



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

UMĚLECKÝ ODLITEK, TEORIE A PRAXE

Artistic casting, theory and practice

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ZUZANA PALČÍKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

DOC. ING. JAROSLAV ŠENBERGER, CSC.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Zuzana Palčíková

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303R002)**

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:

Umělecký odlitek, teorie a praxe

v anglickém jazyce:

Artistic casting, theory and practice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vlastnosti a charakteristika slitin používaných na umělecké odlitky, technologie využívané v uměleckém lití. Odlití a popis technologie použité k odlití jednoduchých uměleckých odlitků.

Cíle bakalářské práce:

Získání zkušeností s výrobou uměleckých odlitků. Ověření získaných informací výrobou uměleckého odlitku.

Seznam odborné literatury:

1. PTÁČEK, L., aj. Nauka o materiálu II. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
2. STRÁNSKÝ, K., aj. Železné hamry a hutě: Českomoravské a Dražanské vysočiny II. část. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2008. 107 s. ISBN 978-80-214-3854-5.
3. ŠENBERGER, J., aj. Metalurgie oceli na odlitky. Brno: VUTIUM, 2008. 310 s. ISBN 978-80-214-3632-9.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jaroslav Šenberger, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 7.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá historií výroby uměleckých předmětů metodou vytavitelného modelu. První část práce popisuje metody přesného lití používané v současnosti i minulosti. Technologie přesného lití je popsána z hlediska, výroby forem, výroby ztraceného modelu, používaných materiálů. Nejprve je popsána v současné době používaná technologie s výrobou skořepinových forem. Následně je popsána technologie používaná od starověku s výrobou ztraceného modelu do sádrové formy a následně výroba hliněných forem. V praktické části práce je studována výroba odlitku býčka z Býčí skály současnými metodami a metodou používanou v starověku. První metoda představuje výrobu odlitku býčka pomocí skořepinového lití. Druhá metoda je odlévání do hliněné formy a rekonstrukce jeho původní podoby. Závěrem jsou porovnány odlitky vyrobené podle těchto dvou metod.

Klíčová slova

Skořepinová forma, hliněná forma, bronz, starověké postupy odlévání, býček z Býčí skály

Abstract

This work deals with the history of the production of art objects by investment pattern. The first part describes the method of casting used in the past and present. Casting technology is described in terms of, mold manufacturing, production lost model used materials. First described in the technology currently used in the production of shell molds. Then is described a technology used since antiquity with the lost production model into plaster molds and then making clay molds. In the practical part of this work is studied the production of cast bull Bull rocks present methods and the method used in ancient times. The first method is the production of cast bull by shell casting. The second method is casting a clay mold and reconstruction of its original form. Finally, are compared castings produced by these two methods.

Key words

Shell form, clay form, bronze, ancient practice of casting, bull from Bull rock,

Bibliografická citace

PALČÍKOVÁ, Zuzana. *Název: Umělecký odlitek, teorie a praxe*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 41 s. Doc. Ing. Jaroslav Šenberger, Csc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Umělecký odlitek, teorie a praxe** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou uvedeny v seznamu a tvoří přílohu této práce.

Datum: 1. 5. 2012

.....
Zuzana Palčíková

Poděkování

Děkuji tímto za cenné připomínky a rady při vypracovávání bakalářské práce vedoucímu bakalářské práce **doc. Ing. Jaroslavu Šenbergerovi, Csc.**

Dále děkuji za odbornou pomoc při tvorbě praktické části **Ondřejovi Štočkovi.**

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	10
1 Metody používané v uměleckém odlévání.....	11
1.1 Současné technologie přesného lití.....	11
1.2 Historické postupy za použití hliněné formy	15
1.3 Historické postupy za použití sádrové formy	18
1.4 Historické postupy za použití pískové formy.....	18
2 Materiály na modelové hmoty.....	18
3 Materiály používané pro odlitky	19
3.1 Měď	19
3.2 Slitiny mědi	21
3.2.1 Bronz	21
3.2.2 Mosaz	23
4 Býček z Býčí skály.....	25
4.1 Býčí skála a nález bronzového býčka.....	25
4.2 Zpracování kovu v pravěku	27
5 Praktická část.....	28
5.1 Výroba býčka litím do hliněné formy.....	28
5.1.1 Příprava hlíny.....	28
5.1.2 Výroba jádra.....	28
5.1.3 Výroba voskového modelu.....	29
5.1.4 Vypálení hliněné formy	31
5.2 Odlévání býčka metodou přesného lití do skořepinové formy	32
5.2.1 Výroba skořepiny	33
5.3 Odlévání bronzu	35
6 Závěr	39

Seznam použité literatury

ÚVOD [12]

Umělecké řemeslo má své počátky v dobách velmi dávných. Nejstarší dochovaná umělecká díla jsou z doby přibližně 20 tisíc let př. n. l. K sochařské tvorbě sváděla člověka tvárlivost materiálu, se kterým běžně přicházeli do styku. Původní tvorba byla zřejmě jen hrou s materiálem a myšlenkou ztvárnit věci okolo sebe např. zvířata. Rozmach řemeslné a umělecké tvorby nastal až s útlumem kočovného života a počátkem stavění měst. V dobách počátku křesťanství vyrůstalo sochařství velmi pozvolna, ve 12. a ve 13. století dosáhlo umění určité výše v Itálii, Francii a v Německu. V 15. století nastal ještě mohutnější rozmach, který vyvrcholil v renesanci (obr. 1), pokračoval barokem, časem upadal a opět povznášel.

Existuje velké množství sochařských materiálů a metod tvorby. Sochařství je na druhu materiálu závislé více než ostatní oblasti umělecké tvorby. Velice oblíbeným materiálem pro sochařskou tvorbu je kov. Kov vyjadřuje svými vlastnostmi zřetelnost a ostrost a je možné jej využít pro monumentální i drobné plastiky. Nejvhodnější materiál pro odlévání soch je bronz. Bronz má všechny potřebné vlastnosti: snadno se roztápí, reprodukuje všechny detaily, má dobrou pevnost a je bez pórů a bublin.



Obr. 1 Auguste Rodin Brána pekla [1]

Jednou z prvních slévárenských technologií starověku, bylo odlévání na ztracený vosk. Touto technologií je možné docílit velmi jemných detailů. Technologie v moderní formě je používána dodnes. V práci je provedena rekonstrukce staré technologie na ztracený model a odlitky vyrobeny touto technologií jsou prováděny s odlitky vyrobenými současnou technologií. Rekonstrukce je provedena na odlitku býčka z Býčí skály.

1 Metody používané v uměleckém odlévání

1.1 Současné technologie přesného lití [10]

Všechny metody, které jsou schopny zhotovit model tvarově přesnější než běžně užívané, jsou nazývané jako přesné lití.

Zejména metoda vytavitelného modelu tvoří technologii přesného lití.

Metoda přesného lití umožňuje vyrábět tvarově složité součásti s rozměrovou tolerancí, která eliminuje následné obrábění. Metoda vytavitelného modelu umožňuje vyrobit tvarově velmi složitou součást s dobrou jakostí povrchu a z materiálu, který je velmi těžko obrobitelný.

Možnosti přesného lití

Maximální síla stěny:	slitina železných kovů 0,5 mm slitina neželezných kovů 0,3 mm
Maximální hmotnost odlitků:	200 kg
Maximální rozměr:	1000 mm
Drsnost povrchu:	Ra 3,2

Princip přesného lití

Tato technologie je stará metoda, která se používala ve starém Řecku a Egyptě. Nejdříve se vyrobí pozitivní model z hmoty, která je snadno odstranitelná z keramické skořepinové formy. Modelová hmota je plněna do forem gravitačně, vysokým tlakem ve formě kašovitě směsi nebo nízkým tlakem napěněné směsi. Takto zhotovený model s vtokovou soustavou je lepen nebo pájen do tzv. stromečku. Za pomoci robotů nebo mechanizovaných linek se jednotlivé stromečky namáčí do břechky a následně se posypou keramickým ostřivem.

Takto vytvořený obal se nechá vysušit a postup se opakuje do vytvoření dostatečné tloušťky stěny skořepiny. Modelová hmota je ze skořepiny vytavena vroucí vo-

dou popř. v autoklávu. Následuje proces žíhání na 900°C. Po vyžíhání je skořepina připravena k odlévání.

Základní vlastnosti skořepin jsou žárovzdornost, tepelná roztažnost a netečnost vůči vlévaným kovům.

Pojidla formovacích hmot [2]

Pojidla s žárovzdorným materiálem tvoří formovací hmotu na výrobu skořepinových forem. Pojidlo má mít tyto základní vlastnosti:

- a) Nesmí snižovat žárovzdornost formy a musí být netečné při vypalování formy.
- b) Musí zajistit pro formu dostatečnou pevnost po vysušení i po vypálení.

Alkosolová pojiva

Nejznámější pojivo alkoholového typu je pod obchodním názvem Ethylsilikát 40. Ethylsilikát 40 s dalšími přísadami jako etanol, voda atd. velmi stabilní pojivo. Pro přípravu pojiva hydrolízou ethylsilikátu je možné použít řadu rozdílných předpisů např.:

Ethylsilikát NT 40	18 objem. dílů
Etanol 96 %	23 objem. dílů
Voda	3 objem. díly
Kyselina solná	0,15 objem. dílů

Hydrosolová pojiva

Koloidní roztoky SiO₂ jsou do sléváren dodávány již hotové, jedinou úpravou je přidání smáčedel. Jestliže použité smáčedlo vyvolá při manipulaci pění, přidáním zhašedel pěny se napění eliminuje. Možný příklad keramické břechky pojené hydrosolem:

Mikrokorund	750 g
Korund 30 až 50 μm	250 g
Hydrosol Tosil P	350 g

Saponát Syntapon (smáčedlo) 0,4 g

Oktanol (zhašedlo pěny) 0,2 g

Konzistence je podle Fordova pohárku č. 6 – 25 s.

Popis jednotlivých fází výroby [10]

Výroba voskových modelů

Vosková hmota se plní vhodným tlakem do forem. Formy mohou být jednoduché nebo vícenásobné. Pro snadnější vyjímání modelu, je možno použít separátor, který zabrání případnému nalepení modelu na stěnu formy. Na kvalitu modelu rozhoduje kvalita voskové hmoty, konstrukce vstřikolisu a kvalita formy. Po zhotovení modelu, je třeba jej očistit od otřepu z dělicí roviny a připravit pro montáž do sestav.

Sestavování stromečků

Na připravený model je vhodně nalepena nebo napájena vtoková soustava. V případě složitějších tvarů odlitku je třeba připojit speciální vtokovou soustavu, která zaručí zatečení kovu do všech míst.

Velkosériově vyráběné kusy jsou připevňovány na vtokový kůl, který zároveň slouží pro doplňování kovu při tuhnutí. Ke vtokovému kůlu je připevněna tyč nebo závěs pro lepší manipulaci.

Namáčení

Stromečky jsou namáčeny do keramické břechky a otáčením se odstraní vzduchové bubliny. Po vytvoření souvislého filmu licího obalu, je stromeček vyjmut a připraven k posypání keramickým ostřivem.

Keramická břечka se skládá z pojiva na bázi etoxypolysiloxanů a keramického plniva určeného druhem odlévaného kovu.

Jsou známy dva základní pojivové systémy, a to hydrosoly a alkosoly. O použití rozhodne požadovaná jakost povrchu, rozměr rovinných ploch a potřebná doba schnutí jednotlivých obalů. V praxi se používají převážně hydrosolové licí obaly, pro-

tože mají nižší sklon k praskání prvního obalu a mají vyšší pevnost. Nevýhodou je, že mají delší dobu schnutí.

Keramické plnivo má stejné chemické složení jako posypový materiál, liší se pouze granulovitostí.

Posyp

Po namočení v břecce se stromeček nechá okapat a následně se posype ostřivem vhodné zrnitosti. Doba schnutí závisí na použitém druhu pojiva a charakteru povrchu vyráběné součásti. Postup namáčení a posypávání se opakuje až do vytvoření dostatečné tloušťky skořepiny.

Odstranění voskové modelové hmoty

Stromeček s vytvrzeným krycím obalem se umístí do autoklávu. Tlakem přehřáté páry se ze skořepiny odstraní modelová hmota. Teplota páry se pohybuje okolo 120 -150°C. Vytavený vosk se po regeneraci vrací zpět do výroby.

Žihání

Cílem žihání je zbavit se zbylých nežádoucích látek, jako je vosk a voda, a dosažení požadované mechanické pevnosti. Žihací teplota se pohybuje okolo 1000°C a skořepina by měla setrvat v peci minimálně jednu hodinu.

Rychlost náběhu na žihací teplotu závisí na druhu keramického materiálu.

Keramika na bázi Al_2O_3 snáší tepelný šok a lze ji vkládat do pece s vyšší teplotou. Skořepiny na bázi SiO_2 musí na žihací teplotu nabíhat pomaleji z důvodů krystalografických změn křemene.

Po vizuální zkoušce je skořepina připravena k odlévání.

Tavení a odlévání

Většina slévárenských podniků přesného lití používá pro tavení kovu indukční středofrekvenční pece do objemu 100 kg. Druh vyzdívky se řídí podle druhu taveného materiálu. Pro odlévání náročnějších materiálů např. superslitin na bázi niklu, je možné použít vakuovou technologii nebo agregát s řízenou pecní atmosférou.

Chladnutí odlité skořepiny může probíhat na volném vzduchu, ve vakuu nebo v ochranné atmosféře, v závislosti na kvalitě povrchu.

Odstranění skořepiny, odřezání odlitků a kontrola

Skořepina po vychladnutí, se zbaví ručně nebo mechanicky většiny keramické směsi. Zbytky formy jsou následně otryskány. Jednotlivé odlitky jsou odděleny od vtokového kůlu a zpracovány dalšími technologiemi

1.2 Historické postupy za použití hliněné formy [3]

Tato metoda patří již do historie, jelikož je časově velice náročná, neboť každá nanesená vrstva formy musí dostatečně vyschnout a tím se formování natahuje na celé týdny.

Negativní formování [3]

Model je zaformován (obr. 2) velkým množstvím sádrových klínů, které se oddělují dělicím prostředkem a na zámky zapadají do sebe.



Obr. 2 Zaformovaný model [3]

Zaformovaný model [3]

Pro výrobu voskového modelu a výztuh existuje několik postupů. Nejprve se forma vytře rozpuštěným sádem s olejem pro snadné oddělení sádry od voskového modelu, potom se na vnitřní povrch formy nanese vrstva ze směsi vosku, pryskyřice a sádra. Vrstva této směsi má tloušťku 2 – 2,8 mm. Na tuto vrstvu jsou pokládány voskové pláty v tloušťce budoucího odlitku. Tyto pláty je nutné namáchnout na natřené vrstvy vosku, tak aby byla zajištěna kompaktnost vrstvy. Při zalévání jádra je nutné zajistit zalití všech míst, aby nebyl odlitek nepřiměřeně tlustý. Je kladen důraz na konstrukci výztuhy, neboť musí zajistit polohu, zabránit praskání jádra a musí odolat žáru roztaveného kovu.

Po očištění stop po dělicí rovině a případně dalších vad na voskovém modelu, se na něj umístí vtoková soustava a výfuky (obr. 3)

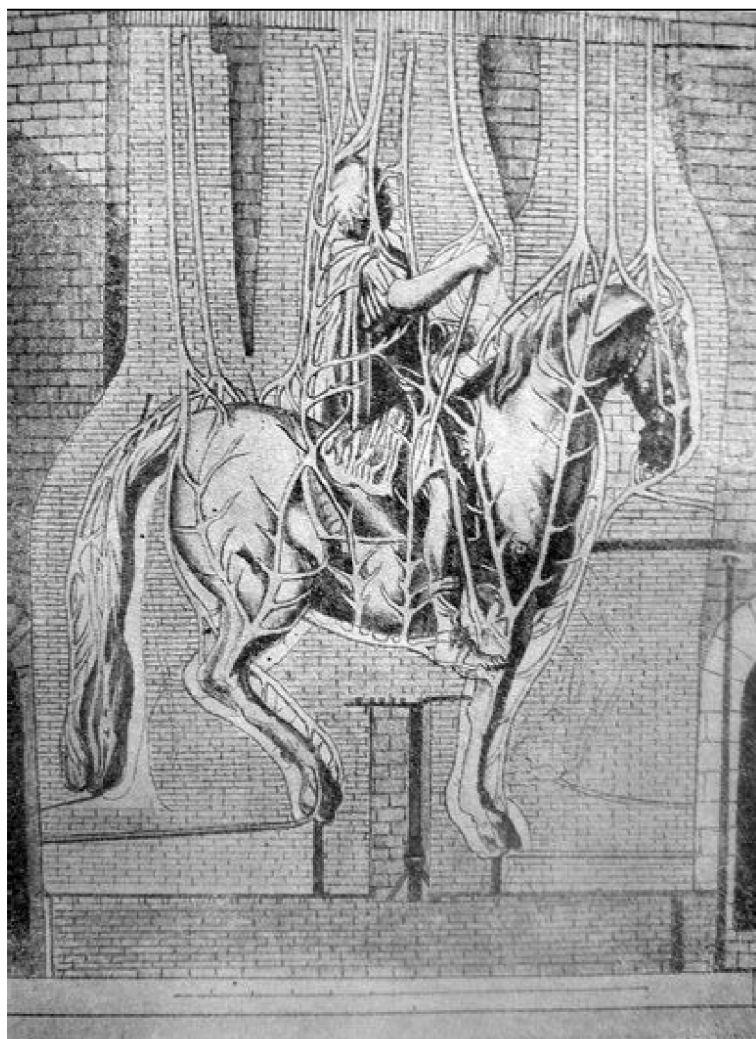


Obr. 3 Vtoková soustava a výfuky [3]

Vtoková soustava a výfuky [3]

Zhotovení hliněné formy je velice časově náročné. Proces nanášení vrstvy hlíny je v logickém sledu, kdy se na model nanese jemnější vrstva hlíny. Ostatní vrstvy jsou zhotoveny z hrubší hlíny. Dříve se hlína mísila s koňským trusem, otrubami, plevami, oštinami a kravskými žíněmi. Po dosažení určité tloušťky hlíny se forma stáhne železnými obručemi pro zajištění pevnosti formy.

Další operace je sušení a žíhání formy, které trvá několik dní v závislosti na velikosti formy. Pod formou je nutné topit 24 hodin denně, dokud se ve vtokové soustavě neobjeví oheň. Po takovém procesu je forma zbavena vosku a množství vyteklého vosku ukazuje, kolik bude potřeba roztavit bronzu. Na obrázku 4 je zobrazen řez formy, která je v jámě připravena na sušení.



Obr. 4 Řez formou k lití kovu [3]

1.3 Historické postupy za použití sádrové formy [3]

Na formy ze sádrových směsí se používá velmi tekutá břečka, která je schopna vyplnit složité tvary modelu, nebo je možné obalování modelu jednotlivými vrstvami.

Do sádrových forem je možné odlévat složité modely mosazi, bronzu a slitin hliníku. Odlévání neželezných kovů do sádrové formy bylo známo již v dávnověku. Výhodou této metody je kvalitní reprodukce obrysů odlitek a dobrý povrch.

1.4 Historické postupy za použití pískové formy [3]

Pro umělecké odlévání se používají přírodní písky, které obsahují více jílových částic a je nutné přidat více vody než u bentonitových směsí, proto je nutné přírodní písky sušit.

Formovací směsi pro odlitky neželezných kovů se liší svou zrnitostí. Používají se velice jemnozrné písky se zrnitostí pod 0,15 mm. Velice častým materiálem pro odlitky jsou písky hlinité s vysokým podílem jílu. Tyto směsi dosahují nižší pevnosti za syrova, větší rozpadavosti po odlití a mají nízkou prodyšnost.

2 Materiály na modelové hmoty [2]

Na vytavitelné modely se používá řada vhodných materiálů např. vosk, termoplasty, zmrzlá rtuť, nízkotavitelné kovové slitiny, síra, směs síry s grafitem apod.

Voskové směsi jsou nejvhodnější materiály, protože kopírují nejjemnější detaily, po vytavení nezanechávají žádný zbytek ve formě a jsou regenerovatelné. Nevýhodou je jejich smrštitelnost.

Použitelné suroviny na voskové modely [2]

Ceresín, parafín, včelí vosk, stearin, kalafuna aj. Ceresín se získává odparafinováním minerálních olejů. Je měkčí než parafín, ale má větší smrštění.

3 Materiály používané pro odlitky [11]

Měď a slitiny mědi

Jeden z prvních používaných kovů je měď. Byla nalezena v přírodě jako ryzí kov a později byla vyráběna redukcí z rud.

Měď a většina slitin mědi se vyznačuje dobrou tvárností za tepla, za studena i pod bodem mrazu, dobrou odolností proti korozi, dobrou svařitelností, pájitelností a obrobitelností.

Přibližně polovina vyráběného množství mědi se spotřebuje na měděné výrobky, druhá polovina na přípravu slitin. Z měděných výrobků představují největší podíl polovodiče pro elektrotechniku.

Čistá měď se vyznačuje vysokou elektrickou a tepelnou vodivostí, významná je i možnost zpracování vratného odpadu.

3.1 Měď [11]

Měď v žíhaném stavu má mez pevnosti v tahu $R_m=200 - 270$ MPa, mez kluzu v tahu $R_{p0,2}=40 - 110$ Mpa a tažnost $A_5 = 35 - 40\%$. Se vzrůstající teplotou pevnostní charakteristiky klesají. Kontrakce a tažnost zůstávají při nižších teplotách v podstatě neměnné, při zvyšování teploty se zhoršují, při dalším zvýšení teploty znovu rostou. Toto zhoršení plasticity je způsobeno příměsovými prvky. Měď tavená ve vakuu tento pokles plasticity nevykazuje.

Prvky Al, Fe, Ni, Zn, Ag, Au, Pt, Cd, Sb tvoří s mědí tuhé roztoky a nemají při obvyklých nízkých obsazích na mechanické vlastnosti mědi výrazný vliv. Prvky Bi, Sb, Pb, O₂, S jsou málo rozpustné v tuhé mědi a s ní tvoří eutektické směsi většinou s nízkou teplotou tání, a tím mají negativní vliv na mechanické a technologické vlastnosti.

Bizmut jen nejvíc škodlivý prvek v mědi. Složení eutektika soustavy Cu – Bi odpovídá téměř čistému Bi. Bizmut způsobuje lámavost mědi za studena. Při válcování mědi bizmut způsobuje lámavost mědi za tepla, protože je uložen na hranicích zrn,

kde se začne tavit. Podobný vliv jako bizmut má antimon, který je však v tuhé mědi částečně rozpustný a jeho negativní vliv na hranicích zrn se snižuje.

Olovo tvoří s mědí soustavu s monoeutektickou přeměnou při 935°C a eutektickou přeměnou při 327°C. Rozpustnost olova v mědi je nepatrná. Eutektikum je tvořeno téměř čistým olovem. Olovo je plastické a nepříliš přispívá k lámavosti mědi za studena. Roztavené hranice zrn způsobují lámavost za tepla. Pozitivně přispívá k lepší obrobitelnosti mědi a slitin mědi tím, že zvyšuje drobitost třísky.

Kyslík je v mědi téměř nerozpustný. Váže se na Cu_2O a tvoří s mědí eutektikum s poměrně vysokou teplotou tání. Oxid mědi Cu_2O zhoršuje tvárnost mědi, odolnost proti korozi, svařitelnost a pájitelnost. Pro dezoxidaci se používají prvky P, Li, Zn, Cd, Si nebo Be, avšak přebytek těchto prvků, má za následek horší elektrickou vodivost, houževnatost a zvyšuje pevnost a tvrdost.

Vodík snadno difunduje do mědi již za teploty 400°C. Reakce vodíku s oxidy vniká pára, která nemůže v mědi difundovat, zvyšuje svůj tlak a způsobuje praskání mědi. Tzv. vodíková nemoc se projevuje při obsahu O_2 nad 0,03 hmot. %.

Síra se v tuhé mědi prakticky nerozpustí. Slučuje se na ní sulfid Cu_2S , který s mědí tvoří křehké eutektikum na hranicích zrn a způsobuje lámavost mědi za studena. Eutektikum má vysokou teplotu tání, proto lámavost mědi, která obsahuje síru, za tepla není výrazná, avšak tvárnost za tepla je zhoršena.

Na čistém vzduchu je měď pokryta vrstvičkou oxidu, který brání další oxidaci. Městský vzduch obsahuje oxid siřičitý, proto koroze probíhá mnohem rychleji, tvoří se zásaditý síran měďnatý, který spolu s oxidem měďnatým tvoří základní složku korozních produktů – patiny. Ve vodě probíhá koroze mědi pomaleji, v kyselých vodách se proces urychluje. Měď se rozpouští ve čpavku a kyselinách a to i ve velmi zředěných.

Na tvarové odlitky se měď slévá obtížně. Má značné smrštění (až 1,8%), odlitky jsou značně pórovité a obsahují velké množství bublin.

3.2 Slitiny mědi [11]

Měď spolu s mnohými kovy tvoří slitiny s velmi rozmanitými vlastnostmi. S řadou kovů např. Ni, Mn, Pt tvoří měď binární soustavu s úplnou vzájemnou rozpustností v tuhém stavu. Větší použití mají slitiny mědi a Zn, Sn, Si, Al, Be.

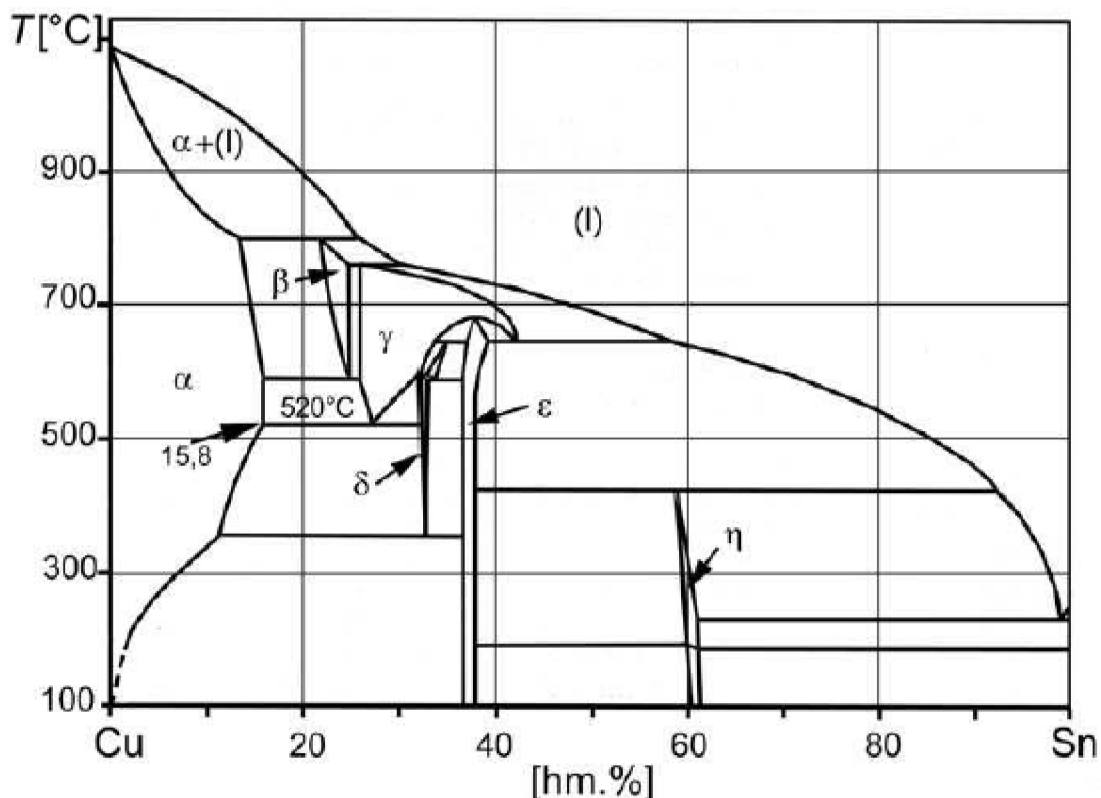
3.2.1 Bronz [11]

Nejznámější bronz podle kterého dostalo označení i celé historické období je bronz cínový.

Bronz byl v Mezopotámii využíván již v letech 3000 – 2500 př. n. l. Cín se do Mezopotámie dovážel pravděpodobně z Palestiny a Anatólie. Kolem roku 2600 př. n. l. se začal odlévat cínový bronz v Egyptě. V Číně měli značné zkušenosti se zpracováním bronzů obsahujícím až 30 hmot. %. Na dnešním českém území se bronz objevil až v letech 1800 – 1500 př. n. l. V Mezopotámii a Egyptě byly v bronzu náhodné příměsové prvky, většinou arzen. V pozdní době bronzové se do bronzů začalo přidávat olovo (až 10% hmot.), které zlepšovalo jeho slévárenskou vlastnost.

Protože výskyt kovového cínu je v přírodě vzácný, lze se domnívat, že cínové bronzové se zpočátku vyráběly žíháním drobných kousků mědi s cínovou rudou zvanou kasiterit neboli cínovec. Vsázka v kelímku byla ohřívána pod vrstvou uhlí, jehož spalováním vzniká redukční atmosféra. Oxid cínu se v rudě redukoval na kovový cín, který se rozpouštěl v mědi a snižoval tak teplotu tavení. Později byl využíván cín kovový, připravený redukcí kasiteritu. Kousky obou kovů se ohřívají v kelímku pod dřevěným uhlím. Cín se roztaví jako první, protože má nižší teplotu tavení (232°C), cín snižuje teplotu tavení mědi z 1050°C asi na 950°C.

Cínové bronzové jsou velmi drahé a deficitní materiály vynikají dobrou houževnatostí, pevností a odolností proti korozi atd. Rovnovážný diagram soustavy Cu-Sn patří k nejsložitějším (obr. 5).



Obr. 5 Rovnovážný diagram soustavy Cu – Sn [7]

Struktura slévárenských cínových bronzů s obsahem 8 hmot. % Sn je tvořena dendrity tuhého roztoku α . Struktura cínových bronzů s obsahem nad 8 hmot. % Sn je tvořena dendrity okrajového tuhého roztoku α a eutektoidní směsí fází $\alpha + \delta$.

V běžných podmínkách chladnutí se ve slitinách Cu – Sn nedosahuje rovnovážného strukturního stavu vyjádřeného v diagramu. Příčinou může být silné odměšování cínu při tuhnutí bronzu a velmi pomalá difuze cínu při nižší teplotě. K tvorbě rovnovážného eutektoidu ($\alpha + \epsilon$) dochází jen při velmi pomalém ochlazování, nebo po delší době žíhání bronzu na teplotě 350°C. Při běžných podmínkách ochlazování je ve struktuře cínového bronzu přítomen eutektoid ($\alpha + \delta$) spolu s proeutektoidními zrny α nebo δ .

Cín zvyšuje pevnostní charakteristiky bronzu. Pevnost v tahu je maximální při asi 20 hmot. % cínu, tažnost při asi 5 hmot. % cínu. Zpevnování probíhá v důsledku tvorby tvrdé fáze δ . Křehkost slitin je vysoká při velkém obsahu fáze δ .

Cínové bronzy se používají častěji pro odlitky než pro tváření. Obsah Sn je většinou 10 – 12%, jsou to heterogenní bronzy, tvořené směsí zrn fáze α a eutektoidu ($\alpha + \delta$). Vyznačují se dobrou pevností a houževnatostí, značnou odolností proti korozi a výbornou třecí vlastností dané eutektoidní směsí a měkkou fází α ve struktuře. Mají malé smrštění (0,8 – 1% při lití do pískových forem a 1,4% při lití do kovových forem), avšak mají horší zabíhavost než mosazi v důsledku širokého teplotního intervalu krystalizace. Přísada 5 – 10 hmot. % olova zlepšuje kluzné vlastnosti.

Cínové bronzy jsou vhodné pro tvarově složitě odlitky.

Malé množství fosforu se používá na legování cínových bronzů, zvýší se tím pevnostní charakteristiky a zabíhavost, takže je možné získat tenkostěnné odlitky složitěho tvaru.

Zvláštní typy bronzu

Ve směsi těchto bronzů je cín částečně nebo úplně nahrazen jinými přísadovými prvky, podle kterých se označují jako cínové, červené, hliníkové, fosforové, beryliové apod. Podle struktury, a tedy i odpovídajících vlastností a způsobu zpracování, se dále dělí na bronzy pro tváření a na odlitky.

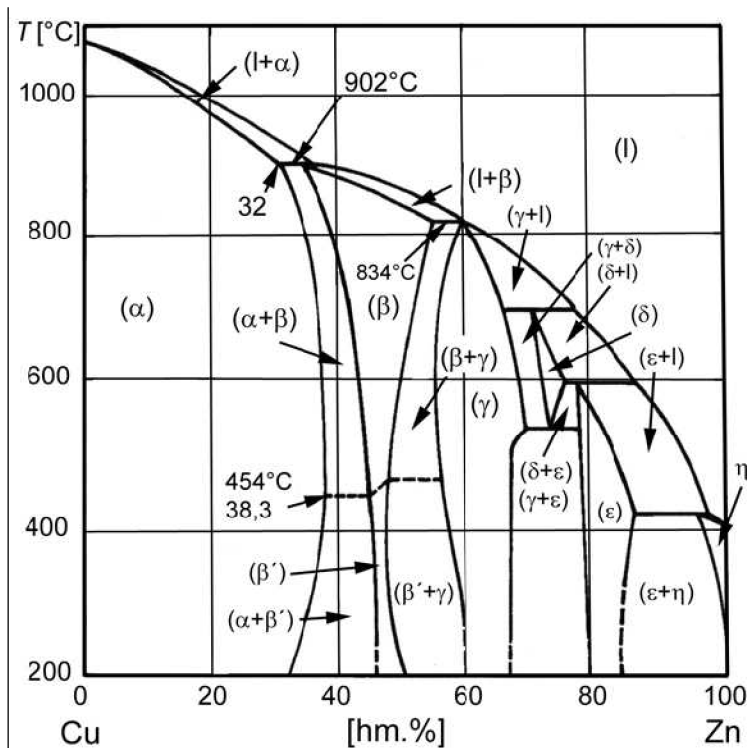
3.2.2 Mosaz [11]

Jsou to slitiny Cu-Zn, případně slitiny na této bázi obsahují ještě další prvky. V době bronzové se zinek v předmětech obvykle nevyskytoval. Pokud je v některých bronzích přítomen, jedná se pouze o náhodnou příměs, která se do nich dostala z měděných rud. Předměty z mosazi jsou v Egyptě datovány až kolem roku 30 př. n. l. V následujících letech se znalost přípravy mosazi rozšířila po celém římském impériu. Mosaz se získávala tak, že se k měděným kouskům přidávala ruda zvaná kalamín, ruda, která obsahuje uhličitan zinečnatý $ZnCO_3$ a tato vsázka byla žihána pod vrstvou dřevěného uhlí.

V českých zemích se kalamín používal ještě v 16. století. Příprava mosazi s použitím kovového zinku byla používaná v pozdější době, neboť získat čistý zinek bylo velice obtížné. V Číně byl čistý zinek vyráběn již ve 2. století př. n. l., ale

v Evropě byl znám až ve středověku. Výroba zinku v průmyslovém měřítku začala až v 19. století.

Základem mosazí je binární soustava Cu – Zn (obr. 6). Likvidus sestává ze šesti větví, podle kterých se z taveniny vylučují jednotlivé fáze (α , β , γ , δ , ϵ , η).



Obr. 6 Rovnovážný diagram soustavy Cu – Zn [9]

Slitiny s vyšším obsahem zinku, mají kromě fáze α také fázi β . S klesající teplotou se koncentrační oblast fáze β zužuje a při pomalém ochlazování se tato fáze mění v tuhý roztok α . Za teplot 454 až 468°C se tvárná a neuspořádaná fáze β mění v uspořádanou, křehkou a tvrdou fázi β' . Pevnost a tvrdost heterogenních mosazí s podílem fáze β' roste, tvárnost a houževnatost naopak klesá.

Se zvyšováním obsahu zinku roste pevnost mosazí a dosahuje maxima přibližně při koncentraci, která se blíží horní hranici oblasti $\alpha + \beta'$ v rovnovážném diagramu (~ 45 % Zn), při vyšších koncentracích zinku dochází k prudkému poklesu pevnosti. Maximální tažnost je při koncentraci 32 % hmot. Zn.

Dvousložkové mosazi Cu – Zn pro odlitky mají obvykle obsah mědi 58 – 63 % hmot. Zn. Jsou to heterogenní mosazi s fázemi $\alpha + \beta'$. Obsahují příměsové prvky (Bi, S, Pb, Sb, As, Fe, P) jejichž obsah zpravidla roste s obsahem zinku, a vliv na vlast-

nosti, zejména mechanické, je podobný jako u mědi. Vyznačuje se dobrou zabíhací schopností a malým sklonem k odměšování, avšak mají velké smrštění (i přes 1,5 %), jsou proto náchylné k tvoření dutin a staženin. Obrobitelnost je zlepšena olovem (1 – 3 hmot. %). Olovo je zdravotně závadné, proto v novějších mosazích je nahrazeno bismutem, selenem, popř. práškovým grafitem. Slévárenské dvousložkové mosazi Cu – Zn jsou v důsledku hrubší a méně stejnorodé struktury používány pro méně namáhané součásti např. čerpadla, armatury, plynovody, ozubená kola, nábytkové kování apod.

Částečnou nebo úplnou náhradou zinku je Si, Mn, Al, Ni, Fe, Sn, kterými se připravují zvláštní druhy mosazí např. mosaz křemíková, hliníková, manganová, niklová a cínová. K těmto mosazím patří i tvrdá pájka s teplotou tání vyšší než 500°C.

4 Býček z Býčí skály

Pro praktické ověření zkušeností s metodami a materiály uměleckého odlévání, byla vybrána soška býčka z Býčí skály.

4.1 Býčí skála a nález bronzového býčka [8] [13]

Býčí skála je jedna z nejvýznamnějších speleoarcheologických lokalit v Evropě. Nachází se ve střední části Moravského krasu. Z jeskyně vytéká Jedovnický potok, který prochází rozsáhlým podzemním komplexem.

V 18. století byla jeskyně Býčí skála využívána knížetem Aloisem z Lichtensteinů k těžbě písku. Při těžbě dělníci nacházeli různé zlomky keramiky a kostí. O tyto artefakty se začal zajímat lékař a amatérský archeolog

Dr. Jindřich Wankel.

V roce 1867 začal Dr. Wankel podnikat výzkum v prostoroře zvané Jižní odbočka. Zde objevil téhož roku pozůstatky lidského sídliště z paleolitu.

V roce 1869 provedl Dr. Wankel další pokusné sondy v ostatních prostorách jeskyně. Přestože objevil další artefakty, výzkumnou činnost přerušuje, neboť považuje jeskyni za probádanou.

Téhož roku zavítali do jeskyně bratřenci Gustav a Arnošt Felklové, kteří v prostorách severní stěny objevili hliněnou nádobu. Tato zdobená keramická nádoba měla cca 20 centimetrů v průměru. Nádoba obsahovala spálené proso, ve kterém byla uložena bronzová soška býčka. Při nálezů byla soška upevněna ke kovové destičce, podle dohadů byla ze stříbra, která ale odpadla a nebyla nalezena.

Soška býčka má hliněné jádro, je 10,1 cm dlouhá a 11,3 cm vysoká. Na čele a po stranách boků byly vsazeny železné trojúhelníčky a páteř pokrýval 2 mm široký pruh železa. Tyto železné kousky nebyly z důvodu koroze zachovány. V místě očí je otvor, ve kterém bylo zasazeno sklo. Při nálezů byl býk pravděpodobně poškozen a má část nohy a pravý roh zrekonstruován. Soška pravděpodobně představuje domestikovaného býka z doby Halštatské 750 – 400 let př.n.l.

Dr. Wankel v jeskyni objevil metalurgicko-dílenský komplex, kde byly skladovány sady náradí, materiál, polotovary pro další zpracování aj.

Tento nález dokazoval pokročilost znalostí při zpracování kovu. Jedním z dalších důkazů o pokročilé technice, je i nález železného dutého prstenu (Obr. 7), o kterém není dodnes jasné, jak byl vyroben.



Obr. 7 Prsten z Býčí skály [8]

4.2 Zpracování kovu v pravěku [5]

Pravěké lidstvo znalo měď již v pozdní době kamenné. Tento světle červený kov je velmi tažný, vhodný ke kování a vytepávání. V suchém prostředí se nemění, avšak ve vlhkém, mění svou barvu na zelenou měděnku (patinu). Nesmíšená čistá měď má vysokou teplotu tavení (téměř 1083°C), proto využívali směšování s jinými kovy, aby snížili teplotu tavení.

Vynález bronzu (slitina mědi a cínu), znamenala novou etapu v dějinách. Bronz je tvrdší než měď, snadněji se taví a lépe se leští, je ale drobivější a křehčí.

Pravěcí řemeslníci zjistili, že mísením různých prvků dosáhnou vhodných vlastností kovů.

Metody odlévání v pravěku

1. Odlévání do otevřených forem jednodílných nebo v přímo v zemi vyhloubených. Forma byla opracována z jedné strany, druhá strana byla většinou plochá. Plochá strana se mohla opracovat např. broušením (př. dýky, šperky, dláta, sekery).
2. Odlévání do dvoudílných forem
3. Odlévání do ztracené formy. Nejprve se odlil voskový model, který se potáhl jemnou vrstvou hlíny po zaschnutí se nanasla porézní vrstva hlíny. Po vypálení hlíny, vosk vytekl a do vytvořené dutiny se nalil kov. Po ztuhnutí kovu se hliněná forma rozdrtila. Tento způsob byl využíván již v nejstarší době bronzové.
4. Odlévání dutých předmětů. Z hlíny se vymodelovalo jádro předmětu, které se potáhlo voskem a opatřeno hliněným obalem, podobně jako v metodě odlévání do ztracené formy. Jádro s voskem bylo opatřeno tyčinkou, která zajišťovala ustavení jádra ve formě. Po vypálení formy, vosk vytekl a zůstala jen dutina pro nalití kovu.

5 Praktická část

Cílem experimentální části je získání zkušeností s tvorbou uměleckých odlitků metodou vytavitelného modelu. V historii se tato metoda nazývala metodou ztraceného vosku. Ověření získaných informací výrobou odlitků, zpracování a vyhodnocení experimentu.

Soška býčka byla odlita dvěma metodami a to v historii používanou metodou lití do hliněné formy a moderní metodou přesného lití do skořepinové formy.

Jedna metoda zachycuje odlévání v době bronzové a železné, druhá metoda je moderní postup pro odlévání tvarově složitých součástí.

5.1 Výroba býčka litím do hliněné formy

Výrobou býčka litím do hliněné formy, bude co nejvíce přiblížen autentický postup tehdejší výroby.

5.1.1 Příprava hlíny

Žáruvzdorná hlína byla dovezena od Blanska ve formě velkých a tvrdých kusů hmoty. Pro její zpracování byla použita drtička, která rozmělnila velké kusy hmoty na menší. Po rozdrcení byla přidána voda, která hmotu přeměnila na tekutou formu hlíny.

5.1.2 Výroba jádra

Originál býčka obsahuje hliněné jádro z důvodu možného ušetření kovu. Pro experiment byla použita směs antuky a sádry. Antuka a sádra byla rozmíchána v poměru 1 : 3. Přidáním vody byla vytvořena kašovitá hmota. Pro vyztužení jádra byla vytvořena konstrukce z drátu, která byla vložena do lukoprenové formy.

Lukopren [4]

Lukopren N jsou dvousložkové silikonové kaučuky, tzv. kondenzačního typu. Po smíchání katalyzátoru a pasty dochází k vulkanizaci v celé hmotě během několika desítek minut za tvorby silikonové pryže, která nemá adhezi k podkladu. Následně se do formy nalila směs antuky a sádry. Jádru schlo přibližně 20 minut a poté bylo vytaženo z lukoprenové formy. Část drátu z konstrukce vyčnívala z jádra ven z důvodů upevnění jádra při vkládání do další lukoprenové formy na výrobu voskového modelu.

5.1.3 Výroba voskového modelu

Na výrobu voskového modelu byl použit čistý ceresín, který byl roztaven a nalit do lukoprenové formy.

Bylo potřeba dbát na správnou teplotu ceresínu, protože příliš nízká teplota způsobí tzv. zvrásnění modelu, kdy dochází k předčasnému tuhnutí vosku a struktura povrchu modelu není hladká. Přehřátý vosk může vytvořit bubliny.

Bylo odlito několik zkušebních modelů býčka, podle kterých byl stanoven optimální postup pro odlévání vosku. Na zkušebních odlitcích bylo patrné několik chyb. Zásadní chyba byla v konstrukci lukoprenové formy, kdy vtoková soustava byla umístěna na hřbetu býčka, což neumožňuje dokonalé zatečení ceresínu do komplikovaných míst, jako jsou uši a rohy. Další komplikace nastala při odlévání býčka s jádrem. Jádro zamezovalo zatečení do komplikovaných míst a do nohou. Tvořili nedotečené místa a zeslabené stěny.

Byly odlity dva býčci s jádrem a jeden býček bez jádra.

Po vyjmutí jednotlivých býčků z lukoprenové formy bylo potřeba začistit stopy po dělicí rovině. Kvalita povrchu byla důležitá, protože veškeré vady a nečistoty se projeví na kovovém odlitku.

Po očištění vad a nečistot, bylo nutno opravit komplikovaná místa, jako uši a rohy, které se při vyjímání modelu ulomily. Na opravu byla použita páječka, která natavila přídavný vosk a spojila ulomené části.

Na opravený model byla připájena doplňková vtoková soustava, která vedla do rohů, aby zajišťovala kompletní zatečení kovu do všech míst.

Model v této fázi byl připraven na nanášení již předem připravené hlíny (obr. 8)



Obr. 8 Voskový model býčka s napájenou vtokovou soustavou

První vrstva hlíny byla nanesena v tenké vrstvě. Hlína obsahovala jen malé množství plev, což zajišťovalo kvalitní povrch. Po nanesení první vrstvy se model nechal den schnout (Obr. 9).



Obr. 9 Voskové modely s první vrstvou hlíny

Postup se opakoval pětkrát. Na hliněné vrstvě byly patrné prasklinky, které vznikly sušením. Na pátou vrstvu hlíny byl namotán drát, který zajišťoval dostatečné vyztužení dalších silnějších vrstev. Na šestou vrstvu byla použita hlína, do které bylo přidáno větší množství plev pro lepší prodyšnost hlíny. Silnější vrstva schla dva dny a postup se opakoval dvakrát.

5.1.4 Vypálení hliněné formy

Hliněná forma s dostatečně vyschlou poslední vrstvou byl připraven na vypálení v peci (Obr. 10). Forma byla v peci vystavena teplotě 600°C po dobu 12 hodin, poté pomalu chladla. Po úplném vystydnutí byla připravena k dalšímu kroku.



Obr. 10 Modely s poslední vrstvou hlíny

5.2 Odlévání býčka metodou přesného lití do skořepinové formy

Tato metoda byla použita pro srovnání odlitku býčka novou metodou odlévání a starou metodou lití do hliněné formy

Voskový model a jádra byly vyrobeny totožným postupem jako model při odlévání do hliněné formy.

Byly vyrobeny tři modely býčků z ceresínu s tím, že dva měli jádro ze sádky vyrobené metodou schaw (obr. 11) a jeden model byl bezjádrový.

Po napájení vtokové soustavy byly modely připraveny pro nanášení břechky.



Obr. 11 Sádrový model umístěný v lukoprenové formě

5.2.1 Výroba skořepiny

Voskový model byl namáčen do břechky a následně posypán molochitovým pískem. Břečka byla namíchána v poměru

Ethanol	644 ml
ETS 40	350 ml
Kyselina H ₂ SO ₄	6 ml

Molochitový písek na první vrstvu měl menší granulovitost než písek pro další vrstvy. Voskový model s první vrstvou nanesené břechky a písku schnul 2 hodiny a postup se opakoval 6 krát (Obr 12).



Obr. 12 Voskový model s nanesenou první vrstvou písku

Po vyschnutí obalu se model vložil připraveného zařízení, kde byl umístěn hořák s plynem, který zajistil roztavení vosku ze skořepiny.

Vyžihání skořepiny (obr. 13) se provádělo v žihací peci při teplotě 1000°C přibližně hodinu.



Obr 13 Skořepina po vyžihání

Před odlitím bronzu se skořepiny nechali předežhřát v peci. Skořepiny s jádrem a bez jádra byly předežhřátý na teplotu 600°C a druhá skořepina s jádrem byla předežhřátá na teplotu 1000°C (obr. 14).



Obr. 14 Předežhřátá skořepina

5.3 Odlévání bronzu

Hliněné formy a skořepinové formy byly ustaveny tak, aby nedošlo k jejich posunutí a následně byl nalit bronz (Obr 16).

Byl použit cínový bronz s přibližně 10% cínu.

Bronz byl roztaven v elektrické peci při teplotě 1160°C po dobu 3 hodin. Jako struskotvorná přísada bylo použito sklo. Po vyjmutí kelímku z pece byla stažena struska (Obr 15).



Obr. 15 Stahování strusky



Obr. 16 Lití bronzu do skořepinové formy

Na obrázku 17 je vidět odlévání bronzu do hliněné formy a následné tuhnutí na obrázku 18.



Obr. 17 Odlévání kovu do hliněné formy



Obr. 18 Tuhnutí kovu

Přibližně po 45 minutách po odlití, byly skořepinové a hliněné formy vytlučeny a následně se odlitek opískoval. Na obrázku 19 je vlevo zobrazeno vytloukání odlitku z hliněné formy a vpravo vytloukání ze skořepinové formy.



Obr. 19 Vytloukání bronzu

Opískování odhalilo veškeré vady spojené s odléváním např. zatečení do puklin v hliněné formě (obr. 20).



Obr. 20 Porovnání odlitku z hliněné formy (vlevo) a keramické skořepiny (vpravo)

6 Závěr

Cílem experimentu byl pokus o rekonstrukci historické technologie výroby odlitek na ztracený vosk. Replika původní podoby býčka z Býčí skály byla vyrobena dvěmi metodami.

Původní metoda lití do hliněné formy se ukázala jako velice jednoduchá a levná metoda, avšak povrch býčka nebyl kvalitní. Nekvalitní povrch zapříčinily pukliny v hliněné formě, do kterých zatekl bronz (obr. 21). Pukliny je možné eliminovat např. menší tloušťkou nanesené první vrstvy hlíny na voskový model popř. zajistit pomalejší schnutí hlíny.



Obr. 21 Lití do hliněné formy

Lze však konstatovat, že rekonstrukce starověké technologie přinesla použitelné odlitky. Je zřejmé, že úplné zvládnutí původní technologie vy si vyžádalo více času. Bylo prokázáno, že lze vyrobit umělecké předměty za použití velmi primitivních postupů.

Při použití moderní metody lití do skořepinové formy, byl povrch býčka znatelně lepší, avšak objevila se místa s nahromaděným materiálem (obr. 22). Při nanášení břechky a posypávání pojivem se vrstva odloupla od voskového modelu, tím se vytvořilo místo kam zatekl bronz. Možná příčina tohoto problému je, že břechka byla namíchána čtyři měsíce před použitím a tím mohla ztratit své vlastnosti.



Obr. 22 Vada na odlitku

Navzdory vadám obou metod odlévání byl experiment úspěšný. Vady, které vznikly, jsou opravitelné běžnými metodami třískového obrábění např. broušením.

Seznam použitých zdrojů

1. Auguste Rodin. In: *Wikipede: otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco: Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Auguste_Rodin
2. DOŠKÁŘ, J. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1976. 320 s. ISBN 04-211-76.
3. HŘEBÍČEK, Lukáš. *Ověřování původních technologií pro výrobu uměleckých odlitků* [online]. Brno, 2008 [cit. 2012-04-15]. Diplomová práce. Fakulta strojního inženýrství.
4. LUČEBNÍ ZÁVODY, a. s. Kolín. *Technologický postup pro výrobu forem ze silikonového dvousložkového kaučuku: Lukopren N*. Dostupné z: <http://www.decomania.cz/deploy/files/tplukoprenn4.pdf>
5. JANOTKA, Miroslav a Karel LINHART. *Řemesla našich předků*. První. Praha: Svoboda, 1987. ISBN 25-105-87.
6. MATOUŠEK, Václav, Petr RENČ a Vladimír PEŠA. *Jeskyně Čech, Moravy a Slezka s archeologickými nálezy*. Praha: Libri, 2005. ISBN 80-7277-286-4.
7. Mosaz. In: *Wikipedie: Otevřená encyklopedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2012 [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Mosaz>.
8. *Novakoviny.eu* [online]. 2010 [cit. 2011-03-06]. Záhada býčí skály. Dostupné z WWW: <http://www.novakoviny.eu/archiv/historie/255-byci-skala-zahada>.

9. Phase Diagrams & Computational Thermodynamics. [online]. [cit. 2012-05-15]. Dostupné z: <http://www.metallurgy.nist.gov/phase/solder/agsn.html>
10. *Slévárství: Technologie přesného lití*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2008. ISSN 0037-6825.
11. *Slévárství: Měď a slitiny mědi pro odlitky*. Brno: Svaz sléváren ČR, 2001. ISSN 0037-6825.
12. ŠEDÝ, Václav. *Sochařské řemeslo: Základ sochařského umění*. Praha: Státní nakladatelství krásné literatury, hudby a umění, 1953. ISBN 301-09-14-54448.
13. *Tourism.cz* [online]. 2004 [cit. 2011-03-06]. Archeologické nálezy v Předsíni jeskyně Býčí skála. Dostupné z WWW: <http://www.tourism.cz/encyklopedie/objekty1.phtml?id=120320>.