

EXPERIMENTÁLNÍ TAVBY ŽELEZA VE STARÉ HUTI U ADAMOVA V SEZONÁCH 2008 A 2009¹

MARTIN BARÁK, JIŘÍ MERTA, ONDŘEJ MERTA, LENKA GRYSOVÁ

Úvod

Výchozím bodem pro realizaci experimentálních taveb je stav bádání v oblasti raně středověkých kusových železářských pecí rekonstruovaných podle nálezů ve střední části Moravského krasu s přihlédnutím k výzkumům v jiných oblastech. Na odkryv a popis metalurgických zařízení navázaly četné experimenty, které prokázaly správnost interpretace archeologických nálezů a objasnily základní metalurgické vlastnosti nalezených zařízení.

Tým Technického muzea v Brně přímo navázal na předchozí práce věnující se výzkumu kusových železářských pecí v Moravském krasu a přesunul metalurgické aktivity do areálu Staré huti u Adamova. Na tomto místě jsou experimenty realizovány pravidelně od roku 1994.

Přesun experimentální činnosti z „laboratorních“ podmínek metalurgických laboratoří a provozů do areálu open-air expozice technické památky přinesl, mimo prezentace veřejnosti, též možnost zabývat se detailněji řemeslnou stránkou práce v rekonstruované huti počínaje, zpracováním materiálu na stavbu pecí, vedení a řízení procesu odhadem, řešení obtíží a havárií specifických pro konstrukci pece a použité materiály a potýkáním se s rozmary počasí konče.

Za dobu, po kterou experimenty provádíme, postupně získáváme zručnost a jisté zkušenosti, které se odrážejí v úspěšnosti experimentů. Poslední dvě sezony tak můžeme označit za úspěšné. Úplné zvládnutí řemesla starých metalurgů zůstává ale nadále výzvou a řada otázek stále čeká na zodpovězení.

Vybavení

I v historii to byl vždy zdroj a množství dmýchaného vzduchu, který určoval charakter metalurgického zařízení. Pro období, na které se soustředíme, předpokládáme jednočinný měch poháněný rukou pracující samostatně nebo ve dvojici. K experimentálním tavnám je užíván jednočinný měch klasické konstrukce o rozměru 42 × 60 cm, největší otevření na 32 cm a objemu cca 25 l. Vzhledem k malému počtu lidí provádějících tavy využíváme pravidelně také náhradní zdroje. Prvním a již tradičním je vysavač ETA starší konstrukce, který při tavně regulujeme nastavením šterbiny mezi výfukem vysavače a trubicou/hadicí, kterou je vzduch veden k peci. Pro sezonu 2009 jsme pořídili malý kovářský ventilátor ESV 220V HOBBY, který jsme instalovali do dřevěné skříně a opatřili nátrubkem vytvářejícím přechod mezi širokým čtyřhranným výstupem ventilátoru a rozměrem trubice z běžného příslušenství vysavačů ETA, které využíváme.

Dále používáme pouze běžné nářadí a vybavení.

Měřicí přístroje

Pro druhování vsázky a orientační měření hmotnosti využíváme mechanickou kuchyňskou váhu staršího data výroby. Finální produkty jsou váženy digitální vahou v depozitářích TMB. V průběhu popisovaných

sezón byl pořízen Infračervený bezkontaktní teploměr IR-1600A. Jeho regulérní využití plánujeme v následujících sezónách.

Experimentální zařízení

Dlouhodobě se věnujeme třem vzorům slovanských kusových pecí archeologicky zkoumaných v blízkém okolí Staré huti u Adamova – vestavěné peci s tenkou hrudí, šachtové nadzemní peci s mělce zahloubenou nístějí a zadlabané peci typu Želechovice.

Vestavěná pec s tenkou hrudí

Nález v polesí Olomučany, lesní odd. 98/1 v rámci výzkumů v letech 1977–1980. Pece byly nalezeny na jednom pracovišti společně s nadzemními pecemi s mělce zahloubenou nístějí. Jedná se o typ pece zapuštěný ze tří stran do rostlého terénu. Hrudní partie je volná, modelovaná z jílu. Nejlépe zachovaný exemplář byl vyzvednut a Muzeum Blansko jej vystavuje ve stálé expozici Nejstarší hutě.

O dmýchání vzduchu svědčí nálezy dyzen v odpadových haldách. V odpadu se vyskytovaly fragmenty dyznových panelů a typické vějířovité slitky, které spolu s mělce zahloubenou až svážnou nístějí svědčí o vypouštění strusky v průběhu tavby.

Nadzemní šachtová pec s mělce zahloubenou nístějí

Nález v polesí Olomučany, lesní odd. 98/1 v souvislosti s nadzemními pecemi s tenkou hrudí. V nálezech se zachovaly pouze nístěje pecí. Použité dyznové panely byly stejného tvaru a konstrukce jako u vestavěné pece s tenkou hrudí, resp. nebyly nalezeny jiné.

Velikost dyzen: L = 100 mm, D = 50 mm, d = 24 mm. Dyznový panel měl tvar obráceného U (H = 280 mm, Š = 260 mm síla stěny 40 mm) s nálevkovitým otvorem pro zaústění dyzny, v něm je uložena keramická vložka, ve které je utěsněna dyzna.

pec	výška	šířka nístěje	délka nístěje	zahloubení nístěje	kychta
I. (th)	620 mm	300 mm	340 mm	90 mm	150 x 120 mm
II. (th)	630 mm	*	*	80 mm	*
III. (th)	390 mm*	*	*	*	*
IV. (th)	*	*	*	*	*
V. (š)	*	370 mm	400 mm	150 mm	*
VI. (š)	*	350 mm	370 mm	130 mm	*
VII. (š)	*	350 mm	450 mm	120 mm	*
VIII. (š)	*	330 mm	400 mm	130 mm	*
IX. (th)	620 mm	350 mm	400 mm	svážná	120×120

* nedochovaná (th) – pec s tenkou hrudí (š) – šachtová pec

Tab. 1. Dochované rozměry pecí v nálezech. Údaje vybrané z textu (Souchopová 1986).

Želechovická pec

Nález v polesí Olomučany, lesní odd. 98/2 a 98/3. Nalezené pece jsou analogické pecím želechovické hutní soustavy. Jsou zcela zapuštěné do jílovité hlíny a do prostoru pece vede široký tunel se silně propálenými

stěnami. Tunel přechází v nístěj, na niž navazuje baňkovitá šachta s podkovovitou dutinou v zadní stěně. V horní partii se šachta silně zužuje a vyúsťuje kychtou v svrchní plošině jílovité lavice. Vzduch byl stejně jako u želechovických pecí dmýchán zezadu tylovou dyznovou cihlou. Dochovaná pec měla rozměry: celková délka pece 1060 mm, výška šachty 500 mm, nístěj 280 × 360 mm, kychta 150 × 150 mm. Huť byla na základě keramiky datována do 8. století.

Suroviny

Dřevěné uhlí bylo použito komerční bez určení složení dřevin. Tavby J–09–05 a J–09–06 byly vedeny s měkkým smrkovým uhlím vyrobeným experimentálním pálením v milíři v průběhu jarní kampaně 2009. Slovanští hutníci dle určení dochovaných uhlíků využívali veškeré dostupné dřeviny (Souchopová 2008).

Železná ruda byla pořízena nákupem ve slévárně oceli. Jedná se o vysoce kvalitní hematit. Podle kopie dodacího listu je její složení: železná ruda Fe – 49,3 %, Al_2O_3 – 0,86 %, Fe_2O_3 – 27,33 %, SiO_2 – 13,43 %, P – 0,019 %, MgO – 4,05 %, CaO – 1,02 %, S – 0,064 % (De–Metal, s.r.o. 1.9.2005).

Pro tavbu J–09–03 byla použita ruda z nálezů u lomu Mokrá–Horákov (Fojt 2008). Jednalo se o limonitickou rudu. Analýzy složení byly provedeny na více pracovištích různými metodami a bylo konstatováno, že se jedná o bohatou rudu, která obsahem oxidů železa dosahovala až 80 %. Zajímavým faktem je, že limonit se v místě nálezů mísil s detritem vápenců, místy sypkým, který byl limonitem tmelený. Tento poznatek je velmi zásadní z pohledu možného užití vápna jako struskotvorné přísady. (Pozn.: Informace o složení jsme získali až několik měsíců po vlastním experimentu.)

Jako součást kovonosné vsázky byly použity rovněž vlastní odpady a produkty z předchozích taveb a okuje. Jedná se o strusku a zrna i větší útvary kovového železa, které se nespojilo do zpracovatelné houby.

Železná ruda je před použitím pražena na otevřeném ohni a následně drcena na rozměru hrubšího písku – největší zrna mají rozměr do 8 mm, většina materiálu je drobnější. To platí i pro použití aglomerátu (kuličky cca 12 mm spečené z rudného prachu alespoň rozbíjíme). Použití aglomerátu se ale pokud možno vyhýbáme, protože se jedná o průmyslově předzpracovanou surovinu.

Dřevěné uhlí je drceno na rozměry cca 30 mm a odděleno od prachového odpadu.

Strusky a nedokonalé produkty předchozích taveb drtíme na písek, kousky železa v tomto procesu často díky své plasticitě zůstávají větší a jsou sázeny v tomto stavu.

Stavba pecí

Vestavěná pec s tenkou hrudí

Nalezené exempláře kompletních pecí byly zapařeny ze tří stran do rostlého hlinitého podloží, pouze hrudní partie je volná, modelovaná z plastického jílu. Pec byla stavěna tak, že do lavice rostlé hlíny hutníci vykopali výklenek, který vymazali a domodelovali hrudní část pece.

Nadzemní šachtová pec

Stavba pece předpokládá zpracování poměrně velkého množství materiálu. Těleso pece musí být modelováno postupně, protože silnostěnná šachta je hmotná a deformuje se vlastní vahou. To ztěžuje zejména vymodelování klenby pracovního otvoru. Pec je nutné stavět pomalu – nejlépe několik dní, aby již postavené části měly čas zavadnout a získat vyšší pevnost v tlaku.

Další ošidnou vlastností šachtové pece je síla stěny, která musí být dostatečná, aby materiál vydržel rozdíl teplot v šachtě a na povrchu pláště pece. Rozdíl teplot je několik set °C. Při tenkostěnné šachtě dochází k praskání a odlupování jednotlivých vrstev. Opakovaně takto došlo k poškození vrchní část šachty, přitom z šachty zbyl jen několikamilimetrový výmaz. Tomuto zabrání jedině dostatečná síla stěny a dobře zpracovaná jílová hmota s dostatečným množstvím ostřiva (písku).

Spotřební materiál – součásti pece

Dyzny jsou nejnamáhanější součásti pece a na jejich kvalitě závisí úspěch tavby. Modelujeme je na kolík, který vytvoří světlost dyzny. Dyznový panel modelujeme podle otvoru v peci tak, aby mezi panelem a obloukem pracovního otvoru zůstala max. 1 cm spára na utěsnění jílovou mazanicí. Jak dyzny, tak dyznové panely jsou připravovány s předstihem, aby dostatečně proschly. Tyto součásti pecí nejsou vypalovány předem.

Sestavení a utěsnění pece

Pec je předsušena ohněm nejméně jeden den, častěji déle. Suchá pec je zazděna, těsnící mazanice je uhlazena i z vnitřní strany pece. Tvar a kvalita zpracování prostoru nejbližší dyzny má zásadní vliv na poškození pece při tavbě a zároveň je podmínkou bezproblémového provozu pece. Se zlepšenou kvalitou zazdění dyznového panelu roste náročnost následného otevření pece. Ideální postup nám v tuto chvíli není znám.

Po nasazení dyzny a jejím utěsnění je připojen zdroj vzduchu a může následovat zapálení pece. Po zapálení doplňujeme pískový zásyp dyznového panelu –lepší se tak tepelná izolace pece.

Průběh tavby

Přidržíme se základního členění tavby na tři fáze – přehřev, vlastní tavbu a dohořívání.

Zapálení pece

Nejlépe se osvědčilo zapálení pece vhozením žhavých uhlíků do prázdné čisté pece, do které je již vháněn vzduch. Poté v malých dávkách postupně přihazujeme kousky dřevěného uhlí. Je třeba dbát na to, aby kousky uhlí nedopadaly na dyznu, která je křehká a při rostoucí teplotě se v ní velmi pravděpodobně vytvářejí lokální pnutí, takže je velmi zranitelná. Žádoucí je postupný růst teploty, což je splněno pravidelným vháněním vzduchu bez výkyvů (vháněný vzduch dyznu ochlazuje) a zejména zpočátku pomalé přihazování paliva.

Takto se zároveň dosáhne rovnoměrného vyhřátí nístěje. Dobře vyhřátá nístěj je podmínkou pro úspěšný odpich strusky.

Jakmile je pec zaplněna na úroveň klenby pracovního otvoru, je možné již plnit pec rychle a bez omezení. Po celý zbytek tavby je nutné pec udržovat stále zcela zaplněnou.

1. Přehřev

Přehřev je fází tavby od zapálení po první vsázku kovanosného materiálu. Přehřev je co nejdelší. Známkou zdárného náběhu teploty je zapálení kychtových plynů, které hoří namodralým plamenem. Přehřev trvá dle našich zkušeností více jak hodinu, u nové pece i déle. Při opakované tavbě se v průběhu dní může tato fáze zkracovat. Závisí to především na množství vlhkosti v tělese pece.

2. Rovnoměrné přísazování

Fáze pravidelných vsázek rudy, dřevěného uhlí a přísad – v našem případě strusek a úlomků železa z předchozích taveb. Pravidlem, kterého se držíme, je hmotnostní poměr dřevěného uhlí a kovonosné vsázky 1 : 1.

3. Dohořívání

Použili jsme dvou základních přístupů. Okamžité vylomení produktu a jeho kování po dokončení tavby přináší úsporu paliva při prvním stupni zpracování. Dlouhodobé ponechání produktu zazděného v peci řádově déle než 10 hodin – do dalšího dne – se opírá o hypotézu možnosti dalšího nauhličení v redukční atmosféře pece.

Použité repliky pecí

P.I – nadzemní šachtová pec s mělce zahlobenou nístějí. Replika pece byla postavena v roce 2008. V průběhu první tavby došlo k rozsáhlému poškození pece praskáním šachty. Z pece se odlupovaly větší části stěny. Oprava byla provedena za provozu obestavěním pece zlomky nepálených cihel a vysypáním spár suchou směsí strusky, písku a hlíny.

V následující sezoně byla pec opravena postupem, který se osvědčil při stavbě pece s tenkou hrudí. Vzhledem k mohutnému zásypu pece ze stran a zezadu dochází prakticky ke konverzi na pec s tenkou hrudí. Nadále ale peci zůstává charakteristický jednoduchý profil šachty odlišný od pece s tenkou hrudí, kde má prostor pece výrazný hruškovitý tvar.

P.II – vestavěná pec s tenkou hrudí. Pec byla postavena v roce 2008, v roce 2009 došlo k opravě hrudní části a kychty. V prostoru Staré huti je podloží tvořeno vrstvou odpadních strusek vysoké pece. Pomáháme si proto náhradním řešením. Do terénní vlny vykopeme výklenek, který napěchujeme hlínou. Další postup je obdobný, přestože rostlý terén je pochopitelně hutnější a poskytuje lepší oporu. Modelování hrudní partie je poměrně snadné, pokud se postupuje modelováním jakýchsi límců z obou stran, až se hruď uzavře. Takto stavěná pec je velmi stabilní, neboť tíhu konstrukce nese terén a ne modelované části. Oproti stavbě šachtové pece je takto stavěná pec poměrně rychle hotova, není třeba zpracovat velké množství materiálu a pec je brzy připravená k tavbě.

P.III ž – želechovická pec (pec typu Želechovice). Replika byla postavena pro sezonu 2009. Pec byla vystavěna s pokusem o pravděpodobnou původní techniku stavby – ražením vodorovného tunelu a vykopání šachty. Stejně jako v případě vestavěné pece s tenkou hrudí byl základ pece vytvořen napěchováním navezené hlíny, do které byla pec vymodelována.

Přehled taveb

tavba	datum	pec
J-08-01	14.5.2008	P.II
J-08-02	16.5.2008	P.I
J-08-03	17.5.2008	P.II

Tab. 2. Přehled redukčních taveb v roce 2008.

tavba	datum	pec
J-09-01	5.5.2009	P.I
J-09-02	7.5.2009	P.I
J-09-03	8.5.2009	P.II
J-09-04	9.5.2009	P.III ž
J-09-05	19.9.2009	P.I
J-09-06	20.9.2009	P.II

Tab. 3. Přehled redukčních taveb v roce 2009.

Popis jednotlivých taveb

J-08-1

Tavba konaná v peci s tenkou hrudí (P.II) dne 14. 5. 2008. Tavba zpracovávala různorodý materiál vybraný z předchozích taveb. Materiál byl separován pomocí magnetu a do vsázky nadcen. V některých případech se jednalo i o několikacentimetrové kousky železné houby, jindy o značně heterogenní „kousky“, ve kterých se vyskytovalo vše od makroskopických zrn železa po dokonale přepraženou rudu.

Tavba byla započata standardním postupem a po dosažení předehřátého stavu byla zahájena první vsázka. V tuto chvíli byl však pokus přerušen hodinovou bouřkou s lijákem. Po obnovení dmýchání se poměrně rychle a snadno dosáhlo známek dobrého běhu pece. Ruční měchy byly nahrazeny vysavačem a pokus pokračoval již s umělým vzduchem. Celkem bylo vsazeno 5,5 kg kovonosné vsázky, z toho 0,5 kg před přerušením tavby. Další 4 kg byly přisazeny za dobu jedné hodiny, v následující hodině již jen poslední 1 kg. Následovalo přisazování pouze dřevěného uhlí.

Pec jsme pro pokročilou hodinu otevřeli až následující den. Pec samotná byla schopna okamžitého dalšího provozu.

Z kusu jsme otloukli nahrubo strusku. Vzhledem k tomu, že byla k dispozici připravená kovářská výheň, následovalo bezprostředně další tepelné a mechanické zpracování produktu.

J-08-2

Tavba konaná v nadzemní šachtové peci s mělce zahloubenou nístějí (P.I) dne 16. 5. 2008.

Pec je celá vymodelována z rudického červeného jílu smíšeného s pískem. Po zahřátí začala pnutím praskat, a proto jsme přistoupili k rychlému obezdění pece z na sucho kladených nepálených cihel, které byly k dispozici. Tím se docílilo zejména tepelné izolace vnějšího pláště pece a tak snížení teplotního gradientu, který vedl k napětí a praskání. Zároveň i poměrně chatrná obezdívka poskytla dostatečnou mechanickou oporu již rozpraskaným částem pece. Po obezdění pec již dále nepraskala (praskání je doprovázeno charakteristickým zvukovým projevem). Hrudní část pece jsme ochránili průběžně doplňovaným a opravovaným omazáním hlínou.

Do vsázky jsme použili komerční dřevěné uhlí – zkr. CHC; drcený rudný aglomerát – zkr. RA a přebrané kovnaté kousky z předchozích taveb – zkr. OLD.

Při dodržení standardního třífázového průběhu tavby s dohořením do druhého dne bylo zahájeno pravidelné sázení dřevěného uhlí a po celou dobu tavby byla udržována rychlost cca 4,3 kg dřevěného uhlí za hodinu. První vsázka rudy přišla 78 minut po zahájení pravidelné vsázky. Struktura sázení byla udržována: 0,5 kg CHC + 0,5 kg OLD; 0,5 kg CHC + 0,5 kg RA; 0,5 kg CHC. Na 1 kg kovonosné

vsázky tedy bylo 1,5 kg dřevěného uhlí. Celkem bylo vsazeno 6,5 kg OLD a 6,5 kg RA. Celková kovonosná vsázka činila 13 kg. Po poslední kovonosné vsázce bylo pod dmýchaným vzduchem přisazeno ještě dalších 5 kg CHC. Celková spotřeba paliva na tavbu činila 41,5 kg.

Rychlost hoření vztažená na dm^2 průřezu šachty (cca $9,5 \text{ dm}^2$) je $0,42 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{dm}^{-2}$ CHC.

Následující den byla pec otevřena a pracovním otvorem byla vyňata houba. Po hrubém otlučení strusky zůstal kus o hmotnosti cca 2,9 kg. Velmi hrubý výtěžek byl tedy asi 22 %. Následným zpracováním se tato hodnota dále snižuje.

J-08-3

Tavba konaná v peci s tenkou hrudí (P.II) dne 17. 5. 2008 jako demonstrace pro veřejnost. K dmýchání vzduchu bylo proto využito výhradně jednočinného ručního měchu. Do vsázky jsme opět použili komerční dřevěné uhlí; drcený rudný aglomerát a přebrané kovnaté kousky z předchozích taveb.

Standardní průběh tavby zahájil po zaplnění pece hodinový přehřev, při kterém bylo přisazeno 2 kg CHC. Následovaly pravidelné vsázky v poměru 1 : 1 CHC a kovonosné vsázky při střídání RA-OLD. Zachována byla rychlost hoření 2 kg CHC.hod⁻¹. OLD po čtyřech 0,5 kg vsázkách došla a pokračovaly proto dále již jen RA. Celkem činila hmotnost kovonosné vsázky 7 kg (2 kg OLD a 5 kg RA).

Dohořívání probíhalo více jak hodinu do otevření pece a bylo spáleno dalších 3,5 kg CHC. V rámci předvádění byla pec otevřena. Struska se při otevření nacházela v polotuhém stavu, neschopná odpichu. Po zvážení měl hlavní, jen velmi zhruba očištěný kus hmotnost 4,5 kg. Následující zpracování teprve ukáže skutečný výtěžek.

J-09-01

5. 5. 2009, pec P.I. Tavba byla zahájena v odpoledních hodinách intenzivním vypalováním dřevem. Po prvním zazdění si pec vyžádala opravu, takže byla konečně zaplněna až po uplynutí 1 a $\frac{3}{4}$ hodiny od zapálení a připojena na plný výkon ventilátoru. Kompletní náplň pece činila 8 kg uhlí. Poté byl i z přední strany k peci přihrnut písek jako tepelná izolace. 17:15–18:30 probíhal přehřev, při kterém bylo spáleno celkem 5 kg dřevěného uhlí (dále jen CHC) – tedy za 75 min. V 18:44 byla přisazena první dávka rudy (pražený hematit) a pokračovalo pravidelné přisazování rudy a CHC v hmotnostním poměru 1 : 1. Dávky byly navažovány po 0,5 kg. Celkem bylo do 22:12 přisazeno 10 kg rudy a 10,5 kg CHC. Následovalo vyhořívání při stále zaplněné peci a ventilátoru do 23:58, kdy byl ventilátor odstaven. Pec byla ponechána pozvolnému dohořívání do dalšího dne a byla vylomena 6. května v 10:00. Samovolné dohořívání trvalo 10 hodin. Vytažená houba nebyla dokonale separovaná od strusky a vytvořila spolu se struskou bochník. Ten byl v dílnách TMB rozřezán úhlovou bruskou na poloviny. I. polovina váží 3,287 kg, II. polovina 2,837 kg, celkem tedy 6,124 kg. Pokud by hmotnost železa činila 50 %, potom by se jednalo o výtěžek cca 3 kg. S touto hmotností budeme dále počítat.

J-09-02

7. 5. 2009, pec P.I. Pec zazděna a zapálena s připojeným ventilátorem v 10:54. 11:15 je pec zcela zaplněna CHC a začíná přehřev. V 12:19 byly pro kontrolu zapáleny kychtové plyny jako indikace teploty hoření. Přehřev trval do 12:24 a celkem při něm bylo spáleno za 69 minut 6 kg CHC. Ve 12:28 došlo k první vsázce vlastního separovaného strusko železného odpadu (dále jen OLD). Následovaly střídavě

vsázky pražené rudy a OLD v celkovém hmotnostním poměru kovonosné vsázky a CHC 1 : 1. Poslední vsázka rudy byla provedena v 18:32. OLD bylo vsazeno celkem 7,5 kg a rudy 8,5 kg, dohromady tedy kovonosná vsázka činila 16 kg. V 14:05 byla provedena inspekce, struska se sice lepila na tyč, ale odpich se nezdařil. Úspěšně proběhl odpich strusky v 16:19, kdy bylo získáno celkem 1,25 kg strusky. Další menší odpich následoval v 17:44. Pec byla po hodinovém dohořívání (pec pod ventilátorem a udržována plná) vylomena ve 20:27. Ihned byla provedena základní separace železného kusu od tekuté strusky a první kování dřevěnou palicí. Získaný železný kus měl hmotnost 2,2 kg a po dalším kovářském zpracování (JK-09-01) byl získán polotovár o hmotnosti 450 g.

J-09-03

8. 5. 2009, pec P.II. Tato tavba byla vedena výhradně s rudou z nálezů u lomu Mokrá-Horákov (Fojt 2008) bez míchání s OLD. Pec byla zaplněna a pod plným ventilátorem v 11:35 a poslední vsázka přehřevu CHC byla zapsána v 12:18. Celkem bylo spáleno 4 kg CHC za 43 min. V 12:14 se samovolně nad pecí vzhály kychtové plyny se slyšitelným pafnutím. V časovém úseku 12:22-15:59 je rovnoměrně přisazována ruda a CHC. Celkem bylo zpracováno 21 kg rudy. Odpichy strusky byly provedeny v časech 14:05, 15:20 a 16:03. Zaplněná pec byla udržovaná pod větrem ještě do 16:30, kdy byla naposledy odpuštěna struska. Pec byla ponechána postupnému chladnutí a byla vylomena následující den v 10:30. Samovolné dohořívání trvalo 18 hodin. Výsledkem byla velmi dobře separovaná železná houba o hmotnosti cca 5 kg. Houba byla ihned postoupena týmu kovářů k dalšímu zpracování (JK-09-02). Získána byla nakonec houska o celkové hmotnosti 1,9 kg.

J-09-04

9. 5. 2009, pec P.III ž – Želechovice. Tavba opět využívá praženou hematitovou rudu. V 9:15 zapálení pece a topení dřevem na přirozený tah. 10:14 pec zaplněna a zahájeno dmýchání ručním měchem. 10:46 uzavřen vodorovný kanál pece. Přehřev byl dokončen v 11:09 poslední samostatnou vsázkou CHC. Přehřev celkem 3,5 kg CHC za 33 min. 11:13 až 15:41 rovnoměrné přisazování, celkem přisazeno 17,5 kg rudy. Dále pec dohořívala zaplněná pod větrem do 16:28, kdy byla otevřena. Při pokusu o zhutnění se houba rozpadala a nakonec z ní zůstalo cca 20 větších kousků. Vzhledem k tomu považujeme tuto tavbu za „neúspěšnou“. Výtěžek po nadrcení a přebrání znovu použijeme jako vsázku.

J-09-05

19. 9. 2009, pec s označením P.I po malé opravě pracovala bez potíží. V 13:12 došlo za stálého dmýchání k zaplnění pece. Přehřev probíhal od 13:21 do 14:07, spáleno bylo 7 kg CHC za 48 minut. Měkčí smrkové uhlí z mířně subjektivně velmi rychle hořelo. V časovém úseku 14:12 až 16:21 jsme rovnoměrně přisazovali rudu (celkem 8 kg) a okuje (6 kg), bylo tedy zpracováno 14 kg kovonosné vsázky. Do 16:57 dohořívala pec pod větrem a následně byla ihned vylomena. Struska byla nápadně tekutá a zateklá i kolem štítku z vnější strany. V důsledku toho také došlo k velmi dobrému vyseparování železné houby o hmotnosti 3,5 kg.

J-09-06

20. 9. 2009, pec s označením P.II. Pec zaplněna v 9:45 a přehřívána od 10:01 do 10:42. Celkem 5,5 kg CHC za 41 min. Rovnoměrné přisazování 10:50 až 12:39. Vsazeno 7,5 kg rudy a 5 kg okují. Pec dohořívala

plná pod větrem do 13:00. Následně byla vylomena a houba byla stejně jako v předchozí tavně nahrubo zpracována dřevěnou palicí s využitím její vysoké teploty.

Kovářské zpracování

Vzhledem k nulovým předchozím zkušenostem s kovářským zpracováním jsme se nechali inspirovat popisem G. Agricoly: „...pak ji [železnou hmotu] s pomahači vylomí sochory z nístěje, shodí na zem, a buší do ní dřevěnými kladivy s tenkými rukověťmi, dlouhými pět stop, aby otloukli strusku dosud na ní lpící, železo stloukli a vykovali.“ Tedy pokud jsme vylomili kus železa, pokusili jsme se jej prvotně zhutnit a otlouci strusku dřevěnou palicí. Tento na zemi před pecí prováděný postup se osvědčil zejména u posledních dvou taveb J–09–05 a J–09–06, kde jsme takto získali dobře očištěné a mírně zhutněné kusy.

Další kování jsme v jednom případě prováděli sami (JK–08–01), ostatní jsme ponechali na skupině kovářů, která se zde sešla, a s výjimkou posledního kování jsme do procesu zpracování nijak nezasahovali a ponechali jsme vše na jejich řemeslném instinktu. Spíše jsme pozorovali a naslouchali „řečem“, které kováři vedli.

U posledního kovaného kusu (JK–09–02) jsme kováře požádali o vykování bochníkovitého tvaru a jeho následné naseknutí tak, aby se produkt tvarově přiblížil autentickým nalezeným lupám.

JK–08–01

Zpracování J–08–01. Prováděno bylo po vyhřevu v improvizované kovářské výhni bez archeologického vzoru. Tato výheň byla používána i při všech následujících kovářských pracích. Zdrojem vzduchu byl válcový kovářský měch se zásobníkem ze sbírek TMB. Výsledkem byl kus, zatím ještě nedokonale zhutněný, ale prostý makroskopické strusky. Výsledná hmotnost produktu je 1,55 kg.

JK–08–02

Pokračování zpracování J–08–01. Neovlivňovali jsme kováře ve volbě tvaru polotovaru.

Kus byl opakovaným ohřevem a kovářským zpracováním zpracován do hranolu. Poté jej kováři 1× přeložili a svařili po způsobu výroby damasku. Z polotovaru byl odseknut vzorek pro provedení metalografických výbrusů, ten kovář ohřál na kalicí teplotu a zakalil do vody. Kovář též provedl jednoduchou zkoušku pilníkem a podle jeho odhadu se ve vzorku vyskytují měkké i zakalené části. Lze tedy očekávat alespoň částečné nauhličení železné houby v peci (v oxidační atmosféře kovářské výhni dochází spíše k procesu opačnému a jak se ukazuje, i k velkým ztrátám). Vzorek bude po dohodě předán některému spolupracujícímu ústavu na provedení metalografie a měření tvrdosti. Konečná hmotnost produktu je 0,55 kg – ztráty při zpracování jsou tedy stále velké.

JK–09–01

Zpracování produktu tavně J–09–02 o původní hmotnosti 2,2 kg. Kovářským zpracováním byl získán polotovar o hmotnosti 450 g.

JK–09–02

Zpracování produktu tavně J–09–03, jejímž výsledkem byla železná houba o hmotnosti cca 5 kg. Kovářským zpracováním jsme získali housku o celkové hmotnosti 1,9 kg.

Vyhodnocení výsledků

Výtah základních údajů taveb je uveden v tabulce 4. Prosté srovnání číselných hodnot bez kontextu měnících se podmínek experimentů nepovažujeme za vhodné, a proto také nebudou vyhodnocovány statisticky.

Jako méně zdařilé jsou (pochopitelně) tavby J-08-03 a J-09-04, které byly koncipovány jako prezentace pro veřejnost a řízeny byly tak, aby v určenou hodinu bylo možné předvést vylomení pece. Rovněž se tyto tavby liší prakticky výhradním použitím ručního měchu, se kterým bývají častější komplikace a je obtížně dodržován pravidelný rytmus dmýchání, neboť různí pomocníci dmýchají s nesterjnou intenzitou.

Tavby J-09-05 a J-09-06 byly vedeny s použitím měkkého dřevěného uhlí (smrk) vyrobeného při květnovém experimentálním výpalu.

J-09-03 byla vedena s autentickou rudou vytěženou v lokalitě „Studniční žleb“ v rámci záchranného výzkumu v těžebním území velkolomu Mokrá-Horákov.

Podstatnou překážkou je porovnání výsledků taveb v různém stupni zpracování či kompaktnosti. Takto jsou tu vedle sebe hrubě zpracované kusy železa s hrubou houbou nebo dokonce houbou spojenou s masou strusky, v jednom případě se houba při pokusu o hrubé zpracování rozdrobila. Technologicky zdařilejší výsledky jsou v tabulce 4 označeny tučně a podtržené, v závorce jsou naopak výsledky jen zhruba odhadované.

tavba	datum	pec	předehřev	[kg/h]	tavba	[kg/h]	dohořívání	%
J-08-01	14.5.2008	P.II	(34min/2,25kg)	3,97	111min/5,5kg	2,97	1h/10h	14,09
J-08-02	16.5.2008	P.I	78min/5,0kg	3,85	244min/19,5kg	4,80	1,5h/12h	22,31
J-08-03	17.5.2008	P.II	56min/2,0kg	2,14	200min/7,0kg	2,10	1,5h/vylomeno	(30,00)
J-09-01	5.5.2009	P.I	75min/5,0kg	4,00	208min/10,5kg	3,03	2h/12h	(11,00)
J-09-02	7.5.2009	P.I	73min/6,0kg	4,93	364min/16,0kg	2,64	2h/vylomeno	13,75
J-09-03	8.5.2009	P.II	47min/4,0kg	5,11	217min/21,0kg	5,80	0,5h/odpich/18h	23,81
J-09-04	9.5.2009	P.III ž	59min/3,5kg	3,56	268min/17,5kg	3,92	0,75h/vylomeno	(?)
J-09-05	19.9.2009	P.I	51min/7,0kg	8,24	129min/14,0kg	6,51	0,5h/vylomeno	26,00
J-09-06	20.9.2009	P.II	41min/5,5kg	8,05	109min/12,5kg	6,88	0,5h/vylomeno	21,44

Tab. 4. Přehled průběhu jednotlivých taveb.

tavba	datum	pec	vsázka	surová houba	% ₁	zprac. houba	% ₂	polotovar	% ₃	% ₄
J-08-01	14.5.2008	P.II	11,00	?		1,55	14,09	0,55	35,48	5,00
J-08-02	16.5.2008	P.I	13,00	2,90	22,31					
J-08-03	17.5.2008	P.II	7,00	2,13	30,36					
J-09-01	5.5.2009	P.I	20,50	3,00	14,63					
J-09-02	7.5.2009	P.I	16,00	?		2,20	13,75	0,45	20,45	2,81
J-09-03	8.5.2009	P.II	21,00	?		5,00	23,81	1,94	38,80	9,24
J-09-04	9.5.2009	P.III ž	17,50	?						
J-09-05	19.9.2009	P.I	14,00	?		3,64	26,00			
J-09-06	20.9.2009	P.II	12,50	?		2,68	21,44			

Tab. 5. Přehled výsledků jednotlivých taveb: 1) procento hmotnosti surové houby ke vsázce; 2) procento hmotnosti hrubě zpracované houby ke vsázce; 3) procento hmotnosti polotovaru k hrubě zpracované houbě; 4) procento hmotnosti polotovaru ke vsázce.

Kovnatost rudy a její vliv na výsledek tavby je znám a pracujeme proto s kvalitní rudnou vsázkou. Ruda ovšem ovlivňuje tavbu i svými fyzikálními vlastnostmi a složením příměsí. Nakoupená hematitová ruda je velmi hutná a pevná a teprve dobře vypražená je drtitelná. Hlavními příměsími jsou SiO_2 – 13,43 %, MgO – 4,05 %, CaO – 1,02 %. Ruda „Studniční žleb“ má podstatně méně hutný charakter a po vypražení se velmi snadno drolí. Vedle hmoty limonitu se zde vyskytovaly i částice vápence, což mohlo zásadním způsobem podpořit tvorbu strusky. Tato skutečnost nám bohužel v okamžiku tavby nebyla známa a nebyl uchován vzorek odpichové strusky pro stanovení složení. Lze tedy očekávat, že tato ruda je snadněji redukovatelná a současně se bude lépe separovat struska.

Vliv rychlosti hoření a průchodu vsázky šachtou. Protože obě pece P.I a P.II mají v úrovni vyústění dyzny stejný průřez, lze porovnávat přímo rychlosti.

tavba	Vp [kg/h]	η [%]
J–09–02	2,64	13,75
J–08–01	2,97	14,09
J–09–06	6,88	21,44
J–08–02	4,80	22,31
J–09–03	5,80	23,81
J–09–05	6,51	26,00

tavba	Vp [kg/h]	η [%]
J–09–02	2,64	13,75
J–08–01	2,97	14,09
J–08–02	4,80	22,31
J–09–03	5,80	23,81

Tab. 6. Vztah výtěžku a rychlosti hoření po dobu rovnoměrného přísazování. Seřazeno podle výtěžku. Varianta s a bez taveb J–09–05/06 vedených s odlišným typem dřevěného uhlí.

Korelace mezi rychlostí hoření a výtěžkem byla provedena podle lineárního vztahu $\eta = A + B \cdot V_p$. V případě použití všech šesti úspěšných taveb dostáváme vztah $A = 7,57$; $B = 2,55$ a korelační koeficient $r = 0,89$. V případě pouze čtyř taveb vedených s komerčním uhlím stoupá na $r = 0,99$ při $A = 4,38$ a $B = 3,48$. Vzhledem k malému počtu taveb a rozdílům ve zpracování (porovnáme zde železnou houbu bez a s prvním zpracováním dřevěnou palicí) budeme pouze konstatovat, že pozorovaná tendence v rámci této minisérie odpovídá známému vztahu mezi rychlostí hoření a výtěžkem (Stránský 2000).

Obě demonstrační tavby (J–08–03 a J–09–04) vedené s ručním měchem se jeví jako celkově slabší co do výsledku. Při porovnání rychlosti spalování se jedná o tavby nejpomalejší. Problematická je manipulace s měchem, dosud jsme nezvládli odpich strusky v kombinaci s použitím měchu. Na druhou stranu lze výtěžek těchto taveb po nadrcení a přebrání recyklovat v rámci další tavby.

Dvě poslední tavby (J–09–05 a J–09–06) využívaly měkké uhlí (smrk) pálené v mířích a vyznačovaly se vyšší rychlostí hoření, kterou jsme konstatovali subjektivně a která se potvrdila i při vyhodnocení zápisu průběhu tavby. Rychlost jsme posuzovali podle spotřeby dřevěného uhlí. Při předehřevu byla rychlost takřka dvojnásobná, po zatížení rudnou vsázkou se rychlost snížila, ale stále byla značně vyšší, než u taveb vedených s komerčním uhlím. Obě tavby proběhly za velmi podobných okolností a s velmi příznivým výsledkem.

Tavba (J–09–03) byla pozoruhodná zejména ojedinělou možností zpracovat autentickou rudnou vsázkou. Vsázka proto nebyla s ničím kombinována. Vzhledem k jinak optimálním podmínkám bylo dosaženo slušného výsledku a při zpracování 21 kg rudy byla získána houba o hmotnosti cca 5 kg. I po kovářském zpracování zůstává výtěžek s 1,94 kg velmi slušný a napovídá cosi o reálných možnostech produkce v těchto zařízeních.

Z hlediska dohořívání a ponechání houby v peci jsme používali oba postupy – okamžité vylomení i ponechání v redukční atmosféře po dobu delší než 10 hodin. Z praktického hlediska znamená možnost

poprvé kovat ještě žhavou houbu ihned po vytažení z pece značnou úsporu dřevěného uhlí. Zda využívali staří mistři delší ponechání houby v peci za účelem nauhličení, či cementovali až později polotovary vhodného tvaru, zůstává otázkou. Pochopitelně je možné zvažovat i možnost využití náhodných nauhličení či vedení tavby tak, že výsledný produkt je nízkouhlíkaté železo nebo uhlíkatá ocel.

Při tavných bylo několikrát provedeno měření teploty. Na jednom z vyobrazení je měření prostoru pece při vylomení dyznového štítku. Maximální povrchová teplota zde byla naměřena 1075 °C. Vhodnější metodika kontrolního měření bude připravena pro ročník taveb J-10-xx.

Kovářské zpracování prováděl kovář restaurátor Technického muzea v Brně Michal Truksa spolu se skupinou dobrovolníků – amatérských i vyučených kovářů. Množství spáleného uhlí je srovnatelné s množstvím uhlí použitým při tavně i vyšší. Jednoznačně se ukázalo, že zpracovávat 5 kg vážící houbu je značně náročné a lze předpokládat, že její rozdělení a následné kovářské svaření do jednoho polotovaru by mohlo být snazší i hospodárnější. Nabízí se zde možnost využití různě velkých výhní, to je však vzhledem k absenci nálezů v hutích pouze spekulací. V dalších sezónách se budeme pokoušet o zdokonalení této fáze výroby.

Metalografické hodnocení bylo provedeno u vzorku železa z tavby J-08-01 (Hošek, Merta, Barák 2010).

Otázky

Jak se lišila funkce vestavěné pece s tenkou hrudí a nadzemní šachtové pece s mělce zahluobenou nístějí? Obě zařízení byla nalezena vedle sebe v jedné dílně, a lze tedy očekávat jejich odlišnou funkci.

Jak bylo dosahováno žádaného nauhličení? Jedná se o náhodné výsledky nebo o cílevědomé ovlivnění kvality produktu? Souvisí tato otázka s nálezem dvou typů hutnických pecí v jedné dílně?

Jak byly konstruovány měchy a jak byl prováděn odpich pod měchem? Odpichový otvor je jen několik centimetrů pod zaústěním měchu dyznou do pece.

Jak provádět hospodárně další zpracování houby na polotovar? Ztráty železa i množství spáleného uhlí byly při kovářském zpracování obrovské.

Literatura

Fojt, B.: Mineralogická charakteristika lokality „Studniční žleb“ v katastru těžebního území velkolomu Mokrá, Ústav geologických věd PřF MU Brno 10. prosince 2008 – nepublikovaná zpráva.

Hošek, J. – Merta, J. – Barák, M.: Metalografický rozbor železného polotovaru z tavby v rekonstrukci pece s tenkou hrudí provedené 14. 5. 2008 ve Staré huti u Adamova. Rukopis 2010.

Pleiner, R.: Zpráva o pokusných tavných ocele ve staroslovanském typu železářské pece, kopie rukopisu v archivu dr. Souchopové.

Souchopová, V.: Hutnictví železa v 8.–11. století na západní Moravě, studie Archeologického ústavu AVČR v Brně, Brno 1986.

Souchopová, V.: Počátky západoslovanského hutnictví železa ve světle pramenů z Moravy, studie Archeologického ústavu AVČR v Brně, Brno 1995.

Souchopová, V. – Stránský, K.: Tajemství dávného železa. Archeometalurgie objektivem mikroskopu, Technické muzeum v Brně, Brno 2008.

Stránský, K. – Souchopová, V., – Merta, J.: Rekonstrukce pochodů přímé výroby železa z rud, Archo-

logia technica 11, Sborník přednášek z 18. semináře Archeologia technica – 13. Duben 1999, Technické muzeum v Brně, Brno 2000.

Tholander, E.: Experimental Studies on Early Iron-Making – Dissertation, The Royal Institute of Technology Department of Process Metalurgy, Stockholm 1987.

Jiřího Agricoly Dvanáct knih o hornictví a hutnictví, přeložili Ježek, B., – Hummel, J., Národní technické muzeum, Praha 1976.

Dodací list č. 001431, 1. 9. 2005, dodavatel: De-Metal, s.r.o., odběratel Královopolská Slévárna s.r.o.

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat všem, jež se podíleli na experimentálních tavnách. Vedle pracovníků TMB to byl zejména tým amatérských kovářů vedený muzejním kovářem Michalem Truksou: Jan Halbich, Jan Lokajíček, Tomáš Rudolf, Radim Topor a Pietro Urvi („umělecký“ pseudonym).

Také bychom chtěli poděkovat Petru Kosovi z Ústavu archeologické památkové péče v Brně za dodání autentické limonitické rudy.

Zkratky

V textu jsou použity zkratky, které jsme zavedli při zaznamenávání průběhu jednotlivých experimentů

CHC	dřevěné uhlí
OR	železná ruda
RA	rudný aglomerát
OLD	vlastní odpadní materiál – směs strusek s obsahem nespojených zrn železa

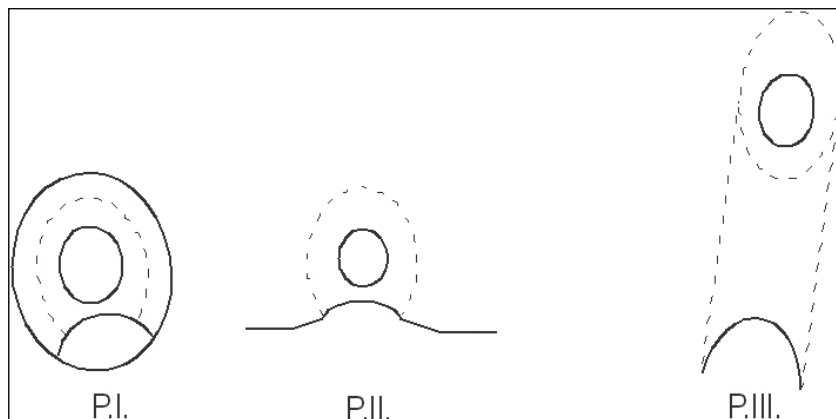
Tab. 7. Zkratky.

Značení taveb

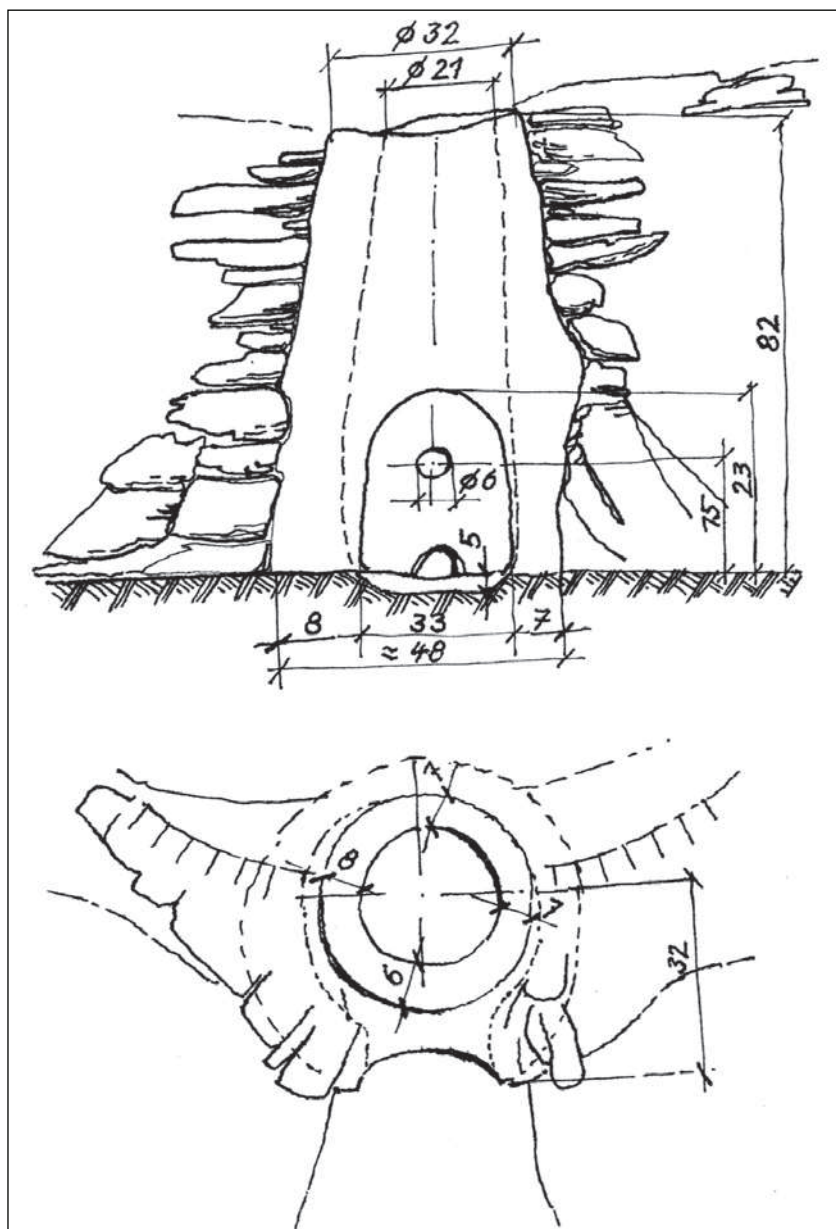
AA-99-99 – první skupina označuje místo konání a druh tavy (J – tava v Josefově, JK kování v Josefově – tedy Staré huti u Adamova). Druhá skupina – dvojčíslí označuje rok tavy. Poslední je pořadové číslo tavy v rámci jednoho roku. Pro J a JK jsou vedeny samostatné číselné řady.

Poznámka

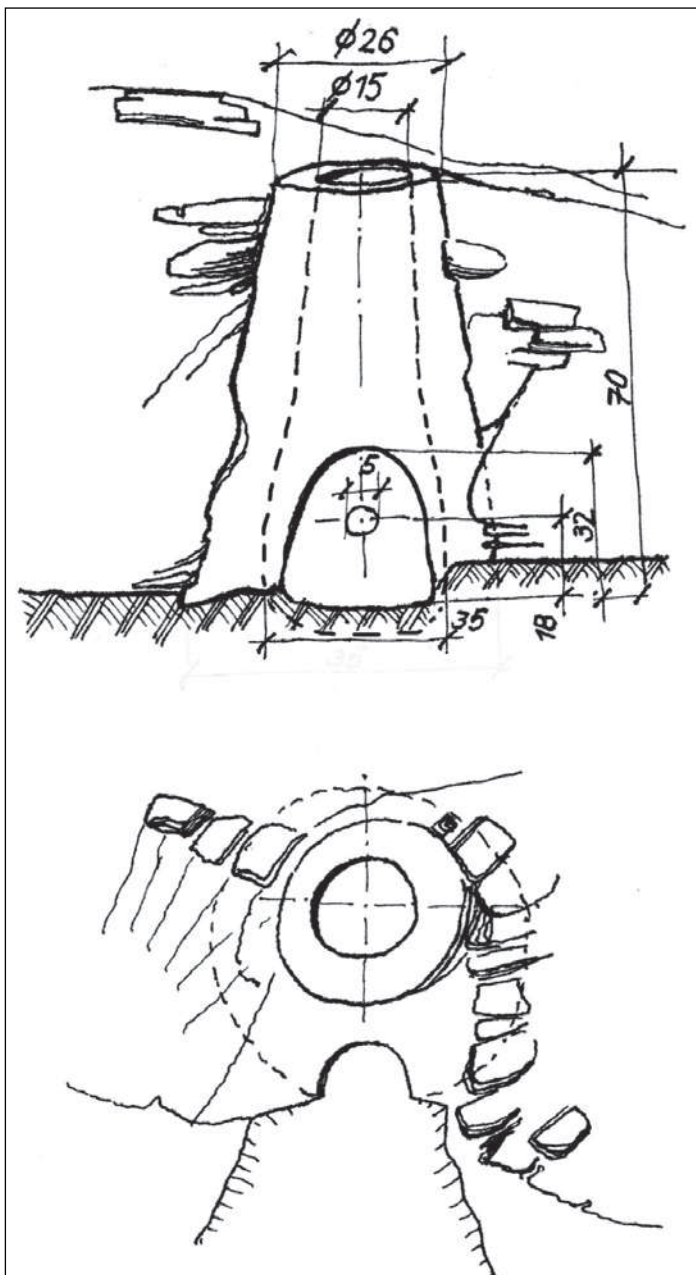
¹ Příspěvek byl na semináři Archeologia technica 28, 7. dubna 2009, přednesen pod názvem Praktické postřehy z výroby železa v rekonstrukci hutě z 9. století. Autoři se rozhodli doplnit text o poznatky získané během úspěšné kampaně roku 2009.



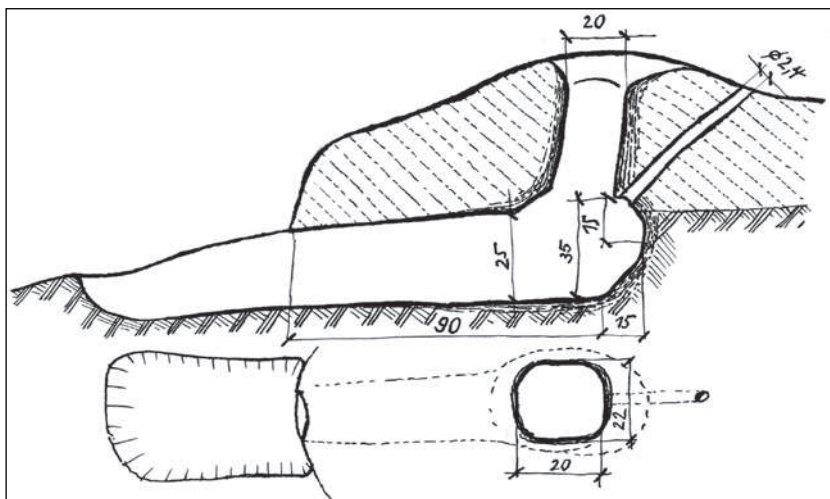
Obr.1. Schematické zakreslení uspořádání pracoviště s pecemi P.I, P.II a P.III.



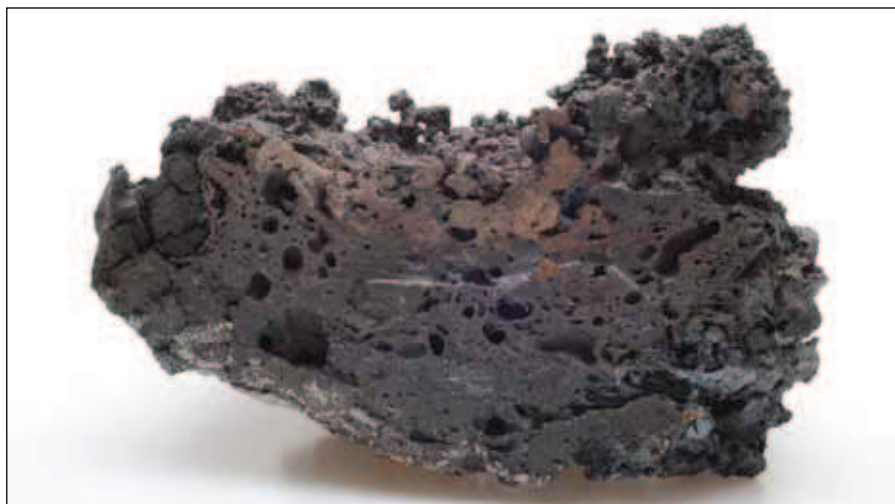
Obr. 2. Pec P.I – nadzemní šachtová pec s mělce zahlabenou nístějí. Stav v roce 2009 po vytvoření masivního zásypu zezadu a ze stran pece. (kresba Jiří Merta)



Obr. 3. Pec P.II – vestavěná pec s tenkou hrudí. (kresba Jiří Merta)



Obr. 4. Pec P.III – pec typu Želechovice. (kresba Jiří Merta)



Obr. 5. J-09-01 Polovina výtěžku (3287 g). Je patrné, že železo se neoddělilo od masy strusky. (foto Eva Řezáčová)



Obr. 6. J-09-01 Druhá polovina houby (2837 g). (foto Eva Řezáčová)



Obr. 7. J-09-02 Prvotní zpracování železa dřevěnou palicí ihned po vylomení z pece. (foto Jiří Merta)



Obr. 8. J-09-02 Polotovár vyrobený z jedné tavby (tvar volil kovář bez historických analogií). (foto Eva Řezáčová)



Obr. 9. J-09-03 Hrouda železa po vylomení z pece. Na pozadí pece P.I a P.II v pořadí zleva doprava (foto Martin Barák).



Obr. 10. Zpracovaný produkt tavby J-09-03 – bochníkovitý polotovár (JK-9-02). (foto Eva Řezáčová)



Obr. 11. J-09-04 Ukázková tavba se těší velkému zájmu. Jiří Merta při krátké přednášce před vyložením pece. (foto Martin Barák).



Obr. 12. J-09-05 Vylomení železné houby z pece. (foto Martin Barák)



Obr. 13. J-09-05 Polovina železné houby. Z řezu je patrné, že se při prvotním zpracování houby po vytažení z pece podařilo oddělit železnou houbu od většiny strusky. (foto Eva Řezáčová)



Obr. 14. J-09-06 Železná houba po prvotním zpracování. (foto Eva Řezáčová)



Obr. 15. Práce v kovárně.
(foto Martin Barák)



Obr. 16. Kování fáze 1: polotovár na dřevěném špalku – separace strusky a vytvoření kompaktního tvaru železa. (foto Martin Barák)



Obr. 17. Bochníkovitý polotovár JK-09-02 se zásekem na kovadlině. Díky nedokonalému prokování se bochník v místě záseku nakonec rozpadl. (foto Martin Barák)



Obr. 18. Bochníkovitý polotovár JK-09-02 „zezadu“. Je vidět oddělení obou částí v místě záseku. (foto Eva Řezáčová)



Obr. 19. Stav pecí v březnu 2010, vlevo nadzemní šachtová pec s mělce zahloubenou nístějí (pec P. I), vpravo vestavěná pec s tenkou hrudí (pec P. III). (foto Ondřej Merta)