

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta**

**Katedra materiálu a strojírenské technologie**



## **Bakalářská práce**

**3D tisk prototypů z vytavitelných materiálů na bázi vosku**

**Vedoucí práce: prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

**Autor práce: Michal Petrásek**

**© 2021 ČZU v Praze**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Michal Petrásek

Zemědělská specializace  
Obchod a podnikání s technikou

Název práce

**3D tisk prototypů z vytavitelných materiálů na bázi vosku**

Název anglicky

**3D printing of prototypes from wax-based fusible materials**

---

### Cíle práce

Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat materiály na bázi vosku a nízko-tavných plastů vhodné pro 3D tisk vytavitelných modelů. Student se dále zaměří na technologie průmyslových 3D tiskáren, které tisknou „voskové“ materiály s velmi vysokým rozlišením, tj. s výškou jednotlivých vrstev pod 25 $\mu$ m. Student shromáždí literární poznatky o předmětné problematice. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce a zhotoví ekonomickou analýzu.

### Metodika

Současný stav řešeného problému (literární rešerše).

Závěry a přínos práce.

**Doporučený rozsah práce**

cca 30 stran

**Klíčová slova**

3D tisk, materiály pro 3D tisk, náklady tisku, vysoké rozlišení

---

**Doporučené zdroje informací**

Firemní literatura dodavatelů vstupních materiálů pro 3D tiskárny

Firemní literatura výrobců 3D tiskáren

CHUA, CH. K., LEONG, K. F.: 3D printing and additive manufacturing: principles and applications. 4th edition of Rapid prototyping. Singapore: World Scientific, 2015.

KLOSKI, L. W., KLOSKI, N.: Getting started with 3D printing: a hands-on guide to the hardware, software, and services behind the new manufacturing revolution. San Francisco: Maker Media, 2016.

MAŘÍK, V.: Průmysl 4.0: výzva pro Českou republiku. Praha: Management Press, 2016.

NOORANI, R.: 3D printing: technology, applications, and selection. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.

Sborníky z konferencí a články uveřejněné v časopisech

WIMPENNY, D. I., PANDEY, P. M., KUMAR, L. J.: Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies. Singapore: Springer Singapore, 2017.

---

**Předběžný termín obhajoby**

2020/2021 LS – TF

**Vedoucí práce**

prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.

**Garantující pracoviště**

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Elektronicky schváleno dne 21. 1. 2020

**prof. Ing. Miroslav Müller, Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

**doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.**

Děkan

V Praze dne 11. 05. 2021

---

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "**3D tisk prototypů z vytavitelných materiálů na bázi vosku**" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.5.2021

---

Michal Petrásek

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Miroslavovi Müllerovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytnuté podněty, vstřícný přístup a za čas, který mi věnoval při konzultacích.

# **3D tisk prototypů z vytavitelných materiálů na bázi vosku**

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na analýzu polymerních materiálů, které lze využít k aditivní výrobě vytavitelných modelů ve slévárenství. Zejména se jedná o analýzu termoplastických materiálů na bázi vosků a fotopolymerních pryskyřic s voskovými plnivy. V úvodní části práce je také názorně popsána technologie odlévání na vytavitelný model, tato část vysvětluje základní pojmy a uvede čtenáře do problematiky možného využití aditivní technologie ve slévárenství. Další část práce je zaměřena na popis základních 3D tiskových technologií, které umožňují tisknout vytavitelné materiály ve vysokém rozlišení a zhotovovat velmi detailní modely. Na konec práce je zařazena ekonomická analýza aditivní výroby ve slévárenském sektoru.

## **Klíčová slova**

3D tisk, vosk, vytavitelný model, aditivní technologie, fotopolymer, slévárenství

# **3D printing of prototypes from wax-based fusible materials**

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the analysis of polymeric materials that can be used for the additive production of fusible models in metal casting. In particular, thermoplastic materials with properties of wax and photopolymer resins with wax additives are analyzed. The introductory part of the thesis also clearly describes the technology of casting on a fusible model, this part explains the basic concepts and introduces the reader to the issue of possible use of additive technology in foundry. The next part of the work deals with the description of basic 3D printing technologies that allow to print castable materials in high resolution and make very detailed wax models. At the end of the work is included an economic analysis of additive technology in the foundry sector.

## **Keywords**

3D printing, wax, fusible model, additive technology, photopolymer, foundry

# Obsah

1	Úvod.....	1
2	Cíl práce a metodika .....	1
2.1	Cíl Práce.....	1
2.2	Metodika .....	1
3	Technologie lití na vytavitelný model.....	2
3.1	Historie odlévání metodou ztraceného vosku.....	2
3.2	Moderní využití technologie lití na vytavitelný model .....	3
3.3	Výroba odlitku na vytavitelný model .....	4
3.3.1	Výroba voskového modelu.....	4
3.3.2	Sestavení stromečků.....	5
3.3.3	Výroba keramické skořepiny .....	5
3.3.4	Vytavování vosku a žíhání skořepin.....	5
3.3.5	Odlévání kovu .....	6
3.3.6	Odstranění skořepiny, odstranění zbytků vtokové soustavy, kontrola odlitků ...	6
3.4	Výroba drobných odlitků metodou vytavitelného modelu .....	7
3.4.1	Popis metody .....	7
3.4.2	Teploty žíhání květ a teploty odlévání některých slitin.....	9
3.5	Vlastnosti vytavitelných materiálů .....	9
3.6	Složení slévárenských voskových směsí.....	10
4	Polymerní materiály .....	11
4.1	Rozdělení polymerů .....	11
4.2	Syntéza polymerů .....	12
4.2.1	Polymerace .....	12
4.3	Přísady (aditiva) .....	14
5	Vosky.....	16
5.1	Definice .....	16
5.2	Rozdělení vosků .....	18
5.3	Přírodní vosky a pryskyřice .....	18
5.3.1	Včelí vosk .....	18
5.3.2	Cerezin .....	19
5.3.3	Karnaubský vosk .....	20
5.3.4	Montánní vosk.....	20
5.3.5	Parafínový vosk.....	20
5.3.6	Další přírodní vosky .....	20
5.3.7	Kalafuna .....	21
5.3.8	Využití přírodních vosků .....	21



5.4	Částečně syntetické vosky .....	21
5.5	Syntetické vosky.....	21
5.5.1	Polyolefinové vosky .....	22
5.5.2	Fischer–Tropschovo vosky (syntetické parafíny).....	22
5.6	Mikronizovaný vosk .....	23
6	Fotopolymery .....	23
6.1	Princip fotopolymerace .....	23
6.2	Fotopolymerní pryskyřice plněné voskem.....	25
7	3D tiskové technologie .....	27
7.1	Technologie pro 3D tisk vytavitelných termoplastů.....	27
7.1.1	DOD technologie.....	27
7.1.2	MJP – multijet printing .....	29
7.2	Technologie pro 3D tisk fotopolymerů .....	30
7.2.1	SLA technologie .....	30
7.2.2	DLP technologie .....	32
7.2.3	Porovnání SLA a DLP .....	33
8	Ekonomická analýza odvětví RP ve slévárenství .....	33
9	Závěr .....	35
	Seznam použitých zdrojů.....	36
	Seznam obrázků.....	40
	Seznam použitých zkratk .....	41

# 1 Úvod

V době rozvíjejícího se oboru 3D tiskových technologií, se ve značné míře rozvinula kooperace této technologie se slévárenským odvětvím. Ve slévárenství má aditivní výroba mnoho možností uplatnění, například v nejběžnější technologii odlévání do pískových forem se s využitím 3D tisku zhotovují některé slévárenské modely k přímému zaformování, tyto modely pak z části nahrazují konvenčně vyráběné modely ze dřeva a kovu. Další využití ve slévárenství má 3D tisk při výrobě vstřikovacích (matečných) forem pro vstřikování vytavitelných či spalitelných směsí. Dalším a zdaleka ne posledním využitím je 3D tisk vytavitelných slévárenských modelů pro přesné lití. A právě o aditivní výrobě vytavitelných modelů a vhodných materiálech je převážná část tato bakalářská práce.

## 2 Cíl práce a metodika

### 2.1 Cíl Práce

Cílem bakalářské práce jse shromáždit a analzovat polymerní materiály na bázi vosku a nízkotavných plastů využívaných pro 3D tisk vytavitelných, slévárenských modelů. Dalším cílem bude popsat technologie průmyslových 3D tiskáren, které mohou tiskout vytavitelné materiály s velmi vysokým rozlišením (výška vrstvy max 25  $\mu\text{m}$ ). Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky bude stanoven přínos práce a vypracována ekonomická analýza.

### 2.2 Metodika

K řešení problematice budou vyhledány vhodné a aktuální informace z českých a zahraničních zdrojů, zejména z odborné literatury, odborných článků uveřejněných ve vědeckých časopisech, webových stránkách výrobců zařízení a materiálů, aj. Po prostudování těchto zdrojů bude zpracována literární rešerše v přiměřeném rozsahu splňujícím požadavky na zpracování bakalářské práce.

## 3 Technologie lití na vytavitelný model

### 3.1 Historie odlévání metodou ztraceného vosku

Zdokumentované počátky slévárenství sahají až do ranné doby bronzové a datují se do období 2 500 – 3 500 let př.n.l. V počátečních obdobích se jednalo spíše o kusovou, řemeslnou výrobu uměleckých předmětů, šperků a zbraní. Hlavní metody, které se tehdy ve slévárenství používaly byly odlévání do pískových forem a odlévání na vytavitelný model (ztracený vosk). Během vývoje se používaly i jiné metody, jako odlévání do vydlabaného kamene, odlévání do sépiové kosti, odlévání do dřevěných forem, aj., ale tyto metody byly spíše okrajové. [1][3]

Odlévání metodou na ztracený vosk („lost wax casting“) dnes častěji označované pod pojmem metoda vytavitelného modelu, je technika využívaná od samotného vzniku slévárenství. Zjednodušeně popsáno, jednalo se o proces, kdy se model z lehce vytavitelného materiálu, obvykle vosku obalil formovací hmotou z vhodné formířské hlíny. Následně se takto obalený model za vysokých teplot vypálil v peci nebo ohništi, obdobně jako se vypalovaly výrobky z keramiky. Vosk se z formy částečně vytavil a z části vyhořel, čímž vznikla dutá skořepina. Do vypálené skořepiny se následně nalil roztavený kov, který zaujal původní místo voskového modelu. Po zchladnutí se skořepina rozbila a odlitek se začistil. Metodou lití na vytavitelný model bylo možné zhotovit odlitky s velice jemnou texturou a vysokou jakostí povrchu, jako je tomu na obrázcích 3.1. a 3.2. [2][3][6]

*Obr. 3.1. Bronzový odlitek hlavy panovníka, Mezopotámie 23. století př. n. l.*



Zdroj: <https://www.britannica.com/biography/Sargon>

Obr. 3.2. odlévaný zlatý hřeben s bojovou scénou, oblast Dněpru, 4. století př. n. l.



Zdroj:[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scythian\\_gold\\_comb\\_with\\_the\\_image\\_of\\_a\\_battle\\_scene\\_from\\_the\\_Solokha\\_kurgan,\\_430-390\\_BC\\_\(47362587962\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Scythian_gold_comb_with_the_image_of_a_battle_scene_from_the_Solokha_kurgan,_430-390_BC_(47362587962).jpg)

Použití včelího a jiných přírodních vosků při výrobě vytavitelných modelů mělo značné výhody: materiál již při mírném zahřátí vytékal z formy ven a nezpůsobil výrazné pnutí vlivem tepelné roztažnosti; vosk je měkký a je možné ho modelovat ručně i jednoduchými nástroji; vosk je snadné spojovat pomocí svařování zahřátými kovovými nástroji. Velkou výhodou většiny vosků také je, že vosk je v malých tloušťkách průsvitný, a proto umělecké voskové modely bylo možné zhotovit se stejnou tloušťkou stěny. Pokud se modelář díval na model proti světlu, na první pohled viděl, kde má velké vrstvy materiálu (tmavá místa) a kde tenké vrstvy (světlá místa). Touto jednoduchou metodou bylo možné model dimenzovat tak, aby při následném odlévání nevznikaly tepelné uzly či tenká místa, která by se nedolila. Tuto techniku využívají umělečtí modeláři, sochaři a klenotníci dodnes. [5][6][22]

### 3.2 Moderní využití technologie lití na vytavitelný model

Masivní průmyslové zavedení technologie lití na vytavitelný model nastalo až v průběhu druhé světové války díky masivní poptávce po přesných, geometricky složitých dílech do leteckých motorů, zejména turbínových lopatek, ale i dalších dílů pro zbrojní průmysl. V současnosti se odlitky přesného lití uplatňují ve většině průmyslových odvětví jako jsou letectví, kosmický průmysl, laboratorní přístroje, zdravotnické a stomatologické výrobky, automobilový průmysl, zbrojní průmysl, energetika a mnoho dalších.[4][3]

Metoda lití na vytavitelný model se řadí mezi metody přesného lití. Termínem přesné lití se označují slévárenské metody, jejichž pomocí je možné odlévat odlitky s rozměrovou přesností

do  $\pm 0,25$  %. Na vytavitelný model se vyrábí odlitky vysoké jakosti s přesnými rozměry a malou drsností povrchu. Metodám přesného lití se někdy říká „lití na hotovo“ což znamená, že odlitek není třeba dále obrábět, kromě odstranění vtokové soustavy. [4][6][5]

Výhody metody:

- Velmi hladké povrchy s drsností až Ra 0,8 u speciálních metod, běžně do Ra 1,6
- Možnost výroby součástí složitých tvarů, které by bylo obtížné jinou metodou vyrobit
- Vytavitelné modely je možné každý individuálně upravit. Modely jsou vyráběny převážně z vosku (nízko-tavného termoplastu), který je možné svářet, lepit, obrábět a opravovat.
- Metoda je vhodná pro kusovou i sériovou výrobu
- Odlitky nemají viditelné dělicí roviny – pokud se začistí ve vosku
- Možnost odlévání velkého množství slitin železných i neželezných kovů.
- Možnost odlévání slitin s vysokou teplotou tavení, např. slitiny Pt a Ti.

Nevýhody:

- Vysoká technologická náročnost = vysoké náklady na vybavení
- Velké energetické nároky vlivem žhání skořepinových forem
- Požadavek na vysokou kvalifikovanost personálu
- Nízká produktivita výroby
- Dlouhá doba výroby od návrhu k finálnímu výrobku
- Komplikovaná výroba velkých odlitků

### **3.3 Výroba odlitku na vytavitelný model**

#### **3.3.1 Výroba voskového modelu.**

V sériové výrobě se vytavitelné modely vyrábí vysoce produktivní metodou vstřikováním tekuté voskové směsi do forem. Vstřikovací formy se běžně vyrábí obráběním a v dnešní době také 3D tiskem. Výrobek, který byl zhotoven vstříknutím do formy se nazývá výstřik. Voskové modely pro kusovou nebo malosériovou výrobu se vyrábí obráběním z voskových polotovarů. Voskové modely uměleckých předmětů, jako jsou odlévané sochy či některé šperky se zhotovují ručním modelováním nebo vstřikováním do forem ze silikového elastomeru. V poslední době je často využívanou metodou výroby vytavitelných modelů přímý 3D tisk z materiálů na bázi vosku – u výroby prototypů je tato metoda dnes dominantní, zvláště pak u odlitků malých rozměrů. Na obrázku č. 3.3 je znázorněna vstřikovací forma s voskovým výstřikem. [6][7]

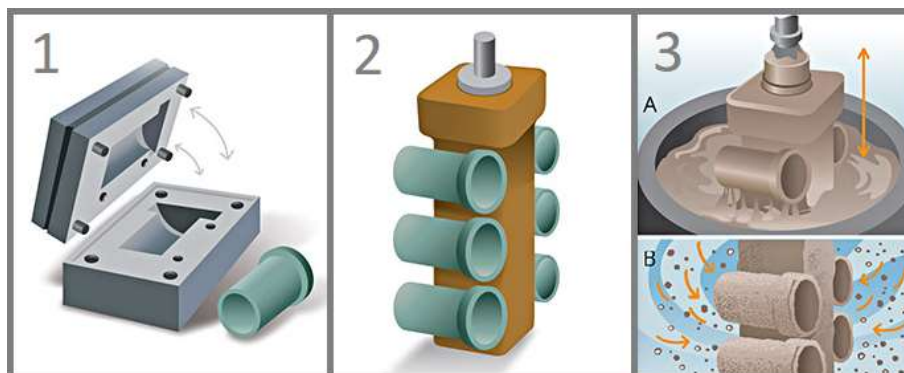
### 3.3.2 Sestavení stromečků

Jednotlivé voskové modely se připojí vtokovými kanálky k hlavnímu vtokovému kůlu. Poloha modelů musí přísně splňovat technologičnost odlévání na vytavitelný model, tj. poloha jednotlivých modelů je taková, aby bylo umožněno roztavenému vosku v co nejvyšší míře vytéct z formy, dále aby tavenina mohla co nejlépe zaběhnout do formy a po odlití aby bylo možné odlitky bez poškození odstranit z vtokového kůlu. Vtokový kůl se vyrábí z vosku nižší jakosti, obvykle z recyklovaného materiálu. Zkompletovaná sestava vtokové soustavy a modelů se ve slévárenské terminologii nazývá stromeček. [6][7]

### 3.3.3 Výroba keramické skořepiny

Voskový stromeček je namáčen do keramické břechky, následně se povrch smáčeného a okapaného stromečku zasype žáruvzdorným ostřivem. Proces namáčení a posypu ostřivem může být aplikován opakovaně. Stromeček se syrovou formovací směsí se přemístí do sušárny a vysuší se při řízené teplotě a proudění vzduchu. [6][7]

Obr.3.3. Vstřikovací forma s výstřikem (1); voskový stroměček (2); výroba keramické skořepiny (3)



Zdroj: [https://www.smile01.com/investment\\_casting\\_process.html](https://www.smile01.com/investment_casting_process.html)

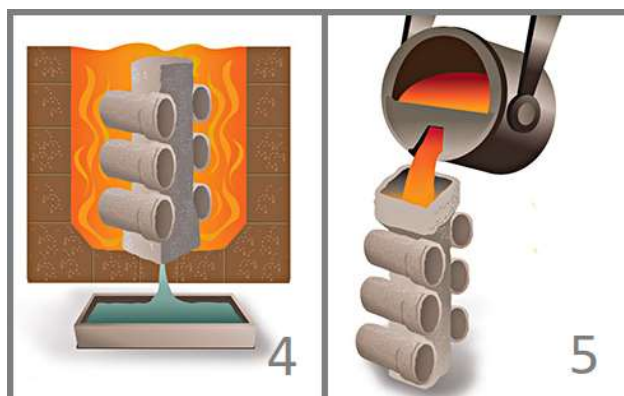
### 3.3.4 Vytavování vosku a žíhání skořepin

Stromečky s částečně vyschlým keramickým obalem se umístí do vypalovací pece. Orientace stromečků je nálevkovým kuželem směrem dolů ke dnu pece. V první fázi vypalovacího cyklu se vytaví vosk, tato fáze někdy probíhá v samostatném parním zařízení (autoklávu). V dalších fázích vypalovacího cyklu dojde k dosušení keramické směsi, vyhoření nevytaveného vosku a k vypálení keramické skořepiny. Žíhací teplota skořepin se pohybuje kolem 1 000 °C [6][7]

### 3.3.5 Odlévání kovu

Do vypálené skořepiny se gravitačně odlévá tavenina. Pro odlévání různých slitin se teplota skořepiny ustálí na jiné požadované teplotě z důvodu správného zaběhnutí roztaveného kovu. Obvyklá teplota formy při odlévání je 700 – 800 °C, ale při zvláštních aplikacích může být konečná teplota formy i výrazně nižší, či o něco málo vyšší. [6][7]

Obr. 3.4. Vytavování vosku a vypalování keramické skořepiny (4); odlévání kovu (5)

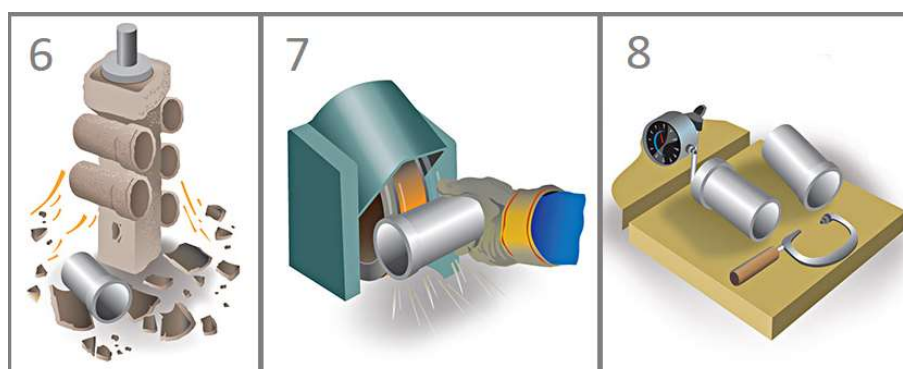


Zdroj: [https://www.smile01.com/investment\\_casting\\_process.html](https://www.smile01.com/investment_casting_process.html)

### 3.3.6 Odstranění skořepiny, odstranění zbytků vtokové soustavy, kontrola odlitků

Skořepina se od odlitků a vtokové soustavy odděluje mechanickým rozbíjením, vibračně, ultrazvukem, proudem tryskající vody a chemicky. Vtoková soustava se odděluje obvykle manuálně, ale do moderních sléváren se dnes často zavádí i robotické odstraňování vtokové soustavy, což se s výhodou uplatňuje při velkosériové a hromadné výrobě. [7]

Obr. 3.5. Odstranění skořepiny (6); broušení odlitku (7); kontrola a měření (8)



Zdroj: [https://www.smile01.com/investment\\_casting\\_process.html](https://www.smile01.com/investment_casting_process.html)



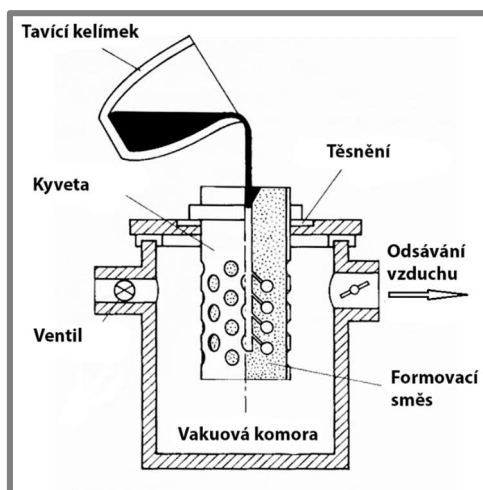
### 3.4 Výroba drobných odlitků metodou vytavitelného modelu

#### 3.4.1 Popis metody

Mezi specifické obory, kde se využívá metoda přesného lití patří stomatologie, zdravotnictví, bižuterní a klenotnický průmysl, hodinářství, výroba optických zařízení, součástí pro jemnou mechaniku atp. Ve všech výše zmíněných případech se jedná o výrobu velmi malých součástí s maximálními požadavky na rozměrovou přesnost a velmi malou drsnost povrchu. Pro odlévání takovýchto drobných modelů se využívá zvláštní strojní zařízení. Zásadní rozdíl je v tom, že při odlévání malých odlitků se keramická skořepina nevyrábí namáčením stromečků do keramické břečky a posypem ostřiva, ale stromečky se zalévají keramickou hmotou do perforovaných baněk ze žáruvzdorné oceli, tzv. kyvet. [10]

Jelikož je křehká skořepina vyztužena ocelovou kyvetou, je možné využívat při odlévání kombinaci vakua a přetlaku inertním plynem, aniž by došlo k jejímu zborcení. Formovací směs má po vypálení jemnou, porézní strukturu, skrze kterou je možné za pomoci podtlaku z vývěvy odsávat plyny, což pomáhá k snadnějšímu zaběhnutí taveniny a vyšší kvalitě povrchu odlitku. Na obrázcích níže jsou zjednodušené výkresy odlévacích zařízení pro „kyvetové“ lití vytavitelných modelů. Na obrázku č. 3.6 je nejstarší metoda vakuového odlévání kyvet, při které je materiál taven v kelímkové pídce s elektrickým či plynovým ohřevem (později i indukčním) a následně přeléván ručně do kyvety usazené ve vakuové komoře. Na následujícím obrázku č. 3.7 je novější zařízení s indukční tavbou materiálu, kde je materiál roztaven a míchán vířivými proudy, po dosažení požadované teploty, je povytažen grafitový trn „odpíchnutí kelímku“ a tavenina vtéká do kyvety. Tato novější metoda vynikala lepším řízením teploty a nižší mírou oxidace taveniny, zvýšila se také bezpečnost práce, jelikož odpadla fáze ruční manipulace s kelímkem a taveninou. [10]

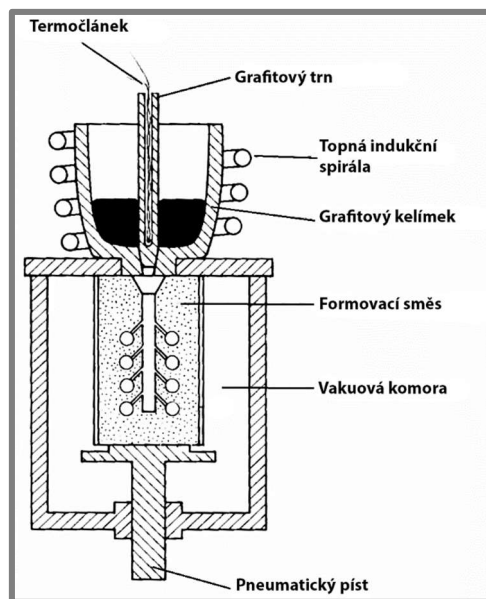
Obr. 3.6. Otevřené vakuové lití



Zdroj: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03215098.pdf>



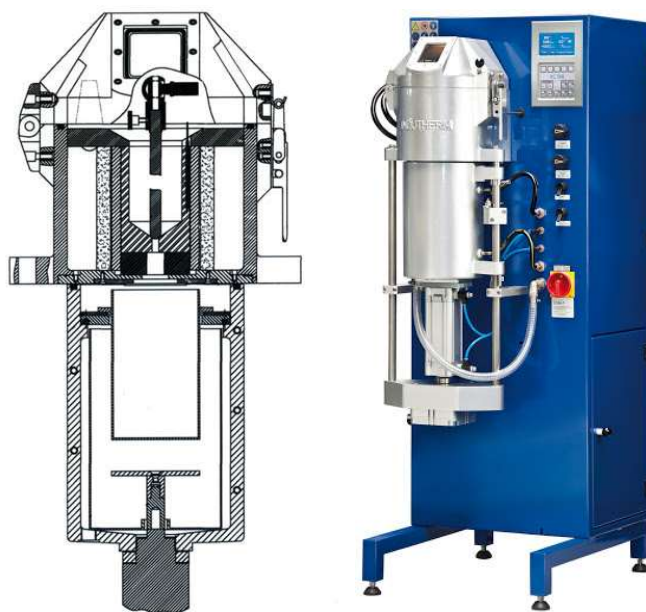
Obr. 3.7. Otevřené vakuové lití s indukčním ohřevem



Zdroj: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03215098.pdf>

Současné odlévací stroje mají uzavřenou tavící komoru s přetlakem inertního plynu, kterým je obvykle argon. Kov je taven a míchán indukčními vířivými proudy. Před odlitím taveniny, je vakuová komora s kyvetou přitlačena pneumatickým pístem k tělesu tavící komory, čímž je kyveta v horní části vystavena přetlaku interního plynu a ze spodní části podtlaku z vakuové vývěvy. K odpíchnutí kelímku dochází automaticky při dosažení požadované teploty taveniny. Na obrázku 3.8 se nachází moderní odlévací stroj na odlévání kyvet.

Obr. 3.8. Vakuový lící stroj s indukčním tavením a ochrannou atmosférou, Indutherm VC 500

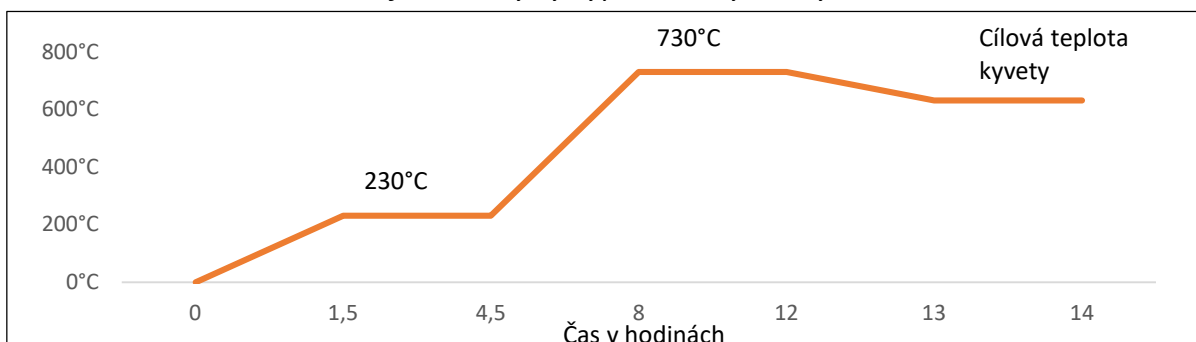


Zdroj: <http://www.indutherm.de/en/products/vacuum-pressure-casting-machines-vc/vc-500/>

### 3.4.2 Teploty žíhání kyvet a teploty odlévání některých slitin

Zalévací formovací směsi pro kyvetové lití se žíhají při výrazně nižších teplotách oproti běžným keramickým skořepinám. Graf 3.1 zachycuje obvyklý průběh vypalovacího cyklu kyvet o průměru 90–120 mm a tabulka č. 3.1 zachycuje orientační teploty kyvet a teploty taveniny v okamžiku odlévání. [9]

Graf 3.1. Obvyklý vypalovací cyklus kyvet



Zdroj: <https://www.srs-ltd.co.uk/technical/burnout>

Tab. 3.1. Orientační teploty taveniny a forem při odlévání

Slitina	Teplota taveniny (°C)	Teplota kyvety (°C)
Hliník	680 - 750	220 - 450
Mosaz	1020 - 1120	500 - 700
Stříbro 92,5 %	950 - 1050	450 - 650
14k Zlato	900 - 1000	500 - 600
18k Zlato	990 - 1100	550 - 650
22k Zlato	1040 - 1140	600 - 700
14k Bílé zlato (Pd)	1050 - 1170	600 - 700
18k Bílé zlato (Pd)	1100 - 1250	600 - 740
Platina (95%)	1900 - 2000	750 - 900
Nerez ocel 1.4401	1625 - 1675	750 - 900
Palladium	1550 - 1600	750 - 900

Zdroj: <https://www.srs-ltd.co.uk/technical/burnout>

### 3.5 Vlastnosti vytavitelných materiálů

Již z popisu slévárenské technologie v předchozích kapitolách lze odvodit, že materiály pro vytavitelné modely musí mít mnoho specifických technologických vlastností, jako například:

- Výborná tavitelnost
- Výborná tekutost a zabíhavost
- Výborná spalitelnost – při vyhoření zůstává jen minimum popela, kolem 0,01 až 0,1 %

- Materiál musí být dostatečně tuhý, aby odolal silovým účinkům při manipulaci a při formování
- Výborná svařitelnost
- Nízká tepelná vodivost
- Schopnost tvorby hladkých povrchů
- Materiál nesmí chemicky reagovat s keramickou formovací směsí
- Nízká toxicita při vypalování
- Nízký obsah těkavých látek – při opakovaném tavení by se neměly výrazně měnit vlastnosti materiálu
- Cena a dostupnost

Výše uvedeným požadavkům vyhovují některé polymerní směsi na bázi vosků a pryskyřic.

### 3.6 Složení slévárenských voskových směsí

Moderní vytavitelné modelovací směsi jsou komplexní sloučeniny mnoha termoplastických materiálů, pryskyřic a přísad, které v praxi nazýváme jako slévárenské vosky. [8]

Komponenty slévárenských vosků:

- Uhlovodíkové vosky
- Přírodní esterové vosky
- Syntetické vosky
- Přírodní pryskyřice
- Syntetické pryskyřice
- Organická plniva
- Oleje
- Voda
- Další přísady

Konkrétní složení směsi musí odpovídat druhu odlévaného výrobku a technologii výroby voskového modelu. Např. vosky pro výrobu modelů obráběním musí být dostatečně tvrdé a dobře obrobitelné. Vstřikovací vosky musí mít malou adhezi k formě, dobrou tekutost a zabíhavost a nízkou tepelnou roztažnost. Vosky pro použití v 3D tiskárnách musí mít vhodnou viskozitu, adhezní i kohezní vlastnosti, konzistentní složení bez nečistot a při opětovném tavení se nesmí dělit na lehčí a těžší frakce, které by zanášely trysky a filtry tiskárny. [5]

## 4 Polymerní materiály

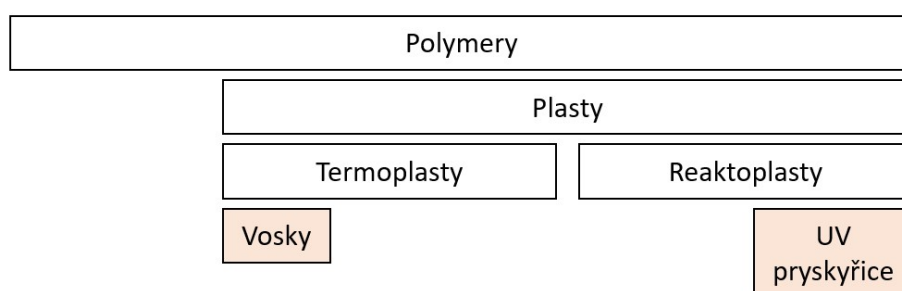
Jsou to chemické makromolekulární látky přírodního i syntetického původu. Většina polymerů je získávána polyreakcemi nízkomolekulárních sloučenin (monomerů), které ve svých molekulách většinou obsahují atomy uhlíku, vodíku, kyslíku, ale často také dusíku, chloru, fluoru a jiných prvků. V praxi jsou nejčastěji používány syntetické polymery jejichž základní složky jsou získávány jako produkty ze zpracování ropy, zemního plynu, uhlí, břidlic aj. Kromě základních látek polymerní povahy obsahují průmyslově vyráběné plasty další přísady (aditiva), které specifickým způsobem upravují jejich vlastnosti. [11][12][1]

Výhody polymerů jsou vysoký poměr pevnosti k hmotnosti, dají se zpracovávat při nízkých teplotách, mají nízkou hustotu a odolnost proti chemické korozi. Z těchto i mnoha dalších důvodů to jsou nejčastěji používané materiály v aditivní výrobě. [13]

### 4.1 Rozdělení polymerů

Polymery podle chování v závislosti na teplotě dělíme tradičně na termoplasty a reaktoplasty. Termoplasty je možné zvýšením teploty převést do stavu taveniny a ochlazením zpět do tuhého stavu – tato přeměna je opakovatelná bez výrazné změny vlastností materiálu. Schopnost opakovatelného tavení stojí za základem recyklačních technologií termoplastů. Reaktoplasty jsou vytvrzovány chemickou reakcí za účinku chemického iniciátoru, tepla, či záření nebo jejich kombinací. U reaktoplastů dochází k hustému, prostorovému zesíťování molekulární struktury kovalentními vazbami, tudíž je reaktoplast ve vytvrzeném stavu netavitelný a nerozpustný. [12]

Obr. 4.1. Rozdělení polymerů pro 3D tisk vytavitelných modelů



K aditivní výrobě vytavitelných slévárenských modelů se využívají jako základní materiál termoplasty, protože právě termoplastické materiály disponují požadovanou vlastností – tavitelností. Nejlepší technologické vlastnosti pro odlévání na vytavitelný model mají vosky, které také řadíme do skupiny termoplastů. Dalšími velmi rozšířenými polymerními materiály

pro 3D tisk vytavitelných modelů jsou pryskyřice vytvrzované účinky UV záření. Tyto pryskyřice jsou plněné částicemi mikronizovaného vosku, přičemž pryskyřice tvoří matici výsledného výrobku a voskové částice vytavitelnou složku. [13]

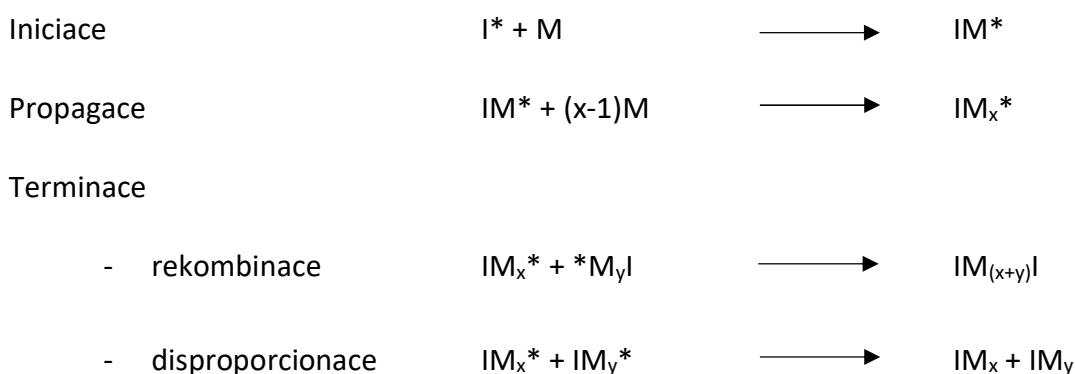
## 4.2 Syntéza polymerů

Syntetické polymery vznikají z nízkomolekulárních sloučenin třemi typy polyreakcí: řetězová polymerace, polyadice a polykondenzace.[12]

### 4.2.1 Polymerace

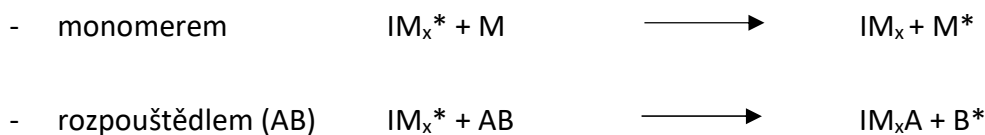
Polymerace je chemická reakce, při které z nízkomolekulárních látek (monomerů) vznikají dlouhé řetězce vysokomolekulárních látek (polymerů). Chemické složení polymeru je stejné, jako chemické složení monomeru. Produktem polymerace je makromolekulární řetězec. Rychlost polymerace a výsledná velikost makromolekul je závislá na rychlostech dílčích dějů – počáteční fáze (iniciace), růstu makromolekul (propagace) a končení (terminace). [11]

K aktivaci polymerace je nutné do systému dodat určité množství energie, tzv. aktivační energie, která převede částice reagující látky do aktivní formy. Molekuly monomeru lze aktivovat teplem, zářením nebo aktivující látkou (iniciátorem). Pokud označíme aktivovanou látku písmenem  $I^*$  a částici monomeru  $M$ , lze dílčí fáze polymerace schematicky popsat následovně: [11]



Během propagace může dojít k další reakci, při níž se reaktivita aktivní molekuly přenesou na jinou molekulu monomeru či makromolekulu vznikajícího polymeru, nebo dokonce na molekulu jiné látky přítomné v reakčním systému – tento přenos nazýváme transfer. [11]

## Přenos



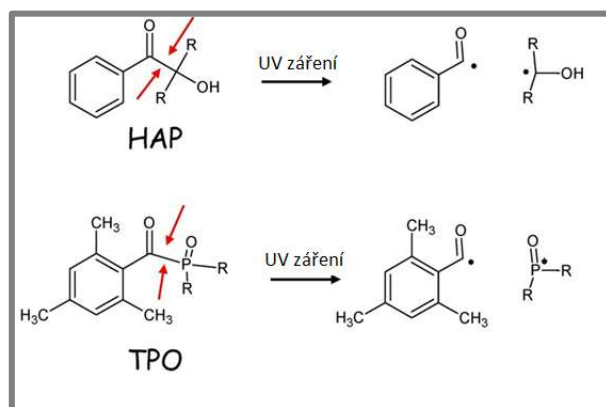
Vstupuje-li do polymerace více než jeden druh polymeru současně, mluvíme o kopolymeraci. K té dochází u monomerů, které mají podobnou aktivační energii. [11]

Podle druhu vazeb rozlišujeme polymeraci na radikálovou, iontovou a koordinační. [11]

## Radikálová polymerace

Jako iniciátory polyreakce se využívají organické i anorganické peroxidy, azosloučeniny nebo ketony. Tyto látky za zvýšených teplot nebo účinků UV záření rozkládají – dochází k rozdělení nepolárních kovalentních vazeb (symetrické, homolytické štěpení) za vzniku radikálů, které jsou velmi reaktivní a téměř okamžitě reagují s okolními částicemi. Radikál je částice, která má alespoň jeden nepárový elektron. Příklad radikálového štěpení je zobrazen na obrázku č. 4.2. [11][13]

Obr. 4.2. Příklad homolytického štěpení za vzniku radikálů u fotoiniciátorů HAP (hydrosyacetofenon) a TPO (fosfinoxid).



Zdroj: <https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-three-free-radical-photoinitiators/>

Iniciace vyžaduje dodání nejvyšší aktivační energie. Aktivační energie růstové reakce je výrazně nižší než iniciační energie. Při růstové reakci vzniká velké množství tepla, které do systému dodává další energii, proto růstová reakce může probíhat samovolně. Polymerace končí ztrátou reaktivity rostoucího radikálu. [11][12]

Radikálovou reakcí polymerují například metakryláty, nenasycené polyestery, akryláty a polyuretany. [14]

## Iontová polymerace

Iontovou polymerací je druh polyreakce, při níž rostoucí konce nebo aktivní centra vznikající makromolekuly vytvářejí polarizovaná seskupení, mezi která je vtahována molekula monomeru. [11]

Obr.4.3. Schéma kationtové reakce



Obr.4.4. Schéma aniontové reakce



Zdroj: [https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid\\_isbn-978-80-7080-788-0](https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-978-80-7080-788-0)

Iontové reakce mají obvykle v porovnání s radikálovými reakcemi nižší aktivační energii, zpravidla probíhají rychleji a za nižších teplot. [11]

Katalyzátory kationtové polymerace jsou silně kyselé reagující látky, jako fluorid boritý, chlorid titaničitý, chlorid cíničitý, chlorid hlinitý, kyselina sírová aj. Monomery schopné kationtové reakce jsou např. izobutylen, vinylethery, alkoxybutadieny. [11]

Katalyzátory aniontové polymerace jsou silně alkalicky reagující látky jako například alkalické kovy a jejich alkoholáty. Aniontově reagují např. akrylonitril, estery kyseliny metakrylové, styren, butadien. [11]

### 4.3 Přísady (aditiva)

Na výrobky z plastů jsou kladeny různorodé požadavky, které není prakticky možné uspokojit čistými polymery, ale jen polymerními směsmi, které obsahují všelijaké přísady. Druh, kvalita a koncentrace přísad v polymerní směsi mohou výrazně změnit užité vlastnosti polymeru. Koncentrace přísad v polymeru se udává v dsp (dílů na sto polymeru), což vyjadřuje, kolik hmotnostních dílů přísady připadá na 100 dílů polymeru. [11][12]

**Změkčovadla** jsou málo těkavé organické látky, díky kterým jsou makromolekulární látky tvárné, ohebné a vláčné. Změkčovadla zároveň snižují teplotu zeskenění a viskozitu taveniny u termoplastů. Principem působení změkčovadel je zvyšování vnitřní pohyblivosti makromolekulárních řetězců, která určuje tuhost polymerů. [11]

**Antidegradanty**, takto označujeme přísady, které chrání výrobky před působením vnějších vlivů jako jsou sluneční světlo, atmosférický kyslík, ozon a teplo. V návaznosti na funkci rozdělujeme antidegradanty na: [11]

- Světelné stabilizátory
- Antioxidanty
- Antiozonanty
- Tepelné stabilizátory

### **Síťovací prostředky**

Do této skupiny přísad řadíme látky, jejichž funkcí je ovlivňovat síťovací reakce, tj. působit na spojování lineárních či rozvětvených makromolekulárních řetězců příčnými vazbami do struktury prostorové sítě. [11]

#### **Síťovací činidla.**

jsou nejdůležitější složkou ze všech síťovacích prostředků, jelikož jsou bezprostředním původcem příčných vazeb. U polymerních směsí, které síťují vulkanizací se tato činidla nazývají vulkanizační. Pokud je síťovaným polymerem reaktoplast, tak vytvrzovací činidla nazýváme vytvrzovadla nebo zkráceně tvrdidla. [11]

U fotopolymerů pro 3D tisk mají dominantní využití vytvrzovací činidla aktivované UV zářením, jsou to tzv. fotoiniciátory (senzobilizátory).

**Aktivátory síťování** - jsou látky, které snižují energii potřebnou k aktivaci síťování. Druhou významnou vlastností aktivátorů je jejich vliv na síťovací reakce, jejíž účinnost podstatně zvyšují. [11]

**Urychlovače síťování** – u reaktoplastů zkracují časy vytvrzování a tím i technologické časy výroby. Například bez použití urychlovačů síťování by byla aditivní výroba na základě fotopolymerace časově neúnosně náročná. [11]

**Pigmenty** (práškové barvy) jsou v polymerech nerozpustné přísady, které dodávají výrobkům příslušný barevný odstín. [11]

Ve směsích na vytavitelné modely jsou pigmenty důležitou přísadou, a to hlavně z důvodu rozlišení materiálů odlišného složení a také, kvůli vizuální kontrole modelů. Na některých odstínech jasných barev jsou lépe viditelné vady výrobku jako jsou díry, přechody tiskových vrstev, přelitky a dělicí roviny.

### **Zjasňující látky**



**Plniva** – pevné netěkavé přísady organického i anorganického původu, které jsou přidávány do polymerních směsí v různém množství od jednotek až do stovek hmotnostních dílů dsp. Jedná se o pevné látky, které jsou fragmentovány na velmi malé částice, obvykle do několika desítek  $\mu\text{m}$ . Plniva významně upravují všechny vlastnosti polymerní směsi, a především pak finálního výrobku. Některá plniva se využívají ke snížení ceny výrobku. [11][12]

Příklady plniv:

- Dřevná moučka – běžné spotřební zboží a elektroinstalační výrobky
- Keramické částice – snižují tečení plastu, zvyšují tuhost a tvrdost, zvyšují teplotní odolnost
- Mikronizovaný vosk – zvyšuje tavitelnost
- Celulóza – zvyšuje houževnatost výrobku
- Slída – lepší elektroizolační vlastnosti a vyšší tepelná odolnost
- Síran barnatý, olovo – stínění proti rentgenovému záření

Dále se používají moučky různých polymerů, oxid křemičitý, mastek, cementy, břidlice ad. [11]

**Vyztužovadla** – látky, které svým tvarem a strukturou zpevňují výrobky zejména z reaktoplastů. Jsou to vláknité a textilní materiály z bavlny, skla, kovu, papíru, dřeva, polyesteru, polyamidu aj. [11]

**Nadouvadla** – jsou přísady, které se při zpracování polymerní směsi rozkládají za vzniku plynů, čímž vzniká lehčený plastový výrobek. [11][12]

**Antistatická činidla (antistaviva)** – přísady potlačující vznik statické elektřiny, která je při zpracování plastů zdrojem mnoha nežádoucích jevů. [11][12]

## 5 Vosky

### 5.1 Definice

Pro termín vosk není zavedena obecně přijímaná definice. Všechny pokusy o definování přesné, komplexní a vědecky ověřitelné definice vosku musí zohledňovat velké množství voskovitých produktů a chemickou složitost jednotlivých typů vosků. Použití pojmu vosk pro různé materiály různého chemického složení se společnými vlastnostmi je nicméně stále rozumné. Vosky běžně nejsou složeny z jedné chemické sloučeniny, ale jsou to složité směsi několika desítek až stovek složek. Jednotlivé složky se liší svou molární hmotností i stupněm rozvětvení řetězců. [20]

Definice stále uváděná v učebnicích chemie, že vosky jsou estery karboxylových kyselin s dlouhým řetězcem s alkoholy s dlouhým řetězcem není zcela univerzální. Aplikovatelná je pouze na některé klasické vosky, jako je včelí vosk; ostatní (např. ropné vosky) do této kategorie nespádají. [20]

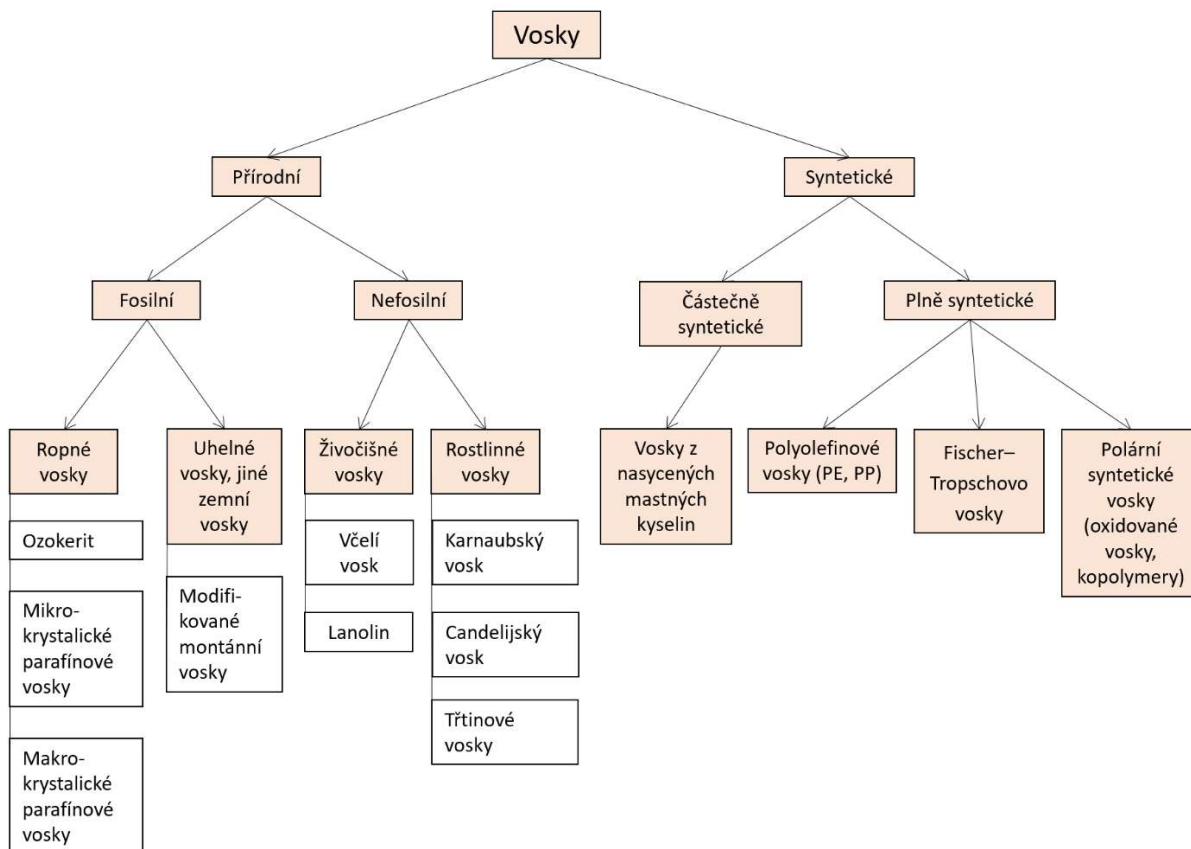
Vosky jsou dnes obvykle definovány svými charakteristickými vlastnostmi, které jsou vyjmenovány např. v mezinárodním celním sazebníku (HS 3404). [15][16]

Některé charakteristické vlastnosti vosků:

- Vykazují vysokou vodoodpudivost
- Za teploty 20 °C jsou to pevné látky s různou konzistencí od měkké pastovité až po tvrdé a křehké
- Nad bodem tání mají relativně nízkou viskozitu
- Tát začínají kolem 40–120 °C
- Konzistence a rozpustnost jsou velice závislé na teplotě
- Mají velmi malou odolnost vůči abrazivnímu opotřebení (sklon k poškrábání)
- Nízká tepelná a elektrická vodivost
- Hoří žlutým plamenem

## 5.2 Rozdělení vosků

Obr. 5.1. Rozdělení vosků



Zdroj: [20]

Značná část průmyslově zpracovaných vosků se nepoužívá v čisté formě, ale jako voskové směsi. Fyzikální a chemické vlastnosti různých druhů vosku lze poměrně volně kombinovat pomocí směsí různých vosků a přidáním aditiv, například viskozitu a teplotu tání parafinových vosků lze zvýšit na požadovaný stupeň smícháním s polyolefinovými vosky. [20]

## 5.3 Přírodní vosky a pryskyřice

Přírodní vosky jsou tvořeny biochemickými procesy a jsou produktem metabolismu živočichů a rostlin. Mezi přírodní vosky řadíme také všechny ropné a fosilní (zemní vosky). [20]

### 5.3.1 Včelí vosk

Vosk včely medonosné obsahuje až 284 složek, 111 z nich jsou těkavé látky. Nejvýznamnější podíl tvoří nasycené a nenasycené monoestery a diestery nasycených a nenasycených

uhlovodíků, volných mastných kyselin a hydroxypolyesterů. Jako příklad komplexního složení přírodních vosků je níže uvedena tabulka 5.1.[17]

Tab. 5.1. Frakce včelího vosku

Frakce	Podíl frakce (%)	Počet složek ve frakci		Poznámka
		hlavní	vedlejší	
Uhlovodíky	14	10 (5)	66	nasyčené uhlovodíky C13-39 (cca 66%); cis-alkeny C31-33; rozvětvené uhlovodíky nemetabolizovatelné běžnými mikroorganismy
Monoestery	35	10 (7)	10	hlavně kyselina palmitová s C <sub>24-32</sub> alkoholy
Diestery	14	6(5)	24	obsahují 15-hydroxypalmitovou kyselinu vázanou $\alpha, \omega$ 1-dioly s palmitovou nebo nenasycenou kyselinou
Triestery	3	5	20	obsahují 2 hydroxykyseliny nebo hydroxykyselinu s diolem uprostřed
Hydroxymonoestery	4	6 (1)	20	estery diolu s kyselinou nebo hydroxykyselinou s jednosytným alkoholem (C40-50) hydroxypolyestery mají větší molekulovou hmotnost a délku řetězce
Hydroxypolyestery	8	5	20	
Estery kyselin	1	7	20	hl. estery kys. 15-hydroxypalmitové s C <sub>32-44</sub>
Polyestery kyselin	2	5	20	dtto, ale řetězec je delší
Volné kyseliny	12	8(3)	10	hlavně C <sub>24</sub> , méně C <sub>26</sub> a C <sub>28</sub>
Volné alkoholy	1	5	?	
Neidentifikované	6	7	?	
<b>Celkem</b>	<b>100</b>	<b>74</b>	<b>&gt;210</b>	

Zdroj: [17]

Pokud se zvýší teplota včelího vosku na hodnotu kolem 100 °C po dobu 24 hodin, výrazně se změní jeho chemické vlastnosti, klesá obsah těkavých složek a mění se poměr mezi estery a kyselinami, přičemž dojde také ke změně fyzikálních vlastností. [17]

Tento vosk měl v počátcích slévárenství při výrobě vytavitelných modelů dominantní podíl. Dnes se včelí vosk v průmyslovém slévárenství nepoužívá, ale využívá se stále například při výrobě uměleckých děl a replik a také jako složka stomatologických a lepících vosků. Včelí vosk ve směsích působí jako změkčující složka a má významný vliv na hladkost povrchu modelu. [17][23]

### 5.3.2 Cerezin

Cerezin je bílo-žlutá voskovitá směs uhlovodíků, která se připravuje extrakcí a čištěním minerálního, fosilního vosku ozokeritu (archaicky zemního vosku). Vytěžený, surový ozokerit

se zahřeje nad teplotu tání a vyčistí se od zeminy a tuhých nečistot, dále se rafinuje a filtruje, čímž vznikne čistý cerezin. Ve směsích se cerezin používá ke zvýšení teploty tání a ke zvýšení tvrdosti. [19][20][22]

### **5.3.3 Karnaubský vosk**

Je vosk získávaný z listů karnaubské palmy ze severovýchodu Brazílie. V modelářských směsích se karnaubský vosk používá ke zvýšení teploty tání a ke zvýšení tvrdosti. Tento vosk je dobře brousitelný. [22][20]

### **5.3.4 Montánní vosk**

Montánní vosk je rostlinný fosilní vosk, který tvoří část extrahovatelných živichných složek hnědého uhlí a rašeliny. Složení závisí na rostlinném původu a geologických podmínkách. Pokud vytěžená bitumenová směs obsahuje více než 60% podíl vosku, nazýváme takovou směs surovým montánním voskem. Největším producentem této suroviny je Německo. [20]

Rafinace montánního vosku probíhá ve třech krocích: extrakce pryskyřic, oxidační bělení, deprivatizace.[20]

Montánní vosk byl jednou z hlavních složek vytavitelných slévárenských směsí. Charakteristické vlastnosti jsou vysoká tvrdost, houževnatost a nízký interval tuhnutí. Dnes je tento vosk často nahrazován syntetickými vosky. [20][23]

### **5.3.5 Parafínový vosk**

Jedná se o vedlejší produkt, který vzniká při vakuové destilaci ropy. Parafínové vosky jsou nejvíce průmyslově vyráběnými vosky, jejich celosvětová produkce činí přibližně 3 mil. tun ročně, což odpovídá zhruba 90% podílu produkce všech vosků.[20]

Parafínové vosky se dodávají v různých tvrdostech, tají v rozmezí 40–70 °C, po ztuhnutí se vyznačují velkou kontrakcí mezi 10–15 %, z toho důvodu se ke zlepšení vlastností přidávají další druhy vosků a plniv.[21][22]

### **5.3.6 Další přírodní vosky**

Lanolin, šelakový vosk, kandelilový vosk, vorvaňovina aj. [22]

### 5.3.7 Kalafuna

Kalafuna je složka přírodní pryskyřice z jehličnatých stromů, zejména z borovice. Získává se destilací surové pryskyřice, kdy se za teplot 100 až 160 °C oddělují esenciální oleje a zůstává tekutá kalafuna, která odtéká otvorem na dně destilačního zařízení. Skládá se z mnoha slabých pryskyřičných kyselin, zejména kyseliny abietové. Za pokojové teploty je kalafuna tuhá a inertní, za vysokých teplot reaguje silně kysele a narušuje vrstvy oxidů kovů, čehož se využívá např. při pájení v elektrotechnice. [18]

Kalafuna se do voskových směsí přidává především z důvodu prodloužení intervalu tuhnutí. Využívá se také jako významná složka lepících vosků pro spojování vytavitelných modelů. [21]

### 5.3.8 Využití přírodních vosků

Přírodní vosky mají velký význam v tradičním slévárenství při odlévání vytavitelných modelů a jsou základní složkou stomatologických a klenotnických vosků. V aditivní výrobě však tyto vosky využití téměř nemají, protože se vyznačují proměnlivým složením a velkým podílem těkavých látek, jejichž úbytek mění vlastnosti směsí. Během opakovaného tavení přírodních vosků se oddělují různé frakce, což má vliv na nehomogenitu směsi. Proto jsou pro aditivní výrobu vhodnější syntetické vosky. [22][20]

## 5.4 Částečně syntetické vosky

Pokud se přírodní vosky nebo voskovité materiály upravují chemickými reakcemi, jako je esterifikace, amidace nebo neutralizace kyselých vosků (vodnými hydroxidy alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin), získají se částečně syntetické vosky, které lze přizpůsobit konkrétním aplikacím. [20]

## 5.5 Syntetické vosky

Plně syntetické vosky byly vyvinuty na začátku 20. století. Tyto vosky mají dvě hlavní skupiny: polyolefinové vosky a Fischer–Tropschovo vosky (syntetické parafíny). U syntetických polymerů lze změnami délky polymerního řetězce a stupni rozvětvení měnit důležité vlastnosti jako teplotu tání, tvrdost, krystalinitu, viskozitu taveniny a další vlastnosti, a tím vyrobit materiály přímo určené pro konkrétní aplikace. [20][12][13]

### 5.5.1 Polyolefinové vosky

Polyolefiny jsou polymery vyrobené z jednoduchých olefinových uhlovodíků, které se získávají jako samostatné frakce při destilaci ropy. Největší technický význam mají polyetylén (PE) a polypropylén (PP), což je největší skupina produkovaných plastů a druhá největší skupina vosků. V materiálech pro aditivní výrobu vytavitelných modelů je často využíván polyetylénový vosk, který lze vyrábět s různými vlastnostmi pro širokou škálu průmyslových aplikací. [12][20]

Vysokotlaké polyetylénové vosky se vyrábí podobně jako vysokotlaký polyetylénový plast, za zvýšeného tlaku a zvýšené teploty v přítomnosti radikálových činidel. U vosků jsou molární hmotnosti podstatně nižší než u plastů, proto se během polymerace rozsah molární hmotnosti upravuje přidáním regulátorů. [20]

PE vosky mají velmi univerzální vlastnostmi, mohou být syntetizovány změnou hustoty a molární hmotnosti homopolymerů a funkcionalizací polyethylenu kopolymerací s různými monomery (např. vinylacetátem nebo kyselinou akrylovou) nebo oxidací taveniny. [20]

Protože jsou PE vosky poměrně levné, mají širokou použitelnost, konzistentní vlastnosti a jsou vyráběny v dostatečném množství, vytlačily v mnoha oblastech drahé přírodní vosky, jako jsou např. karnaubský a montánní vosk. [20]

Vlastnosti PE vosků [26]:

- Vysoká chemická odolnost
- Nízká hustota
- Nízká křehkost a vysoká hodnota protažení
- Vynikající tepelná stabilita
- Dobré lubrikační vlastnosti
- Nízká nasákavost
- Vysoká teplota tání a bod měknutí
- Vysoká kompatibilita s jinými vosky
- Nízká cena

### 5.5.2 Fischer–Tropschovo vosky (syntetické parafíny)

Tyto syntetické vosky vznikají jako produkt Fischerovo–Tropschovo syntézy. Jedná se o proces, ve kterém se přeměňuje směs oxidu uhelnatého a vodíku na kapalné uhlovodíky za přítomnosti kovových katalyzátorů (kobalt, železo, ruthenium), při teplotách 150 – 350 °C a tlaku několik jednotek MPa. Tento proces objevili němečtí chemici Franz Fisher a Hans Tropsch v roce 1925. Hlavní suroviny pro FT syntézu jsou uhlí, biomasa a zemní plyn. [25]

Fischer – Tropochovo vosky sestávají z  $n$ -parafinů s délkou řetězce mezi 20 a 50 atomy uhlíku. Vosky s průměrnou molární hmotností 400 g/mol jsou označovány jako měkké a vosky s průměrnou molární hmotností 700 g/mol jako tvrdé. Parafiny mají jemnou krystalickou strukturu a kvůli úzkému rozsahu molární hmotnosti, malý rozsah tání a velmi nízkou viskozitu taveniny. Bod tuhnutí, hustota a tvrdost se zvyšují se zvyšující se střední molární hmotností. Nízká molární hmotnost ve srovnání s polyolefinovými vosky je důvodem určité vzájemné přemístitelnosti krystalických vrstev a s tím spojené leštitelnosti. [20]

Syntetické parafiny jsou plně kompatibilní s rafinovanými vosky, polyolefinovými vosky a většinou rostlinných vosků. Jsou rozpustné při zvýšené teplotě v obvyklých voskových rozpouštědlech (např. Nafta, terpentýn a toluen) za vzniku čirých roztoků. Přídavek 10 - 20% syntetického parafinu do jiných vosků zvyšuje jejich bod tuhnutí a tvrdost bez významného ovlivnění viskozity taveniny. [20]

## 5.6 Mikronizovaný vosk

Voskové směsi pro další využití se zpracovávají do formy bloků, šupin, granulátu, drátů, folií atd. Speciální formou je mikronizovaný vosk ve formě prášku o velikosti částic od jednotek  $\mu\text{m}$ . Tyto vosky se využívají v nátěrových hmotách, některých inkoustových pigmentech, hydrofobních prostředcích, v textilním průmyslu, různých leštidlech a mimo jiné také jako plnivo ve vytavitelných fotopolymerech. [15]

Mikronové vosky se vyrábí různými technologiemi jako např. drcením a mělněním tvrdého vosku, lámáním tenkých folií aj. Nejběžnější metodou je zmrazování kapiček vosku během rozprašování. [15]

Mikronizovat lze většinu druhů přírodních i syntetických vosků.

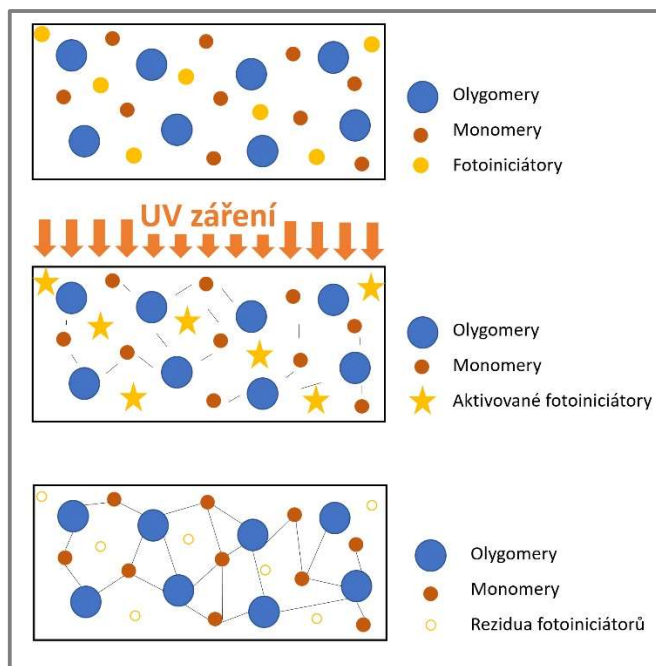
# 6 Fotopolymery

## 6.1 Princip fotopolymerace

Termínem fotopolymery (fotopolymerní pryskyřice, UV pryskyřice) označujeme takové druhy látek, které po aktivaci světelným zářením mění své fyzikální a chemické vlastnosti tím, že vytvářejí prostorově zesíťované makromolekulární struktury (obr. 6.1). Hlavním zdrojem aktivační energie je ultrafialové záření, které způsobuje rozklad fotoiniciátorů na reaktivní částice (radikály, elektrofilily, nukleofilily). Tyto částice stojí za typem reakcí v polymerech, jako jsou radikálová, aniontová nebo kationtová reakce, více viz. kapitola 4.2. [14][27]



Obr. 6.1. Schéma polymerace aktivované UV zářením.



Zdroj: [http://www.signindustry.com/flatbed\\_UV/articles/2008-11-17-SGIA\\_Primer\\_on\\_UV-Curable\\_Inkjet\\_Inks.php3](http://www.signindustry.com/flatbed_UV/articles/2008-11-17-SGIA_Primer_on_UV-Curable_Inkjet_Inks.php3)

Běžně fotonymerní směsi obsahují velké množství složek jako např. monomery, oligomery, pojiva, plniva, změkčovadla, iniciátory, stabilizátory a mnoho dalších. V obecné teorii si vystačíme se třemi základními složkami:

**Oligomery** – jsou molekuly, které jsou složeny z 2 až 10 částic monomeru. Oligomery ve vytvořeném fotonymerním systému určují hlavní mechanické vlastnosti jako jsou pevnost, pružnost, chemická odolnost. Obvykle se jedná o epoxidy, urethany, polyethery či polyestery, z nichž každý propůjčuje materiálu specifické vlastnosti. [27][28]

**Monomery** – určují rychlost a hustotu zesíťení, viskozitu pryskyřice, povrchové vlastnosti. Jedná se například o akryláty či styreny.[28]

**Fotoiniciátory** – přeměňují energii záření na chemickou tím, že tvoří reaktivní částice, které iniciují chemické reakce.

Tab. 6.1. Příklady fotoiniciátorů

Radikálové fotoiniciátory	Kationtové fotoiniciátory
Isopropylthioxanthon	Diaryljoniové soli
Benzofenon	Triarylsulfoniové soli
2,2-Azobisisobutyronitril	
1-Hydroxycyclohexyl phenyl keton	

Zdroj [14]

Fotopolymery se využívají v mnoha tiskových technologiích, především ve stereolitografii a jiných opticky vytvrzovacích systémech. Materiály pro 3D tisk musí být navrženy tak, aby měly dostatečnou pevnost a po vytvrzení minimální rozměrové smrštění, aby se zabránilo rozměrovému zkreslení vytvrzených objektů. Běžně se využívají monomery akrylátů a methakrylátů s radikálovými iniciátory. Tyto materiály však mají velké rozdíly v objemu zesíťované a nezesíťované směsi, proto se mísí s velkým množstvím plniv, které objemové smrštění výrazně snižují. [29]

Také se hojně využívají epoxidové pryskyřice, které jsou vytvrzovány kationtovými iniciátory. Výhodou epoxidových pryskyřic je jejich vysoká pevnost, malé objemové smrštění, ale za cenu dlouhého času polymerace. Používají se také kombinované systémy, kdy směs obsahuje radikálové i kationtové iniciátory a jako základ epoxidové i akrylátové částice, které po zesíťování vytvoří kompozitní materiál s vysokou rychlostí vytvrzení akrylátu a malým smrštěním a dobrými mechanickými vlastnostmi epoxidové matrice. [28]

Zásadní výhodou fotopolymerních pryskyřic je jejich schopnost lokální polymerace jen v místech exponovaných světlem. Při expozici fotopolymerních pryskyřic ostře ohraničeným paprskem světla, může být hranice mezi ozářenou a polymerovanou oblastí jen několik jednotek  $\mu\text{m}$ , což je důvod, proč si tyto materiály vysloužily své místo v aditivní výrobě. [28][11]

## 6.2 Fotopolymerní pryskyřice plněné voskem

Pro aditivní výrobu vytavitelných modelů jsou vyvíjeny speciální pryskyřice s voskovými plnivými. U těchto směsí tvoří fotopolymerní pryskyřice matrici a částice mikronizovaného vosku vytavitelnou složku systému. Voskové částice se neúčastní polymerní reakce, polymeruje pouze pryskyřice.

Tyto pryskyřice mají obvykle horší schopnost vytavení a vyhoření oproti slévárenským voskovým směsím, což je zapříčiněno tím, že matrice z reaktoplastu není teplem tavitelná. Obvykle je zapotřebí formy vypalovat za vyšších teplot. V poslední době se však charakteristiky vytavitelných fotopolymerů výrazně zlepšují a přibližují se voskům. Například německý výrobce 3D tiskáren Envisiontec uvádí že v jeho vytavitelné směsi je obsaženo až 90 % vosku. Na obrázcích 6.2. a 6.3. jsou zobrazeny modely vytištěné z fotopolymerní pryskyřice plněné voskem. [31]

Obr. 6.2. 3D model zubní protézy z fotopolymerní pryskyřice plněné voskem



Zdroj: <https://envisiointec.com/case-studies/dental/ssk-dental/#>

Obr. 6.3. 3D model prstenů z fotopolymerní pryskyřice plněné voskem



Zdroj: <https://envisiointec.com/3d-printing-materials/castable/easy-cast-2-0-c/>

Fotopolymerní pryskyřice se používají v tiskárnách založených na selektivním ozařování světlem, čímž zejména u SLP zařízení vzniká velké množství tepla, které v místech expozice zahřívá pryskyřici až na teploty kolem 80°C. Proto je nutné fotopolymerní pryskyřice plnit vosky, které těmto teplotám odolají, aniž by se částice vosku roztavily či spekly. Zvýšeným provozním teplotám vyhovují některé voskové materiály ze skupiny polyolefinů. [30]

Nevýhodou voskem plněných pryskyřic je jejich malá adheze k tiskové platformě. Další velkou nevýhodou je malá pevnost stavěných modelů, což musí být kompenzováno umístěním většího množství podpěr. [31]

## 7 3D tiskové technologie

Existuje mnoho 3D tiskových technologií s podporou různých tiskových materiálů a využitím pro různé sektory trhu od jednoduchých osobních FDM tiskáren pro domácí použití až po vysoce specializované stroje pro průmyslové či lékařské účely.

V této práci se zaměřujeme jen na tiskové technologie, které mají využití při aditivní výrobě vytavitelných slévárenských modelů ve velmi vysokém rozlišení, což nachází praktické uplatnění při zhotovování drobných odlitků viz kapitola 3.4.

### 7.1 Technologie pro 3D tisk vytavitelných termoplastů

Při 3D tisku termoplastů využíváme toho, že materiál můžeme převést do stavu taveniny a postupně přesně řízeným umístěním jednotlivých kapek poskládat trojrozměrný objekt.

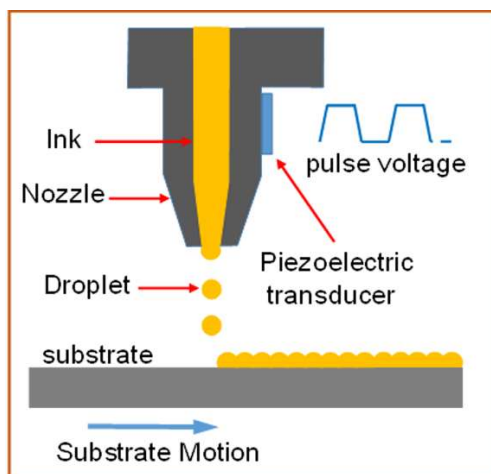
Materiály pro využití v této technologii musí mít kromě slévárenských vlastností viz. 3.5. také další vlastnosti jako např. dobrou adhezi k substrátu, odpovídající viskozitu a povrchové napětí a mimo jiné také dobrou třískovou obrobitelnost.

#### 7.1.1 DOD technologie

Technologie Drop on Demand (DOD) vychází z původní technologie 2D inkoustového tisku. Jedná se o technologii tisku, při které tisková tryska dodává přesně velké kapky inkoustu v přesně řízených intervalech na podkladový substrát, kterým je obvykle papír. V aditivní technologii je inkoust nahrazen termoplastickým materiálem, který je ve všech fázích tiskového procesu udržován v tekutém stavu. Materiál je roztaven ve vyhřívané nádrži, ze které je odváděn vyhřívanými linkami k vyhřívané trysce, a až na podkladovém substrátu ztuhne v podobě čoučkovité kapky. Z jednotlivých kapek je pak složen prostorový obrazec o určité výšce „h“ (výška vrstvy). [32][33]

Dávkování materiálu procházejícího tryskou je přesně řízeno piezoelektrickým převodníkem, který s využitím nepřímého piezoelektrického jevu převádí elektrické pulzy na mechanickou rezonanci (obr. 7.1). Pomocí elektronického řízení lze ovlivnit velikost kapek (amplituda pulzů) a frekvenci kapání (frekvence pulzů). [32]

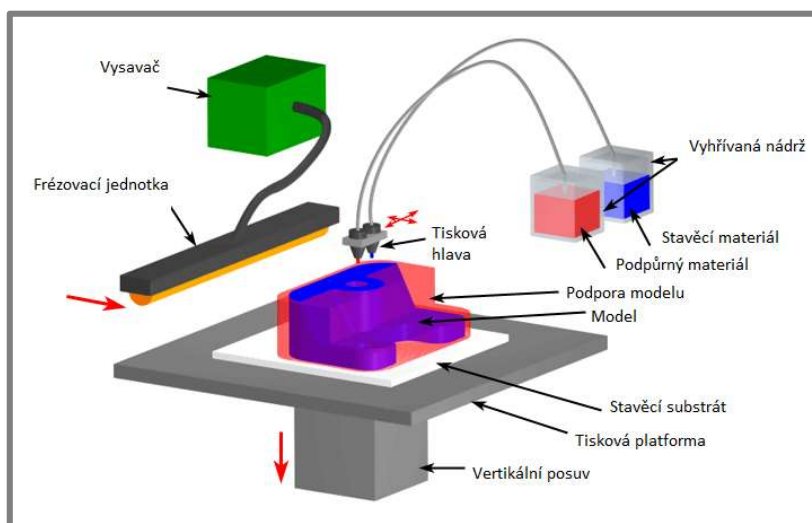
Obr. 7.1. Tisková tryska využívající piezoelektrický jev



Zdroj: <https://phys.org/news/2015-05-inkjet-kesterite-solar-cells.html>

Po vytištění a ztuhnutí je povrch každé jednotlivé vrstvy zarovnan horizontální vřlcovou frézou na přesně určenou výšku, na kterou navazuje další vrstva. Frézovací jednotka je připojena k vysavači, který je spínán současně s pohonem frézy.

Obr. č. 7.2. Tiskárna DOD se jednou stavěcí tryskou



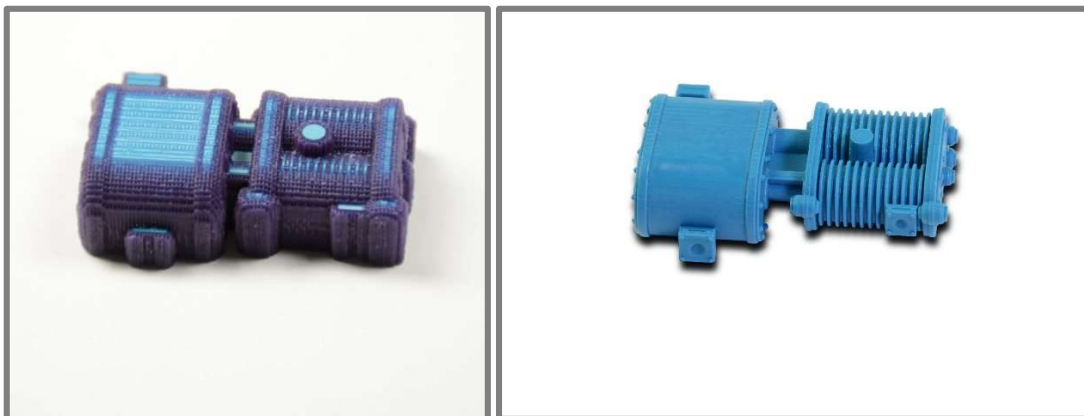
Zdroj: <https://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>

Tyto 3d tiskárny mají v tiskové hlavě umístěny dvě samostatně řízené trysky. Jedna tryska slouží k tisku základního stavěcího materiálu a druhá tryska k tisku podpůrného materiálu. Stavěcí i podpůrný materiál jsou termoplastické směsi na bázi vosku s velkým počtem komponent. Každý z těchto dvou materiálů je navržen tak, aby měl jinou odolnost vůči organickým rozpouštědlům a aby bylo možné podpůrný materiál selektivně rozpustit. Na

obrázku 7.3. je vytištěný model s podpůrným materiálem a na obrázku 7.4. je opláchnutý model bez podpor.

*Obr. 7.3. Vytištěný model s podpůrným materiálem (obrázek vlevo)*

*Obr. 7.4. Čistý model bez rozpuštěného podpůrného materiálu (obrázek vpravo)*



Zdroj: <https://www.multistation.com/en/product/solidscape-s500/>

Přesné tiskárny s DOD technologií disponují automatickou kalibrací množství dodávaného materiálu a kalibrací pozice trysek. Před tiskovou úlohou jsou u každé trysky ověřeny souřadnice polohy a překalibrovány hodnoty vstupního napětí na piezu. Během tiskové úlohy se po každé vytištěné vrstvě kontroluje soutisk obou trysek. K tomuto účelu je v tiskové hlavě instalovaná kamera, která soutisk snímá. Pokud elektronický systém vyhodnotí obraz z kamery za neshodný, tiskárna spustí auto-kalibrační a čistící sekvenci a po provedené re-kalibraci se vrací k tisku.

Tento typ zařízení vyrábí společnost Solidscape. V současné době má firma v nabídce čtyři modely řady S, které mají tiskovou platformu o rozměrech cca 152 x 152 mm, tiskové rozlišení 5000 DPI (dots per inch), což odpovídá rozlišení 197 x 197 bodů na 1 cm<sup>2</sup>. Tiskárny se liší produktivitou tisku a možnostmi nastavení tisknutelné výšky vrstev, která u některých modelů začíná už na 6,35 μm. [34]

Popsaná DOD metoda patří k nejpřesnějším technologiím 3D tisku, ale kvůli vysokým cenám materiálu a provozních nákladů, nízké produktivitě a možnosti tisku jen velmi malých předmětů se tyto tiskárny nejvíce uplatňují v klenotnickém sektoru.

### **7.1.2 MJP – multijet printing**

Tyto 3d tiskárny využívají také tiskové trysky s piezoelektrickým buzením, avšak v tiskové hlavici je místo jedné trysky na stavěcí materiál a jedné trysky na podpůrný materiál instalováno těchto trysek paralelně několik (řádově desítky až stovky). Díky velkému počtu

trysek je tiskárna výrazně výkonnější a tisk produktivnější. Tyto tiskárny mají větší plochu tiskové platformy než tiskárny s jednou tryskou, proto je na nich možné vyrábět větší součásti.

Rozdíl MJP oproti DOD s jedinou stavěcí tryskou je v tom, že pokud je řízeno polohování pouze u jedné trysky, může tato tryska vykreslovat obraz vrstvy součásti ve křivkách, čímž je dosaženo hladších linií oproti technologii MJP, která obraz vykresluje v rastrové struktuře.

Vývojem a výrobou tohoto typu tiskáren se zabývá např. společnost 3D Systems. Produkty, které vyhovují požadavkům tisku vysoce detailních vytavitelných modelů jsou např. tiskárny ProJet MJP 2500W, ProJet MJP 3600W, ProJet MJP 3600W Max. Všechny uvedené tiskárny staví modely s výškou vrstvy od 16  $\mu\text{m}$  a liší se produktivitou tisku a velikostí platformy. [35]

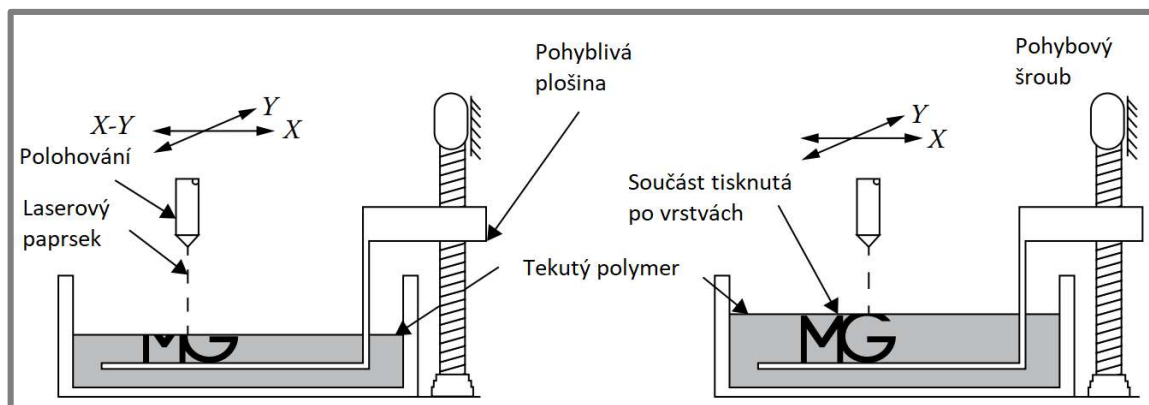
## 7.2 Technologie pro 3D tisk fotopolymerů

V roce 1984 přišel Charles Hull, spoluzakladatel společnosti 3D Systems s novou koncepcí aditivního výrobního procesu, který využívá k výrobě součásti selektivně vytvrzovanou fotopolymerní pryskyřici. Proces se nazývá SLA (stereolitografie), což znamená doslova „prostorové psaní“. Tato technologie se stále vyvíjí a patří k nejrozšířenějším 3D tiskovým technologiím. [38][37]

### 7.2.1 SLA technologie

SLA je první komerčně vyráběná technologie 3D tisku. Tato technologie RP je založena na vytvrzování tenkých vrstev pryskyřice světelným paprskem. Zdrojem světla je UV laser, jehož pohyb je řízený ve dvou osách elevačním zrcadlovým systémem. Po vytvrzení každé vrstvy je plošina s modelem posunuta o výšku jedné vrstvy směrem ke dnu, nebo naopak ode dna nádoby, to záleží na provedení SLA tiskárny. Je-li model tisknut tak, že jsou jednotlivé vrstvy vytvrzovány na hladině a stavěný model je ponořen v pryskyřici, nepůsobí na model gravitační síly a síly potřebné k odtržení modelu ode dna vany. Tato metoda je proto vhodná pro tisk velkých a objemných modelů. Na obrázku 7.5. je znázorněna SLA tiskárna v původním provedení s horním vytvrzováním pryskyřice. [38]

Obr. 7.5. Princip SLA tisku s vrchním vytvrzováním pryskyřice



Zdroj: [38]

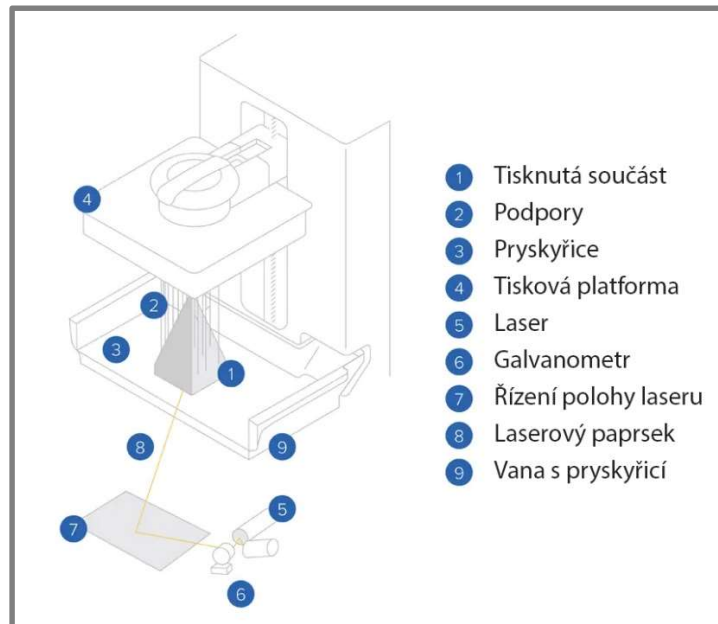
Postup sestavení modelu:

1. Laserový paprsek vykreslí obraz vrstvy, čímž dojde k vytvrzení fotopolymeru o výšce, která je mezi hladinou nádrže a plošinou
2. Plošina po vytvrzení sestoupí o výšku jedné vrstvy
3. Laserovým paprskem je vykreslena další vrstva, které navazuje na vrstvu z předchozího kroku
4. Tento proces se opakuje, dokud není postavena celá součást

Daleko častěji je dnes využívána metoda SLA se spodní světelnou expozicí, kdy laserový paprsek prosvítá skrz skleněné dno vany a vytvrzuje vrstvy modelu ze spodu. Tento systém je výhodný u drobných předmětů, protože rovné skleněné dno, zajistí výbornou rovinnost vytvrzené plochy. Velkou nevýhodou je namáhání tisknuté součásti gravitační silou a tahovou silou, která je nutná k odtržení vytvrzené pryskyřice ode dna vany, to je nutné dodatečně řešit vhodným dimenzováním podpěr. [31][37]



Obr. 7.6. SLA tiskárna se spodním vytvrzováním pryskyřice

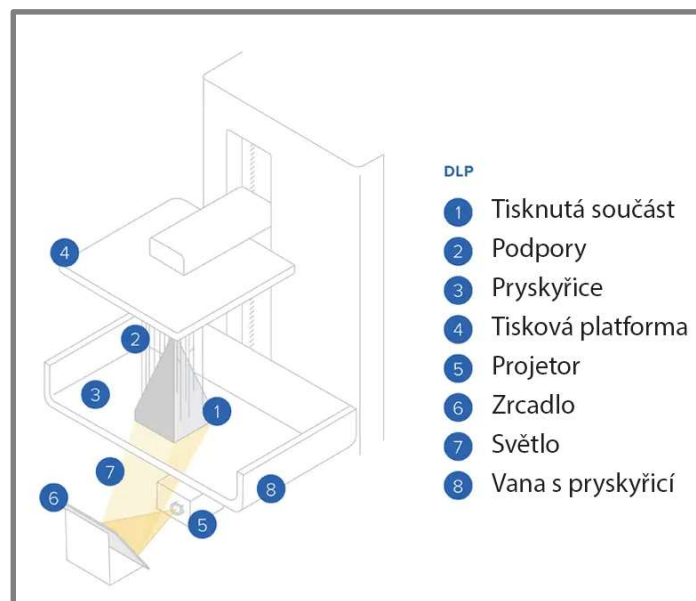


Zdroj: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>

### 7.2.2 DLP technologie

Digital light processing je tisková technologie, která konstrukčně vychází z původní metody SLA, ale místo UV laseru využívá jako zdroj vytvrzujícího světla dataprojektor o vysokém rozlišení. Tato technologie se vyznačuje rychlejším vytvrzováním vrstev, protože dataprojektor osvítí celou vrstvu najednou, n rozdíl od laserového paprsku, který jednotlivé vrstvy vykresluje.[37][38]

Obr. 7.7. DLP tiskárna



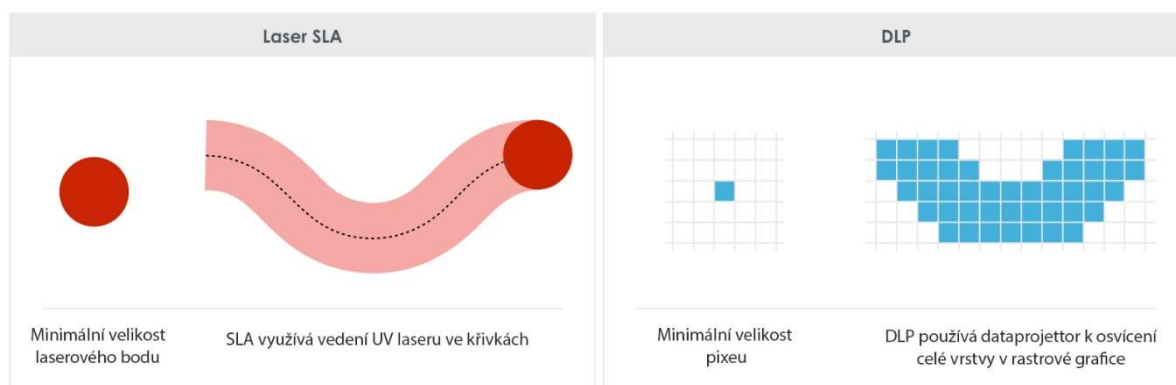
Zdroj: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>

### 7.2.3 Porovnání SLA a DLP

Základním rozdílem, jak již bylo popsáno je způsob světelné expozice. SLA vedením laserového bodu vykresluje obraz vrstvy ve křivkách, čímž lze docílit hladkých kontur. DLP osvětluje souvisle obraz celé vrstvy v rastrové grafice, což má za následek vytváření pryskyřice v kvádrových voxidech. [37]

U SLA je rozlišení zcela nezávislé na velikosti tisknutého modelu, respektive plochy vrstvy modelu. U DLP je podstatné, jakou plochu projektor osvětluje – čím menší je plocha na kterou projektor promítá obraz, tím menší je velikost jednotlivých pixelů a obraz má hladší kontury.

Obr. 7.8. Vykreslení obrazu SLA vs. DLP



Zdroj: <https://theorthocosmos.com/laser-sla-vs-dlp-vs-masked-sla-3d-printing-technology-compared/>

V minulosti se považovaly SLA tiskárny kvůli hladšímu obrysu vrstev za vhodnější pro přesný a hladký tisk detailních modelů. S rostoucím rozlišením dataprojektorů (Full HD, 4K, 8K) se tyto rozdíly ztrácí. Některé společnosti přicházejí s dalšími možnostmi, jak obraz z dataprojektorů vyhladit. Například společnost Envisiontec má patentovanou technologii vyhlazování obrazu, která využívá řízeného pohybu celého projektoru ve dvou osách o 0,5 pixelu, čímž je možné dosáhnout výrazného vyhlazení kontur. [36]

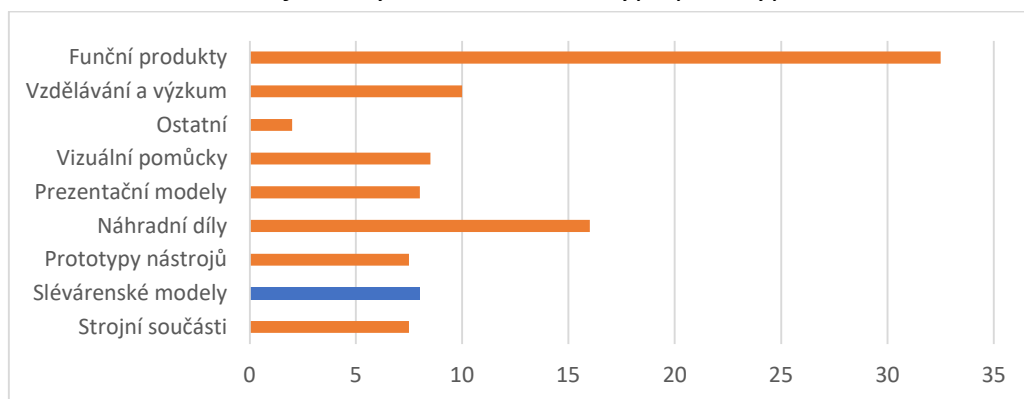
## 8 Ekonomická analýza odvětví RP ve slévárenství

Využívání technologie RP je v mnoha průmyslových sektorech dnes již standardem, ale i přes značné rozšíření zažívá toto odvětví stále výrazně rostoucí trend. Každý výrobní podnik má své specifické požadavky na výrobu prototypů, proto existuje mnoho typů a tříd fyzických prototypů. Hlavní společnou motivací však je minimalizovat riziko, náklady a čas během procesu vývoje produktu. [38]

Níže jsou vyjmenované některé základní typy prototypů vyráběných pomocí 3D tisku:

- Vizualizace konstrukčního konceptu
- Testování výrobků, přizpůsobení a ověření funkcí
- Ověřování technických změn
- Prezentace návrhu klientům
- Modely pro průzkumy trhu
- Modely pro certifikace
- Styling a ergonomické studie
- Formovatelné modely pro slévárenství
- Formy a nástroje pro vstřikování plastů
- Vytavitelné modely pro slévárenství

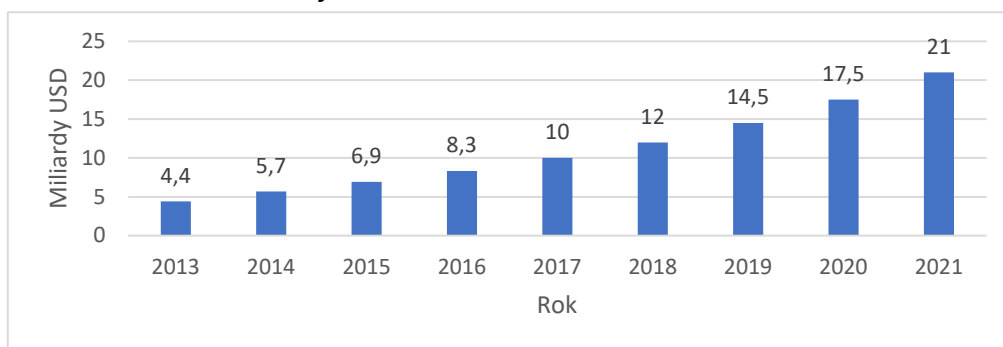
Graf 8.1. Využití 3D tisku dle typu prototypů



Zdroj: [38]

Odhaduje se, že na globálním trhu s 3D tiskárnami budou v roce 2021 prodána nová zařízení v hodnotě 21 mld. USD. viz. graf 8.2. Podíl výroby slévárenských modelů na celém sektoru 3D tisku činí zhruba 8 % viz. graf 8.1., což je hodnota, která by v přepočteném podílu činila 1,68 mld. USD, což dopovídá hodnotě všech prodaných 3D tiskáren v roce 2010. [39]

Graf 8.2. Globální trh s 3D zařízeními



Zdroj: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>

## 9 Závěr

Tato práce byla zaměřena na analýzu vytavitelných polymerních materiálů a popis 3D tiskových technologií, které takové materiály využívají. V úvodu práce je popsán proces slévárenské metody lití na vytavitelný model s důrazem na technologické postupy výroby forem a odlitků. Popis slévárenské metody umožňuje pochopit praktický význam vytavitelných modelů a dále získat představu o fyzikálních podmínkách, kterým je vytavitelný model vystaven. Součástí teoretického úvodu je popis vlastností voskových slévárenských směsí a jejich složení.

Ve stěžejní části práce byly analyzovány polymerní materiály na bázi vosků a fotopolymerních pryskyřic s voskovými plnivými. V této části byly v obecné rovině popsány polymerní materiály a popsány jejich základní vlastnosti, uvedeny příklady různých typů polymerace a vyjmenovány druhy aditiv. V další části je již detailněji popsána kategorie vosků a fotopolymerů, zejména jejich hlavní vlastnosti, složení a způsoby výroby. V závěru práce byly popsány 3D tiskové technologie v návaznosti na využití vytavitelných materiálů.

Jako primární zdroj informací byly použity učebnice chemie a strojírenské technologie zaměřené na polymery a slévárenství, dále odborné práce a články zabývající se technologiemi a materiály pro aditivní výrobu a v neposlední řadě webové stránky a katalogy výrobců zařízení a tiskových materiálů.

3D tiskové technologie přináší do slévárenského odvětví nové inovativní pohledy na konstrukční řešení forem a odlitků. Aditivní technologie nám umožňuje vyrábět součásti složitých tvarů, které by konvenčními metodami obrábění nebylo možné zhotovit. Dovoluje nám také v krátkém čase vyrábět zkušební prototypy součástí ještě před tím, než se zhotoví cenově nákladné vstřikovací formy. Slévárenští pracovníci, pracovníci slévárenských modeláren a strojní konstruktéři si rychle a ochotně přisvojili nové technologické postupy výroby odlitků s podporou aditivní výroby. Proto se aditivní výroba snadno stala nedílnou součástí slévárenského modelářství.

Vzhledem k současnému trendu digitalizace a automatizace průmyslu je velmi pravděpodobné, že se odvětví 3D tisku bude i nadále rozvíjet rychlým tempem, a to jak na úrovni technologického vývoje, tak i zvyšováním tržního uplatnění v průmyslu.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. Základy strojírenské technologie I. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-06056-8.
- [2] NĚMEC, Milan, Bohumír BEDNÁŘ a Barbora BRYKSÍ STUNOVÁ. Teorie slévání. Praha: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 978-80-01-04395-0.
- [3] HERMAN, Aleš. Lití na vytavitelný model. Praha, 2016. Studijní text. ČVUT, Fakulta strojní [cit. 2021-5-11]. Dostupné z:  
<http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
- [4] Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of art review [online]. 2018. Journal of Manufacturing Processes, 2018 [cit. 2021-5-11]. ISSN 1526-6125. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612517303225>
- [5] Developments in investment casting process—A review [online]. 2012. Journal of Materials Processing Technology, 2012 [cit. 2021-5-11]. ISSN 0924-013. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013612001823>
- [6] DOŠKÁŘ, Josef a Otakar KAŠTÁNEK. Přesné lití: výroba přesných odlitků metodou vytavitelného modelu. Praha: SNTL, 1961. Knižnice strojírenské výroby.
- [7] Investment Casting Process [online]. Tainan City: SMILE, 2020 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.smile01.com/investment\\_casting\\_process.html](https://www.smile01.com/investment_casting_process.html)
- [8] KUČERA, TOMÁŠ. ROZMĚROVÁ PŘESNOST ODLITKŮ ZE SLITIN AI VYRÁBĚNÝCH METODOU VYTAVITELNÉHO MODELU. Brno, 2008. Diplomová práce. VUT, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Vedoucí práce Doc. Ing. MILAN HORÁČEK CSc.
- [9] BURNOUT - CASTING INSTRUCTIONS [online]. Staffordshire: Specialist Refractory Services, 2021 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.srs-ltd.co.uk/technical/burnout>
- [10] GAINSBURY, Peter. Jewellery Investment Casting Machines. Gold Bulletin [online]. 1979, 8 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z:  
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF03215098.pdf>

- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011. ISBN 978-80-7080-788-0
- [12] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav. *Nauka o materiálu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2236-3
- [13] NOORANI, Rafiq. *3D Printing: Technology, Applications, and Selection* [online]. Boca Raton: Engineering & Technology, 2017 [cit. 2021-5-12]. ISBN 9781315155494. Dostupné z: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781315155494/3d-printing-rafiq-noorani>
- [14] PANDEY, Ramji. *Photopolymers in 3D printing applications*. Helsinky, 2014. Diplomová práce. Arcada. Vedoucí práce Mirja Andersson. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/38109995.pdf>
- [15] KOEN, Louis. *THE MICRONISATION OF SYNTHETIC WAXES*. Stellenbosch, 2003. Dostupné také z: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.947.7060&rep=rep1&type=pdf>. Diplomová práce. University of Stellenbosch. Vedoucí práce Izak Nieuwoud.
- [16] *What is wax?* [online]. Bruxelles: European Wax Federation, 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.wax.org/about-us/definition-type.html>
- [17] A.P. Tulloch, *Beeswax: Composition and Analysis*, 1. srpen 1980, ISBN-13 978-0860980872
- [18] FIEBACH, Klemens a Dieter GRIMM. *Resins, Natural* [online]. 6. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 200n. l. [cit. 2021-5-12]. ISBN 9783527306732. Dostupné z: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a23\\_073](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/14356007.a23_073)
- [19] CERESIN WAX. *ChemicalBook* [online]. [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: [https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_cb1303742.htm](https://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_cb1303742.htm)
- [20] ULLMANN'S *Encyclopedia of Industrial Chemistry: Wax* [online]. 7. Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015 [cit. 2021-5-12]. ISBN 9783527306732. Dostupné z: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a28\\_103.pub2](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/14356007.a28_103.pub2)
- [21] HUBÁLKOVÁ, H., KRŇOULOVÁ, J.: *Materiály a technologie v protetickém zubním lékařství*, 1. vyd. Praha: Galén, 2009. ISBN 13: 978-80-7262-581-9.

- [22] BITTNER, Jiří. Protetická technologie pro střední zdravotnické školy obor zubní technik. Praha: Scientia Medica, 2001. Učebnice pro střední zdravotnické školy (Scientia Medica). ISBN 80-85526-77-8
- [23] A Study on the Blended Wax Patterns in Investment Casting Process. World Congress on Engineering 2011. London, 2011, 2011(1), 6. ISSN 2078-0966.
- [24] FAVARO, Silvia a Antonio PEREIRA. Outstanding Impact Resistance of Post-Consumer HDPE/Multilayer Packaging Composites. *Materials Sciences and Applications* [online]. 2017, (8), 11 [cit. 2021-5-13]. ISSN 2153-1188. Dostupné z: doi:10.4236/msa.2017.81002
- [25] DE KLERK, Arno. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology: Fischer–Tropsch Process [online]. 1. John Wiley & Sons, 2013 [cit. 2021-5-12]. ISBN 9780471238966. Dostupné z: [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/0471238961.fiscdekl.a01?saml\\_referrer](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/0471238961.fiscdekl.a01?saml_referrer)
- [26] MITCHELL, John. Polyethylene Wax – uses and properties [online]. Cambridge: EngineeringClicks, 2019 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/polyethylene-wax-uses-properties/>
- [27] A Primer on UV-Curable Inkjet Inks [online]. Orlando: SIGNINDUSTRY.com, 2006 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [http://www.signindustry.com/flatbed\\_UV/articles/2008-11-17-SGIA\\_Primer\\_on\\_UV-Curable\\_Inkjet\\_Inks.php3](http://www.signindustry.com/flatbed_UV/articles/2008-11-17-SGIA_Primer_on_UV-Curable_Inkjet_Inks.php3)
- [28] CRIVELLO, James V. a Elsa REICHMANIS. Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies. Chemistry of Materials [online]. American Chemical Society, 2014, 26 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cm402262g>
- [29] WANG, Xifan a Franziska SCHMIDT. Additive Manufacturing of Ceramics from Preceramic Polymers: A Versatile Stereolithographic Approach Assisted by Thiol-Ene Click Chemistry. Additive Manufacturing [online]. 2019, [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1905/1905.02060.pdf>
- [30] STEYRER, Bernhard, Bernhard Buseti a György HARAkÁLY. Hot Lithography vs. room temperature DLP 3D-printing of a dimethacrylate, Additive Manufacturing [online]. 2018, , 21 [cit. 2021-5-13]. ISSN 2214-8604. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418300058>

- [31] The Evolution of Castable Materials. Tctmagazine [online]. 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.tctmagazine.com/additive-manufacturing-3d-printing-news/evolution-castable-materials-envisiontec-wax-3d-printing/>
- [32] LIN, Xianzhong, Reiner KLENK a Lan WANG. 11.3% efficiency Cu(In,Ga)(S,Se)<sub>2</sub> thin film solar cells via drop-on-demand inkjet printing. Energy & Environmental Science [online]. 2016, 9 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: doi:10.1039/C6EE00587J
- [33] Inkjet Printing [online]. Suite: CustomPartNet [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/ink-jet-printing>
- [34] *The best 3D printers for jewelry* [online]. Solidscape, 2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.solidscape.com/jewelry/>
- [35] *ProJet MJP, Katalog* [online]. 3D Systems, 2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2019-01/3d-systems-mjp-wax-tech-specs-usen-2019-01-11-web.pdf?ind=jewelry>
- [36] Advanced DLP: For Superior 3D Printing. <https://envisiontec.com/> [online]. EnvisionTEC, 2017 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2017/04/Why-EnvisionTEC-DLP-3D-Printing-is-Better-rebranded.pdf>
- [37] *SLA vs. DLP: Guide to Resin 3D Printers* [online]. Formlabs, 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>
- [38] NOORANI, Rafiq. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection [online]. 1. Boca Raton: CRC Press, 2017 [cit. 2021-5-13]. ISBN 9781315155494. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781315155494>
- [39] MLITZ, Kimberly. 3D printing market size worldwide from 2013 to 2021. Statista [online]. 2021 [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/796237/worldwide-forecast-growth-3d-printing-market/>



## Seznam obrázků

- Obr. 3.1. Bronzový odlitek hlavy panovníka, Mezopotámie 23. století př. n. l.
- Obr. 3.2. odlévaný zlatý hřeben s bojovou scénou, oblast Dněpru, 4. století př. n. l.
- Obr.3.3. Vstřikovací forma s výstřikem; voskový stromček; výroba keramické skořepiny
- Obr. 3.4. Vytavování vosku a vypalování keramické skořepiny (4); odlévání kovu (5)
- Obr. 3.5. Odstranění skořepiny (6); broušení odlitku (7); kontrola a měření (8)
- Obr. 3.6. Otevřené vakuové lití
- Obr. 3.7. Otevřené vakuové lití s indukčním ohřevem
- Obr. 3.8. Vakuový licí stroj s indukčním tavením a ochrannou atmosférou, Indutherm VC 500
- Obr. 4.1. Rozdělení polymerů pro 3D tisk vytavitelných modelů
- Obr. 4.2. Příklad homolytického štěpení za vzniku radikálů u fotoiniciátorů HAP (hydroxyacetofenon) a TPO (fosfinoxid).
- Obr.4.3. Schéma kationtové reakce
- Obr.4.4. Schéma aniontové reakce
- Obr. 5.1. Rozdělení vosků
- Obr. 6.1. Schéma polymerace aktivované UV zářením.
- Obr. 6.2. 3D model zubní protézy z fotopolymerní pryskyřice plněné voskem
- Obr. 6.3. 3D model prstenů z fotopolymerní pryskyřice plněné voskem
- Obr. 7.1. Tisková tryska využívající piezoelektrický jev
- Obr. č. 7.2. Tiskárna DOD se jednou stavěcí tryskou
- Obr. 7.3. Vytištěný model s podpurným materiálem
- Obr. 7.4. Čistý model bez rozpuštěného podpurného materiálu
- Obr. 7.5. Princip SLA tisku s vrchním vytvrzováním pryskyřice
- Obr. 7.6. SLA tiskárna se spodním vytvrzováním pryskyřice
- Obr. 7.7. DLP tiskárna
- Obr. 7.8. Vykreslení obrazu SLA vs. DLP

## Seznam použitých zkratk

2D	dvozměrný (dvoudimenzionální)
3D	trojzměrný (trojdimenzionální)
RP	rapid prototyping
SLA	stereolitografie
DOD	Drop on Demand
DLP	Digital Light Processing
MJP	multijet printing
PP	polypropylén
PE	polyetylén
CNC	Computer Numeric Control
FDM	Fused Deposition Modeling
UV	ultra fialové
HAP	hydroxyacetonefenon
TPO	fosfinoxid
Dsp	dílek na sto polymerů