

„ERCKEROVY“ KAPELKY EXPERIMENTÁLNÍ REKONSTRUKCE VÝROBY, POUŽITÍ A MATERIÁLOVÉ ANALÝZY

Michaela Kovářová, Martin Bartoš

Prubířská kapelka je speciální nádobka, ve které probíhá tzv. kupelace, tj. konečný krok stanovení obsahu drahých kovů v rudách, popř. slitinách. V raném novověku byly kapelky zhotovovány ze směsi kostního a dřevěného popela. Cílem této práce byla výroba kapelek podle raně novověkého způsobu popsaného v knize Lazara Erckera z roku 1574. Takto vyrobené kapelky byly odzkoušeny a také analyzovány. Pomocí elektronového mikroskopu byla zhotovena fotografická dokumentace popelů, řezů kapelkami a získaných stříbrných zrn. Pomocí energiově disperzní rentgenové spektroskopie bylo určeno prvkové složení popelů používaných k výrobě kapelek. Byla zkoušena také pevnost vyrobených kapelek jak po vysušení, tak po vyžehání.

Klíčová slova: kapelka – kupelace – Lazar Ercker – stříbro – prubířství

„ERCKER’S“ CUPELS – PREPARATION, USE AND ANALYSIS

Cupel is a special vessel, which is used for cupellation – the last step of determination of precious metals in ores or alloys. In Early Modern Age cupels were made of bone ash and wood ash mixture. The goal of this paper was the manufacturing of cupels according to Ercker's recipe. These cupels were tested and also analyzed. Figures of ashes, cross-sections of cupels and silver grains were acquired by electron microscopy. Elemental composition of ashes used to cupels manufacturing was determined by energy dispersive X-ray spectrometry. The strength of dried and annealed cupels was also tested.

Key Words: cupel – cupellation – Lazarus Ercker – silver – assaying

Prubířská analýza, jejímž úkolem bylo stanovení obsahu drahých kovů v rudách, popř. slitinách, se skládá ze čtyř až pěti základních kroků a v malém měřítku kopíruje průběh hutnění stříbra. Hutnění rudy obsahující stříbro začínalo předběžnými úpravami (třídění, drcení, pražení atd.). Následovalo redukční tavení rudy společně s dalšími přísadami v tavicí peci. Cílovým produktem tohoto tavení bylo především rudní (hutní) olovo, do kterého přešlo stříbro z rudy. Dalším krokem bylo tzv. shánění, tj. proces, při kterém docházelo k oddělení stříbra od olova. Shánění bylo prováděno ve sháněcích pecích, do kterých byl vháněn vzduch. Olovo se na povrchu lázně oxidovalo na oxid olovnatý (klejt), který byl při teplotě v peci kapalný a byl z povrchu lázně odstraňován. Stříbro se za těchto podmínek neoxidovalo, a tudíž jeho koncentrace v olovu postupně rostla. Shánění bylo prováděno tak dlouho, dokud se na povrchu nevytvořila vrstva stříbrné taveniny. Stříbro získané sháněním mělo čistotu přibližně 90 %, a proto bylo ještě dále přečišťováno pomocí přepalování. Při tomto procesu bylo stříbro taveno s čistým olovem v nádobě, jejíž stěny byly pokryty silnou vrstvou směsi dře-

věného a kostního popela, v tzv. testu. Olovo se opět oxidovalo na klejt, který vsakoval do směsi popelů, a stříbro zůstalo ve formě velmi čistého kovu na povrchu výplně z popela (Vaněk – Velebil 2007). Prubířská analýza se skládá z obdobných kroků jako hutnění. Po případném vypražení rudy následuje redukční tavení, které se při prubířské analýze provádí v tavicím kelímku. Cílovým produktem je regulus, tj. slitina olova se stříbrem. Dalším krokem je struskovací tavení regulu na tzv. prubířském (struskovacím) střepe. Tento krok slouží především k přečištění regulu, tj. k oxidaci dalších kovů, které do něj mohly přejít při redukčním tavení rudy, a také případně ke zmenšení velikosti regulu. Poté následuje tzv. kupelace, což je proces, při kterém se z regulu získává čisté stříbro. Kupelace se provádí v nádobkách vyrobených z popela, tzv. kapelkách. Princip kupelace je stejný jako u přepalování. Olovo se oxiduje na klejt, který vsakuje do pórů kapelky, zatímco stříbro oxidováno není a zůstává ve formě zrna na kapelce. Získané zrno se následně zváží a z jeho hmotnosti a z velikosti navážky rudy je pak možné určit relativní množství stříbra v rudě (Jirkovský 1956, 113–114).

VÝROBA KAPELEK

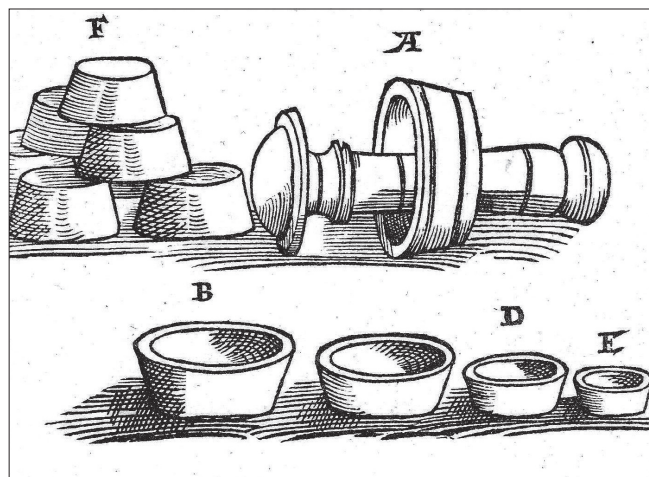
Podle Erckera (Ercker 1982, 22–26; Kubátová 1996, 117–120) jsou nejlepší kapelky vyrobeny ze směsi dvou objemových dílů plaveného dřevěného popela a jednoho objemového dílu kostního popela. Tato směs je zvlhčena silným pivem, vodou s vaječným bílkem, popř. „jílovitou vodou“. Správná konzistence materiálu je taková, aby vzniklá směs zůstala při zmáčknutí pohromadě. Výroba kapelek se provádí vtlačení směsi do formy (kadlubu) vysoustružené z bronzu nebo z hruškového dřeva a vymazané slatinou (Obr. 1). Po naplnění kadlubu je směs zarovnána s jeho horním okrajem a následně je pomocí dřevěného tloučku, tzv. mnicha, zhotovena uprostřed jamka. Vzniklou jamku je dobré pokrýt vrstvičkou kostního popela a upéčovat ji tloučkem. Nakonec je kapelka vytlačena z formy a uskladněna v suchu, aby dokonale vyschla. Vypalování kapelek probíhá až před samotnou kupelací.

Ercker kromě výroby kapelek popisuje také přípravu materiálu k jejich výrobě. K přípravě **dřevěného popela** doporučuje použít lehké dřevo, popř. pruty z vinné révy. Dřevěný popel má být podroben plavení, aby došlo k odstranění zbytků nespáleného dřeva, hrubých nečistot a „mastnoty“ (mastnotou je pravděpodobně míněn uhličitán draselný – potaš). Na počátku plavení se popel získaný spálením dřeva nasype do síta a přelije vodou, aby se skrze síto splavil do vhodné nádoby. Hrubé uhlíky a písek zůstanou na sítu. Poté se do nádoby nalije tolik vody, aby její hladina sahala vysoko nad popel. Voda s popelem se promíchá a ponechá v klidu jednu až dvě hodiny. Nečistoty a „mastnota“ z popela přejdou do vody nebo plavou na hladině. Tato voda se slijí a popel se zalije čistou vodou a nechá stát, dokud voda není čirá. To se opakuje tak dlouho, až voda přestane mít „ostrost“ a nebude už chutnat louhovitě. Pak se popel s vodou promíchá a rychle přelije do druhé nádoby, dokud je popel ještě zvlhčený. Na dně první nádoby tak zůstanou hrubé nečistoty a písek. Popel se pak nechá usadit, udělají se z něj koule nebo hroudy a ty se pak suší na slunci nebo v peci.

Na přípravu **kostního popela** doporučuje Ercker použít kosti z telecích hlav. Nejprve se povařením z kostí odstraní nečistoty a mastnota, po usušení se spalují v ohni, dokud nejsou čistě bílé. Takto připravené kosti jsou rozetřeny na kameni, prášek je vložen do hrnce a opět vypalován na ohni nebo v hrncířské peci. Pak je popel opět rozetřen, až se podobá mouce a je připraven k použití. Takto připravený popel považuje Ercker za lepší než plavený kostní popel.

PŘÍPRAVA PLAVENÉHO DŘEVĚNÉHO POPELA

Dřevěný popel byl připraven spálením různých druhů dřeva v kamnech. Následným prosetím přes nerezové síto s velikostí ok 1 mm byly odstraněny částice větší než 1 mm, jako jsou kamínky a hrubé uhlíky. Podsítný podíl byl pak přelit vodovodní vodou a ponechán v klidu po dobu jedné hodiny, aby se dobře usadil. Poté byla



Obr. 1: Kapelková pánvice (A) a kapelky různých velikostí (B až D) dle Erckera (1574)

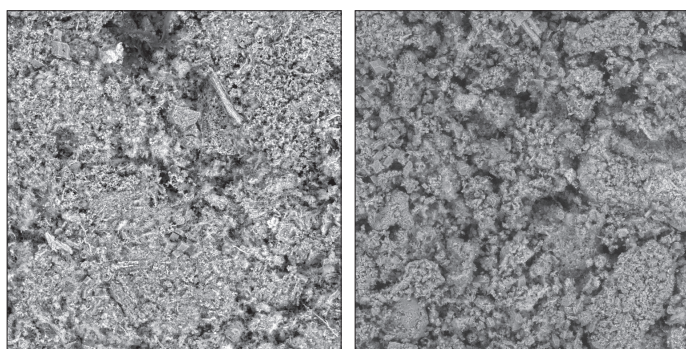
voda slita a popel byl zalit čistou vodovodní vodou. To bylo opakováno tak dlouho, dokud voda nebyla téměř čirá (přibližně pětkrát). Poté byl popel opět zalit čistou vodou, promíchán a ihned přelit do jiného kbelíku. Hrubší podíl popela zůstal na dně původního kbelíku a byl následně odstraněn. Jemný podíl byl ponechán v klidu, aby se usadil. Voda byla opět slita a popel byl přelit opět čistou vodovodní vodou, promíchán a přelit do jiného kbelíku. Přebytková voda byla odstraněna filtrací přes papírový filtr na Büchnerově nálevce a popel byl dosušen v sušárně při 110 °C.

ANALÝZA DŘEVĚNÉHO POPELA

Dřevěný popel byl analyzován pomocí elektronového rastrovacího mikroskopu s energiově disperzním rentgenovým analyzátozem (EDS).¹ Bylo zjištěno, že neplavený dřevěný popel je tvořen částicemi rozmanitého tvaru i velikostí. Maximální velikost částic je 0,1 mm. Plavením dřevěného popela došlo k odstranění nejhrubšího podílu částic – v plaveném popelu je maximální velikost částic okolo 0,05 mm. Plavený popel je více homogenní a také rozmanitost tvarů částic je o mnoho menší než u neplaveného popela (Obr. 2).

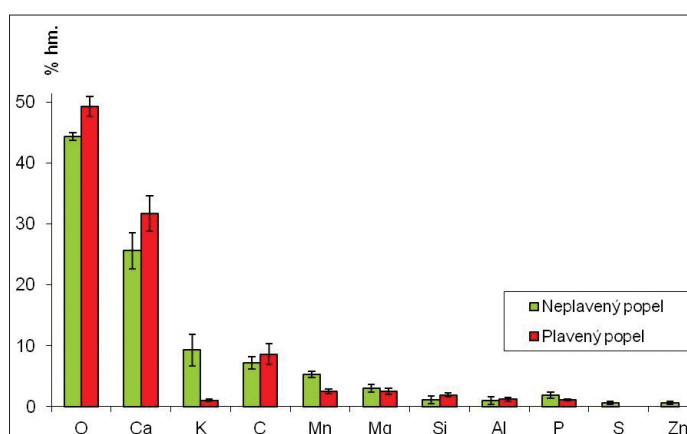
Přibližné prvkové složení dřevěného popela, zjištěné pomocí EDS, je uvedeno na obr. 3. Obsahy většiny prvků se u plaveného a neplaveného popela příliš neliší. Výjimkou je draslík, jehož obsah se plavením rapidně snižuje z cca 10 % hmotnosti na cca 1 % hmotnosti. Draslík je v popelu přítomný převážně ve formě uhličitanu draselného, který je dobře rozpustný ve vodě, a tudíž je při plavení popela odstraněn. Vzestup hmotnostních procent vápníku a kyslíku je dán právě snížením hmotnostních procent draslíku.

¹ Použit byl kompaktní rastrovací elektronový mikroskop VEGA3 SBU (Tescan, Brno, ČR) s integrovaným energiově disperzním rentgenovým mikroanalýzátozem Quantax, detektor XFlash 410-M, software Esprit 1.9 (Bruker Nano GmbH, Berlín, Německo). Základní parametry: urychlovací napětí 20 kV, detektor BSE, nevodivé vzorky byly měřeny v režimu nízkého vakua (UniVac, 10 Pa).

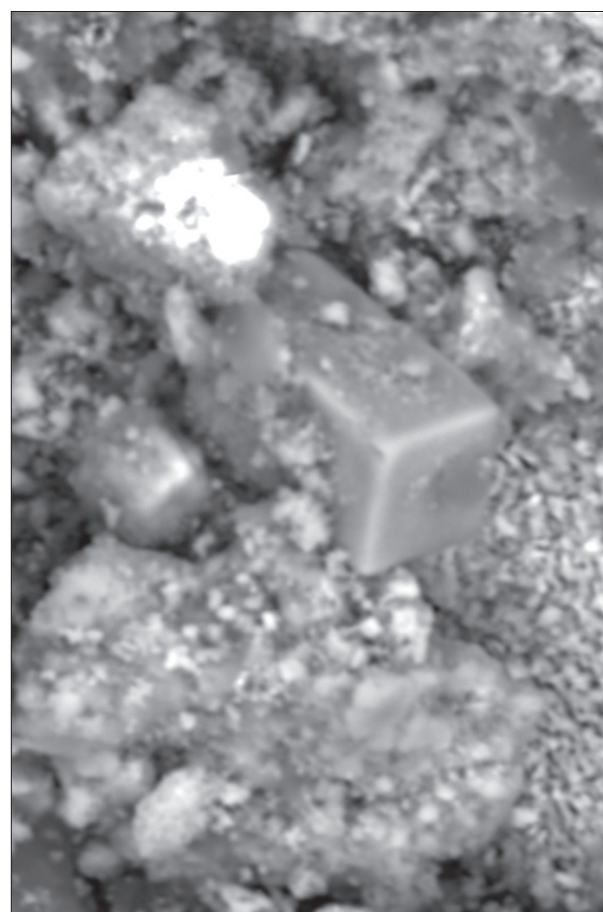


Obr. 2: Dřevěný popel – neplavený (vlevo) a plavený (vpravo).

Šířka záběru 0,5 mm. Foto autoři



Obr. 3: Prvkové složení dřevěného popela



Obr. 4: Plavený dřevěný popel, uprostřed krystal kalcitu.

Šířka záběru 70 μm . Foto autoři

Pomocí elektronové mikroskopie byly v dřevěném popelu identifikovány hojně se vyskytující krystaly tvaru kvádrů o velikosti přibližně 10 až 20 μm (Obr. 4). Analýzou jejich prvkového složení bylo zjištěno, že se pravděpodobně jedná o kalcit.

Kromě prvkové analýzy byla provedena také rentgenová difrakční analýza² s cílem zjistit, jaké minerální fáze dřevěný popel obsahuje. Touto analýzou bylo zjištěno, že základní minerální fází je kalcit a identifikován byl ještě v malé míře křemen, jehož obsah se plavením snižuje. Dále popel obsahuje amorfní podíl, jehož obsah se plavením snížil z 10–20 % u neplaveného popela na 5–10 % u popela plaveného.

PŘÍPRAVA KOSTNÍHO POPELA

Kostní popel byl připravován z telecích kostí, které byly nejprve vařeny, následně očištěny od morku a zbytků masa a sušeny v troubě. Poté byly kosti spalovány na otevřeném ohni v kbelíku

s děrovaným dnem a pak žíhány v peci při teplotě 1 000 °C. Po vytazení z pece a vychladnutí byly kosti roztlučeny na menší úlomky. Část z nich byla rozetřena v třecí misce, což se ale ukázalo jako obtížné a zdlouhavé. Proto byly úlomky kostí rozemlety v elektrickém tříštivém mlýnku na kávu. Vzniklý prášek byl proset přes síto s velikostí ok 1 mm a nadsítný podíl byl vrácen do mlýnku k dalšímu mletí. Průběh přípravy kostního popela si lze prohlédnout na obrázku 5.

Dodatečně se ukázalo, že tříštivý mlýnek není pro tento účel příliš vhodný, protože při tomto způsobu mletí vznikají částice dvou základních velikostí. Větší mají rozměry v desetinách mm (s poněkud obroušenými resp. otlučenými hranami), druhou skupinou jsou velmi jemné částice popela o rozměru menším než 1 μm . Tento jemný podíl by při Erckerem doporučeném rozetření na hladkém kameni nevznikal. Snížit podíl malých částic se podařilo pomocí bronzového síta o velikosti ok 0,1 mm. Fotografie kostního popela jak před prosetím přes jemné síto, tak i po něm je na obrázku 6.

² Rentgenová difrakční analýza byla prováděna na difraktometru D8 Advance (Bruker AXS, Německo) s Bragg-Brentano goniometrem (poloměr 217,5 mm), záření CuK α , $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$, grafitový monochromátor, detektor Na(Tl)I, napětí 40 kV, proud 30 mA, scan (2 Θ) 5° až 60°, krok 0,02°, 10 s na jeden krok. Analýzy provedl Ing. L. Beneš, CSc., ze Společné laboratoře chemie pevných látek UMCh AV ČR a Univerzity Pardubice.



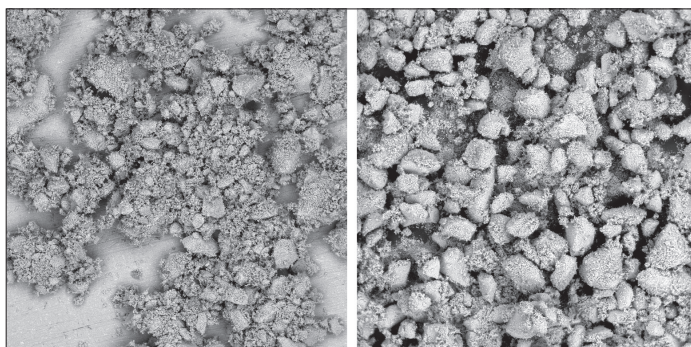
Obr. 5: Příprava kostního popela. Vařené telecí kosti byly spáleny na otevřeném ohni v plechovém kbelíku s děrovaným dnem. Po spálení byly vyžihány v peci, rozdrobeny a rozemlety. Foto autoři

ANALÝZA KOSTNÍHO POPELA

EDS analýza kostního popela ukázala, že obsahuje cca 50 % hmotnosti kyslíku, 35 % vápníku, 14 % fosforu a 1 % sodíku. Pomocí difrakční analýzy byla v kostním popelu identifikována jediná minerální fáze – hydroxyapatit $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2(\text{CO}_3)_{0,09}(\text{OH})$.

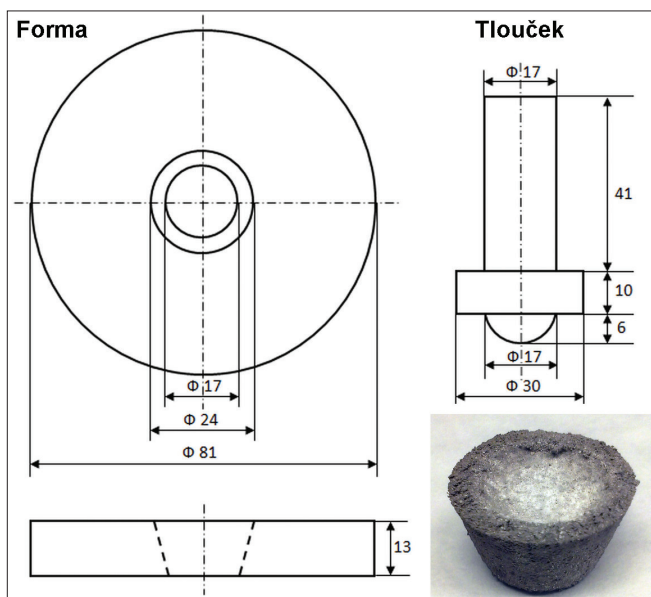
VÝROBA KAPELEK

Kapelky byly vyráběny v teflonové formě zhotovené podle vlastního návrhu (Obr. 7). Teflon byl zvolen jako náhražka Erckerem doporučeného bronzu resp. hruškového dřeva z důvodu nepřilnavého povrchu, tudíž nebylo nutné formu vymazávat slatinou. Rozměry kapelek byly zvoleny podle kapelek pocházejících z muzea v Kutné Hoře (Bartoš a kol. 2001, 49). Všechny měly tvar obráceného komolého kužele, průměr horního okraje byl 24 mm, průměr dna 17 mm, výška 13 mm, průměr jamky 17 mm a hloubka jamky 6 mm. Hmotnost vysušené kapelky obvykle mírně překračovala 5 gramů. Obdobnou velikost měla i použitá kapelka ze slovenského báňského revíru Hodruša–Hámre, která byla k dispozici. Kapelky byly zhotovovány tak, jak popisuje Ercker, tedy ze směsi dvou objemových dílů plaveného dřevěného popela

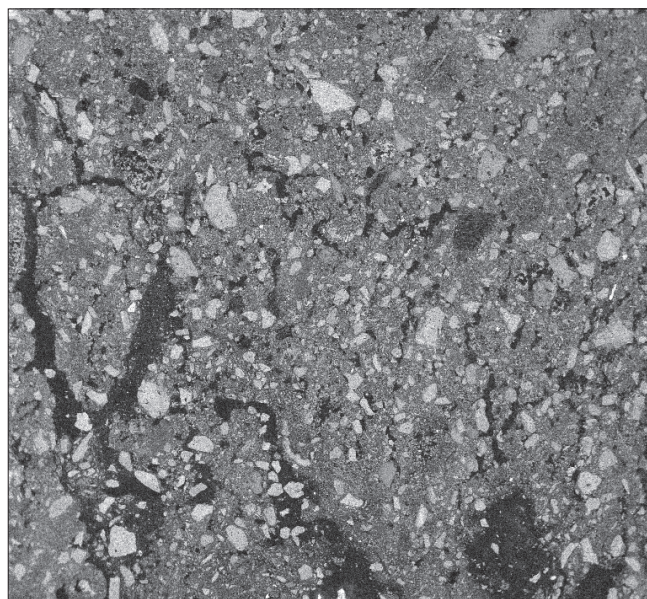


Obr. 6: Kostní popel před prosetím (vlevo) a po prosetí přes bronzové síto s velikostí ok 0,1 mm (vpravo). Šířka záběru 2,5 mm. Foto autoři

a jednoho objemového dílu kostního popela. Tato směs byla zalita pivem (Velkopopovický Kozel výčepní světlý) tak, aby při zmáčknutí držela pohromadě. Hmota byla následně vtlačena do formy, zarovnána s její horní hranou a pomocí tloučku byla do ní vyražena jamka. Ta pak byla pokryta vrstvičkou kostního popela zaraženou pomocí tloučku do povrchu jamky. Zhotovená kapelka byla vytlačena z formy a ponechána několik dnů až týdnů při laboratorní teplotě, aby dokonale vyschla (Obr. 7). Žihána byla až těsně před použitím a to přibližně po dobu 15 minut při teplotě 1 000 °C.



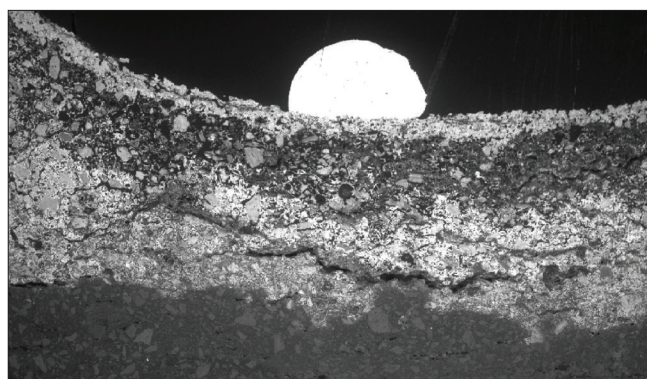
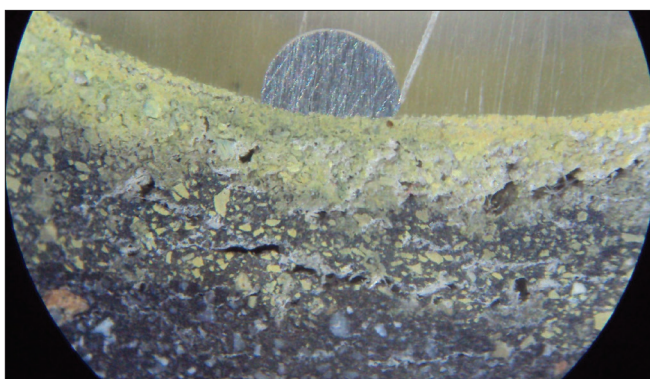
Obr. 7: Návrh teflonové formy na výrobu kapelek a sušená kapelka připravená k použití. Kresba a foto autoři



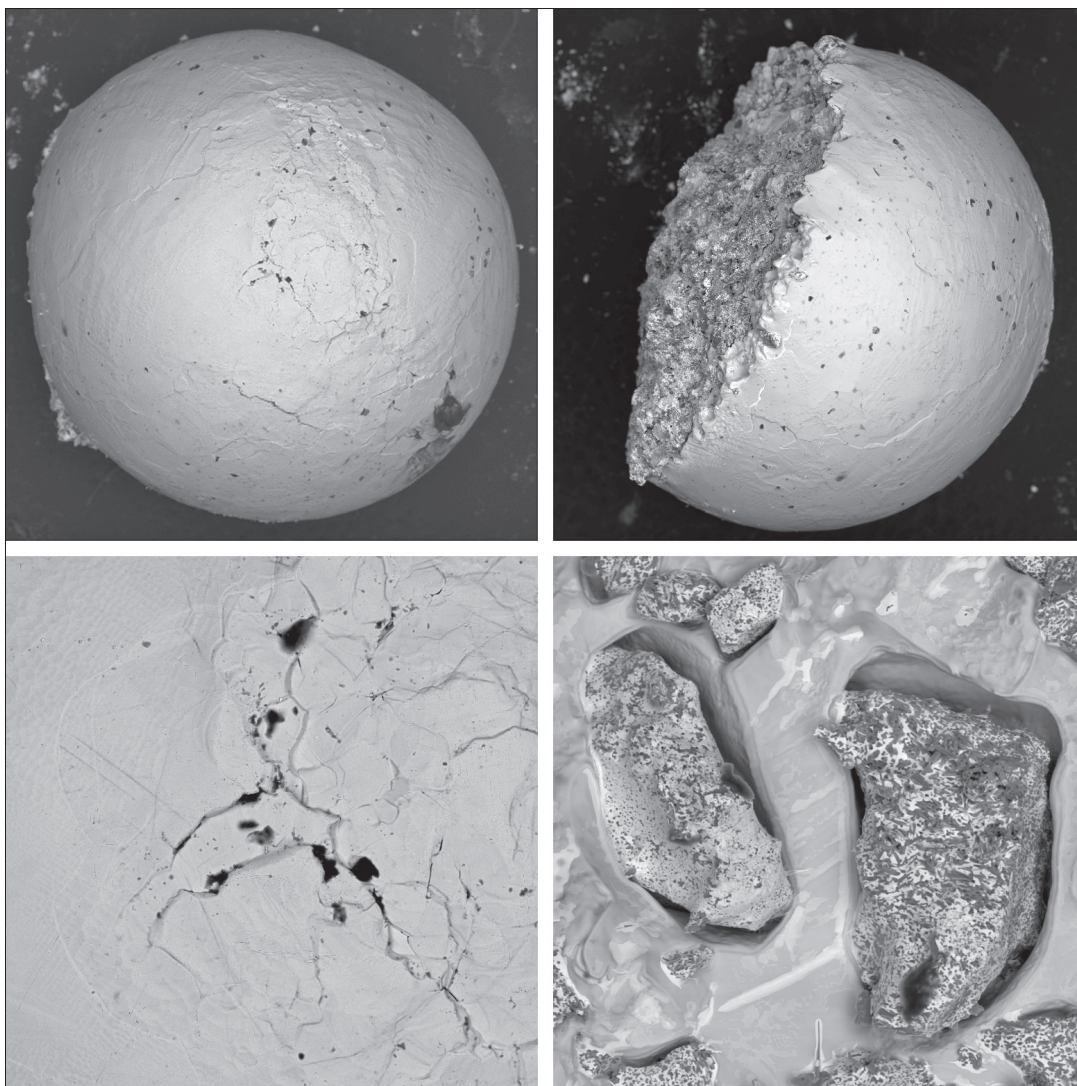
Obr. 8: Struktura materiálu nepoužité kapelky – částice kostního popela světlé, dřevěný popel šedý, polyesterová pryskyřice černá. Šířka záběru 6 mm. Foto autoři



Obr. 9: Hoření olova v peci a průběh chladnutí kapelky po proběhlé kupelaci. Foto autoři



Obr. 10: Řez použitou kapelkou se zrnem stříbra – fotografie z binokulární lupy (vlevo) a z elektronového mikroskopu (vpravo). Šířka záběru 10 mm. Foto autoři



Obr. 11: Stříbrné zrno – nahoře pohled na zrno shora a z boční strany (šířka záběru 2 mm), dole detail pórů na povrchu zrna a styk stříbra s částicemi kostního popela (šířka záběru 0,5 a 0,3 mm). Foto autoři

ANALÝZA NEPOUŽITÝCH KAPELEK

Několik nepoužitých kapelek bylo opatrně rozříznuto, pak zalito do polyesterové pryskyřice a byl z nich zhotoven nábrus. Ten byl pak pozorován pod elektronovým mikroskopem. Cílem bylo zachytit strukturu a rozvrstvení materiálu kapelky, aby bylo možné porovnávat kapelky před a po použití. Pozorováním bylo zjištěno, že se jedná o náhodně rozmístěné částice kostního popela ve hmotě tvořené dřevěným popelem (Obr. 8). Pouhé vypálení kapelky v peci se na její struktuře nijak neprojeví.

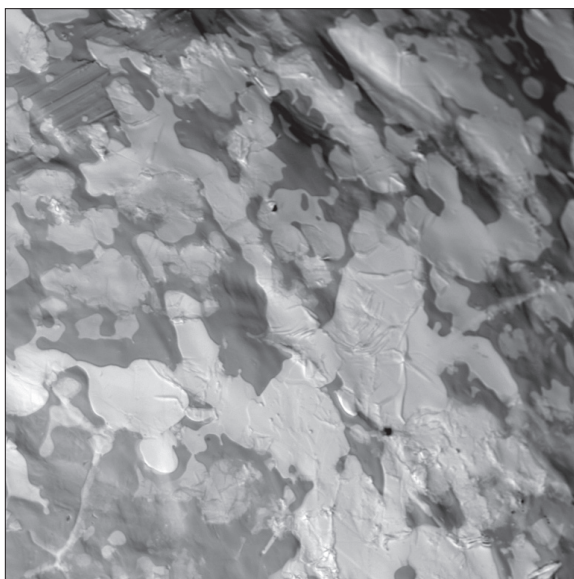
Kromě obrazové analýzy byla pomocí upraveného siloměru měřena také pevnost kapelek v tlaku.³ Byla měřena pevnost jak kapelek sušených, které musí vydržet skladování, vkládání do pece

a zahřátí, tak i žíhaných v peci po dobu 15 minut (na rozžhavenou kapelku se umísťuje regulus a po ukončení analýzy musí vydržet vytažení z pece a relativně rychlé ochlazení) a pak vytemperovaných na pokojovou teplotu. Sušené kapelky se rozpadly při působení síly $63,7 \pm 1,1$ N, vyžíhané kapelky při $52,2 \pm 1,1$ N. Větší pevnost sušených kapelek lze vysvětlit vlivem organických látek přítomných v pívě, především cukrů, které po odpaření vody působí jako lepidlo přidržující jednotlivé částice popelů. Podobně by působilo i další pojivo doporučované Erckerem – vaječný bílek. Vypálením se organická hmota zničí a pevnost kapelky poklesne.

³ Pevnost byla měřena pomocí siloměru Dual-Range Force Sensor 0–50N (Vernier, Beaverton, OR, USA) s gumovým polokulovým nástavcem. Siloměr byl umístěn ve stojanu minivrtáčky a byl pokud možno pokaždé stejnou rychlostí ručně vtlačován do misky kapelky. Průběžně byla zaznamenávána síla působící na kapelku, která plynule narůstala. V momentě destrukce kapelky došlo k náhlému poklesu signálu. Z grafu byla odečtena a dále použita maximální dosažená hodnota. Všechna měření pevnosti byla prováděna za laboratorní teploty. Pro jednotlivé druhy kapelek byla měření opakována dvakrát.

KUPELACE V MUFLOVÉ PECI

Kupelace probíhala v elektrické muflové peci při počáteční teplotě 1 000 °C (teplota musí být vyšší než teplota tání oxidu olovnatého – klejtu, tj. vyšší než 886 °C). Kapelka byla nejprve žíhána prázdná a po rozžhavení na ni byly vloženy přibližně 3 g olova. Poté, co se olovo po rozžhavení začalo oxidovat – hořet, bylo na ně vloženo přesně odvážené množství stříbra ve formě drátku a v jednom případě ve formě sulfidu stříbrného zabaleného do papírového kornoutku. Takto bylo simulováno složení olověného regulu. Pec se v této fázi analýzy nechávala pootevřená nebo byla občas otevřena, aby do ní proudil kyslík. Teplo uvolněné hořením zvyšovalo teplotu roztaveného kovu, která byla výrazně vyšší než teplota kapelky. Tavenina hořícího olova svítila na tmavší kapelce (Obr. 9 vlevo). Vznikající klejt vsakoval do pórů kapelky a objem taveniny postupně klesal. Stříbro není za podmínek analýzy oxidováno a zůstávalo v roztaveném kovu na povrchu kapelky. Na konci analýzy došlo ke krátkodobému zvýšení jasů zrna kovu a nyní už čisté stříbro ztuhlo, protože teplota v peci je v této fázi analýzy nižší, než teplota tání stříbra (962 °C).⁴ Po proběhlé kupelaci je vhodné zabránit rychlému ochlazení stříbrného zrna umístěním kapelky před ústí pece, sníží se tím nebezpečí „prskání“ zrna (Jirkovský 1956, 113–114). Toto prskání je způsobeno unikáním kyslíku, který je dobře rozpustný v tekutém stříbře, ale špatně v tuhém. Na druhou stranu bylo po vytažení kapelky z pece nutné stříbrné zrno co nejdříve vyjmout, protože po ztuhnutí klejtu a jeho přechodu na massicot (viz dále) dochází k přilepení zrna a je obtížné je z povrchu odloupnout. Povrch kapelek byl ihned po vytažení zbarven oxidem olovnatým do vínova, tato barva při chladnutí postupně přecházela přes oranžovou až do konečné žluté (Obr. 9). Změna zbarvení je způsobena fázovou přeměnou oxidu olovnatého z jeho červené formy – lithargitu (α -PbO) na formu žlutou – massicot (β -PbO). Stabilní při běžných teplotách je přitom lithargit, který se transformuje na massicot při teplotě kolem 540 °C. Při běžných teplotách je massicot metastabilní (Giefers 2007).

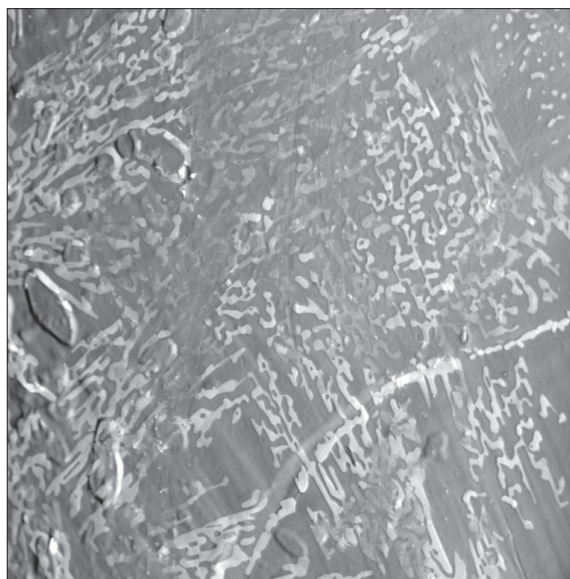


ANALÝZA POUŽITÝCH KAPELEK

Z použitých kapelek byly zhotoveny nábrusy, které byly nejprve zkoumány pod binokulární lupou a následně byly podrobeny analýze pomocí elektronového mikroskopu s energiově disperzním rentgenovým analyzátozem. Na obrázku 10 je zachycen řez použitou kapelkou, na jejímž povrchu je stříbrná kulička. Svrchní, žlutě zbarvená vrstva je nejtenčí a v této vrstvě je největší koncentrace klejtu. Pod touto vrstvou je vrstva další, která je z velké části tvořena kostním popelem. Je zde vidět, že částice kostního popela jsou prosycené klejtem, protože jsou jím zbarveny do žluta. Spodní vrstva je tvořena směsí kostního a dřevěného popela a klejtem již není prosycena.

ANALÝZA ZÍSKANÝCH STŘÍBRNÝCH ZRN

Na snímcích z elektronového mikroskopu (Obr. 11) je vidět, že stříbrná zrna obsahují póry. Tyto póry vznikly pravděpodobně unikáním vzduchu při tuhnutí stříbra. Bylo také zjištěno, že vzniklá zrna nemají tvar koule, ale spíše polokoule, protože strana přiléhající k povrchu kapelky je značně zploštělá a také znečištěná kousky kostního popela impregnovanými klejtem. Při detailním zkoumání styku zrna s povrchem kapelky je vidět, že stříbro povrch kapelky nesmáčí, protože se snaží zaujmout co nejmenší styčnou plochu. Kolem částic popela jsou dutiny vyplněné vzduchem. Při nedokonalé provedené kupelaci zůstávají na povrchu stříbra zbytky oxidu olovnatého, který během chladnutí „zatuhne“ na stříbře. Na snímcích z elektronového mikroskopu se při použití BSE detektoru tyto zbytky jeví jako světlé skvrny na tmavším podkladu (Obr. 12).



Obr. 12: Zbytky oxidu olovnatého (světlé skvrny) na povrchu stříbra (tmavší podklad). Šířka záběru 0,2 mm. Foto autoři

⁴ Teplota při kupelaci by neměla překročit 900 °C, aby nenastaly velké ztráty stříbra těkáním (Jirkovský 1956, 113).

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vyzkoušení staré technologie výroby a použití kapelek, popsané Lazarem Erckerem v jeho knize z roku 1574. Snahou bylo co nejvíce dodržet jím popsaný postup, resp. odchýlit se od něj pouze v míře neovlivňující výsledek experimentů. Takovou odchylkou je použití teflonové formy na výrobu kapelek místo Erckerem doporučené bronzové, resp. dřevěné. Výraznější vliv na výsledek pokusů mohlo mít použití tříštivého mlýnku na rozemletí kostí, výsledný produkt má zjevně jiné granulometrické složení a i poněkud jiný tvar částic než popel zhotovený roztíráním na hladkém kameni. Částečně se to podařilo napravit snížením obsahu jemných částic jejich proséváním přes jemné síto. Další odchylkou bylo použití moderní elektrické muflové pece místo prubířské pícky vyhřívané dřevěným uhlím. Moderní pec sice umožňuje přesně regulovat teplotu, ale ve srovnání s pecí popsanou Erckerem má velkou tepelnou setrvačnost neumožňující rychlé změny teploty a konstrukce dvířek a ústí mufle neumožňuje předehřívání vzduchu vstupujícího do mufle při pootevřených nebo otevřených dvířkách.

Analýzou použitých materiálů bylo zjištěno, že dřevěný popel se plavením stává jemnějším a do značné míry se z něj odstraní uhlíčan draselný (potaš). Z minerálních fází obsahuje prakticky jen kalcit s malou příměsí křemene a taky malé množství amorfního podílu. Kostní popel je tvořen pouze hydroxyapatitem. Pivo, přidávané ke směsi suchých popelů, slouží k mechanickému zpevnění vysušených kapelek. Po vyžhání, kdy se spálí organické látky z piva, pevnost kapelek klesne. K tomu ale dojde až těsně před vložením olova na kapelku. Z olova vzniklý klejt pak kapelku impregnuje a tato impregnovaná část má pevnost výrazně převyšující měřicí rozsah použité aparatury.

Kupelací získaná zrna stříbra mají tvar polokoule se zploštělou stranou přiléhající ke kapelce. Na této straně je zrno znečištěno materiálem kapelky. Zrno obsahuje značné množství pórů vzniklých unikáním kyslíku rozpuštěného v roztaveném stříbře při jeho tuhnutí. Při špatně provedeném závěru kupelace může dojít až k vyprsknutí stříbra, které je způsobeno unikajícím kyslíkem, nebo k zatuhnutí zbytků klejtu na povrchu stříbra.

Kupelace v kapelkách vyrobených podle Erckerova návodu proběhla vesměs úspěšně. S kapelkami bylo možné i při jejich křehlosti manipulovat, nedocházelo k jejich praskání či vzniku trhlin ani natavování vlivem klejtu nebo výraznějšímu oddrolování materiálu kapelky při manipulaci nebo v peci.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují doc. Ing. L. Benešovi, CSc., ze Společné laboratoře chemie pevných látek UMCh AV ČR a Univerzity Pardubice za měření na rengenovém difraktometru a RNDr. J. Králové z Českého muzea stříbra v Kutné Hoře za poskytnutí kapelky z revíru Hodruša–Hámre.

LITERATURA

Bartoš, M. – Brzák, P. – Ševců, J. 2001: Prubířství a prubířská keramika. In: Nekuda V. (ed.), *Archaeologia historica* 26/01. Brno: Muzejní a vlastivědná společnost v Brně, 43–53.

Ercker L. 1982: Kniha o prubířství. Praha: Národní technické muzeum v Praze (překlad: P. Vitouš).

Ercker, L. 1574: Beschreibung allerfürnemisten mineralischen Ertzt und Berckwercksarten. Praha.

Giefers, H. – Porsch, F. 2007: Shear induced phase transition in PbO under high pressure. *Physica B* 400, 53–58.

Jirkovský, R. 1956: Prubéřství a základy vzorkování. Praha: Státní nakladatelství technické literatury.

Kubátová, L. 1996: Neznámý rukopis Lazara Erckera 1569. Praha: Státní ústřední archiv v Praze.

Vaněk, V. – Velebil, D. 2007: Staré hutnictví stříbra. In: *Stříbrná Jihlava 2007 – Silberne Stadt Jihlava 2007*. Brno–Jihlava: Archaia Brno, o.p.s. a Muzeum Vysočiny Jihlava, p.o., 188–205.