



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 FILMOVÉ FIGURKY

MAKING OF MOVIE FIGURINE REPLICA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Petřík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vojtěch Janský

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Michal Petřík**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Vojtěch Janský**
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 filmové figurky

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Výroba uměleckých odlitků je velmi specifickým odvětvím slévárenství, především pro svůj důraz na povrchovou jakost na úkor všech ostatních vlastností odlitku.

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je vytvořit přehled historie uměleckého odlévání, užívané materiály pro lití a výroba bronzových odlitků figurky.

Seznam doporučené literatury:

GRÍGEROVÁ, T., I. LUKÁČ a R. KOŘENÝ. Zlívárenstvo neželezných kovov. Bratislava: Alfa, Edícia hutnickej literatúry, 1988.

AGRICOLA, G., B. JEŽEK a J. HUMMELA. Jiřího Agricoly Dvanáct knih o hornictví a hutnictví = Georgii Agticolae De re metallica libri XII / [s použitím českého překladu Bohuslava Ježka a Josefa Hummela z prvního českého vydání z roku 1933]. Ostrava: Montanex, 2001, 546 s. : il., faksim. ISBN 80-7225-057-4.

STRÁNSKÝ, K. Železné hamry a hutě Českomoravské a Drahanské vrchoviny. II. část. Brno: Vysoké učení technické v Brně - fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, 2009, 107 s. : il. (některé barev.), mapy, faksim. ; 30 cm + 1 CD-ROM. ISBN 978-80-214-3853-8.

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

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

PETRÍK Michal: Výroba repliky filmové figurky

Tato práce je zaměřena na přehled historie uměleckého odlévání formou chronologického průřezu jednotlivými uměleckými epochami lidstva, kde se vyskytovalo umělecké odlévání. Dále je tato práce doplněna stručným přehledem nejpoužívanějších materiálů pro umělecké odlévání. Praktická část této práce je věnována výrobě repliky filmové figurky na základě kopie dětské hračky, a to metodou vytavitelného modelu.

Klíčová slova: Historie odlévání, umělecké odlévání, odlévání bronzu, přesné odlévání

ABSTRACT

PETRÍK Michal: Production of a movie figurine replica

This thesis is focused on an overview of artistic casting in a form of chronological order of individual epochs in the mankind's arts, in which artistic casting had occurred. Furthermore, a brief overview of materials used the most in artistic casting is added to this thesis. Practical part of this thesis is dedicated to various ways of production of a movie figurine replica based on a copy of children's toy.

Keywords: History of casting, artistic casting, bronze casting, investment casting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PETŘÍK, Michal. Výroba repliky filmové figurky [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124671>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Vojtěch Janský.

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 dne

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Panu Ing. Vojtěchu Janskému za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych také chtěl poděkovat kolegům ze školní slévárny za pomoc při zhotovování bronzových odlitků.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Úvod

TEORETICKÁ ČÁST 7

1 PŘEHLED HISTORIE UMĚLECKÉHO ODLÉVÁNÍ..... 7

1.1 Úvod 7

1.2 Starověk..... 8

1.3 Středověk..... 10

1.4 Novověk 13

2 PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO UMĚLECKÉ ODLÉVÁNÍ 16

2.1 Měď a její slitiny 16

2.2 Litina 16

2.3 Zlato a jeho slitiny 17

2.4 Stříbro a jeho slitiny 17

3 PRINCIP A TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU 18

3.1 Princip a postup výroby vytavitelného modelu a forem..... 18

3.2 Odlévání 19

PRAKTICKÁ ČÁST 20

4 VÝROBA VYTAVITELNÝCH MODELŮ 20

4.1 Výroba vytavitelných (spalitelných) modelů pomocí 3D skeneru 20

4.1.1 Příprava 3D skeneru 20

4.1.2 Příprava dílu pro skenování 20

4.1.3 Skenování dílů 21

4.1.4 Úprava skenů jednotlivých dílů 21

4.1.5 Tisk spalitelného modelu metodou FDM z PLA..... 23

4.2 Výroba voskových vytavitelných modelů 23

4.2.1 Výroba forem na voskové modely..... 24

4.2.2 Odlévání voskových modelů 25

4.2.3 Vytvoření stromečků 28

5 ODLÉVÁNÍ 29

5.1 Výroba skořepin 29

5.2 Příprava forem pro odlévání 29

5.3 Tavba a odlévání 30

5.4 Práce po odlévání 34

Závěr 35

Seznam použitých zdrojů

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD

Bez kultury by nemohlo existovat umění, tak jak ho známe. Člověk se už od pradávna snaží otisknout technologický pokrok do uměleckých děl. Mezi technologický pokrok určitě patří zpracování kovů. Jedním z prvních způsobů zpracování kovů, kterému se člověk naučil, je kování. Po kování se jako další způsob naučil odlévání. Mezi první odlévané materiály patřily čisté kovy, jako je měď a zlato, které bylo možné najít v ryzí podobě v přírodě. Právě z těchto materiálů máme první nalezené odlitky. Tyto odlitky byly umělecké a sloužily především k náboženským účelům nebo vyjadřovaly společenské postavení majitelů. S postupným získáváním dalších metalurgických, technologických znalostí a objevováním nových materiálů, začal člověk používat tyto nové materiály i na odlitky. Tato práce má za cíl utvořit nástin technologií a materiálů používaných pro umělecké odlévání, pomocí příkladů z různých historických období. Mimo jiné i vyhotovení uměleckých odlitků technologií vytavitelného modelu, se zaměřením na různé druhy vytavitelných materiálů.

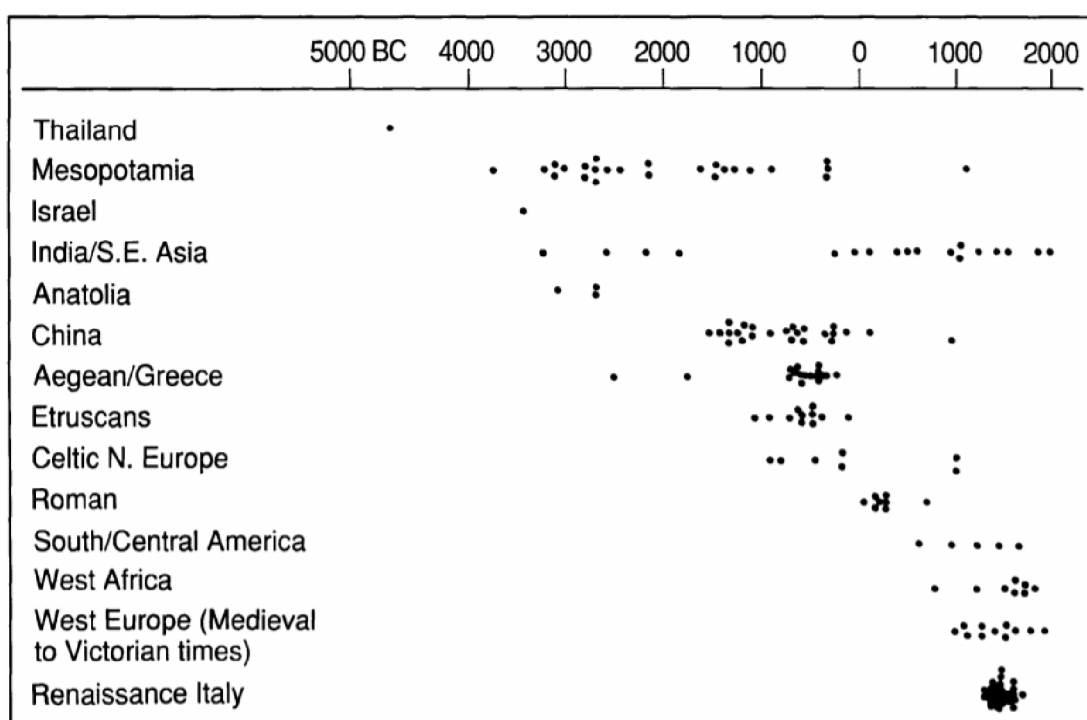
TEORETICKÁ ČÁST

1 PŘEHLED HISTORIE UMĚLECKÉHO ODLÉVÁNÍ

1.1 Úvod

V následující části budeme popisovat historii odlévání kovů od starověku po současnou dobu. Nejdříve se zaměříme na starověké období, kde primárním zdrojem informací jsou archeologické nálezy. Nalezené historické doklady vypovídají o tom, že po technologii zpracování kovů kovářím je slévárnictví druhým nejstarším způsobem zpracování kovů člověkem. Písemné zmínky o použití kovů můžeme nalézt již v literárních dílech autorů z období antiky, ty jsou často plné nepřesností, smyšlenek a pověr. Oproti tomu daleko přesnější informace nám poskytují archeologické nálezy. Kovové předměty se poměrně dobře zachovaly a jejich nálezy umožňují odborníkům poměrně dobře zrekonstruovat postup výroby a zpracování. [1], [2], [3]

Na Obr. 1 můžeme vidět četnost nálezů používání technologie vytavitelného modelu.



Obr. 1 - Přibližný přehled začátků používání technologie vytavitelného modelu [2]

S postupným rozvojem pecí na tavení kovů a metalurgie začal člověk používat kovy a jejich slitiny k výrobě nástrojů až po umělecká díla. Používané kovy daly názvy historickým obdobím. Pravděpodobně měď byla prvním kovem, který se naučili lidé využívat pro výrobu svých nástrojů, a to už na konci doby kamenné. První odlitky byly nejpravděpodobněji právě z mědi, díky tomu, že se měď dala nejsnáze najít. Nejčastěji člověk mohl nalézt ve volné přírodě ryzí měď, bez příměsí jiných nečistot. Díky svým vlastnostem se dala velmi dobře zpracovávat kovářím a odléváním. Kov byl roztaven v primitivních pecích, kde se používaly datlové pecky nebo sušený trus jako palivo kvůli vysoké výhřevnosti. První měděné odlitky vznikly pravděpodobně nalitím roztaveného kovu do dutiny z písku, jílu nebo kamene. První dochované odlitky můžeme najít na území dnešního Iráku, severovýchodní Sýrii, jihovýchodního Turecka a západního Íránu. Mezi první dochované odlitek patří takzvaná „Měděná žába“, jejíž stáří sahá přibližně až 3200 let před našim letopočtem. [4], [5], [6], [7], [8]

1.2 Starověk

Rozvoj zemědělství znamenal pro člověka možnost se trvale usídlit a soustředit se na vyvíjení a zdokonalování nových technologií. Dále byl starověk charakterizován společenskou dělbou práce, to znamenalo vytvoření specializovaných činností ve výrobní a správní sféře, a dále oddělení řemesel od zemědělství. Díky tomu došlo ve starověku k výraznému prohloubení metalurgických znalostí. Mimo jiné velký rozvoj můžeme nalézt ve šperkařském odvětví, kde se začalo odlévat do trvalých forem, viz Obr. 2. [6], [9]



Obr. 2 - Díl dvoudílné pískovcové formy [10]

Tato dvoudílná šperkařská trvalá forma pochází z Novoasyrské říše, ze starověkého Ninive na území dnešního Iráku. Ninive bylo hlavním městem Asyrské říše a bylo centrem obchodu a řemeslné výroby. Tato forma je vyrobena vyřezáváním ze světle zbarveného pískovce, druhý díl formy byl pravděpodobně plochý, takže zadní část všech odlitků byla plochá. Tato forma se používala pro odlévání drobných ozdob a šperků. Každá kavita formy má vlastní primitivní vtokovou soustavu. Na formě můžeme vidět lidskou postavičku, kozu, ptáka a půl měsíce, které sloužily pravděpodobně jako přívěšky nebo náušnice. Pravděpodobně stáří této formy sahá přibližně 2 250 až 1 920 let před naším letopočtem. [9], [10]

Určitým zdokonalením mohlo být položení kamene na hladinu tekutého kovu vylitého do dutiny. To vedlo ke snížení účinků oxidace, ale vliv na tvar odlitku to nemělo. Dalším pokrokem ve vývoji bylo použití dvoudílných forem. K přesnějšímu způsobu vytváření odlitků přispělo odlévání metodou ztraceného vosku (dnes metoda vytavitelného modelu). Postup byl takový, že se nejdříve vytvořil díl, který měl být odlit, z vosku, ten se obalil formou z jílu nebo podobného materiálu. Po usušení byla forma vypálena a vosk z ní vytekl výpustným otvorem, který potom tvořil vtok, kterým byl roztavený kov naléván do formy. Po vychladnutí byla forma odstraněna a zůstal odlitek. Vtok mohl být potom rovněž odstraněn. Podle archeologických nálezů byla tato metoda používána již ve třetím tisíciletí před naším letopočtem. [7], [11], [12]

Při vykopávkách v Tell Agrabu v Iráku byl objeven model vozu taženého čtyřmi osly, jehož stáří se odhaduje na tři tisíce let před naším letopočtem, viz Obr. 3. Jedná se o nejstarší známý exemplář odlitý metodou ztraceného vosku. Podle úrovně zpracování

můžeme odhadovat, že tvůrce využil při jeho výrobě zkušeností mnoha předešlých generací, které tento postup znaly. Odlitek je vyrobený z bronzu, tak jako většina odlitků litých na ztracený vosk. [13], [14]



Obr. 3 - Vůz tažený čtyřmi osly [15]

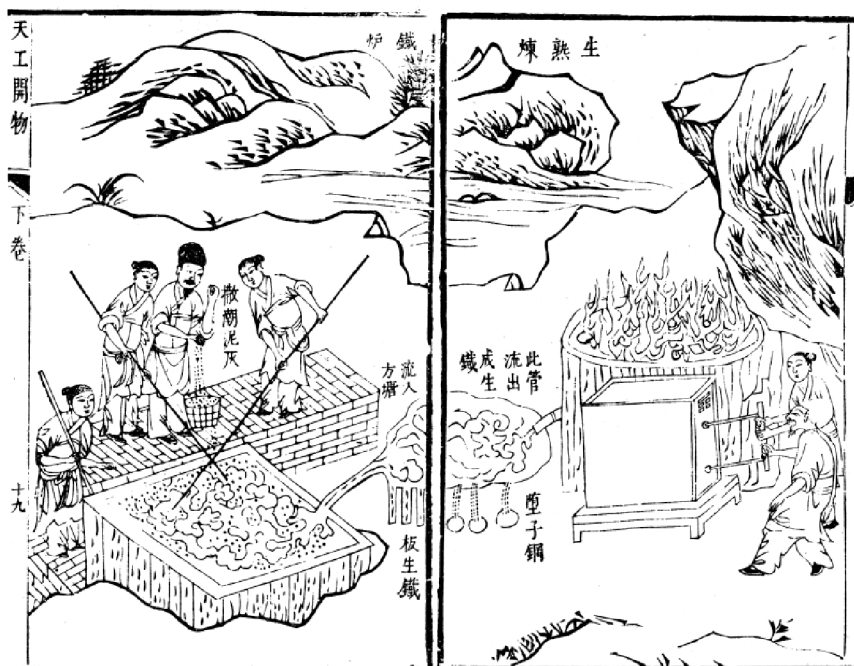
Podle dochovaných nálezů byla tato technologie rozšířena napříč Asií a Evropou tak, že koncem prvního tisíciletí před naším letopočtem byla používána od Číny po Velkou Británii. Existovaly však rozdílné varianty v technice provedení. V Anglii se používali formy z jílu, v Egyptě ze směsi koňského a kravského hnoje a v Indii se směs z hnoje používá dodnes. První část formy musela po vyschnutí věrně odrážet nejjemnější detaily provedené na voskovém povrchu, proto měla podobu řídké kaše. [2], [7]

Dále můžeme nalézt hmatatelné důkazy o prvním odlévání litiny na území dnešní Číny, a to už z 6. století před naším letopočtem, kde můžeme nalézt první odlité litinové sochy a zvony, viz Obr. 4. K roztavení litiny se používalo uhlí s vysokým obsahem síry, která velmi snížila teplotu tavení litiny ve srovnání s dnes používanými litinami, Obr. 4. [16], [17], [18], [19]



Obr. 4 - Typický čínský litý litinový zvon [20]

Trvalo asi 2 000 let, než se technologie odlévání litiny dostala do Evropy (cca 15. století) a dalších 300 let trvalo, než se litina hromadně rozšířila. [17]



Obr. 5 - Kresba zachycující čínskou metalurgii [21]

Tato kresba viz Obr. 5 pochází ze 16. století našeho letopočtu a popisuje nám prastaré umění Čínské metalurgie. Na levé straně kresby můžeme vidět čínské dělníky při procesu čerení. Pro tento proces používali oxid vápenatý. Na pravé straně kresby je znázorněna primitivní vysoká pec. [21]

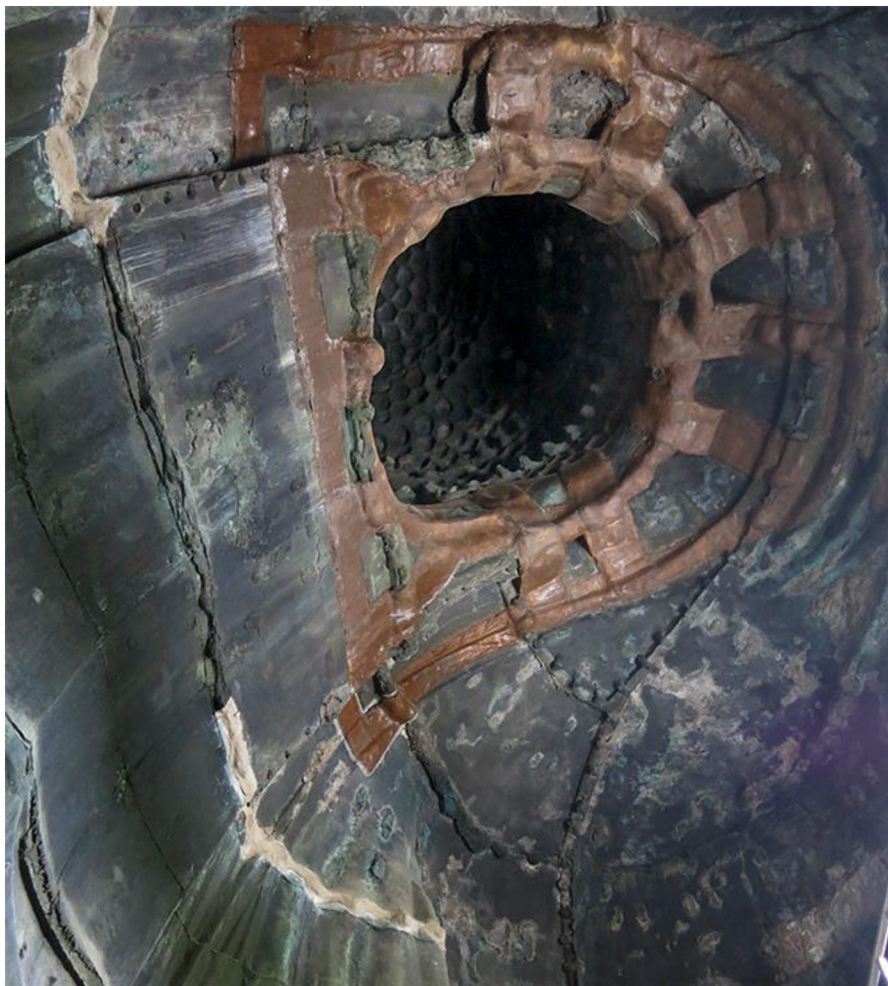
1.3 Středověk

Každá ze starověkých kultur měla své vlastní typy odlitků. Ozdobné odlitky v Číně či obrovské sochy v Řecku na paměť maratónského běhu z pátého století před naším letopočtem. Např. krétské odlitky druhého tisíciletí před naším letopočtem byly odlity s hrubým povrchem. V Japonsku bylo takto odlito mnoho soch Buddy. Úctyhodná je masivní socha Buddy v klášteře Todaiji v Kamakure, viz Obr. 6. Na její výrobu bylo spotřebováno 7 000 kg uhlí a 7 000 kg včelího vosku. [2], [22], [23]



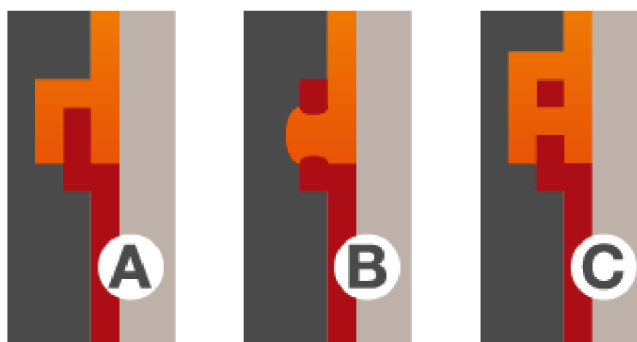
Obr. 6 - Socha Buddy Kamakura Daibutsu [24]

Tato socha Buddhy nemohla být odlita díky své velikosti najednou, a tak byla odlévána postupně. Tělo bylo postupně odlito ze 7 vrstev, obličej z 5 vrstev a zadní část hlavy ze 6 vrstev, viz Obr. 7. Jádro formy tvořila hlína s dřevěnými výztužemi a vnějšek byl vytvořen pouze z hlíny, po odlití poslední vrstvy byla celá socha zakryta formou (hliněným obalem), po úplném zatuhnutí byla nejdříve odebrána vnější hlína, dále bylo potřeba odstranit vnitřek formy (jádro), hlínu a výztuhy, k tomu sloužily dvě okna na zádech Buddhy. Celá socha pak byla pozlácena, bohužel toto pozlacení bylo postupně zničeno přírodními vlivy. [22], [23], [25]



Obr. 7 - Vnitřek sochy Buddhy Kamakura Daibutsu [26]

Z vnitřku sochy jsou jasně patrné jednotlivé lící roviny. Jednotlivé vrstvy byly tvarově zesíleny, takzvaně přeplátovány, viz Obr. 8. Přeplátování A bylo použito na zádech a břichu sochy. Přeplátování B na kolenou sochy. Přeplátování C na ramenou. [25]



Obr. 8 - Socha Buddhy Kamakura Daibutsu [25]

Z roku 1570 se nám dochoval rukopis vzácné odborné příručky, napsané česky Vavřincem Kříčkou z Bítýšky, zvonařem ze 16. století. Kříčkův rukopis je znám pod jménem Mathesis bohemia a je ve skutečnosti nejstarším dochovaným kompendiem slévárství. Kříčka byl znamenitým kovolítcem, znal lití do ztraceného vosku a zápalné střely. Jeho spis ukazuje vyspělost tehdejšího slévárství. Kříčka ve spolupráci s Tomášem Jarošem z Brna, královským puškařem, zhotovil Zpívající fontánu, viz Obr. 9. Tato fontána, která se nachází v Královské zahradě v Praze na Pražském hradě před Letohrádkem královny Anny, patří k vrcholnému dílu pražského kovolijce Tomáše Jaroše z Brna. Jednotlivé figury pro formu vytvářel mistr Vavřinec Kříčka z Bítýšky. [27], [28], [29]



Obr. 9 - Zpívající fontána [30]

Sochař, zlatník a spisovatel Benvenuto Cellini ve svém životopise popisuje, jak odlil hlavu Medúzy: *“Postavil jsem si novou pec, odlišnou od pecí ostatních sochařů, a kromě jiných důmyslných a nových zařízení, kterými jsem ji opatřil, pořídil jsem dva otvory na bronz, protože jinak by se nebyla tato neshdná a členitá socha nikdy zdařila.”* CELLINI, Benvenuto. *Vlastní životopis: [Vita]*. Praha: Sfinx, 1936. Knihovna mistrů, viz Obr. 10. Cellini ve svém díle také popisuje, jak vyráběl jádro. Všechny větší sochy jsou duté. Pro sochy v nadživotní velikosti musel být nejdříve vyroben rám ze dřeva, který se obalil jílem a různými druhy hnoje, jak již bylo zmíněno. Tak vznikl hrubý obrys sochy. Pak byl na toto jádro položen vosk určený k modelování. Jak zmiňuje Cellini, tak před tím byly do jádra v důležitých průřezích zasazeny slámky, které přečnivaly jádra zhruba o asi 12 mm. Vosk potom zcela pokryl slámky a pokud sochař při své práci na nějakou slámku

narazil, tak věděl přesně, kolik tloušťky voskové vrstvy na jádře zbývá. Pokud by sochař neměl tuto pomůcku, tak hrozilo, že odstraní příliš mnoho vosku, a to by mělo za následek vytvoření tenkých stěn formy a tím by došlo k poddimenzování konečného odlitku. [31]



Obr. 10 - Perseus s hlavou Medúzy r.1545 [32]

1.4 Novověk

Vzestup vědy, stále rychlejší technologický postup a začátky moderní společnosti zapříčinily vznik spojení funkčnosti předmětů denní potřeby a umění dohromady. Prvopočátky novověku můžeme najít v Itálii, ve Florencii. Pěkný příklad skloubení uměleckého odlitku a funkční věci jako jeden z prvních předvedl Lorenzo Ghiberti svým výtvořem Porta del Paradiso. Jedná se o dveře do kaple sv. Jana Křtitele, jejichž výroba trvala 27 let a byly dokončeny roku 1452. Tyto dveře se skládají z rámu, do kterého je zasazeno 10 desek, na kterých jsou vyobrazeny biblické výjevy. Rám a jednotlivé desky jsou z bronzu a byly odlity technologií ztraceného vosku. Forma byla vytvořena z hlíny, která byla následně vysušena a vypálena. Po odlití byly jednotlivé desky pozlacené pomocí zlatého prachu, který byl rozmíchaný ve rtuti a poté nanášen štětcem. Po zahřátí se rtuť odpařila a vytvořila z větší části hladký zlatý povrch. Celé dveře váží úctyhodných 4,5 tuny, viz Obr. 11. [33], [34], [35], [36]



Obr. 11 - Dveře Porta del Paradiso [37]

Umělecké odlévání se nevyhnulo ani pohřebnictví, i když jenom pro velmi movité. Názorným příkladem jsou litinové sarkofágy odlité ve Štěpánově nad Svratkou, Tyto sarkofágy jsou dokonalým dílem spojujícím slévárenské řemeslo s uměním. Sarkofágy jsou krásně zdobené a můžeme na nich najít různé symboly křesťanství a konce života. Každý, kdo byl uložen v těchto sarkofázích, byl balzamován a poté vložen nejdříve do dřevěné rakve, tato rakev byla vložena do cínové rakve a ta nakonec vložena do litinového sarkofágu, viz Obr. 12. [38]



Obr. 12 - Litinový sarkofág [39]

Technologie lití ztraceným voskem se od renesance používala k odlévání uměleckých odlitků, především soch a zvonů. Až v 19. století se začala tato technologie používat v lékařském odvětví. Došlo tak ke skloubení lékařského a uměleckého odvětví. V roce 1897 se americký zubař Phillbrook inspiroval technologií ztraceného vosku a upravil ji pro náhradu tehdejší velmi náročné technologie výroby korunek zubů, viz Obr. 13. Phillbrook tehdy nasadil pacientovi kus vosku na zlomený zub a vytvaroval ho tak, aby přibližně tvarově odpovídal zubu na opačné straně. Následně vytvarovaný kus vosku nechal odeslat k odlévání. Nejčastěji používaným materiálem na zubní korunky bylo zlato, a to především kvůli svým vlastnostem. Díky své houževnatosti nepoškozuje ostatní zuby při žvýkání a je korozivzdorné. [40], [41]



Obr. 13 - Zlatá umělá korunka [42]

Mezi významné představitele uměleckého odlévání v České republice známé ve světě patří sochař Otmar Oliva, který se své tvorbě používá technologii vytavitelného modelu. V roce 1998 také vytvořil medaili k 20. výročí papežského úřadu Jana Pavla II. Mezi jeho specializace patří zhotovování liturgických předmětů a úpravy chrámových prostor. Mezi jeho nejvýznamnější práce patří výzdoba kaple Redemptoris Mater papeže Jana Pavla II. Ve své malé slévárně ve Velehradu odléval se svými přáteli například kašnu, plastiku a pamětní desku, které zdobí nádvoří Reduty v Uherském Hradišti, viz Obr. 14. Týden vytvářel voskové modely, které zaformoval směsí sádry a antuky, dále pak byly vypáleny v peci při teplotě 400 °C. Toto vypalování trvalo tři dny v kuse a formy byly připraveny k odlévání. Po odlití a vychladnutí byly odlitky očištěny od forem a cizelěři provedli dokončovací práce. [43]



Obr. 14 - Otmar Oliva se svým dílem [44]

2 PŘEHLED MATERIÁLŮ POUŽÍVANÝCH PRO UMĚLECKÉ ODLÉVÁNÍ

U materiálů používaných pro umělecké lití se především klade důraz na jakost povrchu na úkor všech ostatních vlastností odlitků. Díky tomu jsou pro lití požadovány materiály, které jsou velmi dobře leštitelné a mají skvělou schopnost vyplnit všechny dutiny formy. [1], [12], [45], [46]

Umělecké odlitky bývají často s přidanou hodnotou, například použitím drahých ušlechtilých kovů nebo přidáním vzácných minerálů ať už se jedná o briliant nebo český granát. Dále pak je zajímavé skloubení umění a funkčnosti. Například na území České republiky můžeme najít skoro na každém starém nádraží krásné konstrukce odlité z litiny. U těchto materiálů se především klade důraz na výslednou povrchovou jakost, a proto se používají především slitiny mědi a dále pak ušlechtilé kovy zlato, stříbro či jejich slitiny. [1], [12], [45], [46]

Materiál se především volí podle velikosti odlitku a technologie odlévání. Další rozhodující vlastností pro volbu slitin na odlévání je šířka mezifázového rozhraní mezi tuhou fází a kapalnou, a tak volíme slitiny se složením co nejbližší k eutektickému bodu nebo přímo eutektické slitiny, jelikož mají výbornou zabíhavost. [1], [12], [45], [46]

2.1 Měď a její slitiny

Jelikož měď a její slitiny působením vnějších vlivů vytváří korodováním na svém povrchu ochrannou vrstvu, takzvanou měděnku, využívají se spíše její slitiny (bronzy a mosazi). Díky skvělým vlastnostem těchto slitin, zejména zabíhavostí a cenou, se bronzy a mosazi používají jak na velké, tak i malé objemy odlitků. Mezi jejich další přednosti patří nižší teplota tání (900 °C až 1080 °C), malé smrštění při chladnutí, čímž dokáže přesně okopírovat všechny detaily formy, které jsou lepší než u čisté mědi. Dále pak některé bronzy a mosazi mohou velmi dobře imitovat drahé kovy, jako jsou zlato nebo stříbro. Hippokrates 400 let před naším letopočtem věděl, že měď a její slitiny mají antibakteriální účinky, a tak se v dnešní době můžeme setkat s litými koupelnovými kohoutky, či klikami od dveří, viz Obr. 15. [47], [48], [49]



Obr. 15 - Bronzová okrasná klika [50]

2.2 Litina

Litina je slitina železa s uhlíkem, ve které je ve většině případů uhlík vyloučen ve formě grafitu. Díky malé finanční náročnosti a skvělým mechanickým vlastnostem (namáhání na tlak) se litina používá od drobných medailónků až po okrasné konstrukce nebo lavičky. Nově se do módy vrací kvalitní litinové nádoby, což se také dá brát jako umělecký odlitek. U nádobí je důležité propojení vzhledu s funkčností, tak aby sloužilo ke svému účelu svým tvarem a povrchovou úpravou. [1], [46], [48]

2.3 Zlato a jeho slitiny

Zlato už od pradávna bylo znakem bohatství a úspěchu. Je velmi ceněné pro své vlastnosti, jako je chemická stálost, houževnatost a zdravotní nezávadnost. Používá se především na výrobu šperků nebo umělých zubních náhrad. [12], [45]

2.4 Stříbro a jeho slitiny

Stříbro stejně jako zlato je také velmi ceněné, i když není až tak chemicky stálé a na vzduchu vytvoří sulfid stříbrný, takzvaně začne černat, viz Obr. 16. A tak se čisté stříbro moc nepoužívá. Nejčastěji se používá ve formě slitin. Ve šperkařství se nejčastěji setkáváme se slitinou stříbra s mědí (Ag s 4,16 až 7,5 % Cu). Mezi nově objevené slitiny stříbra patří slitina $\text{Ag}_{93}\text{Cu}_6\text{Ge}_1$, při zahřátí této slitiny na cca 230 °C dochází k oxidaci germania (vznik oxidu germaničitého) na povrchu a tím vytvoření ochranné vrstvy na povrchu. Tato ochranná vrstva zabraňuje vzniku sulfidu stříbrného a je také odolná proti poškrábání. [12], [45], [51], [52]



Obr. 16 - Stříbrná amfora na parfém (Tiffany & Co.) [53]

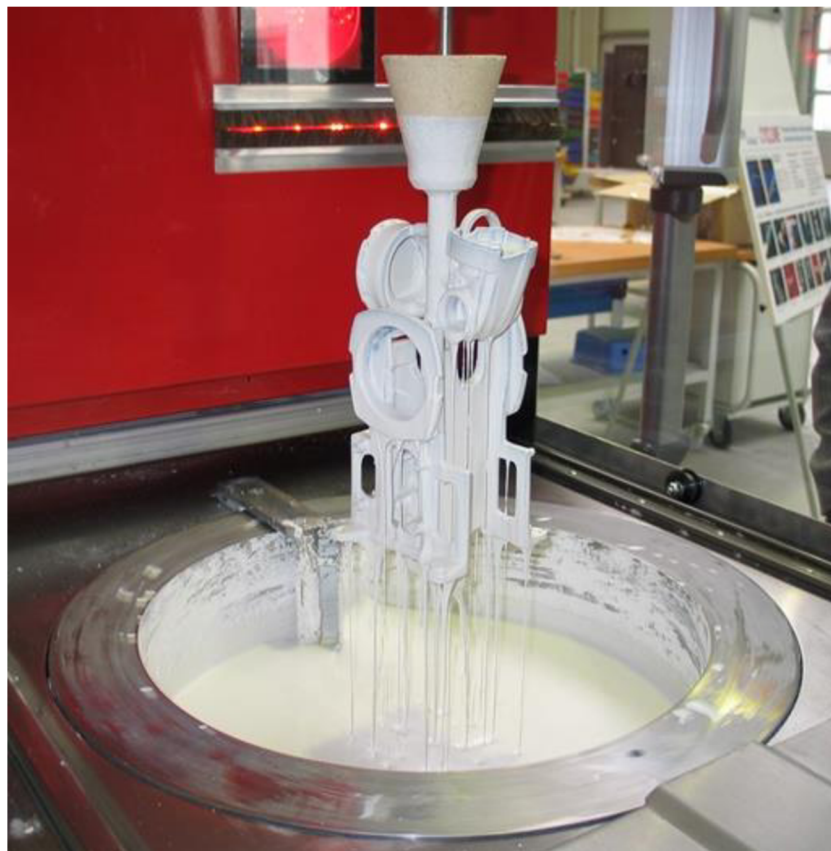
3 PRINCIP A TECHNOLOGIE VYTAVITELNÉHO MODELU

Technologie vytavitelného modelu, je technologie, která patří mezi metody přesného odlévání. Je to způsob lití kovu, při kterém se roztavený kov nalije do formy, která byla vytvořena pomocí vytavitelného modelu. Po vytvoření formy se nechá vytavitelný model roztavit a vytéct. Je to technologie, kdy se jako vytavitelný (spalitelný) materiál používá vosk, plast, pryskyřice atd.. Kvalita vytavitelného modelu je klíčová pro finální kvalitu odlitku. Vytavitelný materiál by měl mít tyto vlastnosti: nízká teplota tavení, nízká tepelná roztažnost, nereaktivita s formou a nízká viskozita v tekutém skupenství. [2], [54], [55]

3.1 Princip a postup výroby vytavitelného modelu a forem

Vytavitelný model je možné vytvořit obráběním voskových polotovarů či ručním tvarováním vosku, či vstříkovat do kovových forem. Dále se může gravitačně odlévat do forem z různých materiálů. Tyto formy mohou být kovové, plastové, silikonové, či z pryskyřice. [2], [54], [55]

Jednotlivé vytavitelné modely se připájejí či přilepí na vtokovou soustavu a vytvoří se tím takzvaný stromeček. Tvar stromečku je ovlivněn velikostí, počtem modelů, dále také způsobem obalování, vytavování, litím a licím materiálem. Tento stromeček se buď zaleje sádrou a nechá vytvrdit nebo je stromeček máčen v keramické břečce a následně se přebytečná keramická břečka nechá odkapat, viz Obr. 17. Pak se posype posypovým materiálem (ostřivem) a vrstva se nechá vyschnout. Sušení jednotlivých vrstev probíhá na vzduchu s řízenými podmínkami, jako je teplota, vlhkost a proudění vzduchu nebo se vysušuje pomocí plynného činidla například plynného amoniaku. Tento proces se několikrát opakuje, dokud tloušťka keramické formy není dostatečná. [2], [54], [55]



Obr. 17 - Máčení stromečku v keramické břečce [56]

Následně se formy musí zbavit vytavitelného modelu. Na tento proces se využívá autokláv, kde se vosk ve formě pomocí přtlaku a přehřáté páry roztaví, vyteče, a tak vytvoří hotovou formu připravenou k lití. Při tomto způsobu je dále nutné žíhat formu, aby došlo k jejímu vytvrzení při teplotách 900 °C až 1000 °C (pro SiO₂) a 1200 °C až 1400 °C (pro Molochit a korund). Při tomto procesu dojde k odstranění všech těkavých látek a dojde k transformaci amorfni vrstvičky SiO₂ na krystalickou strukturu. Nebo se tyto dva procesy sloučí v jeden proces a forma se vypálí a zároveň vytvrdí v peci, kde vosk vyteče nebo shoří. Při tom také může dojít k popraskání formy, kvůli větší tepelné roztažnosti vosku, než je u keramické formy, a proto tento proces není doporučován. [2], [54], [55]

3.2 Odlévání

Po vytvrzení se do formy hned lije roztavený kov, aby se zamezilo teplotnímu šoku a tím popraskání formy zapříčiněné transformací SiO₂ při teplotě 572 °C. Po zchladnutí kovu se forma rozbije nebo otryská vodním proudem. Následně se odlitky odřezávají od vtokové soustavy a poté se kontrolují. Po odřezání od vtokové soustavy odlitky ve většině případů nevyžadují žádné nebo minimální dokončovací operace. [2], [54], [55]

PRAKTICKÁ ČÁST

4 VÝROBA VYTAVITELNÝCH MODELŮ

Kvalita vytavitelných modelů by měla být co nejlepší, co se týče jednotlivých detailů a tvarů, které by měl mít finální odlitek. Existuje několik způsobů výroby vytavitelných modelů. Modely mohou být i z velmi odlišných materiálů.

4.1 Výroba vytavitelných (spalitelných) modelů pomocí 3D skeneru

Z důvodu tvarové složitosti a množství detailů modelu se opustilo od ručního vymodelování, ale zvolil se způsob 3D naskenování na optickém 3D skeneru GOM Atos Compact 2.

4.1.1 Příprava 3D skeneru

Pro přípravu skeneru bylo potřeba nejdříve nasadit snímací čočky 3D skeneru. Dále byla provedena kalibrace pomocí kalibračního terče, kde se skenovalo 20 poloh kalibračního terče vůči 3D skeneru.

4.1.2 Příprava dílu pro skenování

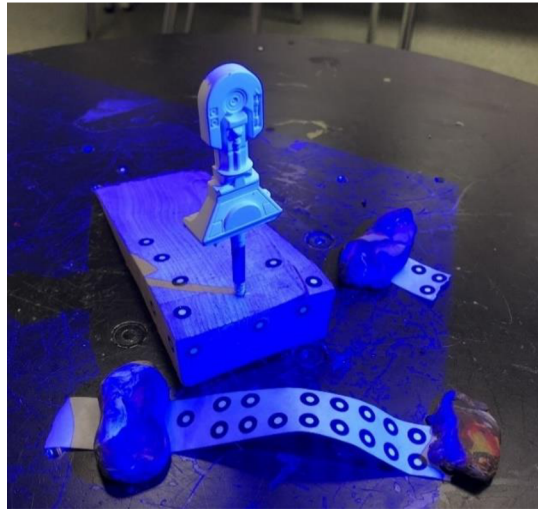
Pro zlepšení kvality skenování bylo potřeba figurky rozložit na jednotlivé díly, a to z důvodu detailů mezi nožičkami a tělem, které by nebylo pravděpodobně možné naskenovat. Rozložit figurku šlo pouze na tělo a dvě nožičky. Z důvodu reflexního povrchu postavičky bylo potřeba celý povrch zmatnit. Ke zmatnění povrchu dílů postavičky byl použit MR2000 antireflexní křídový sprej, kde se stříkal na celý povrch dílu postavičky. Po úplném zaschnutí byly nerovnoměrně nalepeny na povrch těla figurky referenční body. Jednotlivé díly byly postupně připevněny na podstavec, na který byly také nalepeny referenční body. Dále byl pomocí modelovací hmoty připevněn na otočný stolek pás s referenčními body. Na nožičky nebylo možné lepit referenční body, a to z důvodu velmi malých ploch na nožičkách. Tyto referenční body slouží k orientaci mezi jednotlivými skeny. Podstavec s dílem byl umístěn přibližně na střed otočného stolku 3D skeneru, viz Obr. 18.



Obr. 18 - Připravený díl pro skenování

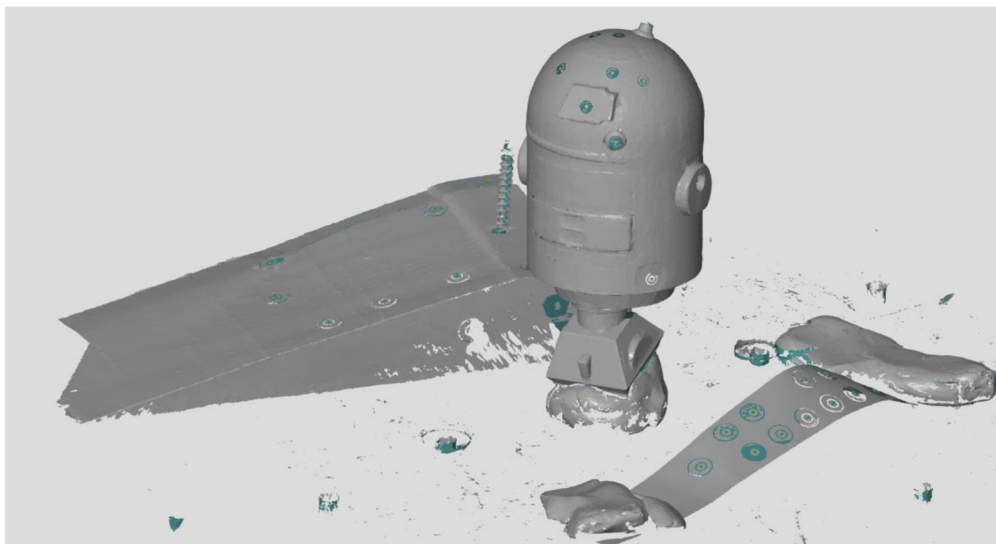
4.1.3 Skenování dílů

Nejdříve byl skener namířen pomocí laserů směrem seshora na snímání dílu a poté byly naskenovány polohy a rozložení referenčních bodů na povrchu dílu, viz Obr. 19.



Obr. 19 - Skenovaný díl

Dále začalo postupné skenování, kdy jeden sken zaznamenal jen určitou část plochy, dále se vždy musel otočný stůl pootočit a nasnímat další sken. Poté se skener nasměroval na spodní část dílu a celý proces se opakoval, dokud nebyl celý díl naskenován postupným automatickým skládáním těchto skenů pomocí programu Atos Professional. V tomto programu také proběhl export těchto skenů do mračna bodů, které vytvořily síť ploch, viz Obr. 20. Následně byly vymazány nežádoucí naskenované plochy, a to plochy stojánku, modelovací hmoty, pásu s referenčními body a otočného stolku.

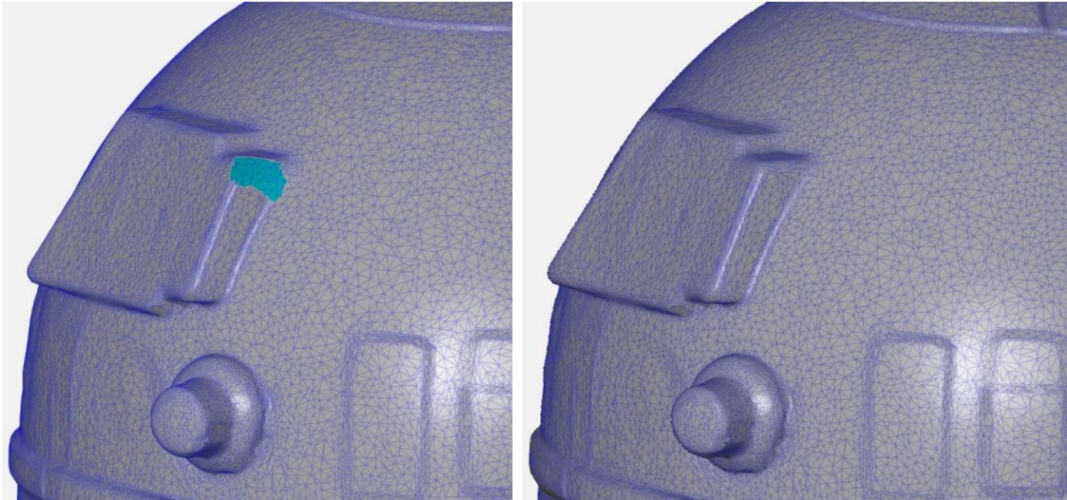


Obr. 20 - Naskenovaný díl s nežádoucími plochami

4.1.4 Úprava skenů jednotlivých dílů

Nejdříve byl proveden import sítě plošek do programu GOM Inspect. V tomto programu se síť plošek dala upravovat a opravovat. Při skenování vzniklo hodně nedokonalostí v podobě děr v síti plošek, viz Obr. 21. Jednotlivé nedokonalosti v síti plošek bylo potřeba zaslepit a některé bylo dokonce potřeba domodelovat znovu. Větší díry se museli zaslepit ručně, viz Obr. 21. Malé díry automaticky zaslepil program, tyto

díry zrekonstruoval pomocí algoritmu, který přepočítává náhradní plochu z okolních plošek pro zaslepení.



Obr. 21 - Vlevo díra v síti plošek, vpravo zaslepená díra v síti plošek

Větší díry bylo potřeba domodelovat přes různé příkazy například Cylindre, Sphere, Bridge, kvůli zachování všech detailů skenovaného dílce. Po uzavření všech děr v modelech bylo potřeba definovat souřadný systém. Následoval export těchto modelů do formátu .stl. Následoval import do programu Autodesk Fusion 360, kde došlo k výrazné redukci plošek, a to přibližně o 80 % na 50 000 plošek z důvodu nedostatečné výkonnosti výpočetního zařízení a omezení tohoto programu. Tato redukce výrazně snížila množství naskenovaných detailů. V tomto programu se dále vygenerovalo objemové těleso, viz Obr. 22.

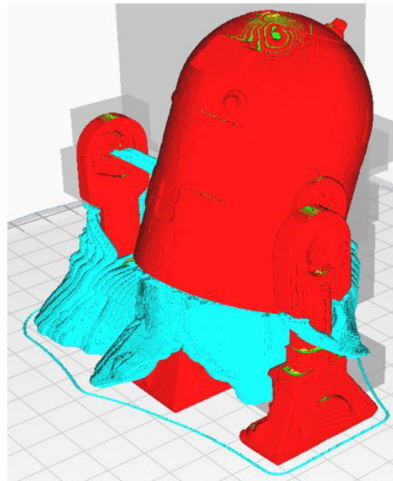


Obr. 22 - Vygenerovaná objemová tělesa

4.1.5 Tisk spalitelného modelu metodou FDM z PLA

Z důvodu potřeby zachování detailů byla použita technologie 3D tisku a to FDM na tiskárně Anycubic Kossel Plus. Pro tisk byl zvolen materiál PLA (kyselina polyléčná v kombinaci s modifikovaným kukuřičným škrobem), a to z důvodu dobré schopnosti vytavení z keramické skořepiny. Kromě toho je tento materiál přírodního původu, pokud do něj nejsou přidávány další aditiva, jako jsou například barviva, takže je ekologický.

Výška tisknuté vrstvy byla nastavena na adaptivní, díky čemuž se zkrátila doba tisku se zachováním detailů. Dále bylo potřeba navrhnout, v jaké orientaci se bude tisknout model, a to z důvodu, aby se neodlepil od podložky a také kvůli využitelnosti materiálu a dalších tiskových parametrů doporučených pro tento materiál. Vybraný software (Ultimaker Cura 4.5) si dále sám navrhnul tiskové podpory, viz Obr. 23.



Obr. 23 - Model s vygenerovanými tiskovými podporami FDM

Před tiskem byla vyčištěna tisková plocha izopropylalkoholem a na paměťovou kartu byl uložen G-Code. Model po dokončení tisku bylo potřeba zbavit tiskových podpor, a to jejich odlomením. Na povrchu modelů byly viditelné tiskové vrstvy, které byly odstraněny natavením povrchu dílu horkovzdušným fénem, viz Obr. 24, kde se po zahřátí částečně nožička zdeformovala.



Obr. 24 - Vyhlazený model FDM

4.2 Výroba voskových vytavitelných modelů

Pro výrobu forem na vytavitelné voskové modely byla použita silikonová pryskyřice, a to z důvodu, že formy z jiných materiálů nejsou příliš odolné při opakovaných použití pro tento případ a nedostatečně vyzdvihují detaily povrchu.

4.2.1 Výroba forem na voskové modely

Jako materiál na formu byla tedy zvolena silikonová pryskyřice ESSIL 125 firmy Sika. Matečný model byl rozložen na tělo a nohy, následně byl omyt v jarové vodě, kvůli zbavení nečistot a mastnoty, které se nacházely na povrchu a následně byly vysušeny. Pomocí tvrdé PE fólie byl vytvořen skelet formy pro tělo, který byl utěsněn lepící páskou a vteřinovým lepidlem. Válcový tvar skeletu formy byl zvolen z důvodu tvaru těla součásti modelu, který je válcovitý, pro nohy matečného modelu byly také zvoleny válcovité tvary, a to z důvodu jejich malého tvaru. Jako skelety se použily PE kelímky 0,3 l a stejný postup. Následně byly díly modelu jednotlivě zafixovány ve skeletech forem pomocí modelovací hmoty a vteřinového lepidla, viz Obr. 25.



Obr. 25 - Skelet formy s tělem

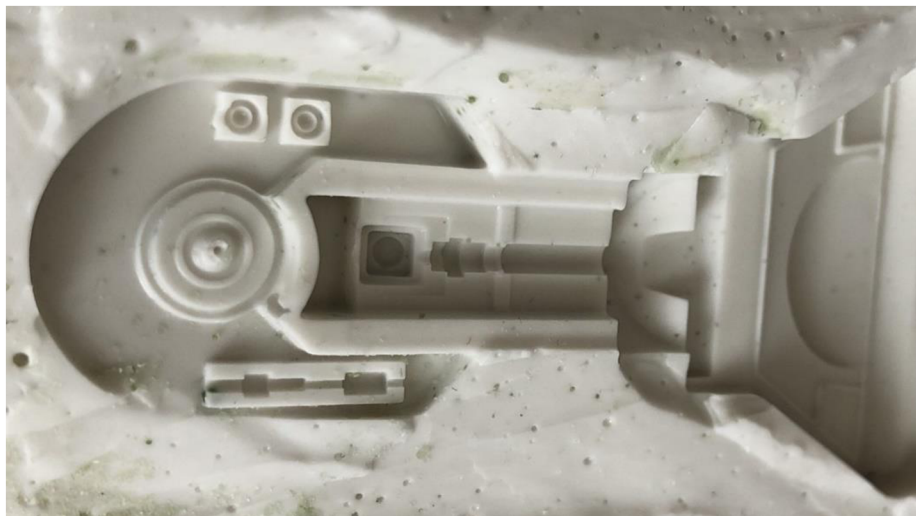
Silikonová pryskyřice ESSIL 125 byla vytvrzena katalyzátorem ESSIL 124, a to smícháním v hmotnostním poměru 100:5. Pro správné vytvrzení bylo potřeba dokonalé promíchání obou složek, které bylo znesnadněno vysokou viskozitou pryskyřice, a tak se složky kontinuálně promíchávaly cca 5 minut. Bohužel se formy nemohly vakuovat kvůli dutosti matečných modelů, aby nezatekla směs dovnitř modelů. Při míchání se do směsi dostaly vzduchové bubliny, proto se počítalo se vznikem vzduchových bublin ve formách. Následně se nechala směs 1 minutu odstát, aby se dostaly vzduchové bubliny na povrch a tím se ve výsledné formě omezily vzduchové bubliny. Jednotlivé matečné modely se postupně pomalu zalévaly ze šikma. Pak se narovnaly, aby směs obtekla matečný model. Dále pomocí vibrací vyvolaných boucháním do skeletů forem se vzniklé vzduchové bubliny dostaly na hladinu směsi. Formy se vytvrzovaly 12 hodin na místě bez otřesů, které by mohly výrazně snížit výslednou kvalitu forem. Po 12 hodinách byly jednotlivé vytvrzené formy vyjmuty ze svých skeletů a řízny přibližně v půlce. Po

rozříznutí byly vyjmuty matečné modely a zkontrolovány formy. Dle očekávání bylo ve formě těla větší množství vzduchových bublin, viz Obr. 26.



Obr. 26 - Vzduchové bubliny v kavitě formy

Výsledná kvalita povrchu kavity formy byla na dobré úrovni, forma detailně okopírovala všechny detaily matečného modelu, viz Obr. 27. Následně byly ostříhány některé otřepty, které vznikly uvnitř formy zatečením směsi otvory do modelu.



Obr. 27 - Detail kavity formy

4.2.2 Odlévání voskových modelů

Pro výrobu voskových modelů byly vyzkoušeny 3 druhy vosků. Jelikož se jednalo o umělecké odlévání, kladly se vysoké požadavky na kvalitu voskových modelů, a tak byl tento proces velice složitý a musel být několikrát opakován a upravován.

Díly formy se musely pevně spojit k sobě. Při prvních pokusech probíhala tavnba vosku v ocelovém kalíšku ve vodní lázni. Kvůli tomu, aby se vosk nepřipálil, byl vosk slit do forem a následně se formy nechaly chladnout cca 1 hodinu. Poté byly voskové modely vyjmuty a byl vyhodnocen výsledek práce. Tyto první voskové modely byly kvalitativně velmi nedostačující, a to kvůli tomu, že vosk nezatekl kompletně do všech částí forem viz Obr. 28. Při dalším odlévání už se zahřívaly formy ve vodní lázni při cca 80 °C a tavnba

vosku byla beze změny. Bohužel se i takto nedařilo odlít a vosk znovu nezatekl do všech částí formy.



Obr. 28 - Špatně odlitá nožička

Při dalších pokusech odlévání vosku bylo doporučeno lít při vibracích. Vibrace byly vytvořeny úderem do stolu při lití, ale ani tato technika nepomohla. V další fázi pokusů při odlévání se vosk tavil bez vodní lázně a byl přehřát cca na 120 °C. Touto teplotou došlo k přepálení vosku a jeho následné degradaci. Po odlití a zatuhnutí vosku, kdy vosk zatekl úplně do všech částí formy těla, ale nožičky nebyly úplně dolité, byly viditelné povrchové bublinky na voskových modelech, a to z důvodu přepálení vosku, viz Obr. 29.



Obr. 29 - Povrchové bublinky zapříčiněné přepálením voskem

Výsledkem odlévání tohoto modrého vosku od firmy Blayson bylo, že jeho vysoká viskozita znemožnila odlít kvalitní voskové modely, a tak se musel změnit vosk, který měl mít nižší viskozitu. Použitím vosku s nižší viskozitou než u předešlého, se podařilo vytvořit mnohem lepší modely těla, kde ve spodní rovině byly nedokonalosti na povrchu, a to bubliny vzduchu zapříčiněné vzduchovými bublinami na formě. Tyto nedokonalosti

se už daly opravit ručně, viz Obr. 30. Bublinky byly opraveny ručním vtlačáním nataveného vosku a následně se pomocí skalpelu odřízl materiál, který tam přebýval.



Obr. 30 - Kavity na povrchu modelu

Nožičky modelu nebyly kompletně dolity, proto se opakoval předchozí postup, ale bez úspěchu. Následně se použil vosk (AC0401) od firmy Blayson na detaily s velmi nízkou viskozitou a výbornou zabíhavostí. Nožičky se podařilo krásně odlít. Úspěšný postup odlévání tedy záležel především na použitém vosku, správné teplotě lité vosku a správném zahřívání forem, viz Obr. 31.



Obr. 31 - Tavba vosku a zahřívání forem

4.2.3 Vytvoření stromečků

Výsledné voskové modely bylo potřeba očistit od otřepů vzniklých zatečením roztaveného vosku do dělicí roviny formy. Toto začištění bylo provedeno pouze přejetím ostří skalpelu po povrchu modelu. Díky kvalitním formám a několika pokusům odlévání a měnění druhů vosků, byly výsledné voskové modely kvalitní. Nedostatky na jednotlivých modelech byly opraveny pájkou a modrým měkkým opravným voskem (A7-208) od firmy Blayson. Poté byl odlit do kokily vtokový kanál. Na vtokový kanál musel být použit vosk na vtokové soustavy s nižší teplotou tavení (AC0458) od firmy Blayson, aby se nejdříve natavil a vytekl, poté se začal tavit vosk z modelů, a to z důvodu zabránění popraskání skořepiny. Následně byly jednotlivé modely připájeny na vtokový kanál, viz Obr. 32. Ke vtokovému kanálu byl připevněn pomocí modelovacího vosku lící keramický trychtýř a následně byl zalit voskem.



Obr. 32 - Výsledné voskové modely připájené ke vtokovému kanálu

5 ODLÉVÁNÍ

Pro odlévání byl zvolen cínový bronz CuSn8 s teplotou tavení cca 1040 °C. Tato slitina má lepší korozivzdornost, vyšší pevnost a odolnost proti otěru než cínové bronzy s nižším obsahem cínu a také díky menší šířce mezifázového rozhraní mezi pevnou fází a kapalnou lepší zabíhavost. Jako forma byla zvolena skořepina z důvodu různých možností intenzit odvodu tepla a zabránění popraskání forem, kde u formy ze sádry bychom nemohli tak dobře odvádět teplo.

5.1 Výroba skořepin

Jednotlivé stromečky byly umístěny do centra Cyclone od firmy MK Technology, které automaticky máčelo jednotlivé stromečky v keramické suspenzi, neboli keramické břečce, která je založená na pojivu Primcote s velmi malou velikostí zrn oxidu křemičitého (maximální velikost zrna 10 nm), a následně posypávalo (primární a sekundárním) posypem. Byl použit jeden primární obal, který byl tvořen z keramické suspenze, posypán zirkonovým pískem. Celkem bylo použito sedm sekundárních obalů, které byly tvořeny ze stejné keramické břečky a posypány pískem (MULLITE 55 od firmy Dupré Minerals) s větší velikostí zrna (od 0,18 do 0,5 mm) kvůli zachování prodyšnosti.

5.2 Příprava forem pro odlévání

Jednotlivé skořepiny bylo potřeba zbavit vytavitelných modelů a voskové vtokové soustavy. Vytavování probíhalo cca 20 minut při 580 °C v komorové peci od firmy LAC. Dále bylo potřeba jednotlivé skořepiny zkontrolovat, jestli nepopraskaly při vypalování, žádná z forem nepraskla. Dále bylo potřeba vytvrdit skořepiny. Vytvrzování probíhalo ve stejné peci při teplotě 1050 °C cca hodinu a půl, viz Obr. 33.



Obr. 33 - Vytvrzování skořepin

5.3 Tavba a odlévání

Jako vsázka do pece byl použit čistý hutní materiál (tyčovina). Tavilo se v kruhové peci od firmy LAC. Pec byla nejdříve nahřata na 500 °C s keramickým kelímkem, aby se odstranila vlhkost v peci, a poté byla vložena vsázka a pec se nastavila na teplotu 1130 °C. Trvalo cca dvě hodiny, než pec tuto teplotu dosáhla. Po dosažení teploty a částečném natavení bylo přidáno sklo, které zabraňuje oxidaci taveniny, a to tím, že po roztavení vytvoří souvislou vrstvu na hladině a zamezí přístupu okolní atmosféry. Podle roztaveného skla můžeme teoreticky určit přibližně teplotu taveniny, a to z jeho viskozity. Po dosažení požadované teploty pece se změnila teplota taveniny pomocí sondy s termočlánkem Ditem 97. Teplota byla 1 118 °C. Bylo staženo roztavené sklo a do taveniny se vhodil dezoxidační prostředek, a to ve formě předslitiny CuP v množství 0,3 % hmotnosti vsázky. Tavenina se prudce zamíchala a stáhla se struska tvořená oxidy. Těsně před litím se naposledy změnila teplota taveniny, která byla 1 095 °C a odlily se postupně jednotlivé skořepiny. Byly vybrány tři typy intenzity odvodu tepla jednotlivých skořepin. Odvod tepla pomocí broků, skořepina formy se zasypala pomocí ocelových broků, viz Obr. 34, které dobře odvádí teplo.



Obr. 34 - Zasypávání skořepiny ocelovými broky

Další způsob byl pomocí proudu vzduchu a další forma se nechala volně vyzářit. Dále se pak skořepiny dochlazovaly ve vodní lázni, kde částečně popraskaly. Následně po vychladnutí odlitků byla skořepina odstraněna z odlitků. Zbytky skořepin na povrchu odlitků byly opískovány a následně byly jednotlivé díly odřezány od vtokového kůlu.

Nohy na všech tělech odlitků popraskaly, viz Obr. 35. Tyto praskliny se vytvořily pravděpodobně vznikem staženiny, a to z důvodu, že tyto nohy ležely mezi velkými masami hmoty. Noha ztuhla jako první a byla vystavena vysokému napětí, a tak vytvořila interkrystalickou trhlinu. Po dolomení noh byla dále pouhým okem viditelná zhrubnutá zrna.



Obr. 35 - Detail trhliny nohy

Další staženina s menšími trhlinami se objevila na spodní části těla. Tato část těla není pohledová, tak staženina nevadila, viz Obr. 36.



Obr. 36 - Detail staženiny s trhlinami na spodní části těla

Jednotlivá odlitá těla si zachovala skoro všechny detaily voskových modelů až na popraskané nohy. Jednotlivé pozůstatky nohou byly od těla odřezány a zbroušeny. Z malého rozdílu odstínů barev jednotlivých odlitků se došlo k závěru pravděpodobné změny chemického složení na povrchu jednotlivých těl, kde pravděpodobně difundoval cín ze středu těla na povrch, tato změna je patrná z rozdílných druhů ochlazování skořepin.

Nožičky se nepodařilo kompletně dolít, viz Obr. 37.



Obr. 37 - Nedolitá nožička

Nedolítí nožiček mohlo být zapříčiněno různými vlivy: nedostatečné teplotě a ochlazení taveniny o kelímek (vysoké viskozitě, nedostatečný čas na zatečení před ztuhnutím), malé rychlosti lití, malé prodyšnosti formy, malé licí výšce, na stromečku se nacházely malé i velké odlitky, které se vzájemně ovlivňovaly, změnou chemického složení, kdy při tavení mohla slitina zoxidovat a tak snížit obsah cínu, nedostatečně teplé skořepině, kde skořepina chladla na vzduchu cca 5 minut, než se do ní začalo lít, a tak tavenina příliš rychle zchladila, čímž nezatekla kompletně do všech kavit formy. Pouze jedna nožička z osmi se podařila dolít. Tato nožička pocházela z lití, kde se ochlazovalo ocelovými broky, viz Obr. 38. Vytavitelný model pro tuto nožičku byl z PLA.



Obr. 38 - Dolitá nožička (PLA)

Z důvodů nedolítí nožiček a popraskání noh byl upraven postup odlévání. Na stromeček byly připájeny pouze nožičky a nohy. Zdvojnásobila se licí výška, čímž se zdvojnásobil hydrostatický tlak, který tlačí taveninu do kavity skořepiny. Byla provedena změna na sekundárních obalech skořepiny, byl použit posypový materiál s větší velikostí zrn (Molochite – 1630DD/G1912 W, od firmy Imerys), z důvodu zvýšení prodyšnosti skořepiny. Zvýšila se teplota pece na 1 200 °C, tedy o 70 °C. Dále se cca po minutě od vytažení skořepiny z pece lilo. Podařilo se odlít všechny nohy, ale z osmi nožiček se podařila odlít s menším nedostatkem pouze jedna, viz Obr. 39.



Obr. 39 - Dolitá nožička s menším nedostatkem

Z důvodu dalšího neúspěšného pokusu, padlo podezření na změnu chemického složení, a to z důsledku možné oxidace taveniny (především cínu), jelikož se použily nepovedené odlitky, jako vsázky na tavby, a tak byla provedena metalografická zkouška chemického složení. Na zkoušku byly vybrány vzorky: vsázka na první tavbu, z první tavby tělo chlazené ocelovými broky a z druhé tavby zbytek vtokového kanálu. Oba vzorky bylo potřeba zbrousit, aby mohla být provedena metalografická zkouška.

Metalografická zkouška byla provedena ručním spektrometrem Delta od firmy Olympus Innov-X. Každý vzorek byl třikrát zkoušen a poté byl udělán z těchto dat aritmetický průměr. Výsledky zkoušek, viz Tab. 1.

Tab. 1 – Chemické složení jednotlivých taveb.

zkoušený materiál	Cu - měď (%)	Sn – cín (%)	Ni – nikl (%)
prvotní vsázka	92	8	0
první odlitky	92,2	7	0,8
druhé odlitky	93	6,2	8,8

Z tabulky je vidět, že došlo k propalu cínu (proběhla oxidace cínu v tavenině), při každém tavení.

I tak byla provedena pouze jedna změna na stromečku a na nožičkách. Kavita na hlavičce nožičky byla vyplněna voskem. Dále byly nožičky připájeny ke vtokovému kanálu stejně, jako v předchozích pokusech. Nožičky byly obohaceny o licí kanálky. Tyto vtokové kanálky byly vytvořeny z vosku odlitého do brček s větším průměrem a následně připájeny mezi vtokový kanál a hlavičky nožiček, viz Obr. 40.



Obr. 40 - Výsledný stromeček se vtokovými kanálky

Při vypalování skořepina popraskala, a tak bylo potřeba jí zalepit opravným tmelem a následně se opakoval technologický postup. Všechny nožičky se podařilo kompletně dolít, viz Obr. 41, při teplotě taveniny 1 160 °C v peci a 1 153 °C těsně po lití.



Obr. 41 - Výsledný odlitek nožiček

5.4 Práce po odlévání

Jednotlivé odlitky bylo potřeba odřezat od licího kanálu a následně zbrousit plochy. Dále bylo potřeba odlitky vyleštit na hadrové leštičce s použitím leštící pasty.

Poté bylo potřeba přivařit nožičky a nohy k tělu. Nejprve proběhly pokusy svařování technologií WIG, MIG, ale bez úspěchu. V obou případech se nepodařilo dostatečně svařit nožičky a tělo, a to z důvodu malé hmotnosti nožičky a velké hmotnosti těla, čímž se nejdříve začala natavovat nožička a až po dlouhé době tělo. A tak pro spojení bylo zvoleno dvousložkové houževnaté epoxidové lepidlo Loctite 3425 na lepení mědi a jejích slitin. Jednotlivé části se podařilo optimálně slepit dohromady, viz Obr. 42.



Obr. 42 - Hotové umělecké odlitky

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vytvoření přehledu historie uměleckého odlévání od starověku až po současnost s využitím celosvětové literatury. Dále v teoretické části je stručně charakterizovaná metoda vytavitelného modelu, která patří mezi nejpřesnější metody odlévání. Tato technologie je rychlá a progresivní.

V praktické části bylo úkolem vytvoření uměleckých, moderně pojatých odlitků z bronzu technologií vytavitelného modelu na základě dětské hračky, a to pomocí různých technologií výroby vytavitelných (spalitelných) modelů. Pomocí silikónové pryskyřice byly vytvořeny formy pro první technologii výroby vytavitelného voskového modelu. Na voskové modely byly použity různé druhy vosků z důvodu dosažení co nejkvalitnějších voskových modelů a postupné zdokonalování technologického postupu výroby těchto modelů. Druhá technologie použita na výrobu vytavitelného (spalitelného) modelu spočívala v naskenování modelu pomocí 3D skeneru a následnou úpravou skenu. Poté byl vytisknut model z PLA, a to technologií FDM. Z těchto vytavitelných modelů byly vytvořeny skořepinové formy, které se pomocí vypalování zbavily vytavitelných modelů a následně se skořepiny vytvrdily. Poté se do těchto skořepin odléval cínový bronz. Z důvodu tenkých stěn modelu nožiček se musel měnit postup odlévání a tvary stromečků. Jednotlivé díly figurky bylo potřeba k sobě spojit. Nejdříve byl pokus svařit, kde se ukázalo, že součásti jsou skoro nesvařitelné. A tak se jednotlivé díly k sobě lepily.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SLOVÁK, Stanislav. *Teorie slévání*. 1. Praha: SNTL Praha, 1990. ISBN 80-03-00400-4.
- [2] BEELEY, Peter R a Robert Fyffe SMART. *Investment casting*. 1. Cambridge, UK: The University Press Cambridge, 1995. ISBN 0-901716-66-9.
- [3] BEDNÁŘOVÁ, Vlasta. *Základy teorie a technologie slévárenství* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/618/618-Zaklady_teorie_a_technologie_slevarenstvi.pdf
- [4] KOPEČEK, Pavel. *Přehled světových dějin* [online]. [cit. 2020-03-27]. Dostupné z: <http://ksv.upol.cz/txt/PSD.pdf>
- [5] ŠTECHMILER, Rudolf. *Živá minulost naší techniky: pásmo historických reportáží o životě a díle některých čelných průkopníků naší techniky*. 1. Praha: Mladá fronta, 1954.
- [6] LADISLAV, Jílek. *Metal 2003: 12. mezinárodní konference metalurgie a materiálů, 20.-22.5.2003, Červený zámek, Hradec nad Moravicí, Česká republika*. 1. Ostrava: Tanger, 2011. ISBN 80-859-8882-8.
- [7] *Slévárenství: časopis ministerstva strojírenství a ministerstva hutního průmyslu a rudných dolů*. Praha: Ministerstvo strojírenství, 1997, 44(2). ISSN 0037-6825.
- [8] BIČ, Miloš. *Při řekách babylónských: dějiny a kultura starověkých říší Předního Orientu*. Praha: Vyšehrad, 1990. ISBN 80-7021-032-X.
- [9] TIGNOR, Robert, Stephen ARON, BROWN, ELMAN a Jeremy ADELMAN. *Worlds Together, Worlds Apart: A History of the World: From the Beginnings of Humankind to the Present*. 4. New York, Us: W. W. Norton & Company, 2013. ISBN 978-0-393-92207-3.
- [10] Jewellery-mould: 91904. In: *The British Museum* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: https://research.britishmuseum.org/research/collection_online/collection_object_details.aspx?images=true&objectId=282827&partId=1
- [11] TYLECOTE, Ronald Frank. *A history of metallurgy*. 2. Londýn: Institute of materials, 1992. ISBN 19-026-5379-3.
- [12] OGDEN, Jack. *Ancient Jewellery: Interpreting the Past Series*. 1. Oakland, U.S.A.: University of California Press, 1992. ISBN 0-520-08030-0.
- [13] BOROWSKI, ODED. *Every Living Thing: Daily Use of Animals in Ancient Israel*. 1. Walnut Creek, U.S.A.: AltaMira Press, U.S., 1998. ISBN 978-0-7619-8919-6.
- [14] FREY, Wendy. *History Alive: The Ancient World*. 2. Mountain View: Teachers' Curriculum Institute, 2006. ISBN 978-1583713501.
- [15] Acopper statue 2700BC: a chariot being pulled by the 4 donkeys It depicts an early form of the wheel By Sumerians. In: *Twitter.com: IraqMsptmia* [online]. twitter.com, 5. 4. 2017 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://twitter.com/IraqMesopotamia/status/849497063503134720>
- [16] WAGNER, Donald B. *Iron and steel in ancient China*. 1. New York: E.J. Brill, 1996. ISBN 90-040-9632-9.
- [17] COLÁS, Rafael a George E. TOTTEN. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. 5. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press, 2016. ISBN 978-1-4665-1108-8.
- [18] WERTIME, Theodore Allen. *The Coming of The Age of Steel*. 1. Chicago, U.S.A.: University of Chicago Press, 1962.
- [19] *Technology and Culture: The Cast-Iron Bells of China* [online]. 1984, 25(4) [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.jstor.org/journal/techcult?refreqid=excelsior%3Add0dc687e8b8abbaf3d4de372851e609>

- [20] *Antique Chinese Iron Bell* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: https://www.1stdibs.com/furniture/asian-art-furniture/metalwork/antique-chinese-iron-bell/id-f_11888111/
- [21] Iron Production in three Ming Texts: Tie ye zhi, Guangdong xinyu, and Tian gong kai wu. In: *Donwagner* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://donwagner.dk/MingFe/MingFe.html>
- [22] SHIOZAWA, Hiroki. *Kamakura Daibutsu no nazo*. 1. Tōkyō, Japan: Yoshikawa Kōbunkan, 2010. ISBN 978-4-642-05695-3.
- [23] FREDERIC, Louis. *Japan Encyclopedia*. 1. London, England: Harvard University Press, 2002. ISBN 978-0674007703.
- [24] The Making of Kamakura Daibutsu - 1. *Japan travel* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://en.japantravel.com/kanagawa/the-making-of-kamakura-daibutsu-1/1938>
- [25] The Great Buddha. *Kotoku-in* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://www.kotoku-in.jp/en/casting.html>
- [26] 鎌倉大仏 胎内拝観. In: *Tanosii Kamakura* [online]. [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://tanosii-kamakura.jp/?tdate=2013-8-6-47>
- [27] STRÁNSKÝ, Josef B. *Z vývoje české technické tvorby: sborník vydaný k 75. výročí založení Spolku českých inženýrů v Praze*. 1. V Praze: Spolek českých inženýrů, 1940.
- [28] *Slévárenská ročenka*. Brno: ÚV Slévárenské společnosti v Brně, 1992, 1992(1). ISSN 0231-7087.
- [29] KŘÍČKA Z BÍTYŠKY, Vavřinec. *Návod k lití a přípravě děl, kulí, hmoždířů, zvoni, konví ke zvedání vody k vodotryskům ap. četnými kresbami opatřený (Mathesis Bohemica)*. 1. Praha: Technické knihkupectví a nakladatelství, 1947.
- [30] *Zpívající fontána* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C3%ADvaj%C3%ADc%C3%AD_font%C3%A1na_\(Praha\)#/media/Soubor:Zp%C3%ADvaj%C3%ADc%C3%AD_font%C3%A1na.jpg](https://cs.wikipedia.org/wiki/Zp%C3%ADvaj%C3%ADc%C3%AD_font%C3%A1na_(Praha)#/media/Soubor:Zp%C3%ADvaj%C3%ADc%C3%AD_font%C3%A1na.jpg)
- [31] CELLINI, Benvenuto. *Vlastní životopis = [Vita]*. 1. Praha: Sfinx, 1936.
- [32] *Perseus with the Head of Medusa (1545)* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.wikiart.org/en/benvenuto-cellini/perseus-with-the-head-of-medusa-1545>
- [33] KNOB, Stanislav a Aleš ZÁŘICKÝ. *Nástin dějin výroby od pravěku po současnost*. 1. Ostrava: Ostravská univerzita v Ostravě, 2009. ISBN 978-80-7368-689-5.
- [34] RADKE, Gary. *The Gates of Paradise: Lorenzo Ghiberti's Renaissance Masterpiece*. 1. London, UK: Yale University Press, 2007. ISBN 978-0-300-12615-0.
- [35] COLITTO, Alfredo. *La porta del paradiso*. 1. Milano, Italy: Edizioni Piemme, 2013. ISBN 978-8856625462.
- [36] Porte del Paradiso. In: *Marcello Miccio* [online]. [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://www.marcellomiccio.it/porte-del-paradiso/>
- [37] *Ghiberti: Puertas del Paraíso del baptisterio de Florencia* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://artistasdelasemana.blogspot.com/2016/12/ghiberti-puertas-del-paraiso-del.html>
- [38] STRÁNSKÝ, Karel. *Železné hamry a hutě: Českomoravské a Dražanské vrchoviny*. 1. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálového inženýrství, 2009. ISBN 978-80-214-3853-8.
- [39] *Litinové sarkofágy vznikly v železárnách ve Štěpánově*. [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://brno.rozhlas.cz/doubraunik-na-den-otevrel-unikatni-hrobku-rodu-mitrovskych-6460394>
- [40] CURTIS, Richard V. a Timothy F. WATSON. *Dental Biomaterials: Imaging, Testing and Modelling*. 1. Cambridge England: Woodhead Publishing, 2008. ISBN 978-1845692964.

- [41] SCHMIDT, Duane Arthur. *Iowa pride: Paperback*. 1. Ames: Xulon Press, 2002. ISBN 978-1591601340.
- [42] *Full Cast Gold Crown* [online]. [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://dentagama.com/news/full-cast-gold-crown>
- [43] *Otmar Oliva odléval sochy z bronzu* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/kultura/aktuality/otmar-oliva-odleval-sochy-z-bronzu.A010622_091315_zlin_kultura_boh
- [44] *Kašna na nádvoří Reduty v Uherském Hradišti, detail* [online]. [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://www.otmaroliva.cz/realizace/kasny-a-fontany/>
- [45] KAYE, Alan a Arthur STREET. *Die Casting Metallurgy: Butterworths Monographs in Materials*. 1. London, UK: Butterworths Company, 1982. ISBN 0-408-10717-0.
- [46] AGRICOLA, Georgius. *Jiřího Agricoly Dvanáct knih o hornictví a hutnictví*. 1. Ostrava: Montanex, 2001. ISBN 80-722-5057-4.
- [47] GRÍGEROVÁ, Tatiana, Ivan LUKÁČ a Rudolf KOŘENÝ. *Zlievarenstvo neželezných kovov*. Bratislava: SNTL Praha, 1988. Edícia hutníckej literatúry (Alfa). Materiály
- [48] HRBEK, Antonín. *Slévárenství: přehled slévárenství pro školení, k samostatnému studiu i pro informaci*. 1. Praha: SNTL Praha, 1970.
- [49] MICHNA, Štefan a Lenka MICHNOVÁ. *Neželezné kovy*. 1. Děčín: Štefan Michna, Lenka Michnová, 2014. ISBN 978-80-260-7132-7.
- [50] DRIFT LEVER HANDLE. In: *Blacksandbronze*. [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.blacksandbronze.co>
- [51] *Archives of Foundry Engineering: The Effect of Addition of Germanium to the Surface Phenomena in Silver Alloys* [online]. Varšava, Polsko: The Katowice Branch of the Polish Academy of Sciences, 2018, 18(3) [cit. 2020-04-26]. ISSN 2299-2944. Dostupné z: <http://journals.pan.pl/dlibra/publication/123606/edition/107819/content>
- [52] PLUMLEE, Scott David. *Chain and Bead Jewelry Creative Connections: New Techniques for Wire-Wrapping and Bead-Setting*. 1. New York, U.S.A.: Watson-Guptill Publications, 2009. ISBN 978-0823024858.
- [53] *Tiffany & Co Rare Antique Sterling Chatelaine Amphora Vinaigrette* [online]. [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.rubylane.com/item/501985-020Tiffanyx20ssx20vinaigrette/Tiffany-Co-Antique-Sterling-Chatelaine-Amphora?search=1&t=ebf60bf0>
- [54] HORÁČEK, Milan. *Technologie vytavitelného modelu: Rozměrová přesnost odlitků vyráběných metodou vytavitelného modelu* [online]. FSI VUT, Brno, 2009 [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/slevarenstvi/sites/default/files/clanky/technologie-vytavitelneho-modelu/technologie-vytavitelneho-modelu.pdf>
- [55] HERMAN, Aleš. *Lití na vytavitelný model* [online]. ČVUT, Praha [cit. 2020-04-26]. Dostupné z: <http://u12133.fs.cvut.cz/assets/subject/files/32/presne-liti-na-vytavitelny-model.pdf>
- [56] Investment casting ceramic slurry: 08-05-07_Bild4. In: *Foundry Planet* [online]. [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://www.foundry-planet.com/fileadmin/redakteur/werbepartner/mk-technology/08-05-07_Bild4.jpg
- [57] CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Přibližný přehled začátků používání technologie vytavitelného modelu [2]	7
Obr. 2 - Díl dvoudílné pískovcové formy [10]	8
Obr. 3 - Vůz tažený čtyřmi osly [15]	9
Obr. 4 - Typický čínský litý litinový zvon [20]	9
Obr. 5 - Kresba zachycující čínskou metalurgii [21]	10
Obr. 6 - Socha Buddy Kamakura Daibutsu [24]	10
Obr. 7 - Vnitřek sochy Buddy Kamakura Daibutsu [26]	11
Obr. 8 - Socha Buddy Kamakura Daibutsu [25]	11
Obr. 9 - Zpívající fontána [30]	12
Obr. 10 - Perseus s hlavou Medúzy r.1545 [32]	13
Obr. 11 - Dveře Porta del Paradiso [37]	14
Obr. 12 - Litinový sarkofág [39]	14
Obr. 13 - Zlatá umělá korunka [42]	15
Obr. 14 - Otmar Oliva se svým dílem [44]	15
Obr. 15 - Bronzová okrasná klika [50]	16
Obr. 16 - Stříbrná amfora na parfém (Tiffany & Co.) [53]	17
Obr. 17 - Máčení stromečku v keramické břechce [56]	18
Obr. 18 - Připravený díl pro skenování	20
Obr. 19 - Skenovaný díl	21
Obr. 20 - Naskenovaný díl s nežádoucími plochami	21
Obr. 21 - Vlevo díra v síti plošek, vpravo zaslepená díra v síti plošek	22
Obr. 22 - Vygenerovaná objemová tělesa	22
Obr. 23 - Model s vygenerovanými tiskovými podporami FDM	23
Obr. 24 - Vyhlazený model FDM	23
Obr. 25 - Skelet formy s tělem	24
Obr. 26 - Vzduchové bubliny v kavitě formy	25
Obr. 27 - Detail kavity formy	25
Obr. 28 - Špatně odlitá nožička	26
Obr. 29 - Povrchové bublinky zapříčiněné přepáleným voskem	26
Obr. 30 - Kavity na povrchu modelu	27
Obr. 31 - Tavba vosku a zahřívání forem	27
Obr. 32 - Výsledné voskové modely připájené ke vtokovému kanálu	28
Obr. 33 - Vytvrzování skořepin	29
Obr. 34 - Zasypávání skořepiny ocelovými broky	30
Obr. 35 - Detail trhliny nohy	31
Obr. 36 - Detail staženiny s trhlinami na spodní části těla	31
Obr. 37 - Nedolitá nožička	31
Obr. 38 - Dolitá nožička (PLA)	32
Obr. 39 - Dolitá nožička s menším nedostatkem	32
Obr. 40 - Výsledný stromeček se vtokovými kanálky	33
Obr. 41 - Výsledný odlitek nožiček	33
Obr. 42 - Hotové umělecké odlitky	34

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Chemické složení jednotlivých taveb.....	34
---	----