

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

OVĚŘOVÁNÍ PŮVODNÍCH TECHNOLOGIÍ PRO VÝROBU UMĚLECKÝCH ODLITKŮ

VERIFICATION OF THE ORIGINAL TECHNOLOGIES USED FOR ART CASTINGS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ HŘEBÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. MILAN HORÁČEK, CSC.

BRNO 2008

Abstrakt

Tato práce dokumentuje odlití stejného uměleckého odlitku do keramické skořepiny, několika forem s použitím různých sádrových směsí, anhydritové sádry, a také pískové formy z přírodního slévárenského písku. Popisuje odlití býčka z Býčí skály do hliněné formy a rekonstrukci jeho původní podoby. Výsledkem je přehledné porovnání metod, ověření technologií výroby odlitků a zdůraznění specifik a možností uplatnění jednotlivých typů forem.

Klíčová slova

Umělecké, odlévání, sádrové, formy, skořepina, experimentální, archeologie, bronzové, sochy, staré, technologie.

Abstrakt

This diploma thesis is describing making of the same art casting by using different foundry technologies/ moulds (ceramic shell mould, several types of plaster moulds including anhydride gypsum and also natural sand mould). In this thesis there is also description of casting the famous piece of bull from "Byčí skála" (Bull Rock). The bull was cast into traditional clay mould which is believed to be the original technology. Also the original shape of the bull casting was reconstructed, i.e. a copy of the original bull casting made. As the main achievement of this work is an overview and comparison of several technologies suitable for making art castings.

Key words

Art, casting, gypsum, moulds, shell, experimental, archeology, bronze, sculpture, old, technology.

Bibliografická citace

HŘEBÍČEK, Lukáš. *Název: Ověřování původních technologií pro výrobu uměleckých odlitků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 65 s., 2 příloh. doc. Ing. Milan Horáček, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Ověřování původních technologií pro výrobu uměleckých odlitků vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum: 20. 5. 2008

.....
Lukáš Hřebíček

Poděkování

Děkuji tímto za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce vedoucímu diplomové práce **doc. Ing. Milanu Horáčkovi, CSc.**

Dále děkuji za objasnění technologie výroby forem do anhydritové sádky ve slévárně Materiálovotechnologické fakulty STU, Trnava **prof. Ing. Mariánu Murgašovi, CSc.** a **Ing. Eugenu Belicovi** .

V neposlední řadě děkuji také zaměstnanci Moravského zemského muzea, archeologického ústavu- doba bronzová, **PhDr. Milanu Salašovi, CSc.**
Za praktické rady děkuji **vedoucí pískové laboratoře Aleně Málkové.**
Děkuji i slévárně ALFE Brno, s.r.o.

Obsah

1 Úvod.....	8
1.1 Historie uměleckého slévárenství ve světě	9
1.2 Historie slévárenství v českých zemích	14
1.2.1 Doba bronzová.....	14
1.2.2 Starší doba železná	15
1.2.3 Období laténské.....	16
1.2.4 Velká Morava.....	16
1.2.5 Středověk a novověk	16
2 Teoretická část.....	17
2.1 Hliněné formy.....	17
2.1.1 Negativní formování.....	17
2.1.2 Popis formování podle Vavřince Kříčky z Bítvyšky	20
2.1.3 Benvenuto Cellini.....	22
2.2 Sádrové formy.....	23
2.2.1 Sádra a její charakteristika.....	25
2.2.2 Sádrové směsi na bázi anhydritu CaSO_4	26
2.2.3 Odlévání do sádrových forem ve šperkařství	28
2.3 Pískové formy	30
2.4 Skořepinové keramické formy.....	30
2.5 Cementové formy.....	32
3 Experimentální část.....	33
3.1 Cíl experimentů.....	33
3.2 Výroba modelů.....	33
3.3 Zhotovení odlitků.....	36
3.3.1 Hliněná forma.....	36
3.3.2 Písková forma	38
3.3.2.1 Zhotovení pískové formy.....	38
3.3.2.2 Rozbor přírodního písku z oblasti Zakřan	41
3.3.3 Sádrové formy.....	42
3.3.3.1 Typy sádrových forem.....	45
3.3.3.2 Pevnost a prodyšnost sádrových forem	50

3.3.4	Skořepinové formy	50
3.3.5	Cementové formy.....	52
3.4	Vyhodnocení odlitků.....	54
3.5	Rekonstrukce původní podoby býčka z Býčí skály	59
4	Závěr	61
	Použitá literatura.....	63
	Seznam příloh.....	65

1 ÚVOD

Existuje mnoho způsobů, jak dosáhnout kvalitních uměleckých odlitků. Za správnou volbou vhodné metody stojí vždy praktické zkušenosti, ale ne vždy je zdánlivě nejlevnější postup výroby odlitku ten nejlepší.

Cílem této práce je vyzkoušet na složitém modelu s dutinou a jemně cizelovaným reliéfem co nejvíce typů forem, používaných v praxi uměleckého lití. Porovnáním postupů výroby a kvality odlitků z různých pohledů by měl vzniknout obraz o výhodnosti a použitelnosti jednotlivých technologií. Lití uměleckých předmětů na vytavitelný model má nepředstavitelně dlouhou a bohatou historii, a proto bylo vhodné odlít odlitek i do hliněné formy. V současnosti se používají keramické a sádrové skořepinové formy, ale také dělené pískové formy mají svoje místo v uměleckém odlévání.

Klade se důraz na kvalitní povrch bez vad. Ve skutečnosti ovšem musí být každý odlitek cizelován. Cizelace je velice náročná, a proto precizní odlitek šetří slévárně čas i peníze. Náklady na cizelaci tvoří obvykle až polovinu celkových nákladů.

Tato práce dokumentuje postupy zhotovení modelů i forem jak fotograficky, tak i údaji o složení formovací směsi, postupech žíhání atd. Čerpá technologické postupy výroby forem z historických spisů a poznámek slavných slévačů a umělců, ale i z nejčerstvějších článků uvedených k tomuto tématu v odborných časopisech a literatuře. Každá z metod má svá specifika a ukazuje se jako optimální jen pro určitý typ odlitků.

1.1 Historie uměleckého slévárenství ve světě

Mnoho nálezů dokládá, že již velmi brzo byly u Egyptanů a v Číně ovládány různé způsoby formování. Výroba modelů ze dřeva, hlíny a jiných vhodných materiálů k formování byla běžná. U jednoduchých předmětů se pravděpodobně již používalo otevřených forem z přírodních formovacích písků, do nichž se vtlačoval tvar, který se odléval přímo, nebo pomocí licí jamky.

Formy na ztracený vosk se hojně vyráběly ze směsi jílu s pískem, hnojem a konopím, nebo žíněmi, nebo oštinami z důvodu prodyšnosti forem. Tyto poznatky se šířily a objevovaly v různých obdobích, na různých místech. Často se přihodilo, že techniky formování byly zapomenuty a později znovu objeveny na jiném místě. Žíhané jílové formy z doby 1600 př.n.l. se nedávno ve velkém počtu našly v Číně. Nálezy ukazují, že už 3000 let př. n.l. existovalo lití na vytavitelný voskový model v přední Asii, Indii a později v Egyptě a Evropě.

Postup výroby formy byl následující:

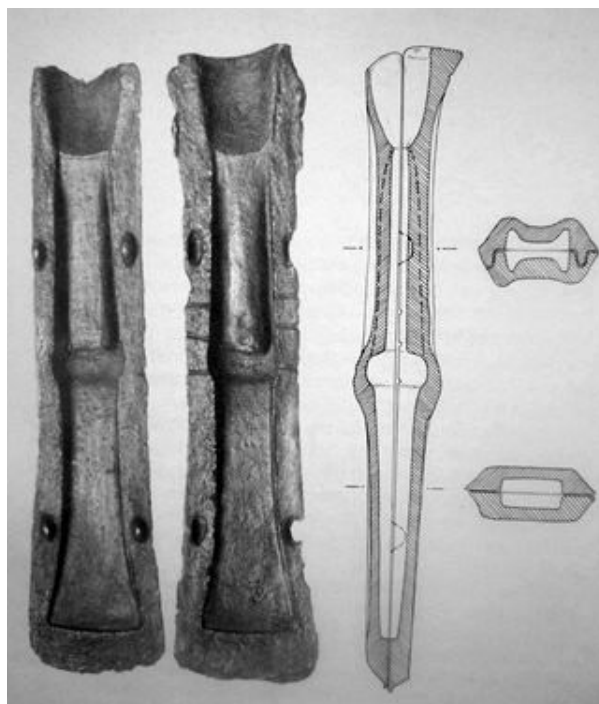
- 1) zhotovení hliněného jádra
- 2) namodelování vosku na jádro
- 3) připájení voskových vtoků a výfuků
- 4) výroba hliněné skořepiny
- 5) vytavení vosku a žíhání formy
- 6) obsypání formy k lití
- 7) lití
- 8) vytloukání odlitku

U odlitků bez jádra, které byly na počátku vývoje metody vytavitelného vosku se na voskový model přímo nanasla jílová směs. Rozvoj lití na vytavitelný vosk nastal kolem roku 500 př. n.l. v Řecku tzv. negativním formováním. Daly se tak zhotovit odlitky o stejnoměrné tloušťce stěny.

Trvalé formy jednoduchého rázu, předchůdkyně dnešních kokil se dělaly z pískovce, břidlice nebo mastku, ale i z bronzu. Svědčí o tom 3000 let stará forma z pískovce (obr.1.1), sloužící k výrobě šperků. Je na ní dobře vidět vtoková soustava a drobné výfuky .



Obr. 1.1 Forma z pískovce 3000 př. n. l.



Obr. 1.2 Bronzová kokila 1200 př. n. l.

Můžeme vidět průduch a lící nálevku, která současně plní funkci nálitku. U pískovcových forem není někdy jasné, jde-li o skutečnou lící formu, nebo spíše matečnou formu k zhotovení voskových modelů. Rozdíl je v nepřítomnosti výfuků na formě pro voskové modely a změna zabarvení na lící formy důsledkem žáru. Obrázek 1.2 znázorňuje dvoudílnou trvalou formu z bronzu pro odlití sekery. S formou tohoto typu bylo provedeno úspěšné pokusné odlití.

Po technologických poznámkách uveďme několik příkladů pozoruhodných odlitků a údajů o nich. K nejstarším slévárenským nálezům vůbec patří indická bronzová soška tanečnice z Kapadocie (obr. 1.3).



Obr. 1.3 Tanečnice z Kapadocie



Obr. 1.4 Staromezopotámská hlava

Významné staré sochařské dílo z přední Asie je hlava odlitá z čisté mědi (obr. 1.4); tato staromezopotámská litá plastika působí i dnes aktuálně. Zobrazovaný byl význačnou osobností a jeho podobizna byla asi při válečném střetnutí poškozena, hlavně oči a uši. Mezi historickými nálezy je hodně zbraní. Hlavními nástroji byly sekery s různými typy upevnění. Zbraně a nástroje se nejčastěji odlévaly do trvalých forem. Odlitky byly dále zpracovávány kováním. Často je bronz také zpevňován tvářením za studena. Struktura kovu se deformačně zpevnila.

Soška na obrázku 1.5 je nejstarší dochovaný důkaz lití do skořepiny ve střední a severní Evropě. [1]



Obr. 1.5 Proslulý Sluneční vozík z Trundholmu; sluneční kotouč je z bronzu potaženého zlatou fólií s tepanou spirálou, což bylo v bronzovém věku severoevropskou zvláštností. [2]

Egyptané vytvořily velkolepé svědectví technické a umělecké tvůrčí činnosti. Protože považovali posmrtný život za důležitější, než pozemský, dávali nebožtíkům bohaté dary na cestu. Nálezy v hrobkách faraónů, pokud nebyly vydrancovány, byly nespočetné šperky, zbraně a další předměty. Mezi časté bronzové plastiky, které znázorňují bohy ve zvířecí podobě, je Bůh mrtvých Anubis, jako ležící šakal (obr. 1.6) a bohyně Bastet jako kočka. U pozdějších děl je jádro, zatímco dříve vyrobené sochy jsou jednodušší. Jádrová směs byla pojena asfaltem.



Obr. 1.6 Anubis jako šakal 1200 př. n. l.

Obraz slévárenství v Antice, dosažený kolem roku 500 př. n.l. v Řecku, tvoří umělecký vrchol. Mnoho bronzových odlitků z této doby je zničeno, jen málo z nich se opět našlo. Patří k nim helénský hrdina na obrázku 1.7, nalezený na pobřeží Jónského moře u Riace. Tento významný nález pochází pravděpodobně od Řeckého sochaře Phidia, nebo jeho žáka. Pravděpodobně byly figury odlévány pomocí jádra, na něž se nanese voskový model, zaformoval se a odlil. [1]



Obr. 1.7 Helénský hrdina [1]



Obr. 1.8 Maratonec z Ephebe [3]

Jinoch z Marathónu (obr. 1.8) byl nalezen na dně moře, protože loď, která sochu kdysi převážela do Říma, ztroskotala. Tento originální bronz vznikl v době kolem poloviny 4. století př. n. l. [3]

Římané se učili umění monumentálních odlitků od Řeků. Z pozdější antické tvorby jsou obzvláště zajímaví koně od Svatého Marka (obr. 1.9), kteří byly odliti v prvním století n.l. Odlité části jsou spojeny nýty z mědi, legovanými jen 2% cínu a olova. Tento materiál byl zřejmě zvláště vhodný pro žárové zlacení. Toto čtyřspřeží je umístěno v Benátkách na katedrále Sv. Marka. Za nejstarší jezdeckou sochu, která se zachovala, je považována asi 1800 let stará socha Marka Aurelia (obr. 1.10), filosofa na císařském trůně. [1]



Obr. 1.9 Kone od Svatého Marka [1]



Obr. 1.10 Proslulá jezdecká socha Marka Aurelia [3]

1.2 Historie slévárenství v českých zemích

1.2.1 Doba bronzová

Doba bronzová, která představuje rozvoj a užití metalurgie a odlévání mědi a cínu (bronzy), se na našem území datuje v rozmezí 19. až 8. stol př. n. l. Přitom již od počátku doby bronzové se zde zpracovávala nejen měď, ale i její arzenové a cínové slitiny, získávané přidáváním arzenových a cínových rud do vsázky při tavení mědi, které vykazovaly vyšší tvrdost a nižší teplotu tavení, než čistá měď. Hromadná výroba bronzů se objevuje až na vrcholu starší doby bronzové 1650 až 1550 př. n. l. Na celém území se přitom rozšířily stejné typy bronzových seker, dýk, jehlic, náramků, spon a dalších předmětů, odlitých z bronzů.

Ve střední době bronzové asi 1400 až 1300 let př. n. l. se znalost bronzů a jeho zpracování již rozšířily téměř po celé Evropě, i když těžba rud a metalurgie byly vázány na sousedství rudných ložisek a výšinná, zpravidla i opevněná sídliště a blízká okolí. K významným lokalitám tohoto druhu patří i návrší sídliště Cezavy u Blučiny na Brněnsku, vztahující se k velatickému osídlení, kde v časném stupni středodunajských popelnicových polí (asi 1300 let př. n. l.) existovala osada již částečně specializovaná na metalurgickou produkci bronzových odlitků.

Dokumentují to nálezy kamenných odlévacích forem – kadlubů, bronzových odlitků dlát, kladívka, kovadlinky, sekerky, srpů, nože, dyzny od tavicích pecí, strusky a depoty (skládky) zlomkových bronzů, lup a dalších slitků určených k přetavení. O existenci kovolitecké – slévárenské dílny na lokalitě svědčí zlomek starobronzové dyzny a zlomek hliněného pláště ztracené formy zhotovené metodou na vytavitelný model. To je ojedinělý důkaz odlévání na ztracený model u nás i v Evropě.

1.2.2 Starší doba železná

Starší doba železná, období halštatské asi 750 až 400 roků př. n. l., z ní pochází i známý Wankelův nále z jeskyně Býčí skála u Adamova (obr. 1.11), který patří v Českých zemích k nejvýznamnějším nálezům halštatského období. Nález je datován do 6. až 5. století př. n. l. a jednoznačně nejznámějším předmětem z tohoto nálezu je bronzový odlitek býčka, který byl bohužel při vyzvedávání bratranci Felklovými poškozen, takže obě přední nohy, pravá zadní noha a pravý roh jsou rekonstruovány. Napříč hlavou býčka prochází oválný otvor, který byl patrně původně vyplněn skleněnou tyčinkou. Na čele a obou lopatkách byly trojúhelníkové železné vložky, zničené korozí, obdobně jako železný, dva mm široký hřbetní proužek. Soška o délce 101 mm a výšce 113 mm byla odlita na hliněné jádro, jež je viditelné otvorem na spodní části břicha. Podle archeologů jde o unikátní předmět, importovaný z velké dálky, patrně egyptského původu.



Obr. 1.11 Býček z Býčí skály (součást této práce bylo i vytvoření této kopie)

K dalším odlitkům výjimečné historické ceny patří násadec na hůl, označovaný jako žezlo, stovky bronzových náramků o průměru 75 mm až 105 mm, z nichž některé nesly stopy zlacení, dále spony a jehlice, k nimž existují analogie z Halštatu, ze severní Itálie a z jižních Čech. Z hlediska slévárenského se k jeskyni Býčí skála váže pozoruhodný nále kamenné formy k odlévání ozdobného předmětu čtyřpaprskových koleček s knoflíky.

Forma je vyrobena z jílovité břidlice. Je velmi pravděpodobné, že většina bronzových odlitků náramků, spon a jehlic, i samotná kamenná forma, je místní provenience a potvrzuje kontinuitu slévárenské metalurgie doby bronzové a halštatské.

1.2.3 Období laténské

Další období je laténské podle naleziště La Tène ve Švýcarsku, je charakterizováno prudkým nástupem a ovládnutím území historických zemí (Čech, Moravy a Slezska) Kelty, kteří dosáhli největšího rozmachu v Evropě v 5. až 1. století př. n. l. Keltové byli výbornými prospektory, hutníky a kováři. Jejich výrobky uměleckého řemesla - spony, náramky, nánožníky, opasky, hudební nástroje atd., které vyžadovaly vysokou řemeslnou zručnost a hluboké znalosti zpracování drahých kovů, stříbra a zlata i bronzu, železa. Pozdější laténská hutnická technika se stala základem evropské civilizace vůbec. Laténská slévačská technika již znala do všech podrobností vlastnosti různých slitin a používala čím dál více odlévání na ztracený vosk. Zvláště, když keltské dílny v 5. století přistoupily k výrobě složitých spon a jiných tvarově složitých předmětů. Lití na vytavitelný model dosáhlo u Keltů vrcholu v 2. století př. n. l.

1.2.4 Velká Morava

Velká Morava v druhé polovině 9. století představovala významný hospodářský a politický útvar. Pro hospodářský vývoj již mělo největší význam železářské hutnictví, jehož rozvoj nastal už v 8. století, ale přesto se rozvíjelo i slévačství. Například ve velkomoravském Starém Městě Nad halčími byla objevena celá slévárna bronzu. Podle církevní historie bylo užívání kostelních zvonů v době Velké Moravy běžné.

Vedle odlévání bronzových předmětů bylo na velkomoravských hradištích prokázáno odlévání šperků a kultovních předmětů také ze zlata, stříbra a olova. I když se hmotná kultura slovanského obyvatelstva v mnohém podobala předchozí pravěké situaci a ve srovnání s antikou představovala krok zpět, vlastním vnitřním vývojem, uspišeným kontakty s dožívajícími římskými provinciálními centry v Podunají, styky s franským prostředím a absorbováním impulsů vzdálené kultury byzantské, docházelo postupně k vyrovnání rozdílů s ostatními evropskými oblastmi. Hutnictví a s ním spojené slévačství v Čechách, na Moravě a ve Slezsku se tak dostalo, navzdory jistému poklesu, již na začátku středověku na úroveň Evropy.

1.2.5 Středověk a novověk

Ve středověku nastalo největší rozšíření slévání bronzu. Odlévalo se v otevřených jednoduchých formách, ve formách dvoudílných, bylo známo odlévání na ztracený vosk i odlévání s jádrem – odlévání dutých předmětů. Hlavními výrobky slévačů byly u nás ve 12. až 14. století předměty církevní, jako zvony, svícny a křtitelnice. Především zvon se stal integrální součástí každodenního života tehdejšího člověka. V té době se začal vytvářet typ slévače specialisty, který se postupně téměř výhradně věnoval zvonařství.

Připomeňme si, že česká technická literatura chová z počátku novověku vzácný rukopis Vavřince Kříčky z Bítvy (+ 1570) „*Návod k lití a přípravě děl, kulí, hmoždířů, zvonů, konví ke zvedání vody k vodotryskům ap., četnými kresbami opatřený*“. Lze v něm nalézt zajímavé informace a je citován v této práci i s Kříčkovou kresbou Zpívající fontány, kterou sám modeloval. [4]

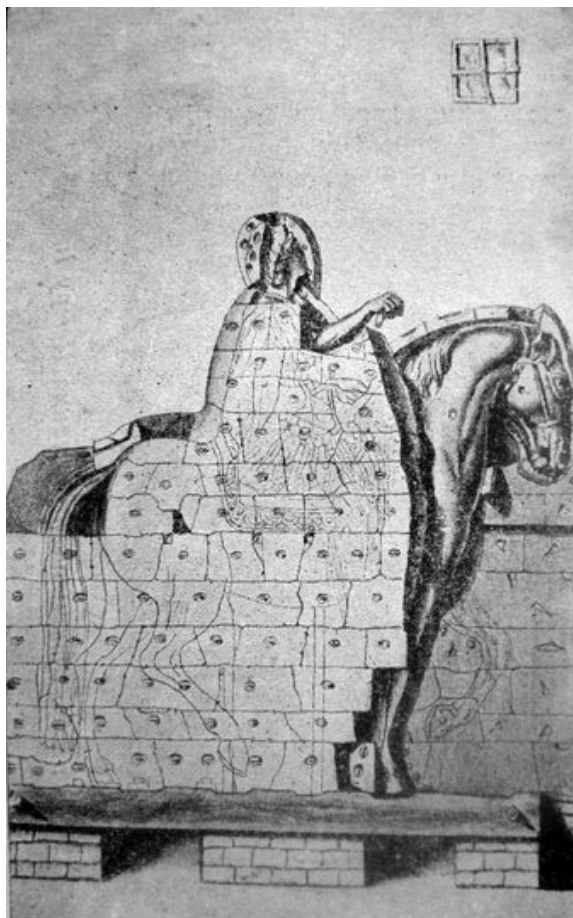
2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Hliněné formy

Patří dnes již do historie, jelikož jejich výroba je velice časově náročná. Každá vrstva formy, nebo například zalité jádro, musí totiž před dalším postupem práce vyschnout, a tím se formování natahuje na týdny.

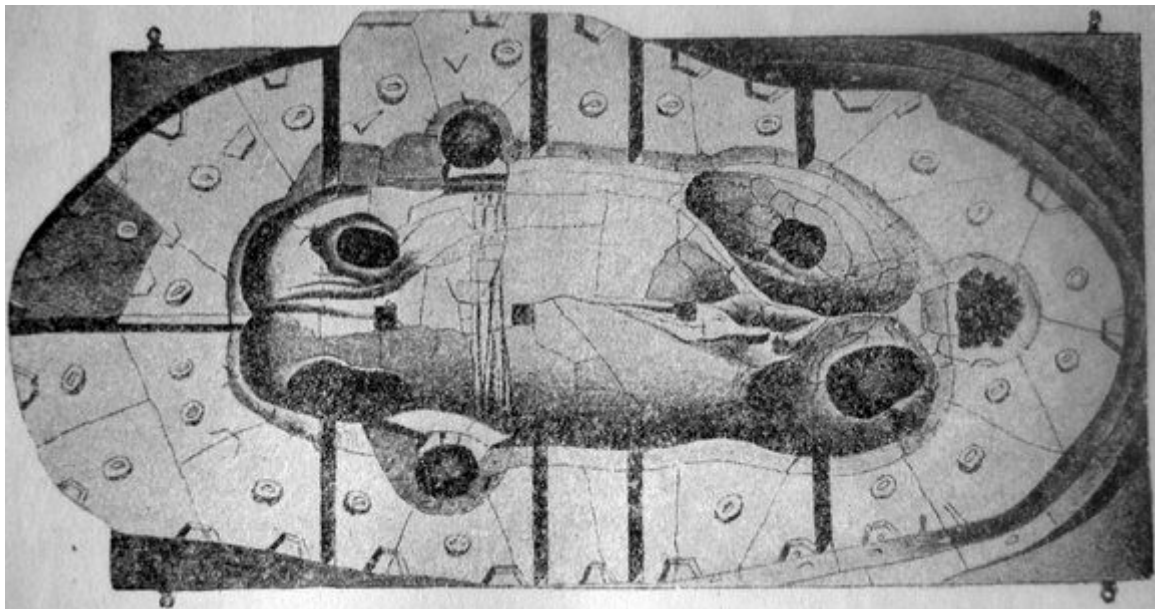
2.1.1 Negativní formování

Model je zaformován mnoha sádrovými klíny, oddělují se dělicím prostředkem a zapadají do sebe na zámky. Jak je forma zaformovaná, je ukázáno na obrázku 2.1, kde je vidět i model.



Obr. 2.1 Zaformovaný model

Na dalším obrázku 2.2 vidíme příčný řez formy při vyjmutém modelu. Celá forma se umístí do rámu a do ní se vyvrtají otvory pro výztuhu jádra .



Obr. 2.2 Řez formou

Existuje několik postupů zhotovení voskových modelů a výztuh. Formíři sádrovou formu nejprve vytřou rozpuštěným sádem s olejem. To zajistí snadné oddělení sádry od voskového modelu. Potom na vnitřní povrch formy nanesou vrstvu ze směsi vosku, sádla a pryskyřice. Celá tato natřená vrstva má tloušťku 2-2.8 mm. Na tuto vrstvu pokládají na dřevěné desce odlité, pravítkem seškrábnuté a zahřáté voskové plátky takové tloušťky, jak má být tlustý odlitek. Tyto plátky namačkají na natřenou vrstvu vosku, tak aby byla vrstva kompaktní. Při zalévání jádra je nutné zajistit zalití všech míst, jinak by odlitek byl nepřiměřeně tlustý. Konstrukce výztuhy musí zajistit polohu, zabránit praskání jádra a při lití odolat žáru roztavené mědi. Výztuha nesmí odvařit roztavený kov.

Složení jádrové směsi: sádra : antuka v poměru 1:2 s vodou. Celou dutinu formy slévači zaplní sádrovou směsí a nechají ztuhnout. Za 3 až 4 hodiny toto jádro natolik vytvrdne, že dovoluje rozbití vnější sádrové formy. Snímáme sádrové segmenty tak, aby vosková vrstva zůstala nepoškozená na jádře. Takto získáme voskový model odlitku, na kterém vyspraví sochař poškozená místa a očistí zatekliny. Tato práce trvá několik týdnů.

Po vyspravení a očištění voskového modelu se ve vzdálenosti 50 mm od modelu umisťují vtokové kanály i výfuky. Z hlavních kanálů vychází menší vtoky připájené k modelu. Vtokový systém ukázaný na obrázku 2.3 zajišťuje rovnoměrný přítok kovu a ukazuje důmyslnost zkušených slévačů.

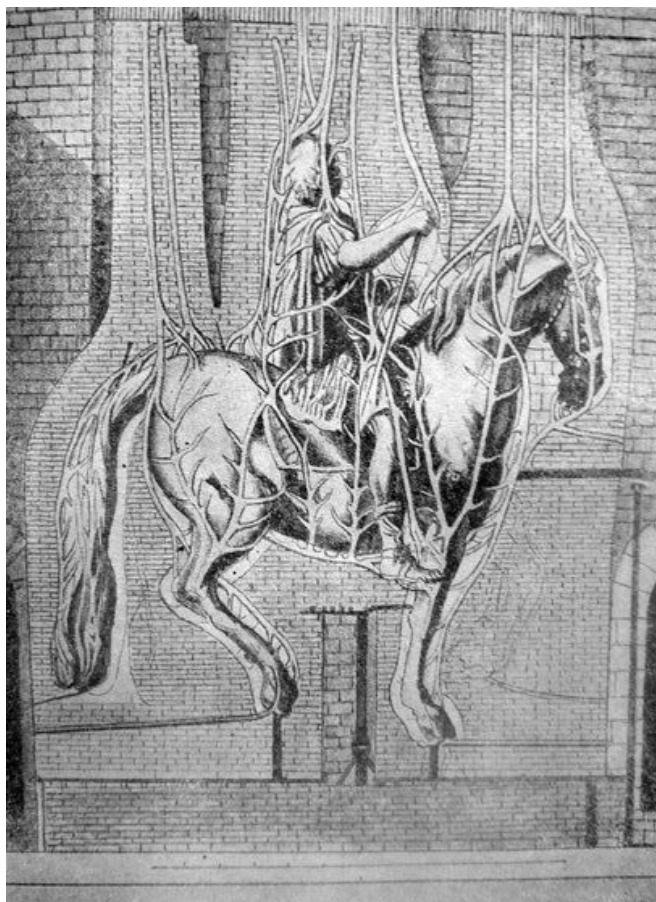


Obr. 2.3 Vtoková soustava a výfuky

Důležitý je promyšlený odvod plynů. Už při vytváření modelu se musí myslet na reálnost jeho odlévání. Hodně času zabere zhotovení hliněné formy. V sudech si formíři míchali hlínu s koňským trusem a otrubami, plevami, oštinami, kravskými žíněmi. Hmota se nechala uležet. Hlína se suší promývá a prosívá několikrát a míchá se s ostatními materiály.

Pro sochu Ludvíka XV. byla formovací hmota ze 3/6 hlíny z oblasti Paříže a 1/6 koňského trusu to všechno leželo v jámě, proto aby se suroviny uležely, potom se směs usušila, roztloukla, prosela a promyla vodou. Směs se podruhé vysušila a s hlínou tímto způsobem připravenou, se smíchaly další 2/6 roztlučené a proseté nejlepší hlíny, zbavené nečistot a s přídavkem písku. Takto připravená směs se smíchala s močí a třela na kameni. Také se přidával vaječný bílek na první čtyři vrstvy. Bez bílku se dokončily ostatní vrstvy. Proces nanášení ostatních vrstev hlíny je celkem jasný, když se kvalitnější vrstva směsi nanese na tloušťku 12-15 mm, formy se začínají pokrývat hrubší hlínou, dokud se nedosáhne tloušťky 200 mm. Potom se forma stáhne železnými obručemi, které se dávají podélně i příčně, spoje se podmazávají v místě křížení hlínou. Když je forma zhotovena a zpevněna, přidělají se k této formě zvlášť zaformované části. Zvláštní zřetel je brán na přesnost sestavení všech částí dohromady.

Dalšími operacemi jsou sušení a žíhání formy, které trvá 20 až 30 dní. Kvůli tomu se pod formou celý měsíc topilo 24 hodin denně, dokud se ve vtokových jamkách neobjevil oheň, takovým způsobem žíhání veškerý vosk vyhořel. Při vysoušení formy vosk stéká speciálními kanály, vytvořenými ve spodní části formy a odvádí se stranou. Množství vytaveného vosku zhruba naznačuje, kolik bronzu bude potřeba natavit. Na obrázku 2.4 je ukázána forma v řezu, která je postavená v jámě pro sušení [5].



Obr. 2.4 Řez formou k lití kovu [5]

2.1.2 Popis formování podle Vavřince Kříčky z Bítyšky

Jednoduše popisuje formování Vavřinec Kříčka z Bítyšky. Vezmeš suchou hlínu smíchanou s kravím trusem, stlučeš a proseješ ji hustým sítem a stlučeš ji s papírem nebo odstřížky, hlína může také obsahovat kobylence. Také použitou hlínu, není-li úplně vypálená, můžeš stlouci, proseti a přidat k hlíně. Mají-li se zhotovit figury nebo sochy mužské či ženské nebo delfíni, uděláš nejprve jádro z hlíny podle velikosti připodobněné předmětu, na ně kladeš vosk a vypracuješ podle tvaru, jaký má mít. Na vosk kladeš dobrou hlínu o určité tloušťce.

Aby se vosk odstranil, uděláš malý oheň kolem formy a otvorem, kde bude vtok, vypustíš roztavený vosk, pak formu vypálíš. Tak také náhrobní kříže můžeš dělat a z vosku vypracovat, ale na jádro musíš vzít dobrou výztuhu.

Vypaluješ ve stoje a do vosku dáš měděné hřeby, aby váha jádra vosk nesmáčkla. K sochám celých postav musíš dát do jádra napříč železo a také do vosku hřeby, aby se jádro ve svršku udrželo a nemohlo stranou vyhnout. Když se formují visuté svícny podle dřevěných modelů, musíš udělat pláště z hlíny, libovolné tloušťky, a potom děláš jádro, do kterého vložíš železo, když jádro uschne, vyjmeš hlínu, do jádra dáš hřeby, stáhneš dráty a vypaluješ. Musíš lít do horké formy buď z kelímku, ruční lžíce nebo pece. Podstavce k svícnům se formují na dřevěný model a jádra můžeš zase přiškrábnout na potřebnou tloušťku (obr.2.5). [6]



Obr. 2.5 Tato kašna, postavená na zámku v Praze, která byla začata roku 1554 a dohotovena v roku devátém a je provedena od mistra Tomáše, puškaře a ode mne, Vavřince Kříčky z Bítvyšky; na ní jsem já sám provedl všechny figury a Wolf puškař je formoval. Lili jsme ji spolu [6].

2.1.3 Benvenuto Cellini

Benvenuto Cellini popsal výrobu hlavy medúzy k soše Persea (obr. 2.6). Nejprve zhotovil železnou kostru, pak hlavu medúzy vymodeloval z hlíny, z vrstvy silné pouze půl palce. Hlínu dobře vypálil, a potom ji teprve potáhl voskem a dodělal tak, jak měla být. Nebo-li jak plyne z popisu na vypálené hliněné jádro nanestl vosk, a potom připevnil hlavu k vosku Persea. Voskový model začal obkládat hlínou, která byla připravena podle pravidel umění. Jílový plášť sevřel železnými svorkami a začal nad mírným ohněm rozpouštět vosk a až se vosk rozpustil, obložil formu cihlami tak, aby oheň sálal na formu a dřevem žíhal dva dny a dvě noci. [7]



Obr. 2.6 Perseus s hlavou Medúzy [8]

Celliniho veledílo Perseus s hlavou Medúzy zobrazuje mytického hrdinu v podobě krásného jinocha. Benvenuto Cellini (1500-1571), rváč a šarlatán, ale také autor *Vlastního životopisu*, nejzábavnější knihy té doby. Cellini byl nejlepší sochař manýrismu; jeho Perseus je geniální dílo. Odlití tohoto bronzu bylo velmi nesnadné a svědčí o zápalu, s nímž virtuos Cellini zmáhal technické překážky. Pracoval na tomto díle v letech 1545-1554. [9]

2.2 Sádrové formy

Formy ze sádrových směsí se zhotovují odléváním z velmi tekuté břečky, která přesně vyplní složité tvary modelu, nebo obalováním modelu jednotlivými vrstvami. Do sádrových forem se odlévají složité modely ze slitin hliníku, mosazí a bronzů. Odlitky jsou hladké. Odlévání odlitků z neželezných kovů do sádrových forem bylo známo již v dávnověku. Účelem nebylo dosáhnout přesných geometrických tvarů, ale hlavně dobrá reprodukce obrysů uměleckých předmětů, které byly rozmnožovány odléváním. Současná slévárenská technologie vyžaduje od sádrových forem přesnost rozměrů po vysušení, hladkost povrchu a odolnost proti praskání při sušení, dostatečná pevnost a prodyšnost, minimální vývin plynů při lití aj. [10]



Obr. 2.7 Arionova kašna odlitá do sádrových forem; autorem je Ivan Theimer.

Arionova kašna na Horním náměstí v Olomouci od světově proslulého umělce a sochaře Ivana Theimera, která byla odlita v italském Toskánsku do sádrových forem, je krásným příkladem možností, které sádra jako formovací materiál nabízí a jichž zde na této kašně bylo využito vrchovatou měrou (obr. 2.7-2.10). [11]



Obr. 2.8 Ivan Theimer a jeho dílo [12]



Obr. 2.9 Slévárna v Toskánsku plně zaměstnaná přípravou k lití Theimrových soch. [12]



Obr. 2.10 Vytłoukání stěžežního odlitku Arionovy fontány z formy [12].

Ivan Theimer v rozhovoru pro časopis Reflex : „Specializovaných řemeslníků zůstává čím dál míň. Odlévám v několika slévárnách v Toskánsku. To kvůli konkurenčnímu vztahu, abych dosáhl skutečně nejlepšího výsledku. Pokud si je slévárna jista, že dostane zakázku, aniž by ji mohl někdo ohrozit, tak kvalita práce klesá“. [13]

2.2.1 Sádra a její charakteristika

Sádra je hydraulicky tuhnoucí maltovina, vyrobená odvodněním sádrovce $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

1. Formy výskytu sádry

Dihydrát síranu vápenatého ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$). Dihydrát obsahuje 20,92 % vody.

α -hemihydrát síranu vápenatého ($\alpha\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$). Získáme jej odvodněním dihydrátu v atmosféře syté vodní páry při teplotách vyšších 97 °C.

Obsah vody je 6,2 %.

β -hemihydrát síranu vápenatého ($\beta\text{-CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$). Je obměnou hemihydrátu α o vyšší krystalizační energii. Získá se odvodněním dihydrátu při teplotě pod 100°C v suchém prostředí.

β -anhydrit – rozpustný. Získá se sušením β -hemihydrátu při teplotě 100 °C nebo sušením dihydrátu při teplotách okolo 200 °C. Obsahuje 0,2 % vody, jež jde odstranit pražením na teploty pod 300 °C.

α - i β -anhydrit přijímají vzdušnou vlhkost a mění se v hemihydrát.

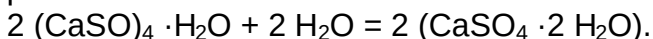
Anhydrit- β nerozpustný můžeme získat pražením různých forem síranu vápenatého při teplotách nad 350 °C.

Podle rychlosti tuhnutí rozlišujeme:

- sádry rychle tuhnoucí (alabastrová, štukatérská),
- sádry volně tuhnoucí (tvrdá, podlahová).

2. Mechanismus tuhnutí sádrových směsí

Po smíchání sádrové směsi s vodou vzniká pevný hydratovaný síran vápenatý podle rovnice:



Voda musí být čistá a studená (o teplotě do 20 °C). Rychlost tuhnutí sádry můžeme ovlivnit přísadami některých solí. Jako urychlovače jsou známy: rozpustné halogenidy (KCl), soli zvyšující koncentraci anionu SO_4 v roztoku (K_2SO_4 , $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), soli kyselin, které dávají se sírany nerozpustné sraženiny (NaO , MgC_2 , NH_4CL). Jako zpomalující prostředky působí: křehká voda, borax, vápenné mléko, soli kyseliny jablečné, citronové, octové.

Sádra obsahuje 21 % chemicky vázané vody, při ohřevu formy na 200 °C ztrácí sádra 15 % vody a přechází opět v hemihydrát, při teplotě 260 °C v rozpustnou bezvodou sádro (anhydrit) a nakonec při 315 °C až 455 °C v pálenou sádro (CaSO_4).

3. Metoda napěnění směsi

Princip je založen na poznatku, že přísada malého množství povrchově aktivní látky do směsi, způsobí při míšení napěnění sádrové hmoty. Zvyšuje se tekutost směsi při obvyklé vlhkosti, po ztuhnutí dostáváme formovací hmotu prostoupenou množstvím bublinek navzájem spojených mikro kanálky, tak že forma dosahuje značné prodyšnosti až 100 n.j.p. [10]

2.2.2 Sádrové směsi na bázi anhydritu CaSO_4

Zajištění vysoké jakosti povrchu dutých odlitků s povrchem často přesahujícím 1 m², klade vysoké technologické nároky na formy, hlavně na odolnost vůči tvorbě povrchových prasklin a celkových deformací během vytavování vosku a tepelného zpracování forem. Špatné zkušenosti s obvyklými výplňovými složkami sádrových směsí, jakými jsou křemičitý písek, šamot, antuka a pod., vedli k úvahám, o jejich náhradě materiálem z použitých forem po vhodné mechanické úpravě. Technologie vyžaduje vyžehání forem při teplotě nad 400 °C, kdy z bezvodého CaSO_4 vzniká ve vodě nerozpustný anhydrit II (β CaSO_4), který je známý jako hlavní složka pomalu tuhoucích tzv. stavebních druhů sádry.

Při vývoji směsi se postupně zvyšoval podíl anhydritu až na úroveň úplné regenerovatelnosti sádrových směsí z forem po odlití. Formovací směs se potom skládá převážně z anhydritu s malým přídavkem (do 5 %) nové sádry a technologicky vhodným množstvím vody. Laboratorní i praktické zkoušky ukázaly, že i samotný regenerovaný anhydrit může sloužit jako plnohodnotná surovina na výrobu forem a jader. Jednotlivé komerční druhy sádry se odlišují zejména rychlostí tuhnutí, tvrdostí a pevností po vytvrzení, a také náchylností ke tvorbě prasklin, danou objemovými změnami při tuhnutí. Odlišné vlastnosti způsobuje rozdílný obsah α a β -hemihydrátu, anhydritu a přítomnost doprovodných solí anebo oxidů záměrně přidávaných s cílem úpravy vlastností.

Množství přidané vody určuje tzv. vodní součinitel w , když je $w = 0,8$, tak na 0,8 l vody připadá 1 kg suché sádry. Rychlost tuhnutí sádrové maltoviny závisí hlavně na obsahu β -hemihydrátu, který reaguje s vodou nejrychleji a při obsahu nad 90% tuhnutí začíná 4 až 10 minut po namíchání s vodou. S rostoucím podílem α -hemihydrátu se doba tuhnutí prodlužuje, ale zvyšuje se pevnost v tlaku dihydrátu po ztuhnutí až nad 130 Mpa.

Odlévání forem ze sádrových směsí vyrobených metodou vytavitelného voskového modelu vyžaduje nejen odstranění volné i chemicky vázané vody, ale i úplné odstranění zbytků vosku, což se zajišťuje vypálením forem při teplotě **400 až 450 °C**. Bezvodý pojivový CaSO_4 forem a jader tehdy transformuje na ve vodě nerozpustný anhydrit II (β - CaSO_4). V případě sádro-anhydritových směsí se z forem po odlití získá výlučně anhydrit II, který lze mechanicky regenerovat. Směs musí být dostatečně tekutá, schopná věrně kopírovat reliéf modelu, za definovanou dobu musí dosáhnout manipulační pevnost a po dobu vytavování vosku, sušení a vypalování musí být povrch forem odolný vůči tvorbě trhlin.

Po ověření více způsobů drcení a mletí, se nejlepší výsledky dosáhli drcením úlomků z použitých forem v **kolovém mísíči** po dobu asi **30 minut** do stavu, kdy rozměry největších fragmentů jsou asi 4 mm a v nadrcené hmotě je dostatečný podíl jemných frakcí. Po odstranění nežádoucích frakcí na síť s okem 4×4 mm, se získá hmota s výhodnou granulometrií, která zajišťuje dobrou tekutost směsi a kopírování reliéfu modelu i velmi dobré technologické vlastnosti forem při dalším zpracování.

Postup dovoluje získat z materiálu použitých forem 95 až 99 % regenerovaného anhydritu, zbytek jsou ztráty převážně vzniklé při uvolňování odlitku, které se nahrazují ve formovací směsi novou sádrovou. Typické složení anhydrito-sádrové směsi je potom 1 hm. díl hemihydrátové sádry, 20 hm. dílů anhydritu s granulometrií do 4 mm a voda 0,6 l; 0,7 l a nebo 0,8 l na 1 kg suché směsi (w 0,6; w 0,7; w 0,8).

Směsi s vodním součinitelem od 0,6 po 0,8 dokážou pokrýt všechny technologické požadavky při výrobě forem od nanášení směsí štětcem (w 0,6), až po zalívání velmi členitých voskových modelů dostatečně tekutou maltovinou (w 0,8). Kromě směsi 1 : 20 se úspěšně ověřila možnost použití samotného anhydritu na lícové plochy forem, kde je výhodná nižší pevnost a vysoká odolnost vůči tvorbě prasklin. Na zvlášť jemné reliéfy je vhodné použít jen nejjemnější frakce po odstranění větších na síť s okem $0,5 \times 0,5$ mm. Použití jemnějších frakcí zvyšuje pevnost po vytvrdnutí, ale obsah vody musí být od w 0,6 po w 0,7, při vyšším obsahu vody už je pevnost příliš nízká.

K experimentálním pracím se použil anhydrit s granulometrií do 4 mm získaný z forem, které byly záměrně volně skladované na vzduchu asi 7 dní, a štukatérská sádra STUCK GYPS firmy KNAUF. Je vhodné manipulovat s formou až po 24 hodinách tuhnutí a volného vysušování forem na vzduchu. Výsledky zkoušek směsi 20 dílů anhydritu s 1 dílem hemihydrátové sádry a samotného anhydritu s vodou poukázali na vhodnost použití mechanicky regenerovaného materiálu sádrových forem vypálených při teplotě nad 400 °C po odlití jako plnohodnotné suroviny na výrobu formovacích směsí. Směsi byly vyvíjené hlavně pro umělecké slévárnictví, kde podstatně delší doba tuhnutí, charakteristická pro anhydritové sádry, není na závadu, ale naopak je určitou předností.

Získaný anhydrit může sloužit i jako jediná složka směsi, ale s limitovaným obsahem vody, který by neměl překročit 0,7 litru na 1 kg suchého substrátu. Podle několikaletých praktických zkušeností používání anhydritu přineslo výrazné zvýšení jakosti povrchu odlitků, zejména velkoplošných a dutých.

Je i ekonomicky opodstatněné, protože zajišťuje s minimálními náklady prakticky úplnou regenerovatelnost materiálu forem po odlití. [14]

Při osobní návštěvě profesor Murgaš velmi otevřeně popisoval celou technologii a kladl důraz na mletí směsi v kolovém mísiči. Dále prozradil, že na tuto technologii přišli při práci s napěněnou sádrou. Sádro na bázi anhydritu lze vyrobit vyžháním sádrové formy ze sádry KNAUF -STUCK GYPS. Jak řekl ing. Belica; přidává do směsi různé typy sádry (alabastrová, štukatérská).

2.2.3 Odlévání do sádrových forem ve šperkařství

Ve šperkařství se používá přesného lití do sádrových forem, velice dobře se sádrové formy uplatňují pro odlévání šperků z drahých kovů - zlata, stříbra, ale i mosazi. Může jít i o miniaturní součástky pro různé jiné účely. Voskové modely se odlévají ze šperkařských vosků.

Vlastnosti vosku:

Vysoce pružný vosk určený pro potenciálně křehké předměty(tab. 2.1).

Tab. 2.1 Vlastnosti vosku [15]

Vstřikovací teplota (°C)	Zatékavost	Pružnost	Smrštivost	Plastičnost
68	střední	nejvyšší	nízká	nejvyšší

Voskové modely se pájí na voskový vtokový kůl, ten se umísťuje do gumové patky. Na patku se nasadí kyveta. Na zalévání sádrové směsi opět existují plničky. Sádrová směs se odsává, vakuuje a veškeré bublinky v sádře vyplouvají na hladinu. Sádry používané na odlévání šperků mají vysokou pevnost a mohou být plněné ostřivem -křemen, šamot ,antuka. Například sádra Eurovest se používá zejména pro odlévání kovů jako je mosaz, ale i stříbro a zlato do ryzosti 14K. [15]

Sádra údajně nabízí výrobcům šperků tyto výhody:

- Je vyrobena speciálně pro metodu lití ztraceného vosku.
- Poskytuje dobrou ochranu proti tepelnému šoku v průběhu vypalování a lití.
- Je vhodná pro mosaz, stříbro a zlato do ryzosti 14K.
- Prášek zajišťuje hladší finální povrch, což znamená úsporu při leštění.
- Obsahuje všechny přísady pro snadnější rozmíchání a odstranění bublinek - není třeba již nic přidávat.
- Je zaručena krémová konzistence v průběhu míchání i lití.

Technické parametry:

Poměr prášek / voda: 100 / 38 - tj. 1 kg prášku na 380 ml vody.

Zpracování:

1. vodu (o pokojové teplotě cca 22°C) dejte do nádoby
2. přidejte do vody prášek
3. míchejte 3,5 - 4 minuty
4. nádobu dejte do vakua na 1,5 - 2 minuty
5. směs vlijte do kyvet
6. dejte kyvety do vakua na 1,5 - 2 minuty
7. nechte kyvety se směsí odstát 2 hodiny
8. dejte kyvety do pece [15]

Jak se zjistilo při exkurzi ve firmě Karat; proces žíhání forem není pouze jeden, žíhací pece mají více programů žíhání například: ohřev na 150 [°C] a výdrž 1,5 [h], následuje ohřev 45 [min] na teplotu 270 [°C] a výdrž 1 [h], ohřev 7 [h] na teplotu 790 [°C] a výdrž na teplotě 2,75 [h]. Lití formy probíhá ihned po té do teplé formy (600 [°C]) vyjmuté z žíhací pece a umístěné do tavicí a licí pece ať už vakuové či odstředivé. Tavicí pece taví velice rychle malé množství slitiny 250 g – 1 [kg], takže cyklus lití lze opakovat několikrát do hodiny.

2.3 Pískové formy

Pro umělecké odlitky se používá přírodních písků, které se nazývají většinou podle lokality, kde se nalézají. Tyto písky obsahují více jílových částic a je nutné větší množství vody než u bentonitových směsí, proto se přírodní písky musí sušit.

Formovací směsi s jílovými pojivy pro odlitky z neželezných kovů se liší v zrnitosti. Používají se velice jemnozrnné písky se zrnitostí pod 0.15 mm. Velice často se používají přirozené písky hlinité s vysokým podílem jílu. Směsi dosahují nižších pevností za syrova, větší rozpadavosti po odlití, nízké prodyšnosti. [10]

2.4 Skořepinové keramické formy

Formovací hmoty pro přesné lití metodou vytavitelného modelu mají kašovitou konzistenci. Jsou to v podstatě jemně suspendované žárovzdorné materiály určité velikosti zrna v kapalném pojidle. Použitelných žárovzdorných materiálů je několik, například kysličník křemičitý ve formě jemně mleté křemenné moučky (α -křemen). Křemenná moučka při vdechování do lidského organismu vyvolává obávanou chorobu z povolání-silikózu. Kromě toho prodělává několik krystalografických přeměn, spojených s náhlými objemovými změnami. Zvyšováním požadavků na vlastnosti a kvalitu přesných odlitků se od používání SiO_2 ustoupilo. Využívá se i kysličník hlinitý a zirkoničitý. Jako posypový materiál ke zvýšení tepelné vodivosti forem na vnější obaly se využívá karbid křemíku.

Z řady křemičitanů vyhovuje požadavkům na malou měrnou hmotnost a tepelnou roztažnost mullit, zirkon a molochit připravovaný pálením vybraných druhů kaolínu při teplotě nad 1500 °C a následujícím drcením ve Velké Británii v Cornwallu. Pro slitiny mědi je vhodný i sillimanit. Pojidla formovacích hmot spolu se žárovzdorným materiálem tvoří vlastní formovací (obalovou) hmotu na výrobu skořepinových forem. Pojidlo musí mít, jak je známo, tyto základní vlastnosti:

- Nesmí snižovat žárovzdornost formy a musí být netečné při vypalování formy k žárovzdornému materiálu i k roztavenému kovu.
- Musí dát formě po ztuhnutí dostatečnou pevnost, jak po vysušení, tak po vypálení.

Jako pojidla formovacích hmot na skořepinové formy se používají především koloidní roztoky kysličníku křemičitého. [16]

Alkosolová pojiva

Nejznámějším pojivem alkosolového typu je u nás ethylsilikát 40 (obchodní název). Alkoholický roztok ethylsilikátu 40 dává s etanolem, vodou a vhodným hydrolyzačním katalyzátorem velmi stabilní kapalné pojivo. Pro přípravu pojiva hydrolyzou ethylsilikátu je řada předpisů například :

Ethylsilikát 40	180 ml
Ethanol 96 %	220 ml
Voda	30 ml
HCl	1,5 ml

Hydrosolová pojiva

Vodné koloidní roztoky SiO_2 se dodávají do sléváren již hotové, jedinou úpravou je přísada smáčedel, jež keramickou břečku zpravidla napěňují. Napěnění se eliminuje přísadou zhášedel pěny. Obsah SiO_2 bývá 20 až 40 hmotnostních %. Čím jemnější je disperze SiO_2 a čím vyšší obsah SiO_2 , tím je hydrosol pro slévárnu vhodnější. Příklad keramické břečky pojené hydrosolem:

Mikrokorund	750 g
Korund 30 až 50 μm	250 g
Hydrosol Tosil P	360 g
Saponát Syntapon (smáčedlo)	0,4 g
Oktanol (zhášedlo pěny)	0,2 g

Konzistence podle Fordova pohárku č.6-25 s.

Dnes se dodávají již hotová pojiva, do kterých se pouze vmíchá například molochitová moučka. [10]

Od druhé světové války, kdy byla výroba skořepinových forem poprvé použita v hromadné průmyslové výrobě strojních součástí, prošla metoda řadou vývojových stupňů. Dnes se všeobecně používá technologie samonosné skořepiny. Nejběžnější způsob výroby samonosných keramických skořepin je obalování voskového modelu. Technologie se skládá z těchto dílčích operací:

1. obalování
2. sušení nebo chemické vytvrzování obalů
3. odstraňování vytavitelných modelů ze skořepin
4. vypalování (žíhání) skořepin

1) Obalování

Obalování je opakované namáčení modelových „stromečků“ do obalové hmoty (keramické břečky), posypávání ulpělé vrstvy žárovzdorným materiálem o vhodné zrnitosti a sušení jednotlivých obalů. Opakuje se tolikrát, až má obal požadovanou tloušťku, na níž záleží pevnost skořepiny a rozměry odlitku. Počet obalů bývá od 3 do 10. Příprava obalové hmoty (keramické břečky) záleží ve vmíchání dostatečného množství žárovzdorné moučky do kapalného pojidla. Připravená suspenze se ponechá určitou dobu v klidu, aby unikl vzduch, který se vmíchal do suspenze spolu s moučkou, a aby se povrch jednotlivých částíček moučky dokonale smočil. U pojidla na bázi ethylsilikátu dochází navíc k dehydrataci. Tento proces se souhrnně označuje jako zrání. Obalování je nejdůležitějším úkonem při výrobě keramické skořepiny a určuje kvalitu odlitku.

2) Sušení obalů skořepin

Obaly tuhnou jen odpařením disperzního prostředí (ethylalkohol) z kapalného pojidla, které vyvolá změnu solu v gel. Vliv má i obsah SiO_2 , čím větší je jeho podíl, tím rychleji schne obal a konečně i klimatické podmínky v sušárně mají podíl na tuhnutí. Ale i velikost zrna posypového materiálu ovlivní dobu schnutí s rostoucí velikostí zrna posypového žárovzdorného materiálu roste i rychlost schnutí obalu. Chemické tvrzení obalů se používá při automatickém formování. Posypané obaly se suší krátkou dobu na vzduchu, načež se vystaví účinkům plynného čpavku. Následuje odstranění čpavkových par proudem vzduchu, či evakuováním.

3) Vytavování modelové hmoty ze skořepin

Vytavovat vosk je možné několika způsoby. Vytavování vosku ve vroucí vodě. Obalený stromeček, ponořený do vroucí vody se rychle prohřívá, a tak dojde k přednostnímu odtavení vosku u stěny skořepiny. Skořepina vsákne nepatrné množství roztaveného vosku. Také se zabrání potrhání skořepiny. Důležitost odtavení povrchové vrstvy vosku a vytvoření dilatační spáry je známá všem odborníkům. Moderní slévárny ovšem používají autokláv nebo bojlerkláv, kde dochází k prudšímu tepelnému nárazu na povrch voskového modelu ve skořepině.

4) Vypalování skořepin

Vypalování keramických skořepin probíhá obvykle za teplot 900 až 1080 °C. Počáteční teplota pece, při níž se studené skořepiny do pecního prostoru vkládají může být 300-400 °C. Rychlost ohřevu skořepiny, která zajistí, aby tepelný nárůst nebyl příliš prudký a skořepina se rovnoměrně prohřívá, je obvykle 250-300 °C/hod. Na maximální teplotě prohřáté skořepiny setrvávají 60-80 minut. Chladnutí formy musí být opět pozvolné. Následuje odlévání buď do studených, nebo žhavých forem. Odstranění keramiky z odlitku se děje buďto mechanicky, a nebo louhováním v hydroxidu sodném při teplotě 400-500 °C. [16]

2.5 Cementové formy

Cement jako pojivo ve slévárenství má svůj význam. Může se používat v kombinaci s vodním sklem, případně se zvlášť vyvinutými urychlovači tuhnutí a tvrdnutí např. CaCl_2 . [17]

Obdobně jako sádrové směsi k zalévání voskového modelu, které jsou vakuovány za ultrazvukových vibrací, je známa i formovací směs s křemenným ostřivem pojená cementem. Cementová směs slouží k odlévání litiny. [18]

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíl experimentů

Cílem experimentální části bylo na uměleckém odlitku s propracovaným jemným reliéfem rozlišit náročnost výroby do různých typů forem. Zhodnotit kvalitu jednotlivých odlitků. Ověřit jaké vady povrchu jsou obvykle spojeny s určitou slévárenskou formou, ať pískovou, či například keramickou skořepinou a najít optimální technologii pro výrobu obdobných odlitků.

3.2 Výroba modelů

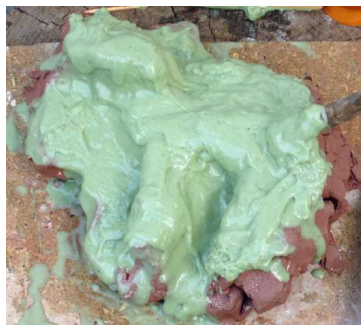
1) Výroba lukoprenové formy

Postup výroby formy je následující- na hliněnou dělicí rovinu (obr. 3.1), natřenou separátorem (benzín+ vosk), se nanese postupně dvě vrstvy lukoprenu (obr. 3.2) a po zvulkanizování se dokončí ještě sádrový „kapsl“, který zajišťuje pevnost silikonu. Obvyklým způsobem se vytvoří i druhá polovina matečné formy (obr. 3.3). Dělicí rovinu formy je nutné dokonale separovat. Stejným způsobem byla vyrobena i matečná forma modelu maratonce (obr. 3.4), na níž se použil lukopren N 1522. Pro zvýšení odolnosti proti roztržení se používá gáza.

Lukopren N jsou dle výrobce silikonové dvousložkové kaučuky. Po smíchání pasty s katalyzátorem dochází k vulkanizaci v celé hmotě během několika desítek minut za vzniku silikonové pryže, která nemá adhezi k podkladu. Nejběžněji se používá N 1522, ale na formu býčka se vyzkoušel vysokopevnostní Lukopren N 8100. Množství katalyzátoru se pohybuje podle druhu lukoprenu, pro Lukopren N 8100 výrobce doporučuje 3% (hmotnostní). [19]



Obr. 3.1 Dělicí rovina z hlíny a kopie býčka zapůjčená z muzea



Obr. 3.2 Lukopren nanesený na model.



Obr. 3.3 Lukoprenová forma



Obr. 3.4 Lukoprenová forma s matečným olověným modelem

2) Výroba voskových modelů

Na počátku technologie na vytavitelný vosk je model. Model se odlévá z vosků různého složení (parafín, stearin, včelí vosk, cerezin...) do matečné formy. Matečná forma bývá velmi často lukoprenová, protože zajišťuje kvalitní okopírování struktury povrchu modelu. Opakovaným nalitím a vylitím vosku do lukoprenové formy vznikne dutý tenkostěnný voskový model (obr. 3.5-3.6).



Obr. 3.5 Voskový model v matečné lukoprenové formě



Obr. 3.6 Tenkostěnné duté voskové modely

3) Výroba sádrového modelu

Při formování do písku je nutné mít pevný model ze sádry. Sádrový model se odléval z modelářské sádry (Almod 60) také do lukoprenové formy.

3.3 Zhotovení odlitků

3.3.1 Hliněná forma

Při výrobě odlitku býčka do hliněné formy je zřejmé, že je nutné postupovat jinak, než postupovali autoři býčka, ale i když se dostaneme k hliněné formě odlišným způsobem, tak samotná forma je více, či méně autentická. Z hliněné formovací hmoty lze sice zalévat jádra, ale je problematické vysušit je ve voskové slupce, která zabrání dokonalému vysušení vody. Pokud se totiž používala hliněná jádra, tak byla zhotovena jako první, vysušena a na ně se nanášela vrstva vosku, tvořící budoucí odlitek. Jako první krok jsem tedy zhotovil hliněné jádro ze směsi rozdrcené vepřovice, přesáté na síť s okem 2x2 mm a oštin, plev, nastříhané žíně, konopný provaz a voda.

Tato hmota, natlačená do sádrového jaderníčku, velmi dobře ztuhla a po vyjmutí z jaderníku bezpečně doschla. V jádru byla samozřejmě výztuha z drátu. Takto vysušené jádro(asi 5 dní) bylo nutné vycentrovat v lukoprenové formě tak, aby po zalití voskem vznikla rovnoměrná tloušťka odlitku. Vzniklé vosky s hliněným jádrem uvnitř se očistily a do trojúhelníkových otvorů se navrtaly dírky, do nichž se vložily kousky drátu, které zajišťovaly polohu jádra ve formě .



Obr. 3.7 Voskový model navtokovaný i s jádrem



Obr. 3.8 První nátěr modelu hlínou

Po navtokování a připájení výfuku (obr. 3.7) už nic nebránilo nanést první vrstvu směsi (obr. 3.8), ovšem pouze přesáté vepřovice; oštiny a vlákna nedovolovaly docílit pěkného povrchu odlitku. Po oschnutí první vrstvy byla nanesena štětcem ještě druhá vrstva, již s oštinami. Dalšího dne opět další vrstva, až čtvrtá vrstva byla omotána drátem (obr. 3.9), který zpevňoval celou formu. Následně se pokryla krycí vrstvou. Takto zhotovenou formu jsem nechal opět týden sušit. Teprve s jistotou dokonale suché formy jsem mohl zapálit pod formou oheň, aby vytekl vosk.

Hliněné formy se žíhaly na 690 [°C] po dobu 5 hodin. Odlití proběhlo za odborného dohledu PhDr. Milana Salaše, CSc., odborníka na bronzы halštatského období z Moravského zemského muzea. Výsledné odlitky byly překvapivě kvalitní, téměř bezvadné (obr. 3.10).



Obr. 3.9 Hliněná forma



Obr. 3.10 Surový odlitek býčka

3.3.2 Písková forma

K výrobě formy z přírodního písku na sušení se použil slévárenský písek ze zakřanské oblasti. Technické parametry tohoto přírodního písku jsou uvedeny níže.

3.3.2.1 Zhotovení pískové formy

Nejdříve se zvolilo uložení v rámech. Pro zapěchování šněrovačky a utvoření dělicí roviny je vhodná formovací směs se 6 % H_2O . Na stloukání klínů je ovšem vhodný písek s 10 až 12 % H_2O . Je zde nutná praxe formíře, který vždycky rychle odhadne, je-li písek sušší, nebo mokřejší. Podle grafů lze ovšem také vidět, kdy už písek ztrácí pevnost a kdy je naopak pevnost optimální.

Jako dělicí prostředek se používá berko prášek nebo „likopodium“, ten stoprocentně oddělí jednotlivé klíny a dělicí rovinu. Tvar a způsob zhotovení klínů má své zákonitosti (obr. 3.11), nikdy nechceme na klínu ostré hrany, které by snadno upadly, ať při rozebírání, či skládání. Každý klín nejprve napěchujeme, nahrubo seřízíme tvar a opatrně po rozklepání sejmeme. Sejmutý klín se fixírkou postříká vodou, zapráší suchým prachem a „likopodiem“. Klínek se opět přiloží k modelu a znovu napěchuje, tím vznikne obtisk. Obtisk je jemný povrch klínu, dokonale kopírující tvar i strukturu modelu. Dokonalost obtisku je základ kvalitního odlitku.



Obr. 3.11 Klínová písková forma

Klíny (nepravá jádra) se zhotovují všude, kde by složitost a členitost povrchu i tvarů sádrového modelu nedovolila sejmutí formy bez poškození povrchu obtisku. Takto se zaklínuje vršek i spodek, forma se rozebere, klíny se vyjmou a přitlučou pískováčky do formy (obr. 3.12- 3.13). Případné vady se opraví a zakryjí grafitovým vodným nátěrem. Samozřejmě se postupy liší a lze najít několik cest, jak například udělat vtok, zářezy, a jestli odlévat formu s vertikální nebo horizontální dělicí rovinou. V tomto případě se zvolil způsob se svislou dělicí rovinou.



Obr. 3.12 Ukládání klínu do formy



Obr. 3.13 Hotová forma před sušením

Forma se sušila v žíhací peci na teplotě 425 °C / 5 hodin. Pro usnadnění práce bylo jádro z CT. Jádro bylo zapěchováno do sádrového jaderníku. Před odlitím se jádro natřelo lihovým křemičitým nátěrem. Nejsložitější bylo ovšem jádro správně uložit do formy. Zkouší se, zda-li je mezera mezi jádrem a formou optimální. To zjistíme jednoduše „blechami“ z písku, umístěnými na kritických místech a po složení smáčkutými na sílu odlitku. Forma byla ještě nakouřena, aby povrch odlitku byl kvalitnější. Na složenou formu se může umístit ještě komínek, který usnadňuje slévači odlít bronz a zvyšuje lící výšku.

Na odlitku jsou patrné vady (obr. 3.14), především zatekliny mezi nepravá jádra, ale splňuje svou funkci, a to ukázat kvalitu povrchu. Je dobré přiznat, že než se zdařilo odlít tento odlitek, byly podobně zhotoveny dva zmetky. Oba zmetky zapříčinily rozsáhlé odvařeniny, způsobené grafitovým vodným nátěrem, použitým před zaprášením obtisku místo fixírky (vody). Samozřejmě celý postup nelze dokonale popsat, je totiž záležitostí vždy daného formáře. Výroba pískové formy zabrala jeden den.

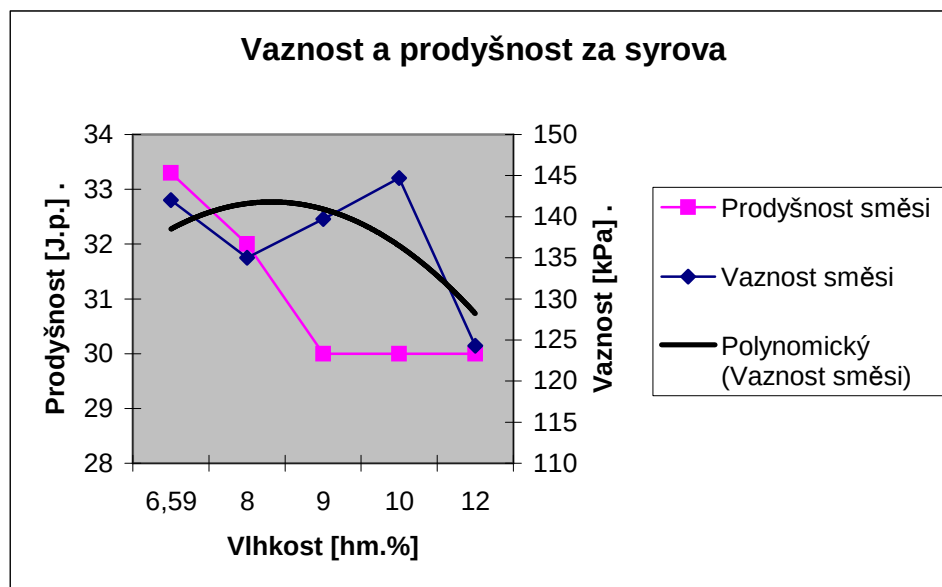


Obr. 3.14 Odlitek hlavičky maratonce do písku

3.3.2.2 Rozbor přírodního písku z oblasti Zakřan

1) Vaznost a prodyšnost za syrova

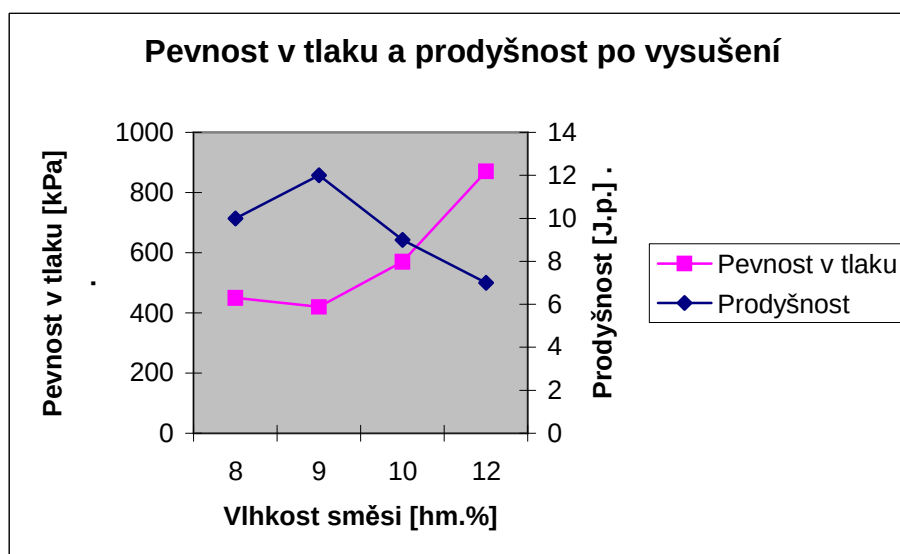
V grafu 3.1 je patrné, že při vlhkosti 12 hm.% již formovací směs za syrova ztrácí vaznost, a proto není k výrobě klínů vhodná směs s více než 12 hm.% vody.



Graf 3.1 Vaznost a prodyšnost za syrova

2) Stanovení pevnosti v tlaku a prodyšnosti po vysušení při 200°C/2hod

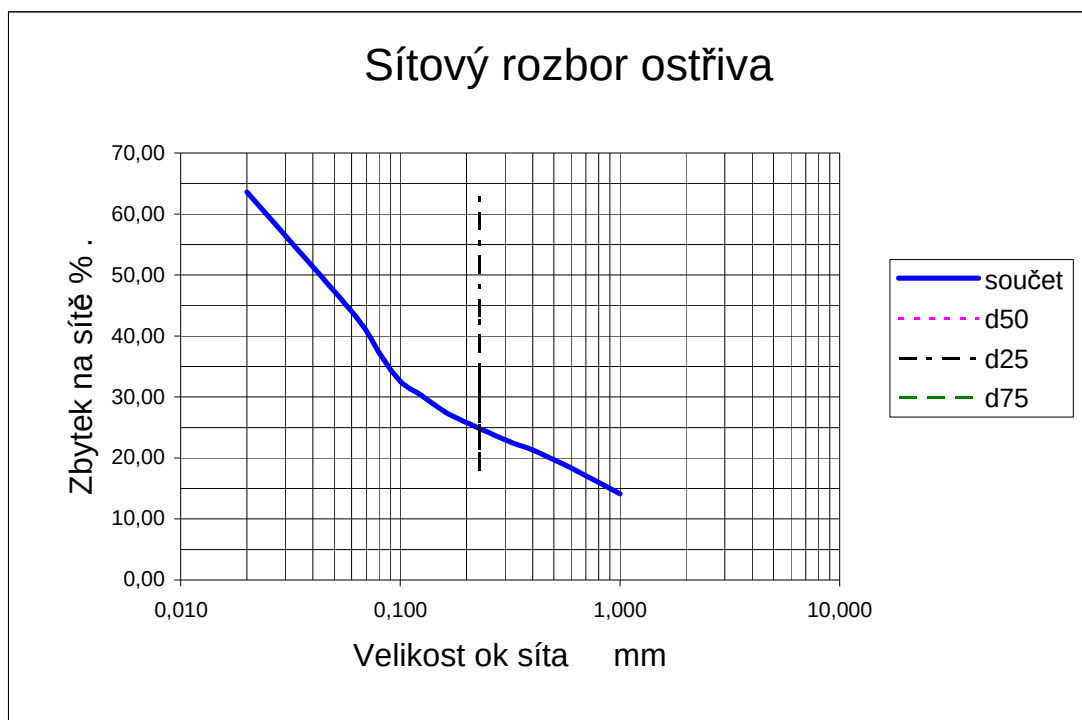
V grafu 3.2 je patrné snížení prodyšnosti formovací směsi s 12 hm.% vody po vysušení při 200 °C po dobu 2 hodin. Snížená prodyšnost formy (klínů) může způsobit vady odlitku.



Graf 3.2 Vaznost a prodyšnost po vysušení

3) Sítový rozbor ostřiva

Sítový rozbor ostřiva (graf 3.3) potvrdil, že zrnitost je pod 0.15 mm a vyplavitelné látky tvoří 36,34 % směsi. Zakřanský přírodní slévárenský písek odpovídá potřebám uměleckého lití z neželezných kovů.



Graf 3.3 Sítový rozbor ostřiva

Použité přístroje:

- 1) Přístroj na měření pevnosti +GF+.
- 2) Přístroj na měření prodyšnosti +GF+.
- 3) Přístroj na stanovení granulometrie WADAD a sada sít (1.0- 0.063 mm).
- 4) Muflová žíhací pec LINN.
- 5) Analytické digitální váhy SARTORIUS.

3.3.3 Sádrové formy

Odlévání do sádry má svá specifika. Forma se buďto může vyrobít zaléváním modelu, nebo postupným vrstvením obalů. Voskový model je dobré odmastit saponátem nebo lihem, aby první vrstva dobře chytla na model. Je dobré sádro zpevnit před posledním obalem, drátem či pletivem. Sádra tuhne rychle, a tak je forma obvykle za několik hodin hotová. Do sádry se přidává antuka, nebo šamot. Na první vrstvu se míchá jemná kvalitní směs, na další obaly už hrubší a méně kvalitní. Provádělo se několik odlitků do různých druhů sádry, lišících se kvalitou i cenou a dobou tuhnutí. Nejprve se zalévalo jádro s výztuhou a odvzdušněním (stéblem), které při žhání vyhoří. Postup je zdokumentován na obrázcích 3.15- 3.21.



3.15 Voskový model nachystaný k zalití jádra a výztuha



Obr. 3.16 Voskový model se zalitým jádrem.



Obr. 3.17 První obal



Obr. 3.18 Druhý obal



Obr. 3.19 Čtvrtý obal omotaný drátem



Obr. 3.20 Obalená forma



Obr. 3.21 Vytlučený odlitek

Všechny sádrové formy byly zhotoveny vrstvením jednotlivých obalů. Potom byl z forem vytaven vosk v pařícím kotli po dobu 2 h (varu). Následovalo žíhání v žíhací peci na 690 °C /5 h. Samozřejmě s postupným náběhem na teplotu a pomalým ochlazováním po vypnutí pece. Do studených forem se odlévala bronz.

3.3.3.1 Typy sádrových forem

A) Forma na bázi anhydritové sádry

Složení formovací směsi použité na jednotlivé obaly a jádro je v tabulce 3.1. Bronzový odlitek odlitý do této formy je na obrázku 3.22.

Tab. 3.1 Forma na bázi anhydritu-složení

Druh použité sádry		anhydrit
Složení jádrové směsi		anhydrit: Hydracast P+: piliny 6:1:1
Složení prvního obalu		anhydrit: Hydracast P+: 20:1
Složení dalších obalů		anhydrit: Hydracast P+: 20:1
Žíhání		600 °C /6 h .



Obr. 2.22 Anhydritová směs

B) Forma na bázi modelářské sádry

Složení formovací směsi použité na jednotlivé obaly a jádro je v tabulce 3.2. Bronzový odlitek odlitý do této formy je na obrázku 3.23.

Tab. 3.2 Forma na bázi modelářské sádry

Druh použité sádry	sádra :Almod 60 (modelářská)
Složení jádrové směsi	sádra: antuka: piliny:sádrový regenerát 1:1:1:1
Složení prvního obalu	sádra: šamotová moučka:antuka 1:1:1
Složení dalších obalů	sádra: antuka: regenerát 1:1:1
Žíhání	690 °C /5 h .



Obr. 3.23 Odlitek do modelářské sádry

C) Forma na bázi stavební sádry

Složení formovací směsi použité na jednotlivé obaly a jádro je v tabulce 3.3. Bronzový odlitek odlitý do této formy je na obrázku 3.24.

Tab. 3.3 Forma ze stavební sádry

Druh použité sádry	stavební sádra (šedá):sádrové pojivo-G2-B-II
Složení jádrové směsi	sádra:šamot hrubý:piliny -1:2:1
Složení prvního obalu	sádra: šamotová moučka -1:2
Složení dalších obalů	sádra: šamot hrubý -1:2
Žíhání	690 °C /5 h .



Obr. 3.24 Odlitek do stavební sádry

D) Forma na bázi sádry Hydracast P+

Složení formovací směsi použité na jednotlivé obaly a jádro je v tabulce 3.4. Bronzový odlitek odlitý do této formy je na obrázku 3.25.

Tab. 3.4 Forma z Hydracastu P+

Druh použité sádry	sádra: Hydracast P+ (vysoce kvalitní směs sádry a křemenného ostřiva pro přesné lití)
Složení jádrové směsi	Hydracast P+:šamot hrubý: piliny- 1:2:1
Složení prvního obalu	Hydracast P+: šamotová moučka- 1:2
Složení dalších obalů	Hydracast P+:šamot hrubý-1:2
Žihání	690 °C /5 h .



Obr. 3.25 Odlitek do Hydracast P+

E) Forma z napěněné sádry

U napěněné směsi se musí sádra po rozmíchání ve vodě několik minut šlehat, aby došlo k napěnění sádry. Složení formovací směsi použité na jednotlivé obaly a jádro je v tabulce 3.5. Bronzový odlitek odlitý do této formy je na obrázku 3.26.

Tab. 5 Forma z napěněné sádry

Druh sádry	použité	sádra: Hydracast FL 204 (vysoce kvalitní sádra s napěňovadlem pro přesné lití)
Složení jádrové směsi		Hydracast FL 204
Složení prvního obalu		Hydracast FL 204
Složení dalších obalů		Hydracast FL 204
Žíhání		690 °C /5 h .



Obr. 3.26 Odlitek do napěněné sádry

Popis použitých materiálů:

antuka d max= 4 mm

šamot hrubý d50= 0,4- 0,6 mm

šamotová moučka d50= 0.063 mm

regenerát =nadcené sádrové formy, přesáté přes síto s okem 4x4 mm

3.3.3.2 Pevnost a prodyšnost sádrových forem

Zkušební válečky z různých sádrových směsí prošly procesem žíhání, stejně jako formy a vyzkoušela se prodyšnost a pevnost v tlaku. Zkušební vzorky (válečky $\Phi D 50 \times 50 \text{ mm}$) prošly tímto procesem: Nejprve 1,5 h v páře (pařák na brambory), a potom v žíhací peci náběh na teplotu 600°C a výdrž 3 h, dále po vypnutí žíhací pece pozvolné ochlazování. Byly naměřeny tyto hodnoty (tab. 3.6).

Tab. 3.6 Pevnost a prodyšnost sádrových směsí

Složení formovací směsi	Prodyšnost [j.p.]	Pevnost v tlaku [kPa]
Sádra : antuka: regenerát 1: 1: 1	0	680
Sádra: regenerát 1: 2	0	730
Sádra :regenerát: antuka:piliny 1: 1: 1: 1/2	0	350

Měření potvrzuje nízkou prodyšnost sádrových formovacích směsí. U jádrové směsi s pilinami se potvrdila nižší pevnost v tlaku, tedy také lepší rozpadavost.

3.3.4 Skořepinové formy

Model s vtokovou soustavou a výfukem byl opakovaně namáčen do keramické břechky a po odkapání přebytečné břechky byl model vždy zasypán molochitovým posypem. Každý obal musel 3 h schnout na vzduchu, než se mohl vytvořit další obal. Postup formování je na obrázku 3.27.



Obr. 3.27 Postup obalování zleva: navtokovaný voskový model ; první obal; obalený vosk; skořepina zbavená vosku.

Tab. 3.7 Složení pojiva

Složení pojiva keramické břechky	v ml nebo objemových dílech
etanol	644
ETS 40	350
kyselina H_2SO_4	6

Keramická břecha dále obsahuje molochit-200 s velikostí částic $d = 0,0-0,75$, který se sype do pojiva (tab. 3.7) tak, aby vznikla požadovaná konzistence. Počet obalů skořepiny byl 6 plus 1 krycí obal, již bez posypu. Na zasypávání prvních dvou obalů se použilo jemnozrnnějšího molochitu, k dalším obalům je vhodnější hrubší materiál- Mono frax 30/80 s $d = 0,4-0,6$ z Rájce Jestřebí. Po uschnutí se obalený vosk ponořil do vroucí vody, kde došlo k vytavení modelu. Žíhání na $1000^\circ C$ s náběhem na teplotu 3 h se zdařilo a do žhavé formy, vyjmuté ze žíhací pece, byla odlita bronz. Bronz odlévaná do skořepiny obsahovala 10 % cínu. Odlitek z bronzu a litiny je na obrázku 3.28 a 3.29.



Obr. 3.28 Bronz odlitý do keramické formy



Obr. 3.29 Litina odlitá do keramické formy LLG

3.3.5 Cementové formy

Poznatky kolem formování u cementových forem se postupovalo při formování dvěma způsoby- nanášením vrstvy jemné cementové směsi na povrch voskového modelu a zaléváním vosku do cementové malty. V obou případech se vždy odlilo nejdříve jádro, do směsi na jádra se přidávaly piliny ke zvýšení prodyšnosti jader po vypálení. Celý proces zkoušení cementové směsi probíhal stejným způsobem jako u sáder. Největší obtíží byla u hlinitanového cementu dlouhá doba tuhnutí a tvrdnutí. Při zalévání modelu se bublinky vzduchu přichytly na spodních stranách modelu a na odlitku je to jasně patrné. Složení cementové formovací směsi je v tabulce 3.8. Na obrázku 3.30 je litinový odlitek odlitý do cementové formy.

Tab. 3.8 Forma cementová zalévaná-složení

Druh použitého cementu	Vysocehlinitanový cement-VHC 71
Složení jádrové směsi	cement : šamot moučka: šamot hrubý: piliny:lupínkový grafit 2: 3:3: 2: 1
Složení zalévané směsi	cement : šamot moučka: šamot hrubý: lupínkový grafit 1: 4: 2: 1
Žíhání	690°C /5 h .



Obr. 3.30 LLG litá do cementové formy

Při nanášení vrstvy cementu (obr. 3.31) zase vznikl na odlitku drsný povrch a nebylo možné docílit kvalitní povrch na celém odlitku. Je to důsledek špatného formování, kdy cement a voda z povrchu voskového modelu byl odsátý vnějším vysychajícím povrchem cementové vrstvy. Tím pádem vznikla místa, kde forma nekopíruje model a na odlitku je drsný povrch. Složení cementové formovací směsi je v tabulce 3.9. Na obrázku 3.32 je litinový odlitek odlitý do cementové formy.

Tab. 3.9 Forma cementová natřená -složení

Druh použitého cementu	Vysocehlinitanový cement-VHC 71				
Složení jádrové směsi	cement	: šamot moučka:	šamot	: piliny:	lupínkový grafit
	2:	3:	3:	2:	1
Složení prvního nátěru	cement	: šamot moučka:	šamot hrubý:	lupínkový grafit	
	2:	4:	2:	1	
	+ 6% vodní sklo -sodné- modul 3.4				
Žíhání	690°C /5 h .				



Obr. 3.31 První obal cementové formy



Obr. 3.32 Odlitek do cementové formy (natírané)

Ukázalo se jako nejvhodnější model zalévat maltou s 6% vodního skla, které způsobí gelaci cementu. To by mělo zamezit vzniku bublinek na odlitku, jehož povrch byl mimo tyto bubliny dostatečně kvalitní. Jako ostřívo sloužil šamot od šamotové moučky, až po hrubý šamot $d_{max} = 0,4-0,6$ mm. Hrubý šamot je vhodný na vnější obaly, nebo do jádra.

3.4 Vyhodnocení odlitků

Vyhodnocení povrchu a vad a celkové zhodnocení z různých pohledů . Vady odlitků u přesných odlitků se rozdělují na zjevné a skryté. U uměleckých odlitků jsou důležité hlavně vady zjevné. Vady odlitků vznikají zejména v těchto fázích:

1. Při výrobě vytavitelného modelu.
2. Při sestavování vtokové soustavy je důležitý správný vtokový systém(výfuky). Má vliv na čistotu odlitku, výskyt staženin , pórovitosti, trhlin, strusky a nekovových vměstků.
3. Při výrobě formy pečlivá práce a správné suroviny pro formu.
4. Při tavení kovu a odlévání.

Na uměleckých odlitcích má cenu hodnotit jen vady vizuálně viditelné a hlavně ty vady, které se často opakují, jsou například charakteristické pro sádrové formy. Popsané vady se dělí na dvě skupiny, a to vady vzniklé nesprávnou formovací technikou a vady vzniklé při lití. Vady, jejichž příčinou jsou chyby voskového modelu, se při pečlivé kontrole vosku dají opravit včas. Je otázkou kovolitce, jak kvalitní má vosky. [16]

1) Kulovité kovové přilisky

Popis vady: Odlitky mají v ostrých rozích, v koutech a otvorech kulovité kovové přilisky, pevně spojené s povrchem(obr. 3.33).



Obr. 3.33 Kuličky na odlitku

Vada vznikala nejčastěji u sádrových forem, výrazně se objevila také u zalévané cementové formy a teoreticky může vznikat i u keramických skořepin.

Příčiny:

Hustá obalová hmota uzavře vzduchové bublinky při obalování . Obalová hmota nesmočí dokonale povrch mastného modelu. V obalové hmotě byl rozptýlen vzduch, který zůstal na povrchu modelu uzavřen.

Odstranění vady:

- 1) Upravit viskozitu obalové hmoty, změnit obalovací techniku. U sádky například nanášet sádku na model štětcem.
- 2) Odmastit model saponátem.
- 3) Odstranit z obalové hmoty vmíchané bublinky vzduchu odstátím směsi nebo vakuem.

2) Zadrogeniny

Otevřené (povrchové) nebo uzavřené dutiny ve stěně odlitku zcela, nebo částečně vyplněné materiálem skořepiny (obr. 3.34). Zadrogeniny se objevily u všech typů forem. Jsou častou a nepříjemnou vadou.



Obr. 3.34 Zadrogeniny

Příčiny:

- 1) Proud kovu vyplavuje částechky popraskané formy.
- 2) Má celou dlouhou řadu příčin, odlišných pro různé typy formovacích metod.
Např: Do pískové formy napadá písek .

Odstranění vady: Jen obtížně se jim dá naprosto vyhnout, zvláště u sádrových forem. Lépe dopadaly keramické skořepiny.

3) Výronky

Popis vady: Více, či méně vystouplé žebrované nebo žilkovité výrostky na povrchu odlitku vzniklé tím, že kov zatekl do trhlin v povrchu skořepiny, v její dutině, nebo otvoru (obr. 3.35).



Objevily se u všech forem, ať sádrových, či keramických. Zvláště sádra je náchylná na praskání obalů při žíhání. Do vzniklých trhlin vniká tekutý kov a tvoří se výronky. Výronky mezi klíny pískové formy a v dělicí rovině jsou nejhorším typem těchto výronků a jsou často spojeny i s přesazením formy.

Obr. 3.35 Výronky

4) Nárůstky

Útvary různého tvaru a velikosti na povrchu odlitku, vytvořené z kovu s vrstvičkami nebo vměstky formovacího materiálu (obr. 3.36) [16].



Obr. 3.36 Nárůstky na býčkovi litém do hliněné formy

Objevily se u hliněné formy. První obal při sušení popraskal, následný obal už nedokázal praskliny vyplnit a i v něm vznikly při schnutí další trhliny, do prasklinek v obalu zaběhl při lití kov. Příčinou mohla být špatně připravená hlína, nebo rychlé sušení obalu.

5) Přesazení

Při ukládání klínů do formy se nepodaří přesně zachovat kontury modelu, jsou přerušeny dělicí rovinou (obr. 3.37). Zároveň se vytvořil i výronek do této dělicí roviny.



Obr. 3.37 Přesazení a zároveň výronek

6) Oxidické pleny

Některý prvek v tavenině oxiduje a tvoří pleny oxidů, které se objevují v odlitku (obr. 3.38).



Obr. 3.38 Oxidické pleny

Vady odlitku, známé pod pojmem šum a pěna jsou vnější i vnitřní vměstky kysličníků. Kůžičky jsou tenké blanky kysličníků, které se tvoří při plnění formy a brání spojení kovu v místech, kde se ve formě stýkají dva proudy postupující s různých stran. Struskové dutiny, šum a pěna se mohou tvořit :

1. okysličováním proudu kovu při jeho odpichu z pece do pánve;
2. napadáním strusky do formy z lící pánve ;
3. okysličováním kovu při odlévání a plnění formy;

Odstranění: Zabránit nadměrné oxidaci taveniny při lití, je vhodné snížit lící teplotu. Stáhnout strusku z hladiny kovu, očistit i hubičku pánve. Zadržovat blanky kysličníků na povrchu slitiny v pánvi(„sháňkou“). Důležitá je správná vtoková soustava, která zachytí strusku. Opět vtoková soustava ovlivní rozstřík kovu ve formě a tvoření kysličníkových blanek. Nesmí dojít k víření a strhávání vzduchu do proudu kovu. Značný sklon k pění při lití mají hliníkové bronzy a slitiny mědi s obsahem hliníku. [20]

7) Odvařeniny od formy

V tomto případě u pískové formy odvařenina vznikla od vodného grafitového nátěru použitého na opravu na hranici klínu před sušením formy (obr. 3.39).



Obr. 3.39 Odvařeniny od formy

8) Drsný povrch

Povrch odlitku nemá požadovanou drsnost. Posypový materiál je pro viskozitu obalové hmoty na první obal příliš hrubý, pronikne jím až k povrchu modelu. Obalová hmota prvního obalu se spotřebuje k povlečení povrchu hrubých zrn (obr. 3.40). [16]



Obr. 3.40 Drsný povrch

9) Plynové dutiny

Mohou vznikat tehdy, brání-li zaplnění formy odpor plynů, nahromaděných ve formě. Zvláště u jader je nutné umožnit odvod plynů z jádra výfukem a prodyšností jádra. Chybějící, nebo nesprávně umístěné průduchy v jádrech, nebo nedostatečně vyžíhaná forma způsobí, že v odlitku vznikají plynové dutiny (obr. 3.41).



Obr. 3.41 Plynová dutina

Aby se odstranila tato příčina zmetků, je nutné zajistit správný odvod plynů z jádra. Příliš mnoho pojiva snižuje prodyšnost jádra [20]. Do jádra se vkládala stébla, která při žíhání shoří, stejně jako piliny v jádrové směsi. Forma musí být dokonale vyžíhaná.

3.5 Rekonstrukce původní podoby býčka z Býčí skály

Ve spolupráci s Moravským zemským muzeem byla vyrobena kopie býčka. Jako model sloužila první kopie býčka zapůjčená ze sbírek muzea. Odlitek z bronzu do sádrové formy byl doplněn vloženými prvky z alpaky nahrazujícími zoxidované železné prvky na originále. Křišťál vložený místo oka byl nahrazen skleněným elementem. Na obrázku 3.42 je rozříznutá sádrová forma s voskovým modelem uvnitř. Výsledná podoba vycizelovaného býčka je na obrázku 3.43.



Obr. 3.42 Řez sádrovou formou s voskem



Obr 3.43. Rekonstrukce původní podoby býčka



Obr. 3.44 Hlavičky samy hovoří o kvalitě odlitků.

4 Závěr

Z hlediska kvality odlitků ukázaly své výhody keramické skořepinové formy. Odlitky do keramických skořepin měly nejméně povrchových vad, výborný povrch, ale mají nevýhodu- špatné rozpadavosti skořepiny, také velikost odlitků je omezená. Odlitky do sádrových forem jsou srovnatelné s odlitky do keramiky (obr. 3.44). Naproti tomu odlitek hlavičky Maratonce z Ephebe do pískové formy byl natolik nekvalitní, že pracnost cizelace odlitku by byla nesrovnatelně větší.

Ekonomické zhodnocení je obtížné, ale například odlitky do sádry byly všechny srovnatelné, přičemž cena sádry se někdy významně lišila. Použití příliš kvalitní sádry v tomto případě nemělo žádný efekt. Sádrové formovací směsi na bázi anhydritu jsou zajímavé možností regenerace sádry, která dále funguje jako plnohodnotná surovina pro výrobu forem a spoří tím náklady na vstupy materiálu do slévárny.

Anhydritová sádra je proto výhodná a má cenu se o technologii dále zajímat a pracovat s ní. Skořepinová forma je cenově náročná, ale cizelace je snadnější. Tento experiment s odléváním do různých typů forem nepostihuje samozřejmě celou oblast uměleckého lití. Pískové formy se například dodnes vyplatí k odlévání plaket, desek a medailí, kde písková forma zaručuje s pomocí obtisku kvalitní povrch a i schopnost udržet tvar velké rovné plochy, jako jsou pamětní desky.

I dnes používají zvonaři k výrobě forem hlínu. Sádrové formy jsou zase jedinečné monumentalitou a složitostí některých odlitých děl, například Arionova kašna v Olomouci, od světově významného sochaře Ivana Theimera.

Tato práce ukázala určitý pohled na problematiku uměleckého lití. Došlo ke srovnání jednotlivých metod na jednom typu odlitku (hlavičky maratonce). Výsledek potvrzuje smysl používání sádky i keramiky a vykazuje pískovou formu do oblasti jiných typů odlitků. Také nelze zapomenout na aspekt experimentální archeologie, reprezentovaný odlitkem býčka do hliněné formy. Zde se v rekonstruované hliněné formě podařilo odlít dvě sošky býčků. Odlitky do hlíny byly dostatečně kvalitní a potvrdil se postup, jakým bylo možné kdysi dosáhnout podobných odlitků.

Je důležité co možná nejlépe zachytit původní podobu nálezů i dodržet autenticitu materiálů. V této oblasti lze i dnes stále zlepšovat kvalitu kopii vzácných a významných nálezů.



Obr. 3.44 Býček na cestě.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ENGELS, G., WÜBBENHORST, H. *5000 Jahre Giessen von Metallen*. 3. auflage. Düsseldorf: Giesserei-Verlag GmbH, 1994. 227 s. ISBN 3-87260-112-1.
- [2] PIJOAN, J. *Dějiny umění / 1*. 3. vyd. Praha: ODEON, 1987. 334 s. ISBN 01-501-87.
- [3] PIJOAN, J. *Dějiny umění / 2*. 3. vyd. Praha: ODEON, 1987. 334 s. ISBN 01-503-87.
- [4] STRÁNSKÝ, K. Nástin slévárenství v českých zemích od pravěku do poloviny 20. století. *Slévárenství*, 1996, roč. 44, č. 2, s. 67-84. ISSN 0037-6825
- [5] РУБЦОВ, Н.Н. *ИСТОРИЯ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА В СССР*. 1 часть. Ленинград. Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы Москва, 1947. 274 с.
- [6] KŘÍČKA z BITÝŠKY, V. *Návod k lití a přípravě děl, kulí, hmoždířů, zvonů, konví ke zvedání vody k vodotryskům ap. čtenými kresbami opatřený (Mathesis Bohemica)*. 1. vydání. Praha: Spolek čs. inženýrů SIA v Praze, 1947. 47 s.
- [7] CELLINI, B. *Benvenuto Cellini Vlastní životopis*. 2. vyd. Praha: ODEON, 1976. 374 s. ISBN 01-021-76.
- [8] Marie-Lan Nguyen *Wikimedia Commons* , [online]
URL<http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Perseus_Cellini_Loggia_dei_Lanzi_2005_09_13.jpg>, citováno 9. května 2008
- [9] PIJOAN, J. *Dějiny umění /6*. 3. vyd. Praha: ODEON, 1989. 334 s. ISBN 01-502-89.
- [10] RUSÍN, K. *Slévárenské formovací materiály*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991. 392 s. ISBN 80-03-00278-8.
- [11] *Wikipedie otevřená encyklopedie*, heslo- Ivan Theimer, [online],
URL<http://cs.wikipedia.org/wiki/Ivan_Theimer> , citováno 9. května 2008
- [12] Informační server statutárního města Olomouc, [online],
URL <<http://www.olomouc.eu/phprs/view.php?cisloclanku=2002052601>> , citováno 9. května 2008

- [13] PETR VOLF, Moje jméno časem odpadne, *Reflex*, [online],
URL<<http://www.jedinak.cz/stranky/txttheimer.html>>,
citováno 9. května 2008
- [14] MURGAŠ, M., BELICA, E. Sadrové zmesi na báze anhydritu CaSO₄.
Slévárství, 2005, roč. 53, č. 9, s. 407-410. ISSN 0037-6825
- [15] SWAH Vybavení zlatnických dílen, [online],
URL<<http://zlatnici.swah.cz/?node=101>>, citováno 9. května 2008
- [16] DOŠKÁŘ, J. *Výroba přesných odlitků*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství
technické literatury, 1976. 320 s. ISBN 04-211-76.
- [17] PÍŠEK, F. *Slévárství II*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1975. 403 s. ...
- [18] Знаменский Л.Г. Кулаков Б.А. Ердаков И.Н., *Южно-Уральский
государственный*, Кафедра "Литейное производство, [online],
университет, URL<<http://canegor.urc.ac.ru/grant/33470.html>> , citováno 9.
května 2008
- [19] Lučební závody Kolín, [online],
URL<<http://www.lucebni.cz/main.php?action=detail&id=12>> , citováno 9.
května 2008
- [20] KOVVI, K. G., PLJACKIJ, V. M. *Vady odlitků ze slitin neželezných kovů*. 1. vyd.
Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956. 132 s. ISBN ...
- [21] BAKER, J. Pět tisíc let přesného lití. *Slévárství*, 1997, č. 10, s. 362-364.
ISSN 0037-6825.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Stanovení pevnosti v tlaku
Příloha 2	Sítový rozbor ostřiva

Příloha 1 Stanovení pevnosti v tlaku

1. Stanovení vlhkosti :

Výpočet :

$$\text{Vlhkost} - W = \frac{m_z - m_s}{m_z} \times 100 \quad [\%]$$

m_z - hmotnost navážky zkoušené směsi = 50 [g]

m_s – hmotnost navážky po vysušení [g]

m_s : 1) 46,70 [g]

2) 46,70 [g]

3) 46,72 [g]

$$\bar{x} = \frac{46.70 + 46.70 + 46.72}{3} = 46.7066$$

$$W = \frac{50 - 46.7066}{50} \times 100 = 6,59 \quad [\%]$$

č.směsi	Navážka na zkuš.váleček [g]	Vlhkost směsi [%]	Prodyšnost [j.p.]	Vaznost [kPa]
1	165	6.59	30	150
	165	6.59	35	141
	165	6.59	35	135

č.směsi	Navážka na zkuš.váleček [g]	Vlhkost směsi [%]	Prodyšnost [j.p.]	Vaznost [kPa]
2	170	8	32	133
	170	8	31	131
	170	8	33	141

č.směsi	Navážka na zkuš.váleček [g]	Vlhkost směsi [%]	Prodyšnost [j.p.]	Vaznost [kPa]
3	170	9	30	131
	170	9	30	140
	170	9	30	148

č.směsi	Navážka na zkuš.váleček [g]	Vlhkost směsi [%]	Prodyšnost [j.p.]	Vaznost [kPa]
4	175	10	30	152
	175	10	30	140
	175	10	30	142

č.směsi	Navážka na zkuš.váleček [g]	Vlhkost směsi [%]	Prodyšnost [j.p.]	Vaznost [kPa]	Spěchovatelnost [%]
5	180	12	30	128	55
	180	12	30	125	
	180	12	30	120	

Příloha 2 Sítový rozbor ostřiva

VUT v Brně, FSI-UMI		Granulometrický rozbor ostřiva	
odb.slévárenství			
Vzorek č.:	slév.písek	Zákazník:	DP 2007
Označení:	Zakřany přírodní	Zpracoval:	Lukáš Hřebíček
Datum odběru:	6.12.2007	Datum:	21.03.08
Datum zkoušky:	11.12.2007		



Ostřivo po výplavu	31,83
Vyplavitelné látky	18,17
%	36,34

Síť	zbytek		součet
	mm	g	%
	1,000	7,06	14,1
	0,630	1,91	3,8
	0,400	1,06	3,3
	0,315	0,70	1,4
	0,200	1,56	3,1
	0,160	0,87	1,7
	0,125	1,33	2,7
	0,100	1,17	2,3
	0,080	2,34	4,7
	0,063	2,91	5,8
	0,020	10,25	20,5
celkem		49,93	100

ρ_s Sytná obj. hmotnost ostřiva g/cm^3	1,680689
S_{th} Teoretický povrch cm^2/g	255,39
MK_{calc} Střední velikost zrn mm	0,356
AFS	145,6
d_{50} mm	#####
d_{75} mm	#####
d_{25} mm	0,230
Pravidelnost zrnitosti ostřiva d_{75}/d_{25} %	0,0
$\log w$	87,7
$\log w$ %	84,2
Podíl ostřiva pod 0,1 mm %	40,00
n_{th} Teoretický specifický počet zrn ks/g	5495494
S_w Specifický měrný povrch cm^2/g	nedef.
K_h Koeficient hrátosti S_w/S_{th}	nedef.

FSI VUT	DIPLOMOVÁ PRÁCE	List 4
---------	-----------------	--------