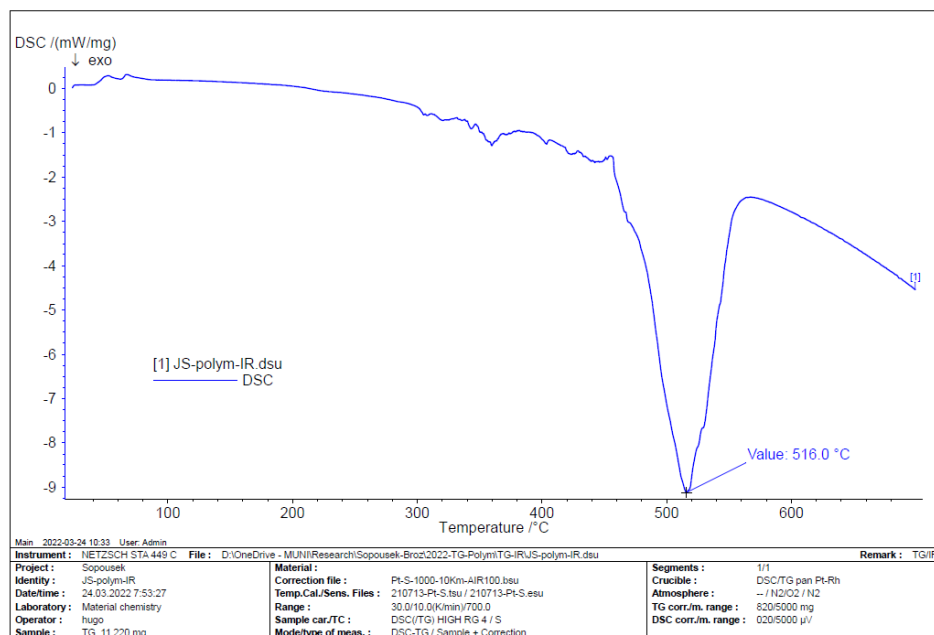
- DSC signál je ve shodě s předchozím měřením DSC+TG.
- Signál „Gram Schmidt“ reprezentuje množství plynných látek unikajících ze vzorku během ohřevu.
- Maximum produkovaných plynných látek je při teplotě 420 °C.



Obr. 38 Křivky TG + DTG.

Interpretace naměřených dat:

- TG signál je ve shodě s předchozím měřením DSC+TG.
- Provedené vyhodnocení signálu TG, viz hmotnostní úbytky vzorku dle grafu.
- Množství zbytkových popelovin (0,87 %) po žihání na 700 °C.
- Obrázek doplněn o derivaci signálu (DTG).



Obr. 39 Křivka DSC se zvýrazněnou teplotou nejintenzivnějšího hoření.

Interpretace naměřených dat:

- DSC signál je ve shodě s předchozím měřením DSC+TG.
- Teplota nejintenzivnějšího hoření je při 516 °C.

4.5 Měření množství zbytkových popelovin

Měření zbytkových popelovin se provádí z hlediska stanovení zbytků popele po vytavení a vyhoření zbytků modelu ze skořepiny. Ideální materiál by měl mít zbytkové množství popelovin nulové nebo se jí co nejvíce blížit. Zbytkové popeloviny by měly být co nejnižší, protože jinak kontaminují slitinu ve skořepině během lití. Někdy je doporučeno po vytavení skořepiny ji propláchnout, a tak zbytky popele odplavit ven. Skořepina se při žhání znovu vysuší.

Zbytkové popeloviny materiálů se zjišťují vázkovou metodou. K experimentu jsou potřeba velmi přesné váhy, porcelánové kalíšky na vzorky, vzorky materiálu. Nejprve je nutné porcelánové nádoby nechat v peci ohřát na teplotu 650 °C, aby se zbavily zbytkové vlhkosti v porcelánu. Po vychladnutí se váží a jejich hmotnost zapisuje, m_{cup} . Dále se připraví vzorky o hmotnosti okolo 10 g, vzorky se váží a hmotnost zapisuje, m_{sample} . Po zvážení hmotnosti se vzorky vloží do vysušených porcelánových kalíšků. Následně se vkládají do pece vyhřáté na 650 °C po dobu 20 minut, podmínky stejné, jako při běžném vytavování modelů z keramických skořepin ve školní slévárně. Po dvaceti minutách se porcelánový kalíšek se zbytkovými popelovinami vyndá a po dostatečném ochlazení na vzduchu se opět váží a hmotnost se zapisuje. [14]

Výsledné množství zbytkových popelovin se určuje dle vztahu (4.5):

$$\%ash = \frac{(m_{cup+ash} - m_{cup}) \cdot 100}{m_{sample}}, \quad (4.5)$$

- kde: $\%ash$ - množství zbytkových popelovin [%],
 m_{cup} - hmotnost porcelánového kalíšku [g],
 m_{sample} - hmotnost vzorku [g],
 $m_{cup+ash}$ - hmotnost porcelánového kalíšku s popelovinami [g].

4.5.1 Měření množství zbytkových popelovin materiálu Polymaker PolyCast

Měření zbytkových popelovin bylo provedeno na vzorcích o hmotnosti 10 g, školní váhy měří s přesností na 4 desetinná místa a váží do hmotnosti 80 g. Porcelánový kalíšek má hmotnost 43 g + vzorek. Uvažujeme-li udávané množství popelovin, dle výrobce 0,003 %. Z 10 gramového vzorku by bylo 0,0003 g zbytkových popelovin. Z vyhledaných vědeckých článků bylo zjištěno, že se množství zbytkových popelovin pohybuje spíše okolo 0,1 %.

Při návrhu vzorků byla uvažována hustota materiálu Polymaker PolyCast $\rho = 1,1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, udáváno výrobcem. Vzorek vážící 10 g odpovídá objemu 9,1 cm³. Vzorek byl proto vymodelován ve tvaru válečku. Bylo vytištěno 8 vzorků hmotnosti 10 g. Celkově byly provedeny 4 měření, vždy po dvou vzorcích v jednom kalíšku. Vzorky byly nejprve vytaveny při teplotě 650 °C po dobu 20 minut v peci s dospalovací komorou (v tabulce 5 značeno (1)). Následně se kalíšky vyndaly z pece, nechaly zchladnout a zvážíly. Po zvážení se kalíšky vrátily zpět do pece vyhřáté na 1000 °C po dobu dalších 20 minut (v tabulce 5 značeno (2)). Poté se porcelánové kalíšky z pece vyjmuly a nechaly zchladit, aby bylo možné provést vážení hmotnosti. Měření bylo realizováno takovým způsobem, aby co nejvíce odpovídalo teplotám a dobám používaným během vytavování skořepin s 3D tištěnými modely ve školní slévárně.

Vzorový výpočet zbytkových popelovin, dle vztahu (4.5):

$$\%ash = \frac{(34,995 - 34,919) \cdot 100}{19,164} = 0,398 \text{ [%]}$$

Tab. 5 Naměřené hodnoty při experimentálním zjišťování množství zbytkových popelovin.

Vzorek	2x10 g	2x10 g	2x10 g	2x10 g
Hmotnost prázdného kelímku [g]	43,192	34,919	43,192	34,917
Hmotnost vzorku [g]	19,141	19,164	18,916	18,903
Hmotnost kelímku s popelovinami [g], (1)	43,256	34,995	43,264	34,995
Hmotnost kelímku s popelovinami [g], (2)	43,195	34,922	43,195	34,921
Množství zbytkových popelovin [%], (1)	0,334	0,398	0,379	0,414
Množství zbytkových popelovin [%], (2)	0,015	0,017	0,013	0,022
Aritmetický průměr [%], (1)	0,381			
Aritmetický průměr [%], (2)	0,017			
Směrodatná odchylka [%], (1)	0,034			
Směrodatná odchylka [%], (2)	0,004			
Interval spolehlivosti [%], (1)	0,042			
Interval spolehlivosti [%], (2)	0,005			

Výpočet průměrné hodnoty zbytkových popelovin:

$$\bar{x} = \frac{x_1+x_2+\dots+x_n}{n} = \frac{0,334+0,398+0,379+0,414}{4} = 0,381 \text{ [%]}, \quad (4.6)$$

kde: \bar{x} - aritmetický průměr hodnot [%],
 x - hodnota [%],
 n - počet vzorků [-].

Výpočet směrodatné odchylky hodnot:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}} = 0,034, \quad (4.7)$$

kde: σ - směrodatná odchylka [%].

Určení intervalu spolehlivosti pro střední hodnotu \bar{x} :

$$\left\langle \bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2};n}; \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n-1}} \cdot t_{1-\frac{\alpha}{2};n} \right\rangle, \quad (4.8)$$

kde: $t_{1-\frac{\alpha}{2};n}$ - kvantil studentova rozdělení $tp = 2,132$ ($k=4$, 95% spolehlivost).

Z naměřených a vypočtených hodnot v tab. 5 vyplývá, že při prvotním vytavování na teplotu 650 °C po dobu 20 minut bylo průměrné množství zbytkových popelovin $0,381 \pm 0,042$ %. Při dalším ohřívání těchto vzorků na žíhací teplotu 1000 °C, kde kalíšky se vzorky setrvávají po dobu další 20 minut, zbytkové množství popelovin kleslo na průměrnou hodnotu $0,017 \pm 0,005$ %. Množství zbytkových popelovin v kalíškách viz obr. 40.

Výrobce materiálu doporučuje po vyžhání skořepiny zbytkové popeloviny vypláchnout vodou. Množství zbytkových popelovin udaných v technickém listu materiálu je 0,003 %. Pro tak nízké množství zbytkových popelovin by se mělo během žhání dosáhnout teplot 1100 až 1200 °C a žíhat po dobu 40-60 minut. Naměřené a dopočítané průměrné hodnoty popelovin jsou vyšší, protože nebylo dosaženo tak vysokých teplot a doby, po kterou by vzorky byly v peci. Měření bylo účelně upraveno pro potřeby a možnosti školní laboratoře.



Obr. 40 Kalíšek se zbytkovými popelovinami po vytavení je vlevo (650 °C/20 min), po vyžhání vpravo (1000 °C/20 min).

5 VYTAVOVÁNÍ MODELU Z KERAMICKÉ SKOŘEPINY

Vytavování keramických skořepin je nedílnou součástí výroby keramické skořepiny. Vytavování by mělo být prováděno nejdříve po 24 hodinách od obalení posledního obalu skořepiny. Během vytavování může docházet k porušení celistvosti skořepiny. Vlivem vyšší tepelné roztažnosti modelu uvnitř skořepiny, která má tepelnou roztažnost nižší a je vyvíjen na povrch skořepiny tlak. Což může být způsobeno i nevhodnou technologií výroby modelu, skořepiny nebo způsobu vytavování modelu ze skořepiny. Řešením u modelů vyrobených z vosků je přehřátí skořepiny a vrstvičky na povrchu modelu, který se stihne odtavit a vytvoří dilatační spáru. Tato dilatační spára je na rozhraní méně dilatující skořepiny a více dilatujícího voskového modelu, viz obr. 41.

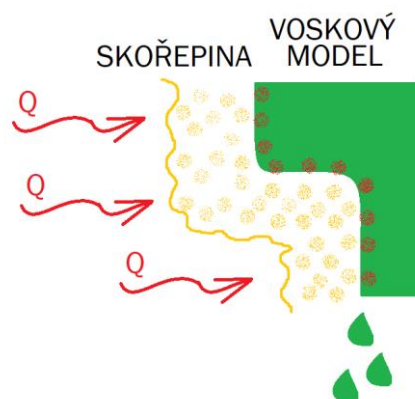
Vytavený vosk ze skořepin se sbírá do sběrné nádrže, odkud je dále filtrován nebo regenerován. Regenerovaný vosk se používá spíše pro vtokové soustavy. Na modely je nevhodný, protože jeho parametry neodpovídají vosku panenskému. Další možností je zaslat posbíraný vosk výrobci, který je schopen vosk rekonstituovat, jeho vlastnosti budou odpovídat parametrům panenského vosku.

Názvosloví používané při procesu odstraňování modelu z dutiny skořepiny a formy:

Spalitelným modelem se rozumí například modely z různých druhů plastů, které jsou odstraněny z dutiny skořepiny. Slitina kovu je lita do prázdné keramické skořepiny. Jsou to materiály, které se během procesu vytavování dostávají na teploty takové, že dojde i k jejich hoření. Jde tedy o kombinovaný proces vytavování a spalování modelové hmoty.

Vytavitelným modelem se rozumí například voskový model, který je odstraněn již před litím. Slitina kovu je lita do prázdné keramické skořepiny. Voskový model je z dutiny skořepiny pomalu vytavován a odtéká do sběrné nádrže.

Vypařitelným modelem se rozumí například polystyrenový nebo plastový model, který se z dutiny před samotným litím neodstraňuje. Slitina kovu je lita do plné formy a model se odpařuje těsně před proudem tekutého kovu. [2]



Obr. 41 Princip odtavení dilatační spáry na rozhraní keramické skořepiny a voskového modelu. [15]

5.1 Způsoby vytavování keramických skořepin za nízkých teplot

Vytavováním vosku ve vroucí vodě, nedochází k jeho degradaci. Doba vytavování je otázkou velikosti a složitosti modelu. Jedná se o jednu z méně účinných metod vytavování.

Vytavování skořepin za použití mikrovlnného pole. Navlhčená skořepina se vloží do mikrovlnného pole, kterým je ohřívána. Od stěn navlhčené skořepiny se ohřívá vosk, který vytvoří dilatační spáru a pomalu se odtavuje.

Vytavování keramických skořepin v autoklávu. Skořepiny jsou umístovány do tlakové nádoby s přehřátou párou. Přehřátá sytá pára modelu rychle a výborně předává teplo, a tím je tak velmi účinně odtavován. (Provozní tlaky autoklávu $p = 0,3 - 0,6$ MPa, teploty $T = 135 - 165$ °C) Odtavovaný vosk se sbírá a není tepelně degradovaný. Vytavování je poměrně účinné a rychlé.

Vytavování keramických skořepin v bojlerklávu. Jedná se o vylepšenou metodu autoklávu s vyvíječem páry. (Provozní tlak 0,9 MPa, teplota $T = 180$ °C) Vyšší teplota a tlak zvyšuje efektivitu vytavování vosku. [2]

5.2 Způsoby vytavování keramických skořepin za vysokých teplot

Způsob vytavování za vysokých teplot (šokově) se nazývá FlashFire. Metoda měla z počátku vývoje jeden zásadní problém, značný vývin plynů během procesu vytavování a spalování vosku z dutiny keramické skořepiny. Tento problém je v současnosti řešen dospalovací komorou, která vyvinuté plyny spálí. Dospalovací komora ve školní slévárně limituje teplotu vytavování na 650 °C, jinak by mohlo dojít k jejímu poškození. Během vytavování vznikají zbytkové popeloviny, které téměř vyhoří při náběhu na žíhací teploty skořepin.

V běžné praxi jsou používány vozíky, na které se navěsí nevytavené keramické skořepiny, se kterými tyto vozíky projíždějí komorou pece. Vysoká teplota nad 750 °C zabezpečuje průchodem tepla skrz skořepinu odtavení svrchní vrstvičky vosku, který vytvoří dilatační spáru, dle obr. 41. Tato dilatační spára je výhodná z hlediska vytvoření dostatečného prostoru pro tepelnou expanzi voskového modelu, tedy snižuje šanci k praskání keramických skořepin. Vytavovaný vosk bývá odváděn ven z pece do sběrné nádrže. Proces vytavování trvá obvykle 10 minut, dalších 10 minut je doba dostatečná pro vyhoření zbytků vosku ze skořepiny. Dále se může pokračovat na teploty odpovídající teplotám žíhacím (900 až 1400 °C). Jednofázové vytavování a žíhání skořepiny v jednom kroku. Další variantou je, že vozíčky po vytavení se skořepinami vyjedou z pece a skořepiny se proplachují od zbytkových popelovin. Zbytková voda ve skořepině po proplachu se odstraní při keramizačním žíhání skořepiny. Jde tedy o dvoufázový proces, kdy se model ze skořepiny vytaví nebo spálí. Po vychladnutí následuje kontrola skořepiny a pokud je neporušena, tak se skořepina žíhá. Dvoufázový proces je ekonomicky náročnější, musí se dvakrát skořepina ohřívat, ale je zde možnost kontroly skořepiny před litím. [16]

Výhody metody FlashFire:

- Vytavení a spálení modelu v jednom kroku.
- Při použití automatizovaného vozíčkového vytavování mají všechny skořepiny shodné parametry.
- Až 80-90 % vosku lze získat bez zbytkové vlhkosti.
- Nízká údržba zařízení.
- Dodržování ekologických kritérií.
- Při použití automatizovaného vytavování se zvyšuje bezpečnost práce.
- Snížení nákladů na opětovné vyhřívání pece na žíhací teploty.
- Není třeba autoklávu.
- Vytavený vosk lze opět použít, ale spíše na vtokové soustavy.
- S výhodou se používá pro RP metody 3D tištěných modelů.

Nevýhody metody FlashFire:

- Vývin plynů, které musí být efektivně dospáleny.
- Znehodnocení a odpaření 10-20 % vosku. [16]

5.3 Vytavování keramických skořepin ve školní slévárně

Ve školní slévárně je možné vytavovat skořepiny metodou FlashFire v odporové žíhací peci, která je limitována maximální teplotou spalin 650 °C, putujících do dospelovací komory. Skořepiny se po 20-ti minutách vytavování z pece vyndávají. V peci je umístěn sběrný rošt na zbytky vosku a vytavovaných plastů, z kterých jsou modely vyrobeny.

Skořepiny vyndané z pece se prohlíží, případně lepí a připravují na žíhací proces. Kdy se z pece musí vyndat rošt pro sběr vosku a zbytků plastu, poté je možné žíhat.

5.4 Praskavost keramických skořepin při vytavování 3D tištěných modelů popsaná v odborné literatuře

Jedním z důvodů praskavosti je již zmiňovaný jiný koeficient tepelné roztažnosti použitých materiálů pro model a pro keramickou skořepinu. Pokud má model vyšší koeficient termické expanze než materiál skořepiny, dojde k jejímu porušení, vlivem působícího napětí na skořepinu. V práci „An approach to eliminate shell cracking problem in fused deposition modeling pattern based investment casting process“ [17] autoři popisují dosavadní poznatky z této problematiky:

Harun a kolektiv: Zjistil, že modely z materiálu ABS bez výplně dosahují lepších výsledků než modely s plnou výplní. Zohledněno vůči praskavosti skořepin a množství zbytkových popelovin při vytavování během teplot 300-500 °C.

Dle svého názoru a dosavadních zkušeností z pokusů se zvýšeným množstvím popelovin u plných modelů rozhodně souhlasím. Naopak s vyšší praskavostí máme zkušenost u modelů bez výplně, kdy dochází k teplotní expanzi vzduchu uvnitř dutiny. Tepelná expanze vzduchu má na model bez výplně největší vliv. Model se snáze deformuje, protože nemá žádné zpevňující příčky. Dle předpokladu má vnitřní výplň funkci zpevňující armatury.

Chen a kolektiv: Uvádí, že při teplotách mezi 200-250 °C během procesu vytavování syrová pevnost skořepiny rapidně klesá. Použití vysokoteplotních polymerů lze tuto pevnost zvýšit, a tedy snížit šance na její prasknutí.

Ve školní slévárně se běžně používají nylonová vlákna jako zesilující prvky v sekundární keramické suspenzi. Přinášejí pozitivní vlastnosti z hlediska pevnosti skořepin. Oproti skořepinám bez vláken, je možné použít nižšího počtu obalů při stejné pevnosti keramické skořepiny.

Sivadasan a kolektiv: Ve své práci uvádí, že velikost termické expanze FDM tištěných modelů je závislá na tvaru vnitřní výplně modelu.

Tvrzení je jistě pravda, avšak v této práci je uvažován pouze jeden typ výplně, Gyroid který propojuje celkový objem dutiny modelu. Dále je nutné uvažovat i množství vnitřní výplně modelu.

Marwah a kolektiv: Uvádí konkrétní poznatek, že vnitřní struktura modelu se čtvercovým tvarem má až o 40 % vyšší napětí na obal skořepiny než model bez výplně.

Yao a Leu: Se také zabývali ve své práci problematikou praskavosti skořepin vlivem množství a tvaru vnitřní výplně modelu. Došli k zjištění, že při použití čtvercové výplně dochází během

procesu vytavování vyboulení stran vnitřní struktury pryskyřicového modelu. Vnitřní výplň modelu začíná měknout a bortit (obr. 15 a 16) se při nízkých teplotách, je tedy eliminována šance k porušení skořepiny.

Zde je možné vidět určitý rozpor s teoriemi prací Marwaha s kolektivem a Yao s Leu.

Kumar a kolektiv: Navrhli aplikovat slabou vrstvičku vosku na FDM tištěném modelu. Tato vrstvička vosku snižuje šanci k prasknutí skořepiny během vytavování modelu ze skořepiny.

Vrstvička by měla být z nízkoteplotního vosku, aby došlo k jeho rychlému odtavení. Vytavený vosk by následně vytvořil dostatečnou dilatační spáru pro expandující model.

Bansode a kolektiv: Navrhli zvýšení koncentrace křemíku v pojivu a počtu zesilovacích vrstev skořepiny. Dále přidání zesilovacích vysokoteplotních polymerních vláken do keramické suspenze. [17]

5.5 Problematika termické expanze ideálního plynu uvnitř dutiny modelu

Gay-Lussacův zákon, vztah (5.1)

Izobarický děj je termodynamický děj, při kterém se nemění tlak zkoumané soustavy ($\Delta p = 0$), zajímá nás, kolikrát se zvětší objem plynu uvnitř dutiny modelu. Z hlediska změn teplot z pokojové teploty ($20\text{ }^\circ\text{C}$) na teplotu počátku rozkladu a poklesu hmotnosti materiálu Polymaker PolyCast (cca $300\text{ }^\circ\text{C} = 573,15\text{ K}$).

$$\Delta p = 0, p = \textit{konst},$$

$$\frac{V}{T} = \textit{konst.}, \quad (5.1)$$

kde: p - tlak [Pa],
 V - objem [m^3],
 T - termodynamická teplota [K].

$$T_{20} = 293,15\text{ K}$$

$$T_{300} = 573,15\text{ K}$$

$$\frac{V_2}{T_{300}} = \frac{V_1}{T_{20}}$$

$$V_2 = \frac{V_1}{T_{20}} \cdot T_{300} = V_1 \cdot \frac{T_{300}}{T_{20}} = V_1 \cdot \frac{573,15}{293,15} = V_1 \cdot 1,955$$

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 1,955 \cdot V_1 - V_1 = 0,955$$

Při změně teploty ideálního plynu z $20\text{ }^\circ\text{C}$ na $300\text{ }^\circ\text{C}$ vzroste objem plynu v dutině o 95,5 %.

Charlesův zákon, vztah (5.2)

Izochorický děj je termodynamický děj, při kterém se nemění objem zkoumané soustavy ($\Delta V = 0$), zajímá nás, kolikrát se zvětší tlak plynu uvnitř dutiny modelu. Z hlediska změn teplot z pokojové teploty na teplotu počátku rozkladu a poklesu hmotnosti materiálu Polymaker PolyCast.

$$\Delta V = 0, V = \textit{konst},$$

$$\frac{p}{T} = \textit{konst.}, \quad (5.2)$$

$$\frac{p_2}{T_{300}} = \frac{p_1}{T_{20}}$$

$$p_2 = \frac{p_1}{T_{20}} \cdot T_{300} = p_1 \cdot \frac{T_{300}}{T_{20}} = p_1 \cdot \frac{573,15}{293,15} = p_1 \cdot 1,955$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 1,955 \cdot p_1 - p_1 = 0,955$$

Při změně teploty ideálního plynu z 20 °C na 300 °C vzroste tlak plynu uvnitř dutiny o 95,5 %. Uvažujeme-li atmosférický tlak:

$$p_1 = 101\,325 \text{ [Pa]}$$

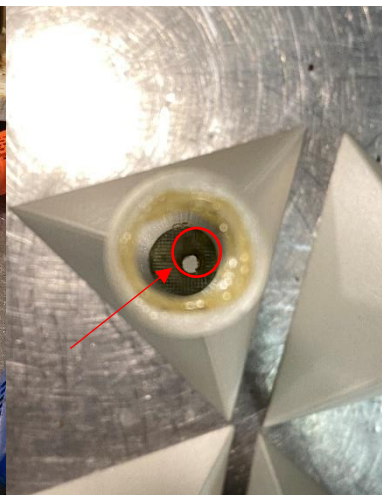
$$p_2 = p_1 \cdot 1,955 = 101\,325 \cdot 1,955 = 198\,000 \text{ [Pa]}$$

5.6 Experimentální vytavování odvzdušněných modelů s 0 % výplní

Experimenty byly zaměřeny na modely s otevřenou vnitřní atmosférou. Vnitřní dutina modelu je propojena během procesu vytavování s pecní atmosférou, aby byla odvzdušněna, viz obr. 43. Pokusný model s 0 % výplní byl volen, aby byla podpořena tendence ke zvýšení pravděpodobnosti prasknutí skořepiny, dle již provedených pokusů.

Vytištěné modely se očistily a lepily k sobě, pyramidy s 0 % výplní a duté válečky za pomoci rozehřátého vosku, viz obr. 42. Následně se do válečku a komolé strany pyramidy udělaly díry rozžhaveným drátem, obr. 43. Dále následoval proces ručního obalování všech 4 pokusných vzorků standardním postupem.

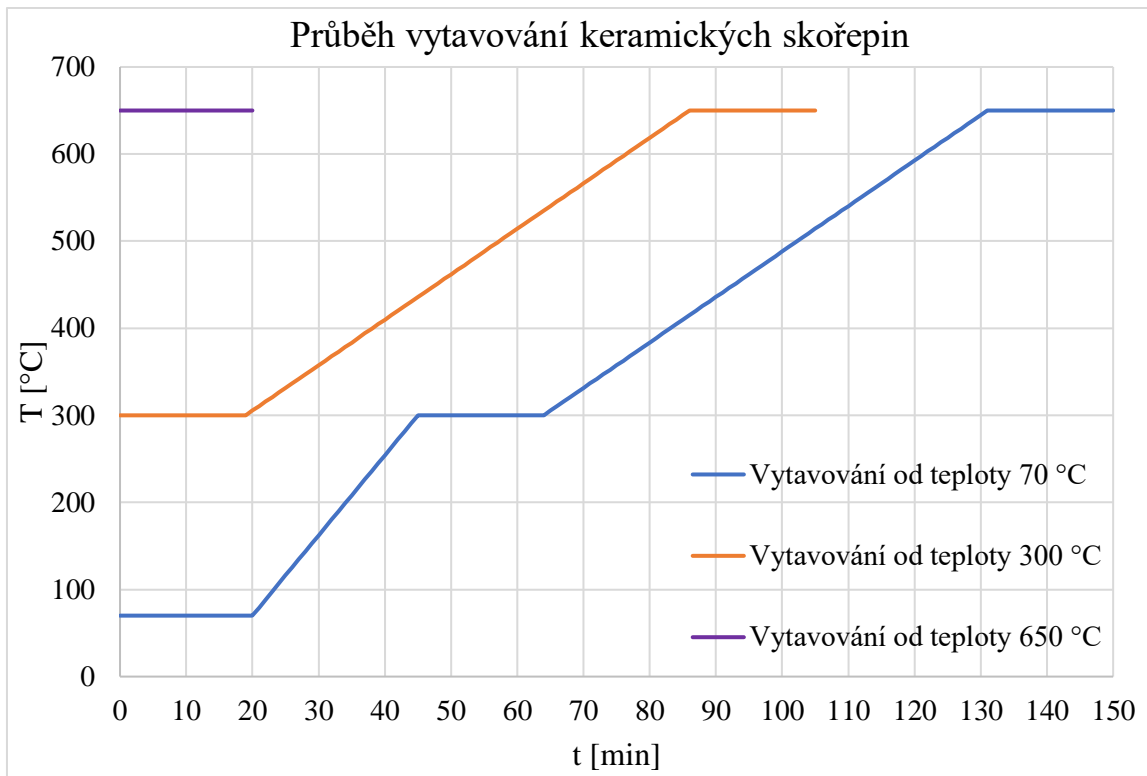
Vytavování bylo provedeno v párech, teplotní a časový průběh dle obr. 45. První dva vzorky se vytavovaly od teploty 70 °C, kde se setrvalo 20 minut na této teplotě. V dalším kroku se nastavila teplota na 300 °C, po vyhřátí pece na tuto teplotu se zapnula dospalovací komora a přidal zbylý pár vzorků. Na teplotě 300 °C se setrvalo znovu 20 minut a dále se nastavila teplota na 650 °C. Po 20-ti minutách vytavování na teplotě 650 °C se vytavené skořepiny vyndaly z pece a kontrolovala se jejich celistvost. Ani jeden ze vzorků nejevil žádné praskliny, obr. 44.



Obr. 42 Lepení modelů.

Obr. 43 Zavzdušněný model.

Obr. 44 Neporušené skořepiny.



Obr. 45 Graf průběhu vytavování keramických skořepin.

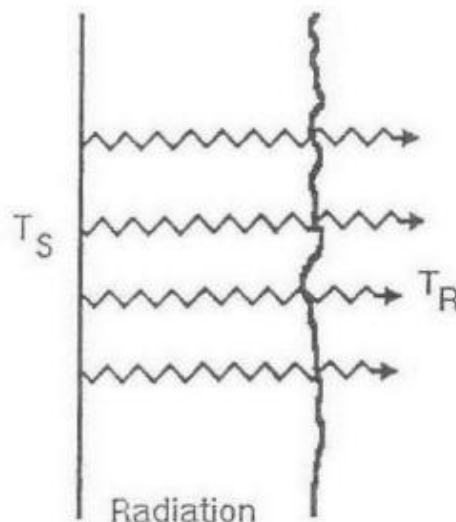
6 TEORIE PŘENOSU TEPLA V KERAMICKÉ SKOŘEPINĚ

Záření, proudění a vedení tepla jsou procesy přenosu tepla, které doprovází skořepinu během vytavování, žhání, lití kovu a ochlazování.

Přenos tepla zářením je ovlivněn teplotou zdroje, kterým je pecní atmosféra nebo slitina uvnitř skořepiny. Dále teplotou přijímače (obvykle okolní vzduch) a vlastnosti ovlivňující popisované záření, například z odlitku. Tepelné ztráty způsobené zářením popisuje vztah, dle článku „Thermal conductivity and heat transfer measurement for ceramic shell molds“ [18]:

$$q_r = K_r \cdot (T_S^4 - T_R^4) \cdot F_e \cdot F_a, \quad (6.1)$$

kde: q_r	-	tepelný tok způsobený zářením (radiation heat flux) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$],
K_r	-	koeficient záření (radiation coefficient) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
T_S	-	absolutní teplota zdroje (absolute temperature of source) [K],
T_R	-	absolutní teplota přijímače (absolute temperature of receiver) [K],
F_e	-	faktor emisivity (emissivity factor) [-],
F_a	-	faktor uspořádání (arrangement factor) [-].



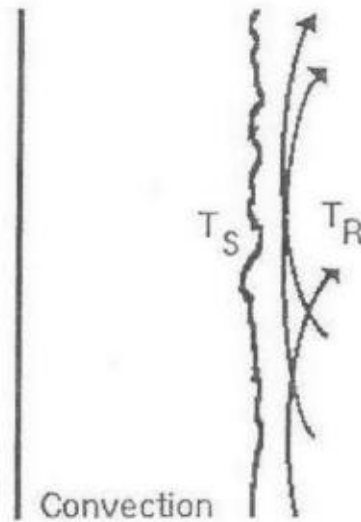
Obr. 46 Přenos tepla zářením. [18]

Faktor emisivity F_e a uspořádání F_a nabývá hodnoty 1 pro ideální „černé povrchy“ radiačního přenosu. Dále je možné uvažovat materiály, které jsou průhledné a neprůhledné pro záření. Radiace by procházela průhledným materiálem bez jakýchkoliv změn, faktory emisivity a uspořádání by byly dány vlastnostmi slitiny. Neprůhledné materiály blokují přenos energie tepelného záření. Keramické skořepiny z hlediska přenosu tepla zářením nejsou průhledné, ale ani neprůhledné.

Přenos tepla prouděním je závislý na struktuře povrchu vzorku, který je ohříván. Dále závisí na typu, rychlosti a druhu proudění ohřívávaného média (typicky vzduch). Tyto parametry jsou obsaženy v koeficientu tepelné konvekce h_c , aby došlo k celkovému zjednodušení výpočtu tepelných ztrát způsobených prouděním:

$$q_c = h_c \cdot (T_S - T_R), \quad (6.2)$$

- kde: q_c - tepelný tok způsobený prouděním (convection heat flux) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 h_c - koeficient tepelné konvekce (convection coefficient) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

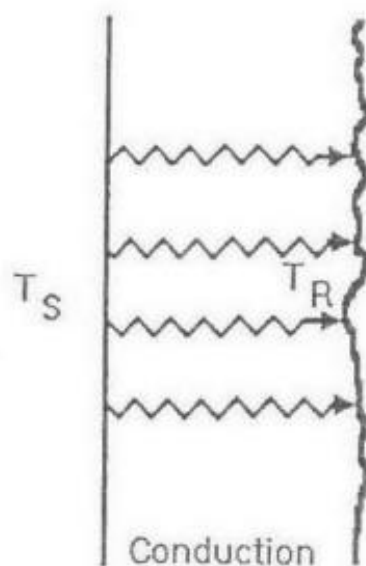


Obr. 47 Přenos tepla prouděním. [18]

Přenos tepla vedením je nejběžnějším typem vedení tepla. Tepelné ztráty způsobené vedením lze spočítat ze vztahu:

$$q_k = k/d \cdot (T_S - T_R), \quad (6.3)$$

- kde: q_k - tepelný tok způsobený vedením (conductive heat flux) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 k - koeficient tepelné vodivosti (thermal conductivity) [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],
 d - délka vedení tepelného toku (heat flow path length) [m].



Obr. 48 Přenos tepla vedením. [18]

Uvažujeme-li kompozitní materiály na bázi keramických skořepin, je nutné provést výpočet efektivní tepelné vodivosti dle vztahu pro neporézní zrnité kompozity k_e [18]:

$$k_e = \frac{k_c[1+2v_d(1-\frac{k_c}{k_d})/(2\frac{k_c}{k_d}+1)]}{1-v_d(1-\frac{k_c}{k_d})/(\frac{k_c}{k_d}+1)}, \quad (6.4)$$

- kde: k_e - efektivní tepelná vodivost (effective thermal conductivity) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 k_c - tep. vod. spojitě fáze (thermal cond. of continuous phase) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 k_d - tep. vod. disperzní fáze (thermal cond. of dispersed phase) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$],
 v_c - objemové procento spojitě fáze (volume fraction of continuous phase) [%].

K výpočtu efektivní tepelné vodivosti k_e pro porézní materiály je nutné uvažovat i přenos tepla zářením skrz porézní skořepinu. Předpokládané hodnoty tepelné vodivosti jsou závislé na parametrech čistých materiálů, avšak pro predikci s ohledem na pórovitost skořepin nejsou doporučeny. V běžné praxi se výhradně tyto parametry zjišťují měřením.

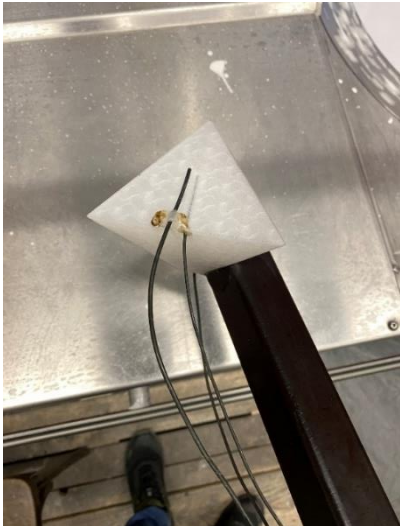
Celkový tepelný tok skrz skořepinu je ovlivňován vlastnostmi přenosu tepla obaly skořepiny. Prodyšnost obaly skořepiny ovlivňuje propustnost plynů. [18; 19]

6.1 Příprava experimentálního měření teplot během vytavování modelu ze skořepiny

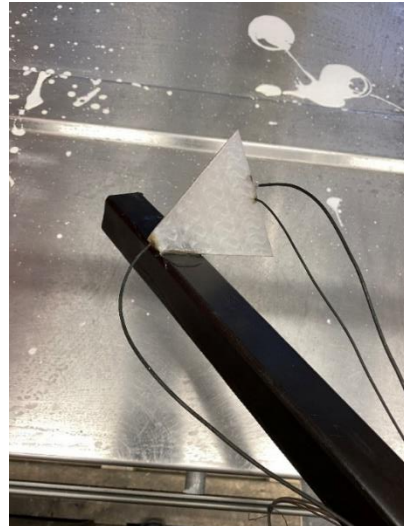
Pro měření teplot v okolí modelu a skořepiny se použil upravený model pyramidy, jako pro zkoušky předchozí, nalepený na voskový vtokový kůl. Trojhranná pyramida s délkou hrany 100 mm byla navržena tak, aby bylo možné implementovat jeden termočlánek do středu modelu (obr. 50) a další těsně pod poslední vnější vrstvy tištěného modelu (obr. 49). Třetí termočlánek se přilepil tavnou pistolí na pyramidu z vnější strany, aby reprezentoval teplotu v rozhraní modelu a skořepiny (obr. 49). Čtvrtý termočlánek se zaobaloval mezi obaly skořepiny, (obr. 52) a poslední pátý se přichytil ke skořepině drátem, aby měřil referenční teplotu v peci okolo vytavované skořepiny. Žíhací pec byla nastavena na teplotu 650 °C po dobu celého měření. V peci panuje určitá nehomogenita teploty a též je výrazně ovlivňována spínáním dospelovací komory. Proto bylo nutné zahrnout referenční termočlánek do měření.

Všechny obaly skořepiny byly obalovány ručně. Množství obalů bylo voleno celkově 8, aby výsledky byly reprezentativní pro běžné množství obalů skořepin, které se ve školní slévárně používají. Po každém obalu se model nechal dvě hodiny sušit před zapnutým větrákem.

Po posledním obalu a jeho důkladném vysušení se připevnil pátý termočlánek. Následovala zkouška celé sestavy ve studené peci (obr. 55), aby se předešlo jakékoliv kolizi během experimentálního měření. Vodiče termočláneků byly svedeny do rohu pecních vrat.



Obr. 49 Termočlánek nad a ve stěně modelu.



Obr. 50 Zleva vede termočlánek doprostřed modelu.



Obr. 51 Primární, zirkonový obal.



Obr. 52 Termočlánek bude zaobalován uprostřed skořepiny.



Obr. 53 Detail prvního obalu na čtvrtém termočláncu.



Obr. 54 Sušení kompletně obalené skořepiny.

6.1.1 Princip funkce termočlánků

Termočlánek má vodiče ze dvou různých materiálů, které jsou na konci k sobě na jednom konci svařené. Ohříváním tohoto svařeného konce se na druhém konci vodičů vytvoří malé termoelektrické napětí. Termoelektrické napětí v řádu [mV] vzniká rozdílem teplot na teplém a studeném konci vodičů. Vodiče termočlánků se připojují na AD převodník, který převádí analogový signál na digitální. Výstupní digitální signál z AD převodníku zpracovává vhodný počítačový program, pro to určený. [20]

6.2 Experimentální měření teplot během vytavování modelu ze skořepiny

Pro měření se zapojily vodiče termočlánků do AD převodníku (obr. 56) a ten se propojil s notebookem, kde byl spuštěn program pro záznam teplot z termočlánků. Do vyhřáté pece na 650 °C se vložila skořepina s termočlánekem na dobu 30 minut. Měření bylo zaznamenáno do textového souboru.



Obr. 55 Zkouška skořepiny ve studené peci.

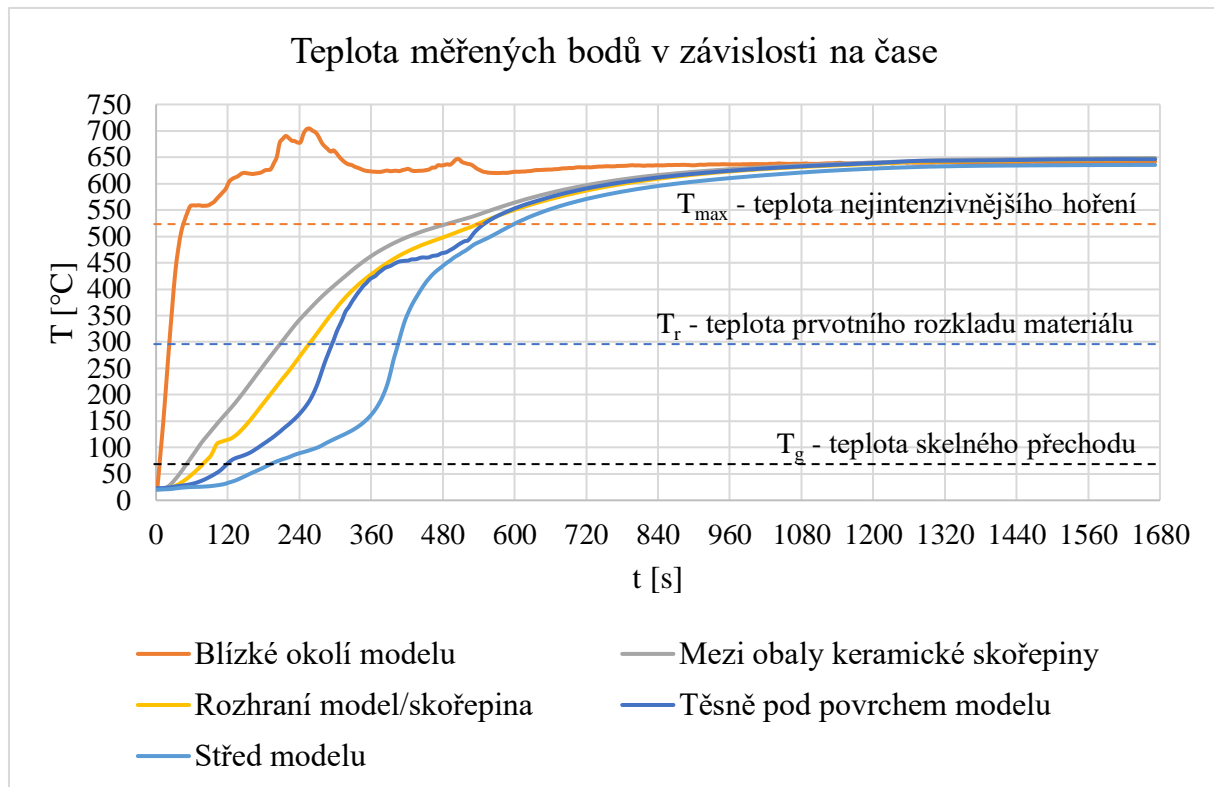


Obr. 56 Zapojené vodiče termočlánků do sběrnice AD převodníku.



Obr. 57 Sestava během experimentu.

Naměřená data:



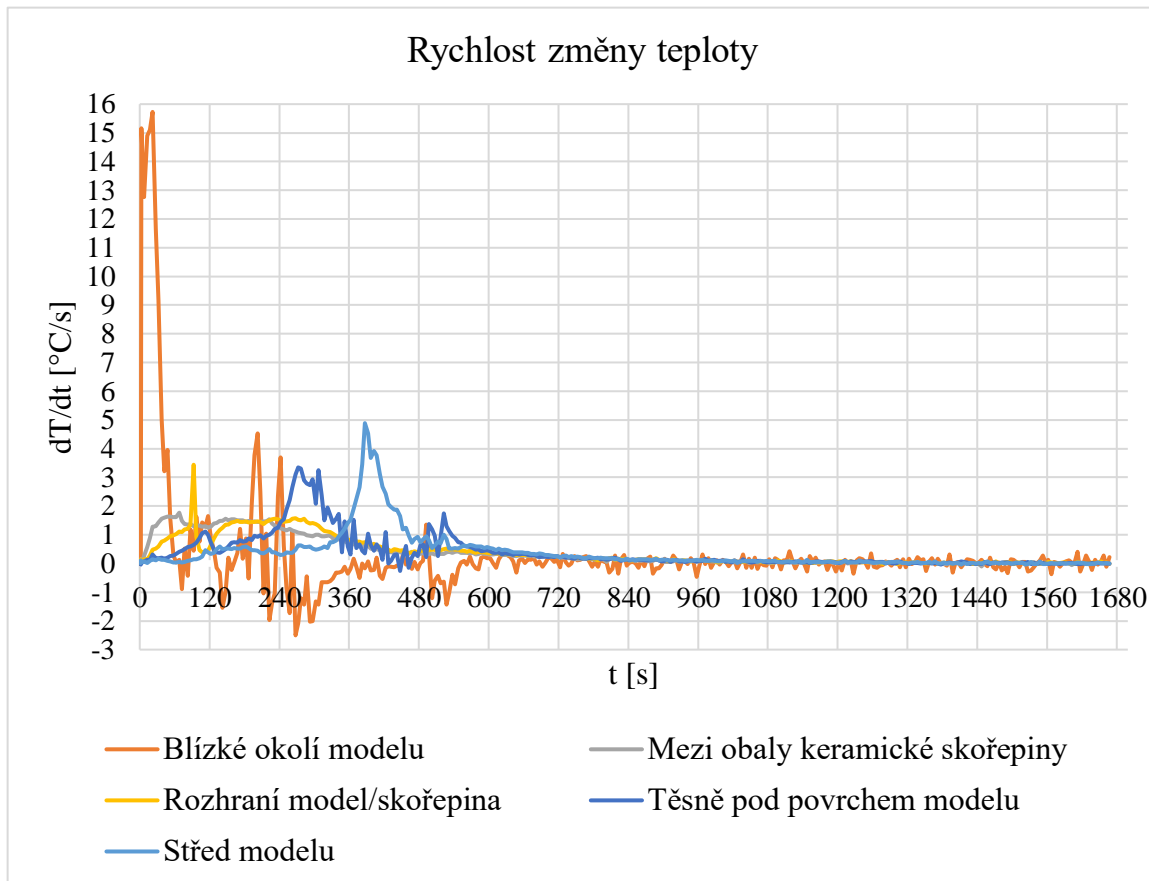
Obr. 58 Graf naměřených hodnot z termočlánků. (V příloze číslo 3 ve větším formátu)

Interpretace naměřených dat:

- Při 70 °C na křivce teploty těsně pod povrchem modelu je z grafu zřejmá drobná špička, korespondující s teplotou skelného přechodu T_g materiálu.
- 200-400 °C dosahují měřené body nejvyšší progresivity růstu teploty. Lze rozpoznat i určitou rozdílnost v jejich progresivitě. Ve skořepině je nárůst teplot pozvolnější, oproti materiálu modelu.
- Teplota v blízkém okolí modelu nevykazuje výrazné změny v růstu teploty, od počátku vložení sestavy do pece až po teplotu 550 °C. Při této teplotě je z grafu zřejmý fakt sepnutí dospalovací komory, která odebere část horkého vzduchu z pece a tím se pecní atmosféra ochladí.
- Prvního výrazného vzrůstu teploty nad 650 °C na křivce v blízkosti modelu je zapříčiněno ohříváním vnějšího termočlánku vlivem vyvinutých plynů při hoření směsi vosku a materiálu modelu.
- V okolí osmé minuty experimentu je zřejmé z křivek teplot v těsné blízkosti povrchu vytavovaného modelu kolísání rychlosti růstu teploty. Z DSC analýzy bylo indikováno rozmezí teplot 475 – 505 °C, jako interval nejintenzivnější chemické degradace (hoření).
- Vlivem hoření materiálu modelu a vývinem plynů při hoření je výrazně ohříván termočlánek v blízkosti skořepiny, z grafu je zřejmá teplotní špička při 650 °C (cca osmá minuta měření).

6.3 Vyhodnocení teplotních spádů

Dopočítané hodnoty difference naměřených dat jsou zaznamenány do grafu:



Obr. 59 Graf rychlosti ohřevu měřených bodů v závislosti na čase.

Interpretace naměřených dat:

- Změna teploty v čase (dT/dt) je označována jako teplotní spád.
- V čase 107 sekundy je zřetelná špička teplotního spádů na křivce dat z oblasti těsně pod povrchem modelu. Špička odpovídá teplotě skelného přechodu materiálu T_g .
- V rozmezí 202 - 242 sekundy měření jsou jasné další dvě špičky tepelných spádů. Jsou způsobeny ohřevem termočláňku na vnějším obalu skořepiny proudícími plyny, které jsou dle předpokladů uvolňovány při spalování směsi odtaveného vosku a materiálu modelu.
- V cca 300 sekundě se materiál modelu dostává na teplotu počátku nestability tepelného efektu.
- V 501 sekundě měření je zřejmá drobná špička na křivce tepelného spádu z termočláňku přidělaného ke skořepině. Předpokladem ohřevu termočláňku je proudění plynných produktů z nejintenzivnější reakce hoření materiálu modelu.
- V 522 sekundě měření těsně blízkosti povrchu modelu je výrazná poslední špička teplotního spádu, způsobená nejvyšší teplotou hoření materiálu modelu.

7 ŽÍHÁNÍ KERAMICKÝCH SKOŘEPIN

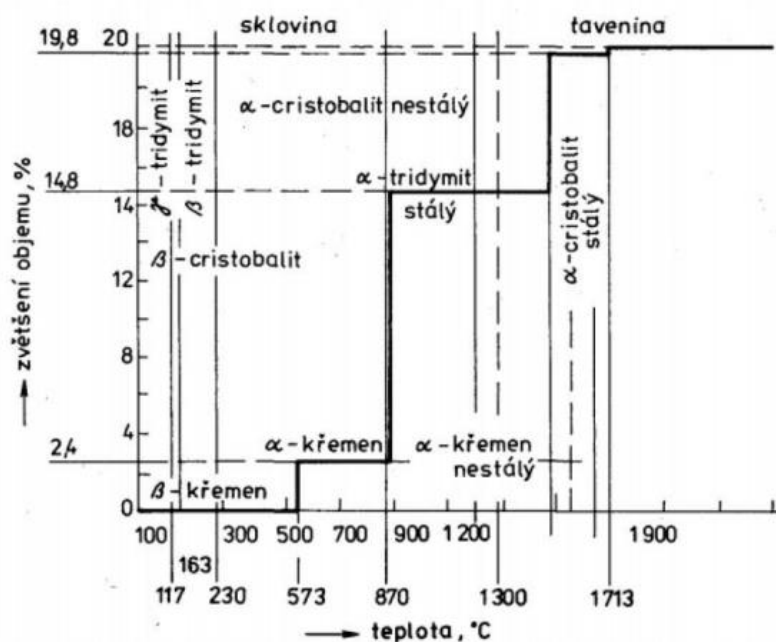
Po vytavení a spálení modelu ze skořepiny následuje proces žíhání skořepiny. Žíhání je proces keramizace, při kterém se jednotlivé obaly keramické suspenze se žáruvzdorným materiálem slinují. Dále se odstraní zbytkové nečistoty a těkavé látky uvnitř skořepiny, vlivem působení vysoké teploty. Dochází k přeměně amorfních vazných vrstev SiO_2 na strukturu krystalickou, to způsobuje nárůst zpevnění skořepiny.

Rozsah teplot používaných během žíhání bývá pro materiály SiO_2 900 – 1000 °C, pro materiály na bázi aluminosilikátových žáruvzdorných posypů na teploty vyšší 1200 – 1400 °C.

Teplota žíhání může být i nižší, uvedené teploty jsou pro dosažení maximálních pevností keramických skořepin. Například pro lití slitin na bázi hliníku není nutné dosáhnout takových pevností skořepin (nejsou dokončeny všechny slinovací reakce), jako pro lití odlitků z oceli. [2]

7.1 Žíhání keramických skořepin na bázi SiO_2

Keramické skořepiny na bázi SiO_2 se žíhají na teploty 900 – 1000 °C. Při náběhu teploty pecní atmosféry na takto vysoké teploty je zásadní počítat i s fázovými přeměnami křemene, obr. 60. Během žíhání β -křemene (hexagonální mřížka) prochází fázovou přeměnou při teplotě 573 °C a mění se jeho krystalická mřížka na α -křemen (trigonální). Je tedy nutné v okolí této teploty skořepinu pomaleji a rovnoměrněji ohřívat. Změna krystalické mřížky je spojena s objemovou expanzí 2,4 %. Vytavování a žíhání nesmí být šokové, zpravidla se skořepiny vkládají při nižší teplotě do pece, mezi 300-400 °C. K této změně v krystalické mřížce dochází i při chladnutí skořepiny po vyžíhání. Proto se slitiny kovů odlévají do vyhřátých skořepin na teploty okolo 700-800 °C. Změnou seskupení krystalické mřížky dochází k šokové expanzi nebo smrštění jednotlivých vrstev skořepiny a výraznému zvýšení pnutí ve skořepině. Pnutí iniciuje tvorbu trhlin, delaminaci jednotlivých vrstev a porušení celistvosti skořepiny. [11; 21]



Obr. 60 Fázové přeměny křemene. [21]

7.2 Žihání keramických skořepin na bázi aluminosilikátů

Aluminosilikáty jsou ostrůva na bázi oxidu hlinitého (Al_2O_3) a oxidu křemičitého (SiO_2), které jsou mezi sebou kombinovány, aby se dosáhlo požadovaného složení. Aluminosilikáty se získávají těžbou jílu, kaolinu a bauxitu.

Molochit se vyrábí kalcinací kaolinu. Proces spočívá v žihání na teplotě cca 1500 °C, na které se setrvá po dobu alespoň 24 hodin. Čímž je zajištěna stabilita, jednotnost a konzistence produktu. Kalcinací se převádí kaolinové minerály na směs složenou z mullitových krystalů a amorfního křemičitého skla bez krystalického křemene. Molochit má velmi nízkou tepelnou roztažnost $4,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Teplotní stabilita až 1770 °C. Molochit obsahuje okolo 42 % oxidu hlinitého.

Tavený Mullit se vyrábí procesem tavení a krystalizace Al_2O_3 . Je vyhledáván pro vysokou tepelnou stabilitu, až do teplot 1900 °C. Mullit má nízkou tepelnou roztažnost $5,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Obsahuje 72-76 % oxidu hlinitého. [22; 23; 24]

Ve školní slévárně se skořepiny na bázi aluminosilikátů žihají na teplotu 1000-1050 °C po dobu jedné hodiny, metodou FlashFire, šokově.

8 PRAKTICKÁ OPTIMALIZACE 3D TIŠTĚNÉHO MODELU

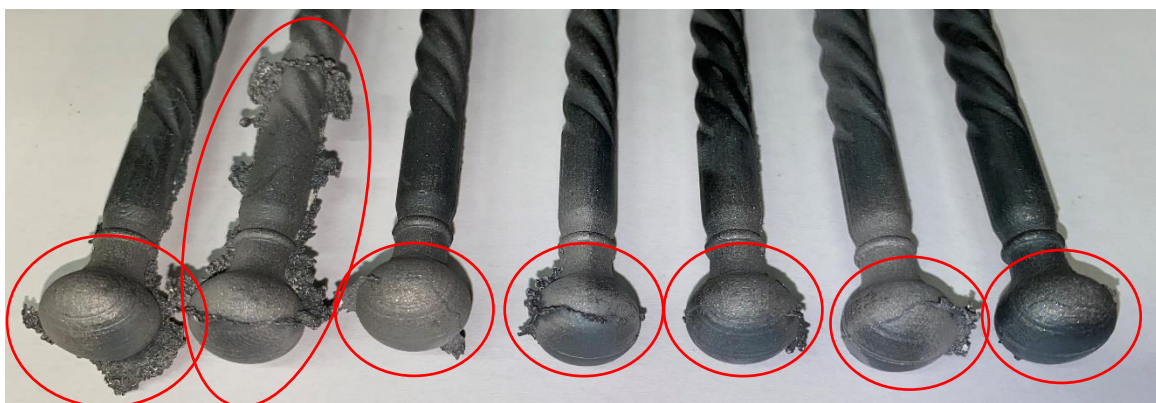
Kapitola popisuje dosavadní zkušenosti s optimalizací 3D tištěného modelu na praktickém modelu kříže meče, odlitku vyráběného metodou hybridní technologie přesného lití.

8.1 Ověření teoretických znalostí při optimalizaci modelu

Ve školní slévárně nastal problém s praskáním keramických skořepin modelu během vytavování modelu ze skořepiny. Fotografie rozpraskané skořepiny na obr. 61. Rozpraskané skořepiny bylo nutno opravovat a lepit žáruvzdorným tmelem. Místo opravy skořepiny lze s jistotou na odlitku vždy rozeznat, povrch odlitku přesně kopíruje vnitřní povrch primárního obalu. Dále oprava nemusí být 100 % a může dojít například k opětovnému porušení během lití kovu. Fotografie odlitků se zateklinami na obr. 62. Je zajímavé, že všechny skořepiny vždy praskly v místě kulovitého zakončení.



Obr. 61 Keramická skořepina s trhlinami na kulovitých koncích modelu.



Obr. 62 Zatekliny na ocelových odlitcích křížů meče vlivem použití opravených skořepin.

V prvním pokusu byl model vytištěn s 8 % výplní. Model po vytištění byl očištěn od nečistot vzniklých při tisku. Dále se standardním způsobem nalepil na vtokovou voskovou soustavu (obr. 63) a obaloval. První obal byl vytvořen zirkonovým žáruvzdorným posypem a sušen 2 hodiny. Druhý obal se žáruvzdorným posypem Mullitu, obr 64. Mullit byl volen, protože je jemnější zrnitosti než Molochit. Aby nedošlo k zaslepení úzké štěrbiny a děr v modelu hned při druhém obalu. Po namočení v sekundární suspenzi se důkladně štěrbina a otvory prohlédly, aby neobsahovaly vzduchové bubliny. Po posypu Mullitem se dala skořepina sušit na 3 hodiny, aby štěrbina dostatečně proschla. Třetí obal byl již s posypem Molochitu a tím se štěrbina zcela uzavřela. Skořepina se nechala sušit přes noc do druhého dne, aby dostatečně proschla. Zbylé 3 obaly byly provedeny standardním postupem. Namáčením v sekundární suspenzi, posyp Molochitem a sušení 2 hodiny. Hotová skořepina se 24 hodin sušila a vytavovala se při teplotě 650 °C po dobu 20 minut. Výsledkem byla prasklá skořepina, v místě kulovitěho zakončení kříže meče, viz obr. 65. Ve stejných místech jako na obr. 61.



Obr. 63 Model přilepený na voskovém vtoku, detail štěrbiny.

Obr. 64 Druhý obal s Mullitem.

Obr. 65 Prasklina v místě kulovitěho zakončení kříže meče.

Další pokusy byly provedeny na optimalizovaných modelech. Vytisklo se 6 zkušebních křížů meče s 8 % vnitřní výplní a 6 dutých trubiček o průměru 18 mm a délce 100 mm. Modely se očištěly po tisku. Před lepením kříže a dutých trubiček se do každého modelu kříže udělala rozžhaveným drátem díra, dle obr. 66. Poté se každý kříž spojil rozehřátým voskem s dutým válcem. Do každého válce nejprve byly udělány větší otvory na vnější straně a poté i v kontaktní ploše válce s modelem kříže, viz obr. 67. Tyto otvory model odvzdušnil. Po takto provedeném lepení všech 6-ti kusů, následovalo obalování. Obalování proběhlo ve shodném postupu, jako při prvním pokusu s 8 % výplní. Vytavování bylo provedeno vložením tří skořepin do pece při 300 °C, na této teplotě se setrvalo po dobu 20 minut a následoval nárůst na teplotu 650 °C. Při teplotě 650 °C se přidaly tři zbylé modely. Viz graf průběhu vytavování, obr. 45. Po 20 minutách se všechny modely vyndaly z pece ven a nechaly se zchladnout. Po vychladnutí se skořepiny zkontrolovaly. Nebyla nalezena žádná trhлина na obalu keramické skořepiny. Optimalizace se tedy zdařila, viz obr. 69 a 70.



Obr. 66 Detail zavzdušňovacího otvoru v modelu.

Obr. 67 Propichování rozžhaveným drátem.

Obr. 68 Kompletně obalené modely křížů meče.



Obr. 69 Vytavováno od 300 °C.



Obr. 70 Vytavováno od 650 °C.

8.2 Seznam použitých modifikací tištěných modelů

Tabulka 6 reprezentuje všechny vyzkoušené modifikace teoretických a praktických modelů v této práci. Průběhy teplot při vytavování je možné nalézt na obr. 45. V tabulce 6 je uvedený stav skořepiny po vytavení ve shodném pořadí, jako použitá výplň modelu.

Tab. 6 Seznam vyzkoušených modifikací a tvarů.

Tvar modelu	Výplň modelu	Vtokový kůl	Vytavování	Stav
Pyramida	0 %, 10 %, 20 %, 30 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, ✓, ✓, ✓
Pyramida	0 %, 0 %, 5 %, 8 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, ✓, ✓, ✓
Pyramida	0 %, 5 %, 8 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, ✓, ✓
Pyramida	0 % *	Ker. trubička	650 °C, 20 min	✓
Pyramida	0 %, 0 %, 0 %, 0 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, x, x, x
Pyramida	5 %, 5 %, 8 %, 8 %	Voskový	650 °C, 20 min	✓, ✓, ✓, ✓
Pyramida	0 %, 0 %, 0 %, 0 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, x, x, x
Pyramida	5 %, 5 %, 8 %, 8 %	Voskový	650 °C, 20 min	✓, ✓, ✓, ✓
Pyramida	0 %, 0 %, 5 %, 8 %	Voskový	650 °C, 20 min	x, x, ✓, ✓
Pyramida	0 % *, 0 % *	PolyCast	70 °C, 20 min + 300 °C, 20 min + 650 °C, 20 min	✓, ✓
Pyramida	0 % *, 0 % *	PolyCast	300 °C, 20 min + 650 °C, 20 min	✓, ✓
Kříž meče	8 %	Vosk	650 °C, 20 min	x
Kříž meče	0 % *, 0 % *, 0 % *	PolyCast	300 °C, 20 min + 650 °C, 20 min	✓, ✓, ✓
Kříž meče	0 % *, 0 % *, 0 % *	PolyCast	650 °C, 20 min	✓, ✓, ✓

*odvzdušněno - vnitřní dutina modelu je propojena se vzdušnou atmosférou pece

x - keramická skořepina během vytavování praskla

✓ - keramická skořepina po vytavování byla v pořádku

ZÁVĚR

Diplomová práce shrnuje dosavadní poznatky z hlediska výroby a optimalizace 3D tištěných modelů pro metodu přesného lití do keramických skořepin. Hybridní technologie přesného lití je používána ve školní slévárně VUT v Brně. Problémem u hybridní technologie je praskavost keramických skořepin během vytavování 3D tištěného modelu ze skořepiny a bylo ji nutné optimalizovat.

V práci je detailně popsána hybridní technologie přesného lití s postupem jednotlivých procesů výroby keramické skořepiny. Optimalizace byla prováděna na 3D tištěných modelech a surovinách používaných pro výrobu keramických skořepin ve školné slévárně na VUT v Brně. Vzhledem k rozsáhlosti problematiky byly na počátku provedeny zkoušky jednotlivých keramických suspenzí. Ověřilo se, že jejich parametry korespondují s doporučenými hodnotami. Pouze množství pevných částic v obou suspenzích bylo zvýšeno cca o 2 % od výrobcem doporučeného množství. Zvýšeným množstvím pevných částic v suspenzi se zvyšuje pevnost skořepiny, ale snižuje její prodyšnost.

Pro první experimenty byl navržen zkušební model ve tvaru pyramidy s hranou 100 mm. Během experimentů byl volen tisk modelů s výplní „Gyroid“ a množstvím výplně 0 %, 5 %, 8 %, 10 %, 20 % a 30 %. Materiál modelu byl volen Polymaker Polycast. Materiál byl speciálně navržen pro 3D tisk modelů určených pro hybridní metodu přesného lití.

V dalším kroku výzkumu byly provedeny zkoušky materiálu Polymaker PolyCast. Zkouška dilatometrie k porovnání materiálu pro 3D tisk a slévárenského vosku. Bylo analyzováno, že PolyCast má nižší tepelnou roztažnost než slévárenský vosk až do teploty cca 74 °C, více informací v kap. 4.2. Diferenciální skenovací kalorimetrií a termogravimetrií se provedla termická analýza materiálu PolyCast, z které byla určena teplota skelného přechodu $T_g = 70$ °C, nad teplotu 300 °C dochází v materiálu k výrazné redukci hmotnosti doprovázené nestabilitou tepelného efektu. V rozmezí teplot 450 °C až 480 °C dochází ke stagnaci hmotnosti materiálu. Hmotnost při teplotě nad 480 °C znovu klesá. Maximální teplota hoření materiálu byla stanovena na 505 °C, při druhé analýze byla naměřena dokonce teplota hoření 516 °C. Z analýzy lze vyvodit závěr, že materiál se začíná rozkládat a hořet od teploty 300 °C s maximem v cca 516 °C. Z analýzy Gram Schmidt byla vyhodnocena maximální produkce plynů vlivem hoření materiálu při teplotě 420 °C. Naměřené hodnoty z DSC a TG jsou zaznamenány v grafech viz kapitola 4.4 i s vlastním komentářem analyzovaných dat. Při termické analýze bylo určeno i množství zbytkových popelovin, po žhání vzorku materiálu na 700 °C bylo naměřeno 0,87 %. Měření zbytkových popelovin bylo provedeno i ve školní laboratoři, vážkovou metodou. Při vytavování cca 19 g materiálu při teplotě 650 °C po dobu 20 minut zbytkové popeloviny činily $0,381 \pm 0,042$ %. Při následném žhání na teplotu 1000 °C po dobu 20 minut už pouhých $0,017 \pm 0,005$ %. Výrobcem udávané parametry materiálu s technologií „Ash Free“ slibují zbytkové popeloviny až 0,003 % při žhání na 1200 °C po dobu 40-60 minut. Rozdíly v naměřených hodnotách zbytkových popelovin jsou závislé na teplotě a době po kterou byly spalovány.

V kapitole číslo 5.4 byly souhrnně sepsány způsoby vytavování 3D tištěných modelů, informace vychází z odborné literatury. Informace byly doplněny i o komentář autora z již provedených experimentů. Dále v kapitole 5.5 byla popsána teorie praskavosti skořepin během vytavování vlivem tepelné expanze vzduchu uvnitř dutiny vytavovaného modelu. Z již provedených experimentů modelů pyramid vyplývá fakt, že skořepiny praskají při vytavování modelů s 0 % vnitřní výplní. Model bez výplně nemá žádné zpevňující příčky a uzavřený vzduch expanduje do té doby, než dojde k tvorbě trhliny na skořepině. Uvažujeme-li změnu teploty z pokojové (20 °C) do teploty počátku hoření/rozkladu materiálu modelu 300 °C, tak objem nebo tlak uzavřeného vzduchu uvnitř modelu vzroste o 95,5 %.

Tato teorie byla ověřena jednoduchým návrhem odvodu dutiny modelu. Na model byla přilepena keramická trubička, která měla v místě spoje vytvořen odvodu otvor z dutiny modelu. Proces obalování byl proveden standardním způsobem. Během vytavování odvodu modelu nedošlo ke tvorbě trhliny na povrchu skořepiny. Dobrých výsledků bylo dosaženo i u dalších obdobně odvodu modelů. Byla tedy provedena vhodná optimalizace. Ucelený seznam vyzkoušených modifikací 3D tištěných modelů a úspěšnost s jejich vytavováním viz tab. 6.

V další části práce byly popsány způsoby přenosu tepla v keramické skořepině. Následně bylo provedeno experimentální měření ve vhodně zvolených bodech keramické skořepiny a vytavovaného modelu. Naměřené hodnoty byly zaznamenány do grafů, viz obr. 58 a 59. Data potvrzují počátek a konec hoření materiálu, které byly zjištěny i při termické analýze.

V poslední kapitole práce byla provedena optimalizace 3D tištěného modelu kříže meče. Skořepiny byly vyráběny ve školní slévárně a během vytavování modelů (s neznámou výplní) každá skořepina praskla v místě kulovité koncovky, viz obr. 61. Praskavost skořepiny byla ověřena i na modelu s 8 % výplní modelu. V rámci dalšího experimentu bylo rozhodnuto o optimalizaci modelu a zavedení odvodu dutiny. Takto optimalizovaný model při vytavování již vyhovoval a skořepina zůstala neporušena.

Celkem bylo v práci použito 36 teoretických modelů pyramid, z nichž na pěti byla provedena optimalizace odvodu, která byla vždy úspěšná. Dále bylo vyrobeno 7 modelů křížů meče, ze kterých bylo 6 vhodně optimalizováno.

Dle získaných zkušeností, je doporučeno modely optimalizovat použitím modelové výplně 5 až 8 % s odvodu vnitřní dutiny 3D tištěného modelu. Na skořepině vyrobené ve školní slévárně s modely neznámé výplně a bez jejich odvodu mělo trhliny na skořepině 10/10 křížů. Po autorově provedení optimalizace modelů byla úspěšnost 6/6, žádná skořepina neměla trhliny, viz obr. 69 a 70.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ŠTĚPÁN, Radim. *Optimalizace vlastností 3D tištěných modelů pro technologii lití do keramických skořepin* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139952>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.
 2. HORÁČEK, Milan. *ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU* [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
 3. Výroba voskových modelů. In: *MORAVIA TECH* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://www.moraviatech.cz/24820-slevarna-presneho-liti>
 4. KUMAR, P., I.P.S. AHUJA and R. SINGH. *A Framework for Developing a Hybrid Investment Casting Process*, *Asian Review of Mechanical Engineering*, Vol. 2 No. 2, 2013, pp. 49 - 55. ISSN 2249-6289.
 5. Co je to STL?. *IT SLOVNÍK.cz* [online]. [cit. 2022-02-06]. Dostupné z: <https://it-slovník.cz/pojem/stl>
 6. Fused Deposition Modeling. In: *Rookie Electronics* [online]. [cit. 2022-05-12]. Dostupné z: <https://rookieelectronics.com/3d-printing-technologies-types/>
 7. YAO, W. L. a M. C. LEU. Analysis of shell cracking in investment casting with laser stereolithography patterns. *Rapid Prototyping Journal*. 1999, 5(1), 427-434. ISSN 1355-2546.
 8. PODIVÍNSKÁ, Martina a Simon JANTAČ. Diferenciální skenovací kalorimetrie – [DSC]. *Fakulta chemicko-inženýrská, VŠCHT Praha* [online]. Praha [cit. 2022-02-21]. Dostupné z: <https://fchi.vscht.cz/files/uzel/0010367/0064~~cw12jg8LUUhNySwBAA.pdf?redirected>
 9. LaBUT. In: *Ústav strojírenské technologie, Odbor slévárenství* [online]. Brno [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/slevarna/labut>
 10. KÜGELGEN, Michael. From 7 days to 7 hours - Investment casting parts within the shortest time. *Proceedings of 68th World Foundry Congress*. Chennai, India, 2008, 68, 147 - 151.
 11. SOUKUPOVÁ, Lucie. *Optimalizace technologie výroby odlitků ze slitin Al metodou vytavitelného modelu* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/25985?locale-attribute=ru>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
 12. BOUCHER, Cole. What Is Coefficient Of Thermal Expansion? How To Measure It?. *Thermtest instruments* [online]. 2019 [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://thermtest.com/what-is-coefficient-of-thermal-expansion-how-to-measure-it>
 13. Differential Scanning Calorimetry. *Polymer Science Learning Center* [online]. Macrogalleria [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://pslc.ws/macrog/level5.htm>
-

-
14. PETRIČ, M, R CERC KOROŠEC, M VONČINA, P MRVAR a S KASTELIC. *Applications of 3D printed polymer patterns in casting technologies*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani.
 15. [Dilatační spára]. [obrázek]. In: HORÁČEK, Milan. *Výroba přesných odlitků technologií vytavitelného modelu: Přednáška pro 2. ročník magisterského studia oboru 23-32-8 slévárenské technologie předmětu "Technologie slévání II"* [online]. Brno: Odbor slévárenství ÚST FSI VUT Brno, Sep 30, 2014, slide č. 24 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.slideserve.com/joelle/v-roba-p-esn-ch-odlitk-technologie-vytaviteln-ho-modelu>
 16. Flash Fire Dewax System. In: *Pacific Kiln* [online]. [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.pacifickiln.com/investment-casting-products/flash-fire-dewax-system/>
 17. SINGH, Simranjeet, Parlad KUMAR a Jagmeet SINGH. An approach to eliminate shell cracking problem in fused deposition modeling pattern based investment casting process. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. India, 2021, (1091), 1-12 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1091/1/012035
 18. HENDRICKS, M. J. a D. R. ENGELHARDT. THERMAL CONDUCTIVITY AND HEAT TRANSFER MEASUREMENT FOR CERAMIC SHELL MOLDS. *Ransom & Randolph* [online]. Maumee, OH, 1992 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://www.ransom-randolph.com/technical-papers>
 19. XU, Mingzhi. *Characterization of investment shell thermal properties*. Missouri, 2015. Disertační práce. Missouri University of Science and Technology.
 20. *Snímače teploty - termočlánky* [online]. Olomouc: ELUC, 2014 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1582>
 21. RUSÍN, K. a kolektiv. *Slévárenské formovací materiály*. Praha: SNTL, 1991. 392 s. ISBN 80-03-00278-8
 22. MOLOCHITE™. In: *IMERYS* [online]. Velká Británie [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.imerys.com/product-ranges/molochite>
 23. MEDVEDOVSKI, Eugene. *Alumina–mullite ceramics for structural applications* [online]. 31 May 2005, 369-375 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884205000945>
 24. HÝBAL, Ondřej. *Vývoj keramické skořepinové formy pro výrobu rozměrných Al odlitků*. Brno, 2018 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/109554?zp_id=109554. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
 25. *CITACE PRO: Generátor citací* [online]. Brno: Citace.com, 2015 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>
-

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbols

Označení	Legenda	Jednotka
BS	množství pevných látek v pojivu	[hmot. %]
C_p	tepelná kapacita	[J·K ⁻¹]
d	délka vedení tepelného toku	[m]
dt	diference času	[s]
dT	rozdíl počáteční a koncové teploty vzorku	[°C]
F_a	faktor uspořádání	[-]
F_e	faktor emisivity	[-]
h_c	koeficient tepelné konvekce	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
k	koeficient tepelné vodivosti	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
k_c	tepelná vodivost spjité fáze	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
k_d	tepelná vodivost disperzní fáze	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
k_e	efektivní tepelná vodivost	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]
K_r	koeficient záření	[W·m ⁻²]
L	délka vzorku po tepelné expanzi	[mm]
L_0	počáteční délka vzorku	[mm]
m	hmotnost	[g]
m_b	hmotnost prázdné odměrné baňky	[g]
m_{cup}	hmotnost porcelánového kalíšku	[g]
$m_{cup+ash}$	hmotnost porcelánového kalíšku s popelovinami	[g]
m_{xb}	hmotnost odměrné baňky se suspenzí	[g]
m_{kal}	hmotnost prázdného kalíšku	[g]
m_{kal+x}	hmotnost kalíšku se suspenzí	[g]
$m_{kal+x+T}$	hmotnost kalíšku se suspenzí po vytavování v peci	[g]
m_{sample}	hmotnost vzorku	[g]
m_{pl}	hmotnost válce se 100 ml suspenze	[g]
m_v	hmotnost prázdného válce	[g]
MOR	modul lomu	[N·mm ⁻²]
n	počet vzorků	[-]
p	tlak	[Pa]
q_c	tepelný tok způsobený prouděním	[W·m ⁻²]
q_k	tepelný tok způsobený vedením	[W·m ⁻²]
q_r	tepelný tok způsobený zářením	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]
Q	teplo	[J]
SG	měrná hmotnost	[g·ml ⁻¹]
t	čas	[s]
T	teplota	[°C, K]
T_b	teplota borcení	[K]
T_c	teplota krystalizace	[K]
T_g	teplota skelného přechodu	[K]
T_m	teplota tání	[K]
T_R	absolutní teplota přijímače	[K]
T_S	absolutní teplota zdroje	[K]
T_u	teplota při které je maximální pevnost skořepiny	[K]
TS	obsah žáruvzdorných látek v suspenzi	[%]
v_c	objemové procento spjité fáze	[%]
V	objem vzorku	[mm ³]
V_{ref}	referenční objem odměrné baňky	[ml]

x	hodnota	[%]
\bar{x}	aritmetický průměr hodnot	[%]
α	koeficient tepelné roztažnosti	[K ⁻¹]
ρ	hustota	[kg·m ⁻³]
ρ_x	hustota suspenze	[g·ml ⁻¹]
%ash	množství zbytkových popelovin	[%]
Δp	rozdíl tlaků	[Pa]
ΔT	rozdíl teplot	[K]

Zkratky

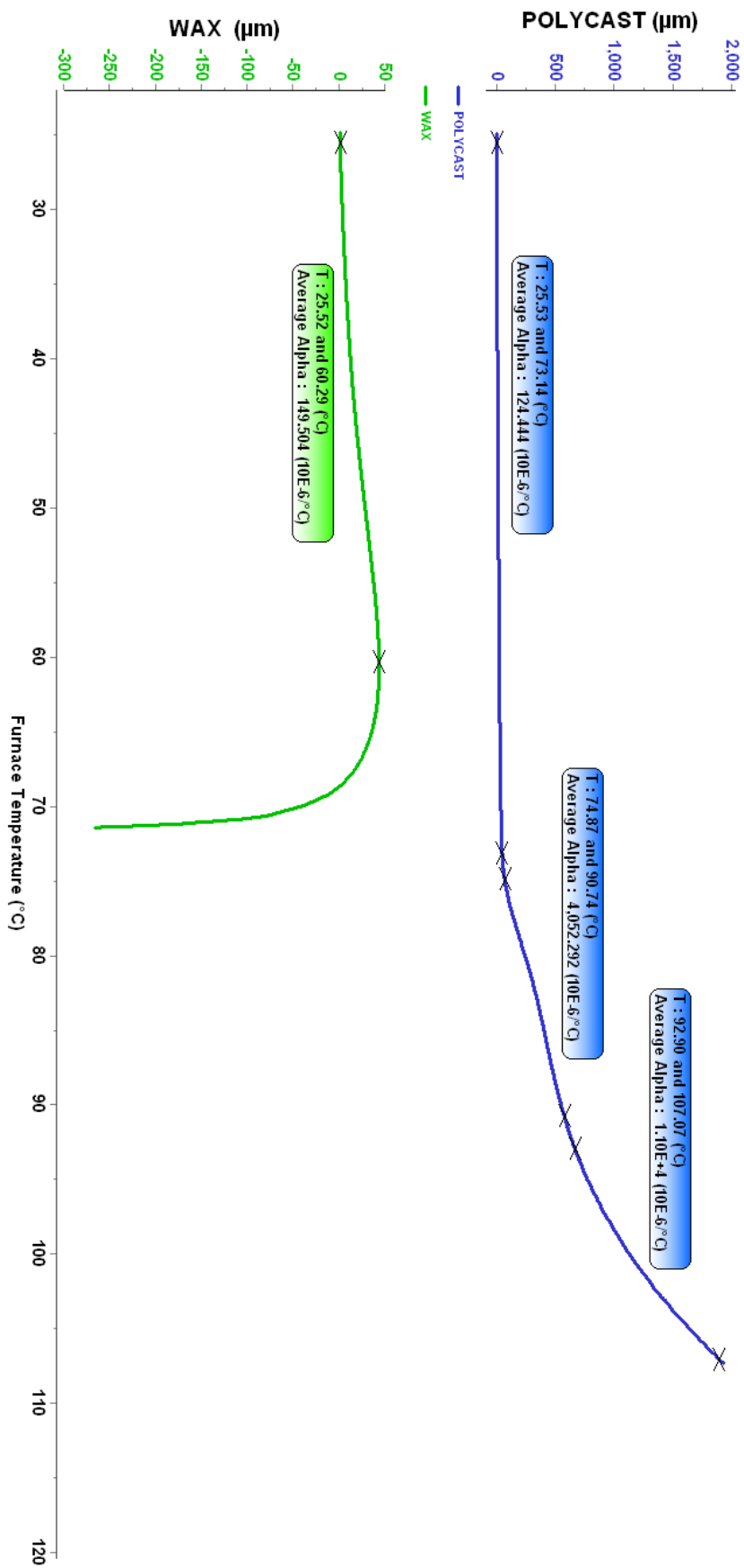
Označení	Legenda
ABS	Akrylonitril Butadien Styren
AD	Analog to Digital
BS	Binder Solids
CAD	Computer Aided Design
cca	circa
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DTG	Differential Thermal Gravity
FDM	Fused Deposition Modeling
GCODE	Strojový kód
HIC	Hybrid Investment Casting
Kap.	Kapitola
MOR	Modulus Of Rupture
Obr.	Obrázek
PLC	Programmable Logic Controller
PVB	Polyvinyl Butyral
RP	Rapid Prototyping
SG	Specific Gravity
STL	Standard Triangle Language
Tab.	Tabulka
TG	Thermogravimetry
TS	Total Solids
3D	Trojrozměrný

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Dilatometrie materiálů – slévárenský vosk a Polymaker Polycast
Příloha 2 Technický list k materiálu Polymaker PolyCast – fyzikální a chemické vlastnosti
Příloha 3 Graf naměřených hodnot z termočlánků v závislosti na čase

Příloha 1

Dilatometrie materiálů – slévárenský vosk a Polymaker Polycast





Nov. 2018

Safety Data Sheet

Version 4.0

3. Personal protective equipment

Wear gloves when handling hot/molten material.

Section 9: Physical and chemical properties**1. Information on basic physical and chemical properties**Appearance: Filament, SolidColor: VariousOdor: OdorlessOdor threshold: Not availablepH: Not applicableMelting point/freezing point: 135°C – 210°CBoiling point: Not applicableFlash point: Not applicableEvaporation rate: Not applicableFlammability: Not availableUpper/lower flammability or explosive limits: Not availableVapor pressure: Not applicableVapor density: Not applicableRelative density: 1.1 g/cm³ (20 °C) ApproximateSolubility: Soluble in alcoholsPartition coefficient (n-octanol/water): No data availableAuto-ignition temperature: > 380°CDecomposition temperature: Onset of decomposition > 280°CViscosity: Not applicable**Section 10: Stability and reactivity****1. Reactivity**

Stable at normal conditions.

2. Chemical stability

Material is stable under normal conditions.

3. Possibility of hazardous reactions

Hazardous polymerization does not occur.

4. Conditions to avoid

Avoid extreme heat. Avoid all sources of ignition: heat, sparks, open flames, etc.

5. Incompatible materials

Strong oxidizing agents. Strong acids.

6. Hazardous decomposition products

Carbon oxides

