



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA REPLIKY HLAVICE PALCÁTU

MAKING A REPLICA OF MACE HEAD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Dobrovolný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Bořil

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Tomáš Dobrovolný**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Bořil**
Akademický rok: 2019/20

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 bakalářské práce:

Výroba repliky hlavice palcátu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Palcát byl klasickým zástupcem chladných zbraní používaných výhradně jízdou. Morfologicky tvar palcátu vychází z primitivních dřevěných palic a kyjů. Palcát se skládal ze dvou částí – hlavice s válcovou tulejí a v ní zasazené dřevěné násady. Hlavice byla ve starší fázi vývoje nejčastěji odlitá z bronzu, pozdější typy již byly ocelové.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je navrhnout vhodnou technologii pro výrobu hlavice palcátu ze zvolené slitiny, z níž bude hlavice odlita.

Seznam doporučené literatury:

DOLÍNEK, V. a J. DURDÍK. Historické zbraně. 2008. Praha: Naše vojsko, 2008. ISBN 80-206-0918-0.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.

BEELEY, P.R. Foundry technology. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001, x, 719 s. : il., čb. fot. ; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.

HORÁČEK, M. Slévárenská technologie I. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

DOBROVOLNÝ Tomáš: Výroba repliky hlavice palcátu

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem vhodné technologie pro výrobu repliky hlavice palcátu. V teoretické části jsou rozebrány technologie, které budou využity při její výrobě. Počínaje technologií Rapid prototyping, jež poslouží ke zhotovení modelu až k možnostem odlévání, ať už metodou lití pomocí vytavitelného modelu nebo litím do pískové formy. V praktické části je popsáno tvoření počítačového modelu, jeho tisk pomocí 3D tiskárny a následné odlévání oběma zmíněnými metodami.

Klíčová slova: palcát, bronzové odlitky, odlévání do pískové formy, odlévání metodou vytavitelného modelu, Rapid prototyping

ABSTRACT

DOBROVOLNÝ Tomáš: Making a replica of mace head

This bachelor thesis focuses on technology for production of mace head replicas. The theoretical part analyzes the technologies that will be used in its production. Starting with Rapid prototyping technology, which will be used to build the model to casting possibilities, either by evaporating casting or sand casting. The practical part describes the creation of a computer model, its printing using a 3D printer and subsequent casting by both mentioned methods.

Keywords: mace, bronze castings, sand casting, evaporating casting, Rapid prototyping

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBROVOLNÝ, Tomáš. *Výroba repliky hlavice palcátu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124667>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Petr Bořil.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 25.6. 2020

.....

Tomáš Dobrovolný

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Petru Bořilovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

ÚVOD	9
1 Výrobní možnosti hlavice palcátu	10
1.1 Tvorba modelů palcátu	10
1.2 Technologie Rapid prototyping	13
1.2.1 Metoda FFF	13
1.2.2 Metoda SLA	16
1.3 Tisk modelů	16
2 Odlévání hlavice palcátu	17
2.1 Materiál pro odlévání	17
2.2 Odlévání do pískových forem	17
2.2.1 Výroba pískové formy	21
2.2.2 Vlastní lití do pískové formy	22
2.3 Odlévání metodou vytavitelného modelu	23
2.3.1 Výroba skořepinové formy	26
2.3.2 Vlastní lití do skořepinové formy	27
3 Dokončovací práce na hlavicích a zhodnocení	29
4 Závěry	31

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5]

Palcát, zobrazený na obrázku 1, je úderná ruční zbraň, typická především pro jezdectvo středověku a raného novověku do 17. století. Je variantou kyje a válečného kladiva, oproti nimž má výhodu – není nutno jej před úderem natáčet do správného směru. Sloužil k drcení plátů protivníkovy brnění. Jeho drtivý charakter při úderu na protivníka dovolil způsobit zlomeniny a těžké pohmožděny i přes zbroj, kterou nebylo nutné prorazit. [1, 2]

Palcát byl užíván též jako odznak moci nebo vojenské hodnosti, např. u českých husitů, ale také u kozáků nebo v armádě Osmanské říše. S palcátem v ruce bývá velmi často zobrazován Jan Žižka z Trocnova, mocný vojevůdce v husitských Čechách. [1]

Palcát se vyvinul z kyje, na dřevěný topor se začala nasazovat hlavice z kovu, nejčastěji bronzu, nebo olova a později ze slitin železa. V dobách novověku však bronzové hlavice přestaly postačovat. Hlavice se často tříštila o kvalitnější ocel brnění, avšak to vyřešil rozvoj zpracování železa a celý palcát se začal kompletně, včetně násady, kovat z oceli. [2]

Historicky se ke zhotovení palcátu tedy používaly dvě základní metody: odlévání a kování. Odlévání však historicky převažovalo, proto se práce zabývá právě tímto způsobem výroby.



Obr. 1 Různá provedení palcátu [3, 4, 5]

1 Výrobní možnosti hlavice palcátu

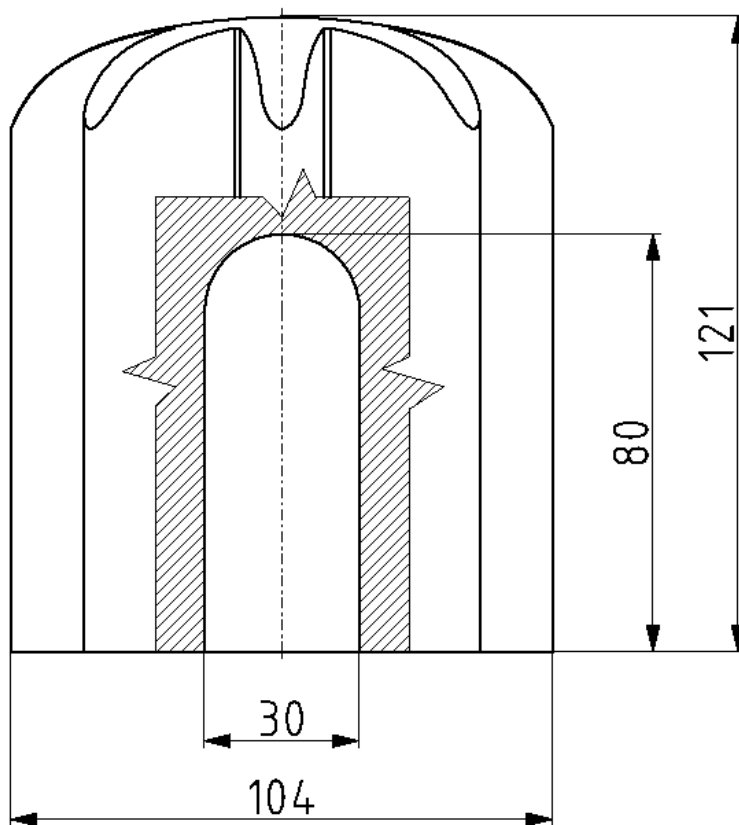
Cílem práce je odlít hlavici palcátu ze zvolené slitiny za použití vhodné technologie. Technologie byly vybrány dvě: odlévání do pískové formy, což byla skutečně historicky používaná metoda, a odlévání metodou vytavitelného modelu, dnes velmi používaná metoda, která poslouží k porovnání výsledků a rozdílů mezi metodami.

K samotnému odlévání bude zapotřebí zhotovit model, k jehož výrobě bude využito technologie Rapid prototyping. Tato technologie byla zvolena z důvodu ceny modelu, jedná se totiž jen o kusovou výrobu. Jako vstup do této technologie je zapotřebí vytvořit počítačový model.

1.1 Tvorba modelů palcátu

Model hlavice byl vytvořen virtuálně, na základě fotografií dochovaných historických palcátů (obr. 1), na obrázku 2 jsou pak znázorněny základní rozměry navržené hlavice.

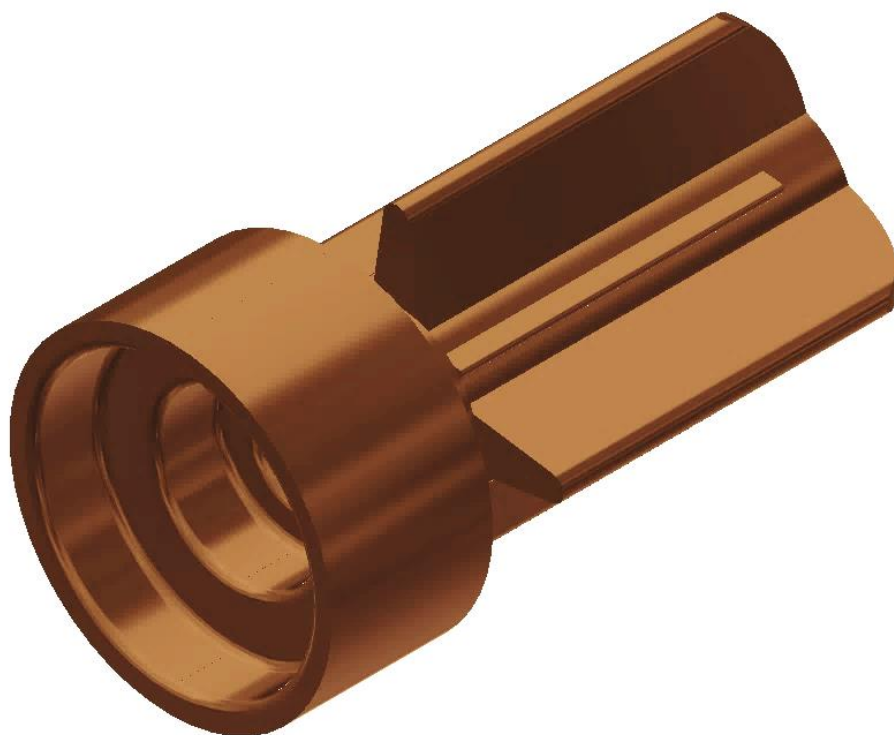
Modely byly zhotoveny dva. Hlavice na obrázku 3 poslouží k výrobě skořepinové formy. Ta na obrázku 4 pak bude použita k výrobě formy pískové, zde došlo k úpravě geometrie modelu hlavice, lze zde vidět rozšíření modelu o známku pro jádro a také chybějící čtyři žebra, ta budou z důvodu formování řešena jako volné části, viz obrázek 6, na děleném modelu (obrázek 5) jsou poté vidět díry pro kolíky, které usnadní formování, aby se modely proti sobě, např. neposunuly nebo neotočily.



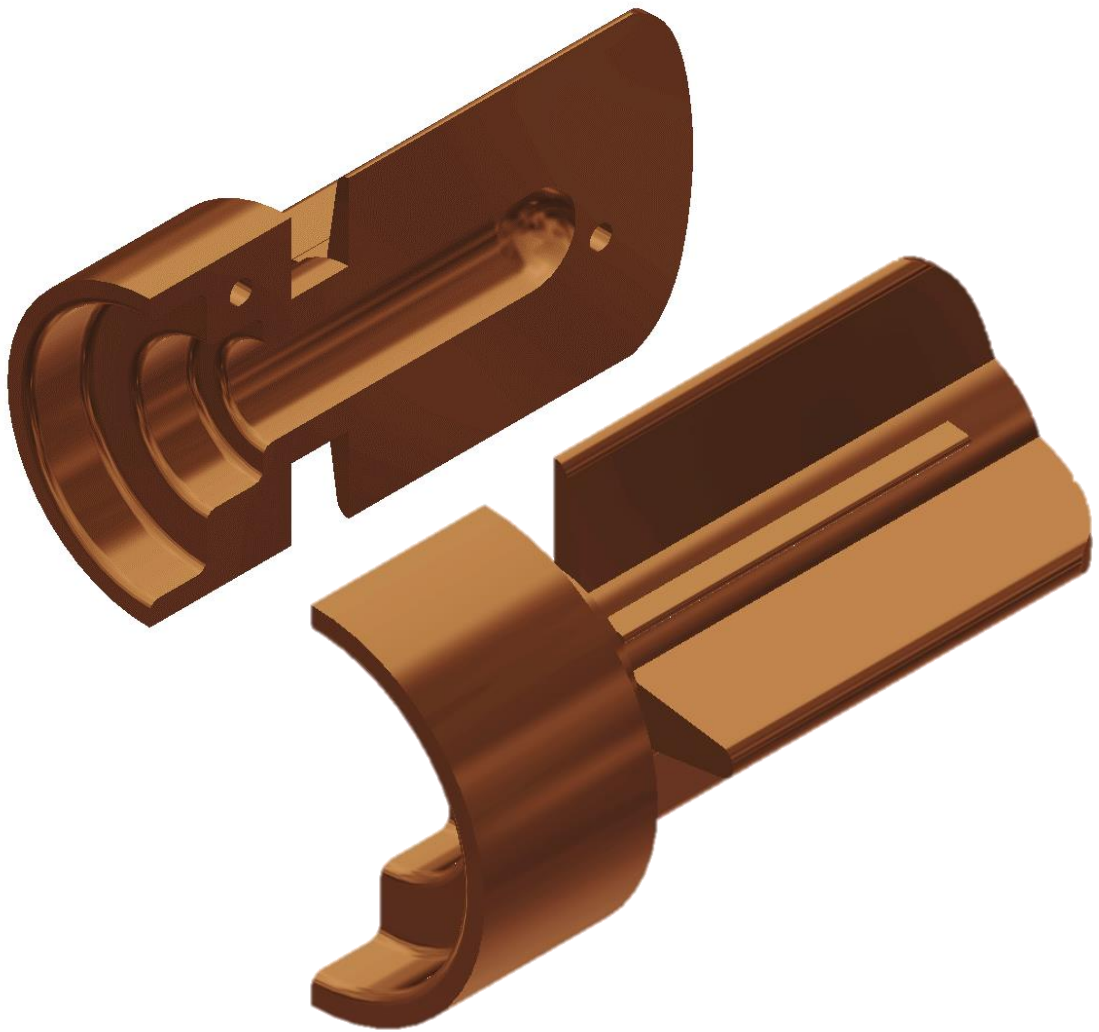
Obr. 2 Základní rozměry hlavice palcátu



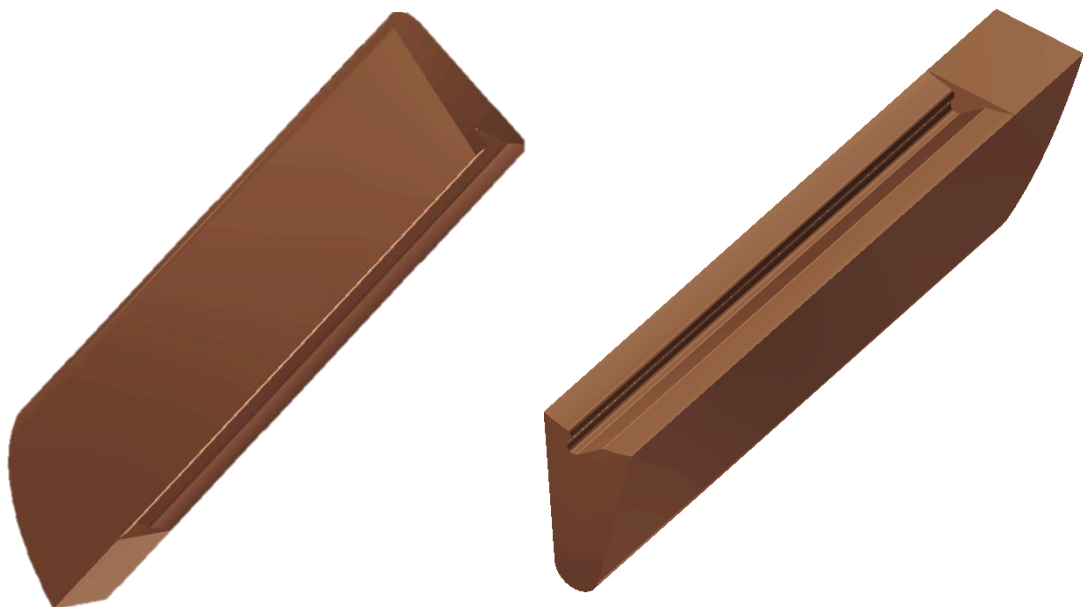
Obr. 3 Model hlavice palcátu pro lití do skořepinové formy



Obr. 4 Model hlavice palcátu pro lití do pískové formy



Obr. 5 Dělený model pro lití do pískové formy



Obr. 6 Žebra pro model do pískové formy – volné části

1.2 Technologie Rapid prototyping [6], [7], [8], [9]

Technologie 3D tisku mají dnes velký potenciál, umožňují totiž vyrábět rozličné součásti, obzvláště ty složitých tvarů. Rapid prototyping (RP) je metoda známá přibližně 30 let, umožňující rychle a přesně vyvinout výrobek z virtuálního modelu generovaného v počítačově řízeném konstrukčním programu a umožňující přímou transformaci projektu v konečný produkt pro různé účely. RP metoda je schopná skládat materiály z 3D modelu do reálného objektu, většinou skládáním vrstvy na vrstvu, vzniklá součást tedy není vyrobena klasickou metodou ubírání materiálu (soustružení, frézování). [6, 7, 8]

S využitím RP technologie je tedy možné vyrobit prototypy součástí s minimální spotřebou materiálu a dostatečnou přesností. Pročež tyto technologie slibují snížení výrobní ceny a zkrácení výrobního času, zatímco poskytují dostatečně vysokou kvalitu finálních výrobků v porovnání s tradičními technologiemi výroby. [7]

Výrobní možnosti RP technologie jsou prakticky neomezené na složitost tvaru, jak znázorňuje obrázek 7.



Obr. 7 Výrobní možnosti RP technologie [9]

Další výhodou této technologie je široký výběr materiálů, které mohou být využity ve výrobním procesu, zahrnující kovy, polymery a termoplasty. Právě termoplasty jsou nejpoužívanějším materiálem při tisku metodou Fused filament fabrication (FFF). [7]

1.2.1 Metoda FFF [7], [10]

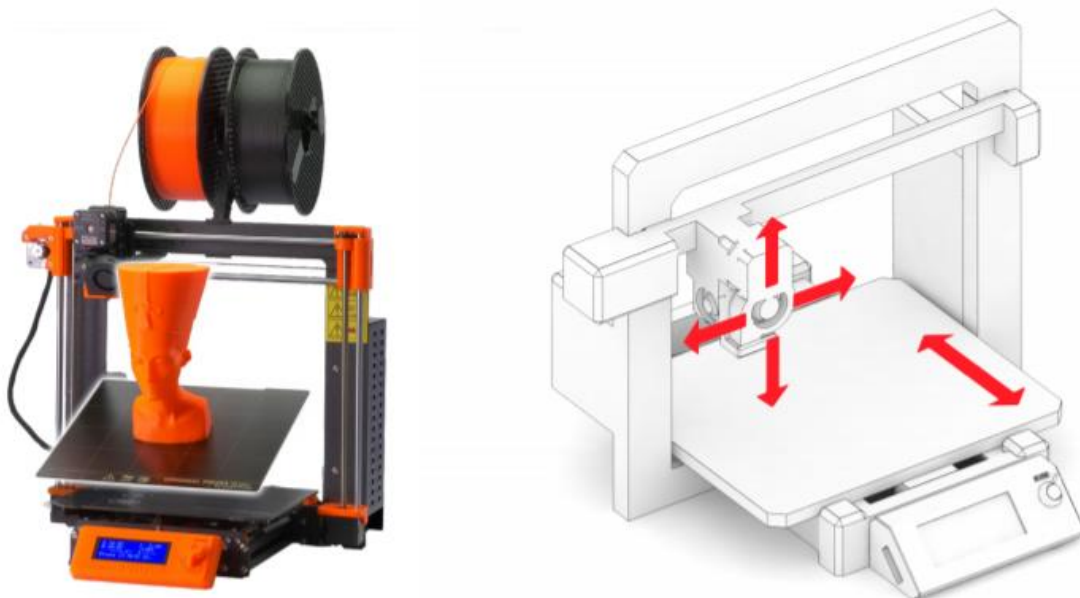
Při tisku metodou Fused filament fabrication (FFF) je natavený termoplastický materiál v podobě tiskové struny (filamentu) vytlačován tiskovou hlavou skrze rozehřátou trysku. Materiál používaný jako filament je ohřát lehce nad teplotu tavení. Celý proces je řízen počítačem. [7, 10]

FFF je vhodná pro výrobu levných součástí v kusové produkci, hlavně pro jednoduchost procesu a levné vybavení. Avšak, výrobky vyrobené pomocí FFF často trpí na vady při tisku a nerovnosti povrchu, jako jsou zakřivení, deformace a smrštění, což může být způsobeno nedokonalou přilnavostí nanášených materiálů. [7]

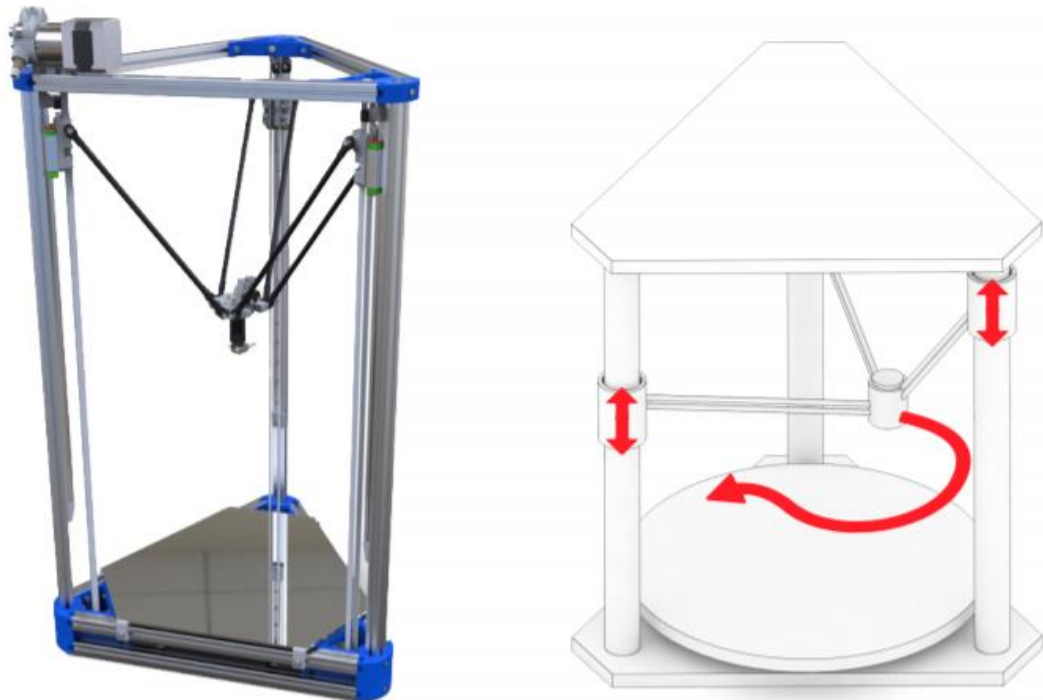
Tiskovým materiálem je tedy tisková struna (filament) nejčastěji průměru 1,75 mm. Oproti pryskyřici či jemnému prášku, které se využívají v dalších technologiích, je práce s filamentem jednoduchá a bezpečná. Na výtisku jsou patrné tiskové vrstvy. Jejich výška se při použití nejběžnější trysky průměru 0,4 mm pohybuje přibližně v rozsahu od 0,05 mm do 0,3 mm. [10]

3D tiskárny se dělí hlavně podle pohybu v trojrozměrném prostoru:

- I. Kartézská tiskárna je založena na principu pohybu po třech lineárních osách, přičemž tisková vytlačující hlava se pohybuje v rovině XZ a podložka v ose Y. Proto je podložka u většiny tiskáren v pravoúhlém stavu, jak lze vidět na obrázku 8. [10]
- II. Delta tiskárna využívá zavěšeného extrudéru na třech ramenech, která jsou spolu spojená právě v místě vytlačovací hlavy. Výhodou je rychlost a velký tiskový prostor v ose Z, naopak tiskárna vyžaduje vysokou přesnost při stavbě a následné kalibraci. Složitá geometrie pak vyžaduje náročné výpočty pro pohyby krokových motorů ramen, příklad Delta tiskárny je na obrázku 9. [10]
- III. Polar tiskárna je založená na polárním pohybu tiskové hlavy po dvou osách a rotační podložce. Je konstrukčně velmi jednoduchá, ale převedení a příprava modelu pro tisk jsou naopak poměrně komplikované. Polar tiskárnu znázorňuje obrázek 10. [10]



Obr. 8 Příklad 3D kartézské tiskárny Original Prusa i3 MK3S [10]



Obr. 9 Příklad 3D Delta tiskárny [10]



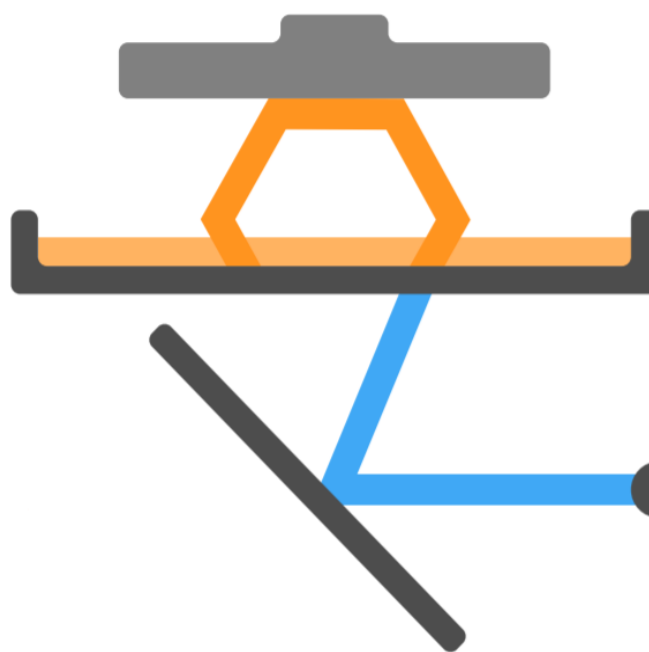
Obr. 10 Příklad 3D Polar tiskárny [10]

1.2.2 Metoda SLA [10], [11]

Stereolitografie (SLA) je technologie založená na principu vytvrzování světlocitlivé pryskyřice pomocí světla. Podložka se při každé vrstvě posune a proběhne vytvrzení fotopolymery na požadovaných místech. V porovnání s FFF tiskárnami je tisk detailnější a kvalitnější, ale trvá déle a tisková plocha je menší. Tisk je takřka ideálně hladký a nejsou na něm vidět patrné vrstvy materiálu, jako jsme tomu zvyklí u FFF tiskáren. Nevýhodou této technologie může být menší tisková plocha, a především toxicita pryskyřice. Je třeba se vyvarovat kontaktu pryskyřice s pokožkou a dýchání výparů během tisku. [10, 11]

Model po vytištění nelze ihned použít, protože je znečištěný nevytvrzenou pryskyřicí na povrchu. Model je na dotek lepkavý, doporučuje se tedy namáčet v izopropylalkoholu, aby se smyl zbytek pryskyřice. Navíc se ještě doporučuje model vytvrdit UV světlem. To vše je potřeba provádět s opatrností a v ochranných rukavicích, nebo se o to mohou postarat automatizované stroje. [10]

Princip tisku technologií SLA, znázorněný na obrázku 11, je založen na osvitě pomocí UV laserového paprsku, kdy je paprsek směřován za pomoci dvou zrcadel a postupně tak vykresluje tiskovou vrstvu. Doba tisku jedné vrstvy je závislá na ploše. [10]



Obr. 11 Princip SLA tisku [10]

1.3 Tisk modelů [7], [10], [11], [12]

Ze zmíněných technologií Rapid prototyping bude k tisku modelů využito metody FFF. Nedosahuje sice tak kvalitních ploch a přesných rozměrů jako metoda SLA, ale výsledné dílce svojí kvalitou jako modely pro odlévání dostačují. Dalším z hlavních důvodů může být i špatná zkušenost ve fakultní slévárně s modely vytvořenými pomocí fotopryskyřice, kde docházelo k praskání během vytavení. K řešení tohoto problému by se dala využít i fotopryskyřice pro lití, avšak ta je až čtyřikrát dražší. Nepochybnou výhodou metody FFF je tedy výrazně nižší cena tisku. [12]

Materiálem pro výrobu modelů bude PLA (kyselina polymléčná), která vykazuje výborné tepelné vlastnosti napříč ostatními materiály využívanými v RP technologiích. PLA patří do skupiny biopolymerů a je plně biologicky odbouratelná, vyráběná z obnovitelných zdrojů (kukuřičného nebo bramborového škrobu či z cukrové třtiny). Vyznačuje se vlastnostmi jako je hezký povrch výtisku i v místech velkých převisů a podpěr, při tisku nevzniká znatelný zápach a díky její malé teplotní roztažnosti se nekroučí a nemá tendenci se odlepovat od podložky či praskat. Hodí se tedy jak pro malé detailní objekty, tak i velké tisky. [7, 10, 11, 12]

Oba modely, včetně volných částí, budou následně vytisknuty na 3D tiskárně Prusa i3 MK2.

2 Odlévání hlavice palcátu [13], [14]

Odlévání je způsob výroby kovových součástí z tavitelných materiálů, kdy se roztavený kov vlije do dutiny formy ve tvaru požadovaného finálního výrobku. Odlévaná součást pak může vyžadovat malé konečné opracování. [13]

Nástrojem k výrobě odlitku je tedy forma a k výrobě formy slouží modelové zařízení, toto označení zahrnuje modely, jaderníky, šablony, modelové desky, podložky, modely nálitků a vtokových soustav, chladítka a další příslušenství. [14]

Modely mohou být trvalé či netrvalé. Trvalé modely umožňují opakovanou výrobu forem. Netrvalé modely slouží pouze pro jedno použití, po zaformování se neuvolňují a nevyjímají z formy, ale odstraňují se vytavením (voskové modely) nebo během lití kovu do formy vyhoří a vypaří se (umělé hmoty). [14]

Jaderníky slouží k výrobě netrvalých jader, které vytvářejí dutiny v odlitcích. [14]

2.1 Materiál pro odlévání [1], [2], [15], [16]

Jako lící materiál byl zvolen bronz. Ten se používal na odlévání hlavice palcátů jako jeden z prvních materiálů, než byl v pozdějších dobách, kolem 15. století, nahrazen ocelí. [2]

Bronz je slitina mědi a dalšího prvku, především cínu, případně hliníku, manganu, nebo olova. [1, 15, 16]

Cínové bronzы se vyznačují vysokou pevností a houževnatostí, vysokou odolností proti abrazi a dnes se využívají k výrobě elastických, ořezávacích součástí jako jsou ložiska, pouzdra a turbíny. [15]

Hliníkové bronzы jsou známé pro své vynikající odolnosti proti korozi, abrazi a kavitaci. Jsou široce používány v námořních a petrochemických průmyslech. Vyrábějí se z nich ložiska, tyče, ventily a šrouby kompresorů. [16]

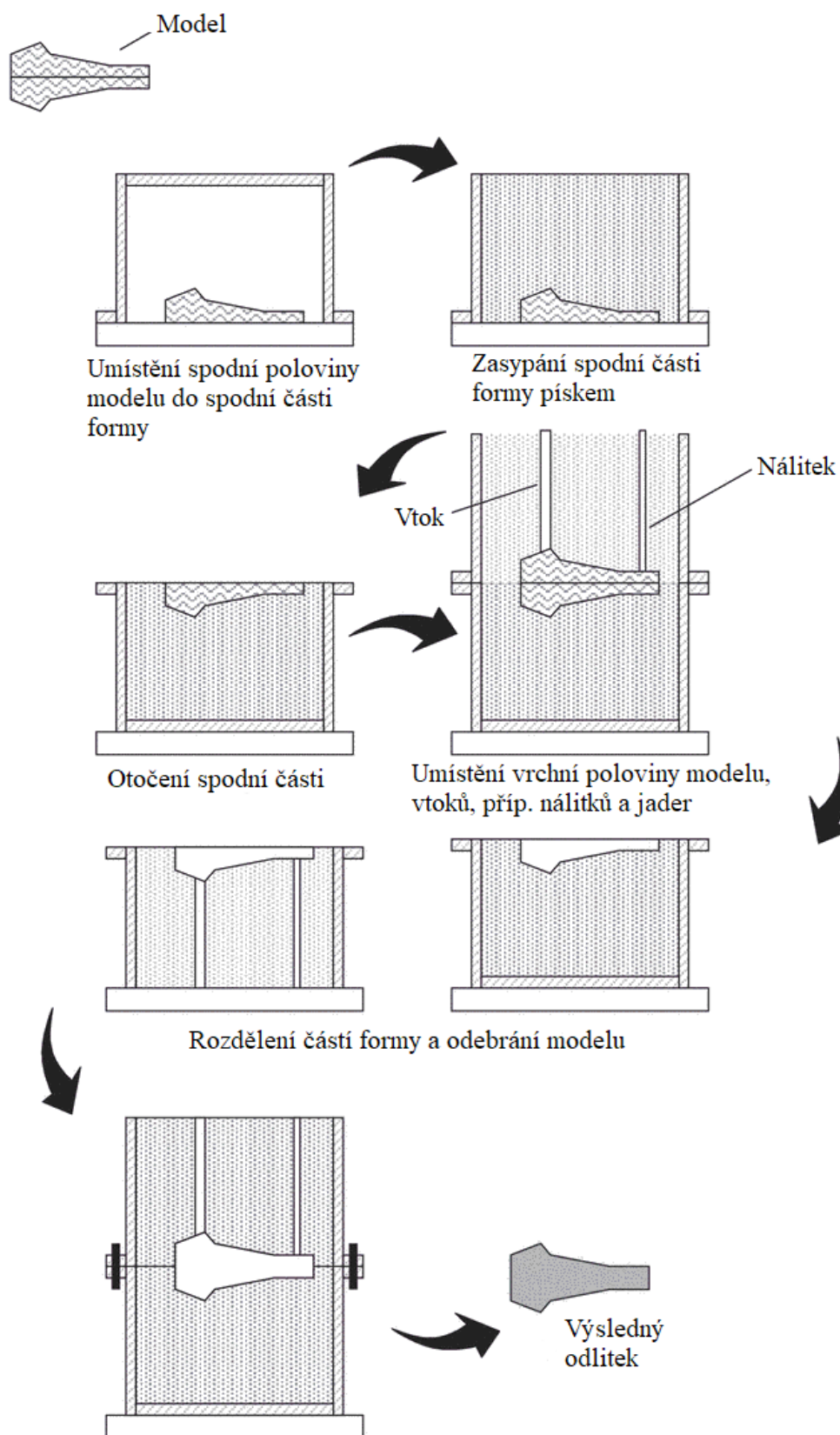
K odlévání obou hlavice palcátů byl ze zmíněných slitin zvolen cínový bronz s obsahem cínu 8 %. Tyto slitiny mají vysoké hodnoty pevnosti a houževnatosti, proto se hodí k odlévání součástí jako je palcát. Lící teploty se u této slitiny pohybují mezi 1100 °C – 1200 °C. [15]

2.2 Odlévání do pískových forem [13], [14], [17], [18]

Lití do pískové formy je pravděpodobně nejstarší známý odlévací proces. Základní princip je, že natavený kov je nalit do tvarové dutiny uvnitř těla pískové formy a je ponechán zchladnout. [13]

Proces lití do pískových forem může být rozdělen na tři hlavní části, výrobu forem, tavení a lití a následné dokončovací operace. [17]

Základní princip lití do pískové formy je znázorněn na obrázku 12.



Obr. 12 Princip lití do pískové formy [13]

Způsobů výroby forem je několik, nejpřehlednější dělení je podle získání pevnosti formy či jádra, tzn. způsobu vazby jednotlivých zrn ostřiva, toto dělení znázorňuje tabulka 1. [14]

Tab. 1 Rozdělení způsobů výroby forem [14]

Název technologie	Charakteristika technologického postupu	Základní složení formovacích směsí
Metody I. generace	Pevnost získají formy či jádra upěchováním formovací směsi (ruční pěchování, střešení, lisování, metání). Ke zvýšení pevnosti někdy sušení či přísoušení.	Ostřivo Jílové pojivo (bentonit, illitický jíl, kaolín) Voda
Metody II. generace	Chemizace výroby forem a jader. Formy a jádra musí být ve většině případů upěchovány, avšak jejich pevnosti se dosáhne až chemickou reakcí způsobující ztvrdnutí pojiva.	Ostřivo Pojivo na bázi chemické látky tvrdnoucí na základě chemických reakcí
Metody III. generace	Fyzikální metody výroby forem a jader. Pěchování je zpravidla nahrazováno vibrací ostřiva. Zrna ostřiva jsou pojena účinkem fyzikálních vazeb (magnetické pole, vakuum, účinek teploty pod bodem mrazu)	Ostřivo v suchém stavu Pojivo – není (někdy voda)
Metody IV. generace	Biologizace výroby forem a jader. Princip: biologická látka ve funkci pojiva se po zaformování rychle množí a spojí všechna zrna ostřiva. Po ztuhnutí odlitku je nutno organismy usmrtit.	Ostřivo Pojivo – živé organismy (např. bakterie)

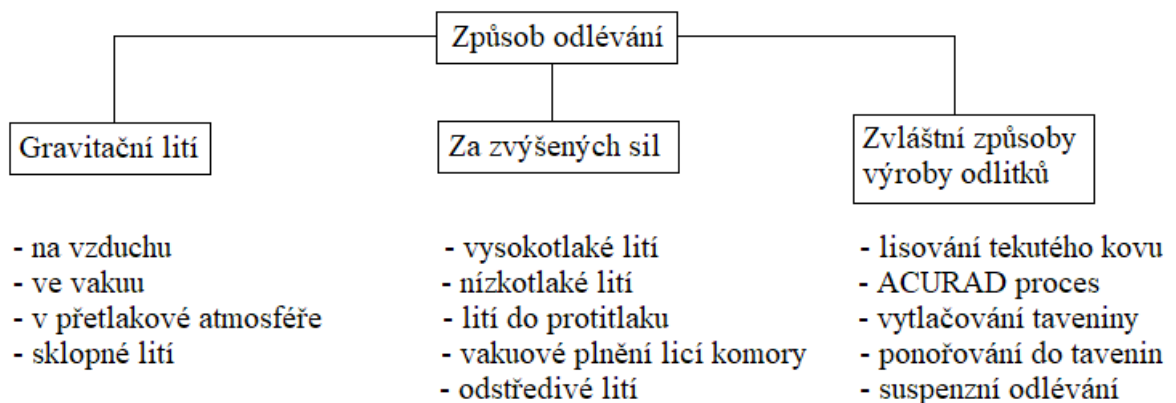
Cílem při tavení kovů je získat kontrolu nad chemickým složením materiálu, zabránit ztrátám při tavení, kontaminaci plyny a vniknutí nekovových vměstků. Nejméně náchylné k těmto ztrátám jsou velké kusy materiálu, např. slitky. Atmosféra v peci, ve které se kovy taví, může obsahovat vodní páru, CO, CO₂, a SO₂ jako produkty spalování paliva, stejně jako běžné plyny vyskytující se v atmosféře. Nejběžnější reakce probíhá mezi složkami taveniny a kyslíkem v atmosféře, např. u železa, mědi a niklu se kyslík značně rozpouští v tavenině, kde se může přidat k reakcím mezi tuhnečnými elementy: podstatné množství povrchových oxidů je utvářeno jen po nasycení taveniny. Naopak u kovů jako je hliník nebo hořčík jsou stabilní oxidy utvářeny na povrchu a rozpustnost oxidů v tavenině je zanedbatelná. [17]

Jedním z nejdůležitějších aspektů při tavení je míra ztráty taveného materiálu, ta má totiž velký vliv na ekonomiku produkce. Příčiny ztrát zahrnují oxidaci a vypařování složek při tavení a zachycení roztaveného kovu, např. ve strusce odebírané z pece. Typické hodnoty ztrát vyobrazuje tabulka 2. [17]

Tab. 2 Typické hodnoty ztrát při tavení kovů [17]

Typ slitiny	Typická hodnota [%]
Cínový bronz	2–3
Hliníkový bronz	4-5
Slitiny mědi	3-4
Vysokotažná mosaz	3-5
Litina	4
Slitiny hliníku	2
Al-Cu-Mg	2-3

Po přípravě formy k lití a natavení materiálu vznikne vlastní odlitek tím, že tekutý kov je dopraven do dutiny formy, kde ztuhne na požadovaný tvar. Při chladnutí roztaveného kovu ve formě však dochází ke vzniku staženin, případně ředin v odlitku, proto je nutné dosáhnout usměrněného tuhnutí, k tomu se využívá tzv. nálitků anebo chladítek. V poslední době kromě klasického způsobu gravitačního lití vznikla celá řada nových postupů vedoucích vždy v určitém směru ke zlepšení užitečných vlastností. Rozdělení způsobů odlévání ukazuje obrázek 4. [14]



Obr. 13 Schéma rozdělení způsobů odlévání do pískových forem [14]

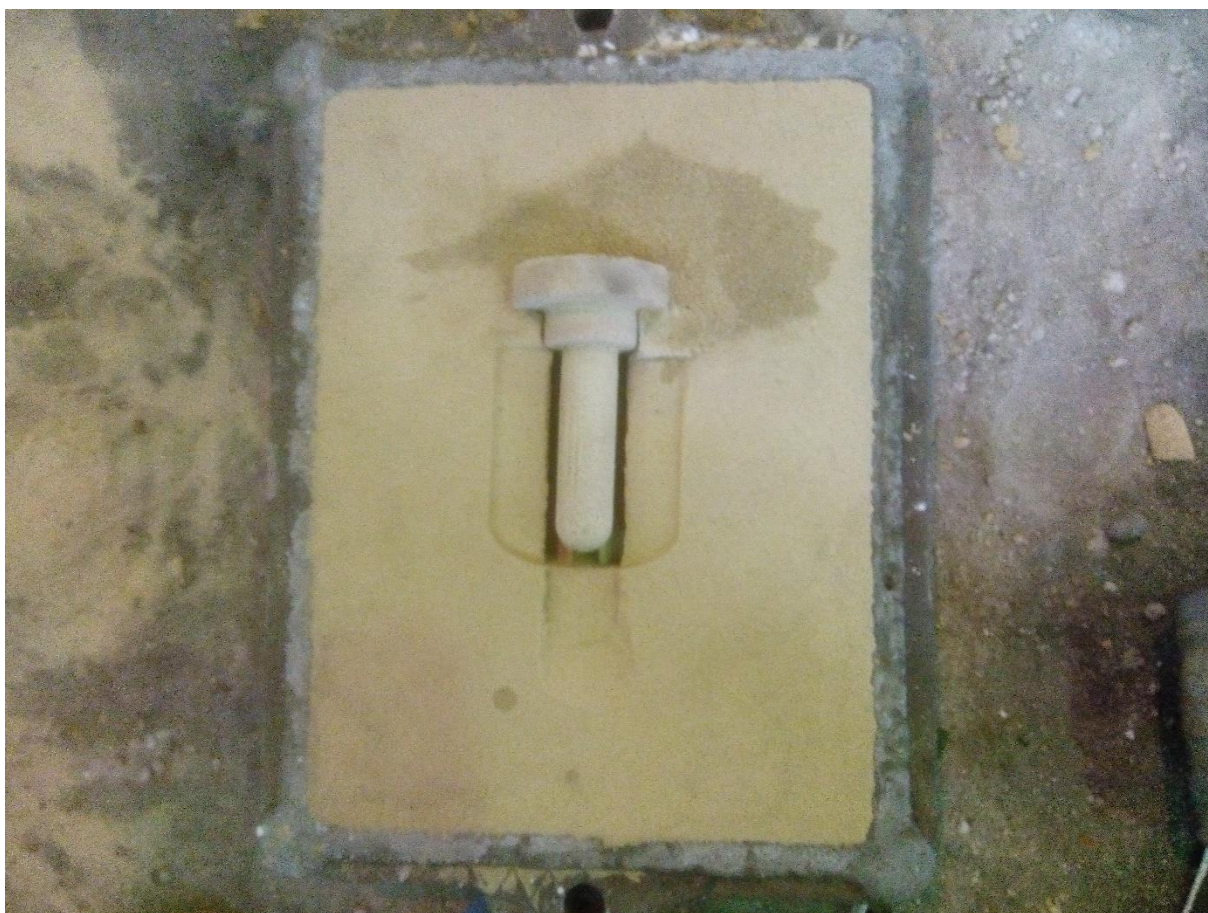
Výhodami metody lití do pískových forem je možnost jednoduše upravit formu nebo model při nevhodně zvolené technologii, odlévat velkou škálu rozměrů odlitků apod. Naopak nepříznivým aspektem může být ekologická závadnost některých druhů směsí, nutnost recyklace forem, soustavná výroba forem, negativní vliv lidského faktoru při výrobě a například horší mechanické vlastnosti odlitku v porovnání s metodami lití do kovových forem. [14, 18]

2.2.1 Výroba pískové formy [19]

Pro výrobu pískové formy bylo využito samotuhnoucího materiálu GEOPOL od firmy SandTeam. Technologie GEOPOL patří mezi ekologické anorganické pojivové systémy na bázi geopolymerů a používá se pro výrobu forem a jader ze směsí určených pro odlévání železných i neželezných kovů. [19]

Tyto samotuhnoucí směsi se vyznačují vlastnostmi jako vysoká pojivová schopnost (dávkování pojiva max. 2 %), zpracovatelnost směsí od 2 do 90 minut a dobrá rozpadavost po odlití. [19]

Spodní část pískové formy po zaformování lze vidět na obrázku 14.



Obr. 14 Spodní část pískové formy

2.2.2 Vlastní lití do pískové formy

Odlévání proběhlo ve školní slévárně na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického. Na obrázku 15 lze vidět samotné odlévání a na obrázku 16 formu krátce po lití.



Obr. 15 Lití bronzu do pískové formy



Obr. 16 Písková forma krátce po odlévání

Na obrázku 17 pak lze vidět odlitou hlavici palcátu včetně vtokové soustavy po vyjmutí z formy, očištění a ochlazení ve vodě.



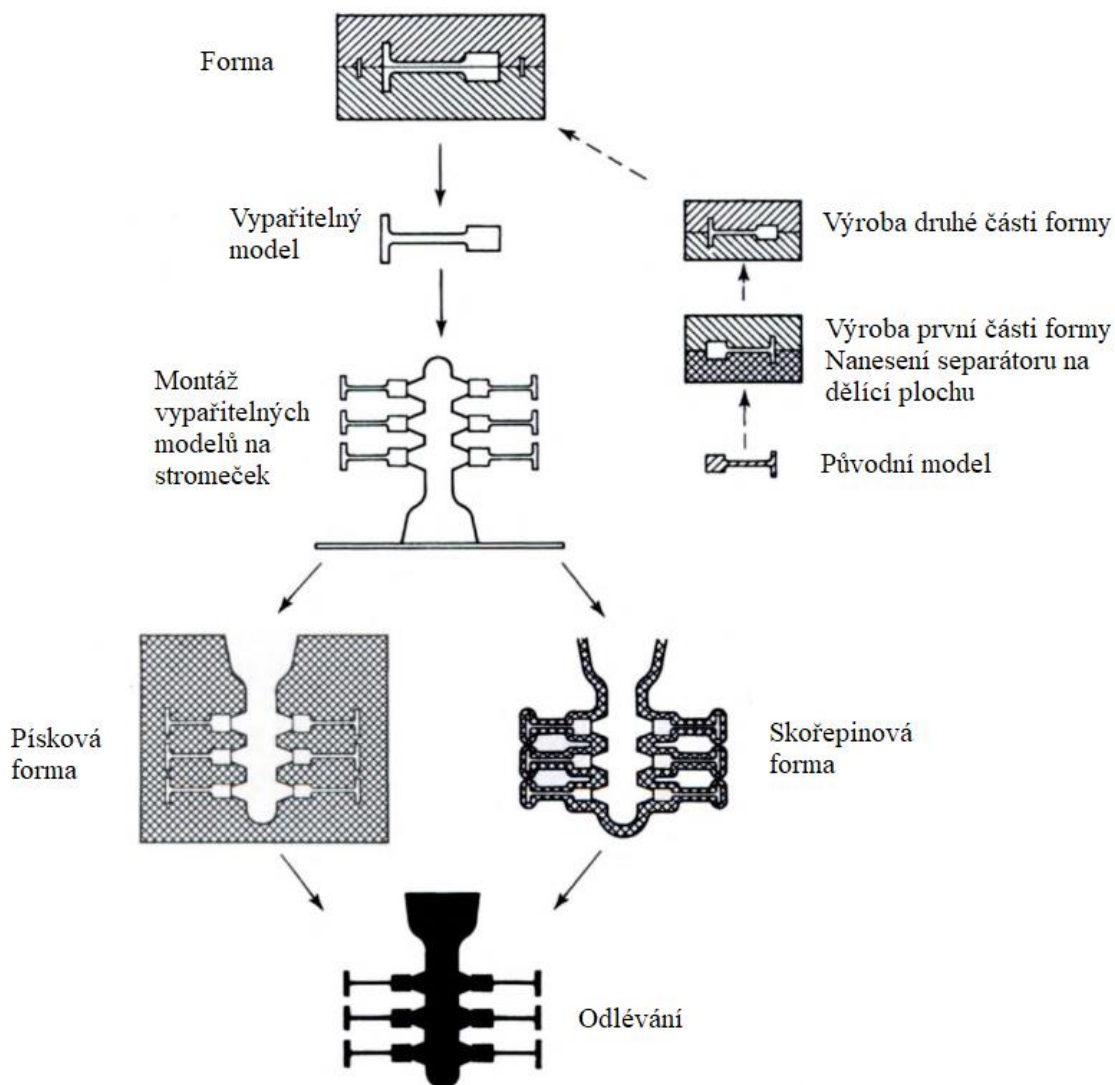
Obr. 17 Hlavice palcátu odlitá do pískové formy

2.3 Odlévání metodou vytavitelného modelu [12], [13], [17]

Při této technologii jsou modely vyráběny z vytavitelných, vypařitelných, nebo jinak zničitelných materiálů. Základní kroky této technologie jsou znázorněny na obrázku 18 a mohou být shrnuty následovně:

- I. Konstrukce formy s dutinou odpovídající voskovému modelu
- II. Výroba a montáž vytavitelných modelů
- III. Výroba žáruvzdorné (keramické) formy za pomoci modelů
- IV. Odstranění (vytavení) modelů a vysokoteplotní vypalování
- V. Odlévání a dokončování [17]

Nejčastějším materiálem na výrobu vytavitelného modelu je vosk. Modelové vosky jsou složeny z přírodních i syntetických vosků a pryskyřice tak, aby dosahovaly požadované kombinace pevnosti, smršťovacích charakteristik a rozměrové stability, tyto materiály se obvykle taví při 55-90 °C a tvoří nízko-viskózní kapaliny. Operační teploty musí být důkladně hlídány, kvůli vysokému koeficientu teplotní roztažnosti materiálu. [17]



Obr. 18 Princip odlévání metodou vytavitelného modelu [17]

Modely se nejvíce vyrábějí za pomoci vstřikovacích strojů, které se dají snadno automatizovat a dosáhne se tak vysoké produkce. Vosk se může vstřikovat ve formě kapaliny, pasty, nebo i v tuhém stavu. Zatímco vstřikování pasty nabízí vysokou přesnost a rychlost produkce, vstřikování ve formě kapalné se využívá více, vysoká míra smrštění při tunutí je tady redukována začleněním tuhých plniv (organické materiály jako je polystyren jsou přidávány k zajištění úplného vyhoření při spalování). [17]

Jako další materiály pro výrobu vytavitelných modelů se mohou používat umělé hmoty, např. polystyren. Jejich výhodou je nízký koeficient teplotní roztažnosti, rozměry modelů jsou tudíž méně náchylné ke změnám teploty.

Jakmile jsou vyrobeny modely nastává jejich umístění na stromeček okolo vtokového systému ze stejného materiálu, takže tento celek vytvoří formu pro odlévání. Voskové modely se montují pomocí nahřáté špachtle nebo páječky, zatímco polystyrenové díly se lepí umělohmotnými lepidly. Přesné pozice může být dosaženo za pomoci speciálních přípravků a podpěr. Dále může být využito i laserového svařování. [17]

Při lití do skořepinových forem jsou voskové modely umístěny na stromeček a namáčí se do keramické suspenze, poté se posypou žáruvzdorným ostřivem a nechají se usušit. Tento proces

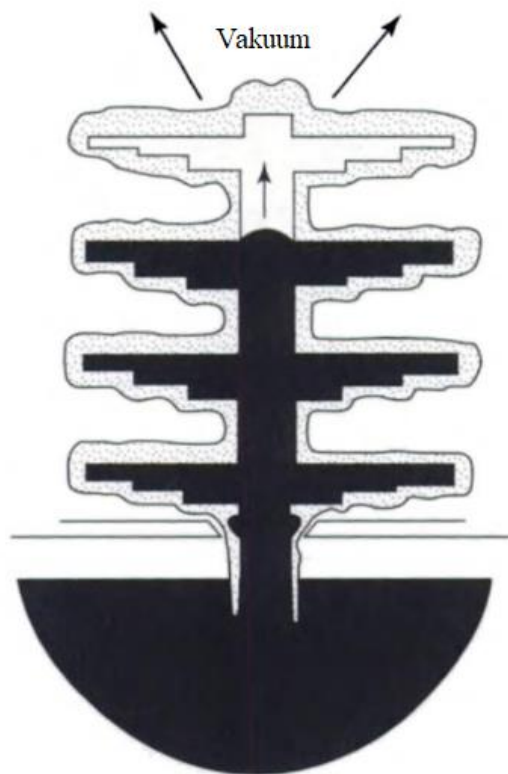
je několikrát opakován do získání požadované tloušťky, té se obvykle dosáhne po šesti až osmi průchodech, přičemž u prvních dvou vrstev bývá posyp z jemnějšího ostřiva. Když je forma úplně suchá, je umístěna do pece a vosk je vytaven pryč. Keramická forma se potom vypálí při přibližně 980°C. [12, 13]

Jednou z hlavních výhod metody vypařitelného modelu je schopnost vyrábět vnitřní dutiny a podříznuté části jako nedílnou součást formy, tím se zbaví jader a vytváří se tak princip bezjaderné formy. [17]

Tavení většiny kovů probíhá v indukčních pecích, pro hliník se využívá pecí odporových, nebo plynových, indukční pece nejsou pro hliník a jeho slitiny vhodné. Formy se mohou odlévat gravitačně, nebo se může využívat zvýšených tlaků či vakua a v některých aplikacích i odstředivého lití. Předehřívání forem na vysoké teploty je široce, ačkoli ne univerzálně používáno. [12, 17]

Gravitační lití dává uspokojivé výsledky v mnoha okolnostech, obzvláště když je využito s odléváním do předehřátých forem, avšak lití za zvýšených tlaků pomáhá lépe zabíhat tavenině do tenkých a tvarově složitých částí. Takže pro tuto metodu byly vyvinuty otočné indukční pece, které usnadňují lití. Ve chvíli, kdy je materiál natavený dojde k otočení zařízení o 180 ° a dochází k vlastnímu lití, přičemž se generuje přídatný moment usnadňující plnění formy. [17]

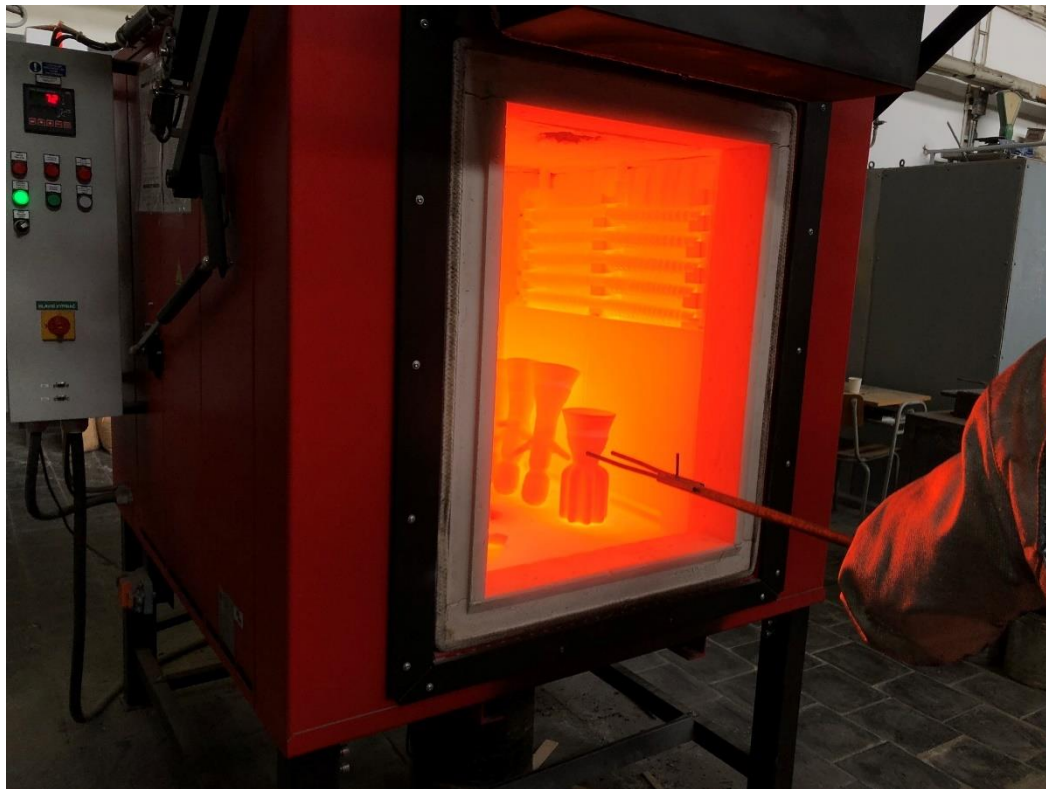
Vakuové lití, jehož princip je schematicky znázorněn na obrázku 19, se výrazně uplatňuje ve výrobě slitin odolávajících vysokým teplotám, kde je důležité zachovat určité podmínky, např. pro ochranu reagujících legujících prvků v kontaktu s atmosférickým znečištěním. Také zabíhání taveniny do úzkých sekcí je usnadněno odstraněním tlaku od vzduchu v dutinách formy. [17]



Obr. 19 Princip vakuového lití do skořepinové formy [17]

2.3.1 Výroba skořepinové formy

Skořepinová forma byla vypálena v peci při 900 °C, to lze vidět na obrázku 20. Skořepinovou formu krátce po vyjmutí z pece je lépe vidět na obrázku 21.



Obr. 20 Skořepinová forma v peci



Obr. 21 Skořepinová forma krátce po vytažení z pece

2.3.2 Vlastní lití do skořepinové formy

Odlévání proběhlo ve školní slévárně na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického. Na obrázku 22 lze vidět samotné odlévání a na obrázku 23 formu krátce po odlití.



Obr. 22 Lití bronzu do skořepinové formy



Obr. 23 Skořepinová forma krátce po odlévání

Na obrázku 24 pak lze vidět odlitou hlavici palcátu včetně vtokové soustavy, která zde plnila i funkci nálitku, po vyjmutí z formy, očištění a ochlazení ve vodě.



Obr. 24 Hlavice palcátu odlitá do skořepinové formy

3 Dokončovací práce na hlavicích a zhodnocení [12], [13]

Po odlití obou hlavic a ochlazení ve vodě proběhlo odřezání vtokových soustav. Obě hlavice byly otryskány od nečistot a následně bylo obroušeno místo vtoků.

Na obrázku 25 lze vidět výslednou hlavici odlitou do pískové formy. Zde si můžeme povšimnout nedokonalostí u spodku hlavice. Na několika místech jsou znatelné otřepy, natavený bronz zde přesahuje model dutiny formy, to patrně zapříčinilo, že se forma krátce před odléváním opravovala a část formy se v těchto místech nepatrně odloupla. Tato oprava zřejmě nebyla dostačující. [12, 13]

V místě jednoho z bodných žeber naopak tavenina nevyplnila celé žebro, to opět pravděpodobně bylo zapříčiněno opravováním formy krátce před samotným odléváním. [12, 13]



Obr. 25 Finální hlavice palcátu odlitá do pískové formy

Na obrázku 26 pak lze vidět výslednou hlavici palcátu odlitou pomocí technologie vytavitelného modelu do skořepinové formy. Na této hlavici nejsou znatelné žádné podstatné vady pro funkci odlitku, má krásně hladký a hlavně přesný povrch. Tavenina dobře vyplnila skořepinovou formu a nedošlo ke tvorbě staženin na hlavici, staženiny byly koncentrovány jen v nálitku, který se odřízl a splnil tak svoji funkci. [12]



Obr. 26 Finální hlavice palcátu odlitá do skořepinové formy

4 ZÁVĚRY

Pro výrobu hlavice palcátu byly vybrány dvě technologie – odlévání do pískové formy a odlévání technologií vytavitelného modelu. Jako materiál pro odlévání byl vybrán cínový bronz, který se historicky k odlévání palcátů používal.

Při odlévání do pískové formy, které napodobovalo skutečný historický proces, vznikly na hlavici vady. Jedno z žeber nebylo úplně vyplněno taveninou a chybí zde část materiálu. Forma byla totiž krátce před odléváním ještě opravována a tato oprava zřejmě nebyla dostatečná. Při dalším odlévání by bylo potřeba pečlivě zaformovávat a formovat s dostatečným předstihem před vlastním litím. Ještě na spodní straně palcátu došlo ke tvorbě otřepů, avšak i to by mělo vyřešit pečlivé zaformování.

Odlévání technologií vytavitelného modelu dalo hlavici přesný a hladký povrch a nenacházejí se na ní žádné znatelné vady, které by bránily funkci odlitku. Tavenina dobře vyplnila celou skořepinovou formu. Díky vtokové soustavě, u níž bylo rozšířeno hrdlo a plnila tak i funkci nálitku nedošlo k tvorbě staženin na hlavici, staženiny se tvořily jen v nálitku.

Podstatně efektivnější metodou pro výrobu hlavice palcátu se ukázala metoda odlévání pomocí vytavitelného modelu. Už i vlastní model byl jednodušší, nemuselo se zde řešit zaformování modelu do formy, u modelu do pískové formy se čtyři žebra musela řešit jako volné části, aby nebránila vyjmutí modelu. Tedy model do pískové formy se musel tisknout na více částí, dvě poloviny a čtyři žebra, což zvýšilo čas tisku.

Lepší kvalitu, bez znatelných vad na odlité hlavici dala taktéž technologie vytavitelného modelu. Odlitá hlavice zde přesně kopírovala vytvořený model, zatímco u lití do pískové formy vznikly vady a zde by se při příštím lití muselo dbát na pečlivé zaformování.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [20]

1. Palcát. *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Palcát>
2. Jiří Šimek: Vývoj chladných zbraní. *Heraldicus: Historický šerm* [online]. Praha: Heraldicus, c2016 [cit. 2020-02-15]. Dostupné z: <http://www.heraldicus.cz/jiri-simek-vyvoj-chladnych-zbrani/#3.1.2>.
3. Palcát. In: *Zbraně a zbroje* [online]. Hradec Králové: Zdeněk Zackl, [2010] [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <http://www.zplusz.cz/?200,पाल्काट>
4. Palcát z 15. století. In: *Vojenský historický ústav Praha* [online]. Praha: Vojenský historický ústav Praha, 2019 [cit. 2020-02-21]. Dostupné z: <http://www.vhu.cz/k-vyroci-bitvy-na-vitkove-budou-vystaveny-husitske-zbrane/>
5. Palcát. *Wikipedia: the free encyclopedia*. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Palc%C3%A1t#/media/Soubor:Drevnosti_RG_v3_ill081a_-_Pernath.jpg
6. LOKESH, Kumar a Prem K. JAIN. Selection of rapid prototyping technology. *Advances in Production Engineering* [online]. 2010, 5(2), 75-84 [cit. 2020-02-12]. ISSN 18546250. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=49074497&lang=cs&site=ehost-live>
7. TYCHANICZ-KWIECIEN, Maria, Robert SMUSZ a Pawel GIL. Performance of thermal insulation fabricated by Rapid prototyping technology. *Thermal Science* [online]. 2019, 23(4), S1079 [cit. 2020-03-12]. DOI: 10.2298/TSCI19S4079T. ISSN 03549836. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=138925497&lang=cs&site=ehost-live>
8. DRDA, Jan. *Přehled pokročilých technik rapid prototyping a jejich využití ve slévárenství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 46s., vedoucí práce Ing. Martin Macků.
9. 25 Best Sites to Download Free STL Files to 3D Print | All3DP. In: *Pinterest* [online]. San Francisco (CA): Pinterest, 2010 [cit. 2020-02-16]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/350717889714144117/>
10. STŘÍTESKÝ, Ondřej, Josef PRŮŠA a Martin BACH. PRUSA RESEARCH A.S. *Základy 3D tisku s Josefem Průšou* [online]. Praha, 2019. Dostupné také z: <https://www.prusa3d.cz/kniha-zaklady-3d-tisku-josefa-prusi/>
11. Materiálový slovník. *Materiál pro 3D* [online]. Brno: Solidify 3D, 2019 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/pla/>
12. BOŘIL, Petr, vysokoškolský učitel [ústní sdělení]. Brno, 10.6. 2020.
13. CAMPBELL, Francis C. *Elements of metallurgy and engineering alloys* [online]. Materials Park, Ohio: ASM International, c2008 [cit. 2020-03-02]. ISBN 978-087-1708-670. Dostupné z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEMEA000U/elements-metallurgy-engineering/elements-metallurgy-engineering>
14. HORÁČEK, Milan. *Slévárenská technologie I*. 2. vyd. Brno: VUT Brno, 1990, 166 s. ISBN 80-214-0217-2.

15. HUI, Jun, Zaixin FENG, Wenxin FAN, Pengfei WANG a Zhuang LIU. Microstructural evolution analysis of grains and tensile properties of tin bronze in hot extrusion at different temperatures. *Materials at High Temperatures* [online]. 2019, 36(1), 68-75 [cit. 2020-06-02]. DOI: 10.1080/09603409.2018.1457603. ISSN 09603409. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=133103456&lang=cs&site=ehost-live>
16. BOICIUC, Simona. LASER DEPOSITION OF BRONZE ALUMINUM ON STEEL SUPPORT. *Annals of the University Dunarea de Jos of Galati: Fascicle IX, Metallurgy* [online]. 2015, 33(3), 45-51 [cit. 2020-06-03]. ISSN 1453083X. Dostupné z: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=a9h&AN=130367196&lang=cs&site=ehost-live>
17. BEELEY, Peter R. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001, x, 719 s.: il., čb. fot.; 25 cm. ISBN 0-7506-4567-9.
18. HERZÁN, Jiří. *Návrh technologie výroby odlitků ze slitin mědi s ohledem na jejich kvalitu a pracnost dokončovacích operací* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116694>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaromír Roučka.
19. Technologie GEOPOL. *SAND TEAM* [online]. Holubice: SAND TEAM, 1997 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.sandteam.cz/technologie-geopol/>
20. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Různá provedení palcátu [3,4,5].....	9
Obr. 2 Základní rozměry hlavice palcátu.....	10
Obr. 3 Model hlavice palcátu pro lití do skořepinové formy.....	11
Obr. 4 Model hlavice palcátu pro lití do pískové formy.....	11
Obr. 5 Dělený model pro lití do pískové formy.....	12
Obr. 6 Žebra pro model do pískové formy – volné části	12
Obr. 7 Výrobní možnosti RP technologie [9].....	13
Obr. 8 Příklad 3D kartézské tiskárny Original Prusa i3 MK3S [10].....	14
Obr. 9 Příklad 3D Delta tiskárny [10].....	15
Obr. 10 Příklad 3D Polar tiskárny [10].....	15
Obr. 11 Princip SLA tisku [10].....	16
Obr. 12 Princip lití do pískové formy [13]	18
Obr. 13 Schéma rozdělení způsobů odlévání do pískových forem [14].....	20
Obr. 14 Spodní část pískové formy	21
Obr. 15 Lití bronzu do pískové formy	22
Obr. 16 Písková forma krátce po odlévání	22
Obr. 17 Hlavice palcátu odlitá do pískové formy	23
Obr. 18 Princip odlévání metodou vytavitelného modelu [17]	24
Obr. 19 Princip vakuového lití do skořepinové formy [17].....	25
Obr. 20 Skořepinová forma v peci.....	26
Obr. 21 Skořepinová forma krátce po vytažení z pece.....	26
Obr. 22 Lití bronzu do skořepinové formy	27
Obr. 23 Skořepinová forma krátce po odlévání.....	27
Obr. 24 Hlavice palcátu odlitá do skořepinové formy.....	28
Obr. 25 Finální hlavice palcátu odlitá do pískové formy	29
Obr. 26 Finální hlavice palcátu odlitá do skořepinové formy	30

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Rozdělení způsobů výroby forem [14]	19
Tab. 2 Typické hodnoty ztrát při tavení kovů [17]	20