

Pokusné tavby železa v polozahloubených šachtových pecích typu Podbořany

Jiří a Vojtěch Kmoškovi

Tento příspěvek obsahuje i popis Pokusu s výrobou dřevěného uhlí v milíři.

Série pokusných taveb probíhala s cílem ověření výrobního procesu železa, pomocí technických prostředků srovnatelných s daným historickým obdobím. Převážná část pracovních úkonů si zakládala na svém vlastním logickém úsudku, kdy samotné osvojování metalurgických zkušeností probíhalo formou praktického experimentování, na podobném principu jako při samotném vzniku a rozvoji metalurgie železa.

Všech dosavadních pět taveb bylo realizováno od srpna do listopadu 2007, převážně na zahradě areálu č.p. 8 v Sebranicích u Litomyšle v rekonstruovaných polozahloubených železářských zařízeních podle nálezu z laténského sídliště v Podbořanech¹.

Při záchranném výzkumu ve 40 letech min. st. zde byl objeven relikt menší železářské dílny s dvěma kompletně zachovalými výrobními zařízeními, datovaný podle keramických nálezů do poslední fáze laténského období. Pec I. byla postavena ze speciálního žáruvzdorného materiálu, vypáleného do běla. Nadzemní část pece ve tvaru dutého válce o vnitřním průměru 33 cm a o síle stěny 10 cm s mírně zaklenutou horní částí kychtového otvoru na průměr 20 cm. Celková výše zachovalé jílovité nástavby dosahovala 45 cm, vnitřní průměr šachty plynule přecházel do kotlovité nístěje o hloubce 50 cm. Vnitřní stěna pláště byla pokryta silnou vrstvou ztuhlé struskovité krusty. Ve vzdálenosti 170 cm se nacházela pec II., která byla zřejmě do tvaru či velikosti shodná s první, avšak nadzemní šachta byla z větší části narušena nešetrou exkavací. V šachtě byly obsaženy paliva, strusky a patrně i tvořící se železné houby. Součástí nálezu byla i keramická dyznová cihla (11 x 8,5 cm) o zachovalé délce 5 cm a vnitřním otvoru 2 cm, dosvědčující nutnost umělého přívodu vzduchu.

Proces výroby

Redukční zařízení rekonstruované za účelem vlastních pokusů výroby železa byly vesměs stavěny s časovým předstihem ze žáruvzdorné směsi, se složením ovlivněným místem výskytu. Zejména z hlavní složky jílů a spraše, ostřené pískem, kromě T2 byla použita sláma, nebo jiné traviny, zlepšující soudržné a izolační vlastnosti pece. Šachty pecí č. 1, 2 a 5 byly dodatečně z části zapuštěny do umělého terénu až po úroveň kycht. Těsně nad úrovní terénu byla do stěny pláště vodorovně vložena nepálená dyznová cihla, rekonstruovaná ze stejného materiálu jako plášť pecí, která mírně přečnívala do vnitřního prostoru zařízení. Zdrojem umělého přívodu vzduchu posloužily 2 typy jednočinných harmonikovitých měchů o přibližném objemu 40 l a 33 l, měch byl horizontálně napojen kovovým ústím přímo na dyznovou cihlu. Surovinový základ při tavebách tvořily dva druhy Fe rud, komerční a domácí dřevěné uhlí². Při tavebách č. 1.–4. byla použita železná ruda ve formě pelet, ze slévárny ve Žďáru nad Sázavou. Železorudný koncentrát Fe_2O_3 s obsahem 64 % Fe a malým množstvím škodlivých prvků byl drcen na maximální velikost lískového ořechu a z pokusných důvodů před T2 oxidačně pražen 2 hodiny v otevřeném ohni. Při T5 bylo použito přírodního hematitu o maximálním obsahu 25% Fe z povrchového zdroje ve Skuhrově nad Bělou. Ruda byla 1 hodinu oxidačně pražena a následně drcena. Samotný tavební proces se skládal ze tří částí:

- doba předehřevu
- aktivní období (přisazování Fe rudy a dřevěného uhlí)
- pasivní období (dohořívání a chladnutí obsahu pece)

¹ Radomír Pleiner – Základy slovanského železářského hutnictví v českých zemích. 1958; str. 117–120.

² O pálení dřevěného uhlí pro potřeby železářských pokusů více v kapitole Pokus s výrobou dřevěného uhlí v milíři.

Při první, přípravné fázi tavení se nistěj zaplnila slámou a většovím. Po dobu 1 až 2 hodin³ se pomocí umělého větru přehřívála pec pouze dřevěným uhlím. Při stálém hoření kychtových plynů se započalo s druhou fází – vkládání Fe rudy a dřevěného uhlí v konstantním poměru v 250 g vsázkách. Rychlost průchodu vsázky šachtou, byla úměrná rychlosti hoření dřevěného uhlí, které bylo ovlivněno množstvím přiváděného vzduchu. Průměrná rychlost průchodu Fe rudy činila v jednotlivých tavnách 4; 2,3; 3,1; 1,4 a 2,5 kg/h a průměrné množství přiváděného vzduchu s pomlkami, jedním měchem se pohybovalo okolo 100 dm³/min,³ až na T4, kde hodnota přibližně činila 50 dm³/min, zapříčiněná příliš malým otvorem v dyznové cihle. Celkem bylo vsazeno při jednotlivých tavnách 12; 13; 16; 7 a 14 kg Fe rudy, za přirozenou dobu chodu 5–6 h.³

Závěrečná fáze tavby (chladnutí) byla aplikována dvěma způsoby. Otevřené chladnutí T1 6,5 h, T2 1 h, T3 1 h 20 min. a chladnutí v redukční atmosféře po dobu T4 17 h 40 min a T5 10,5 h. Vyjmutí výsledného produktu jsme praktikovali také dvěma metodami. Vylomení pece a vyjmutí produktu u taveb 1, 2 a 3, tudíž se nemohlo opakovaně použít stejného zařízení k tavně. Druhá metoda spočívala v přesunutí nadzemní části pece mimo nistěj a pohodlné vyjmutí produktu tavby, kdy po menších úpravách zůstává zařízení použitelné pro opakované tavení. Vyjmutí produktu skrze dyznový nebo kychtový otvor a následné provedení oprav se nám tímto způsobem nedařilo, kvůli příliš malým rozměrům otvorů. Výtěžek ve formě houbovitého produktu byl docílen u taveb 2, 3 a 4. Při T2 vznikla houba menších rozměrů o váze 800g (viz. obr. 2.) vyredukováná v místě vyústění dmyšny. T3 poskytla zatím největší houbovitý výtěžek o váze 5,5 kg, rovnající se 34 % z množství vsazené rudy a velikosti opisující vnitřní šachtu v úrovni přiváděného vzduchu. Při T4 bylo docíleno největšího výtěžku ku poměru vsazené rudy – 2,95 kg / 42 % (viz. obr. 3.). Houba byla po přesunutí šachty lokalizována, natavená na stěně těsně nad vyústěním vzduchu. Tavná 1. a 2. poskytla pouze velké množství strusky, bohaté na železo.

Zpracování polotovaru

všechny tři houbovitě výtavky byly rozříznuty úhlovou bruskou na dvě poloviny pro účely pokusného kovářského zpracování a případného odebrání vzorků. Houby z taveb 2 a 4 jasně nasvědčovaly faktu, že v průběhu tavby vzniklo metalické železo. U výtěžku T3 není tento fakt úplně jasný. Kovářské zpracování všech tří polotovarů, ale potvrdilo domněnku, že netvoří-li metalické železo pospolitou kostru, dochází při následném ohřevu a kování k porušení soudržnosti houbovitého celku. Tudíž je houba v této formě kovářsky prakticky nezpracovatelná.

Závěr

Na základě zhodnocení výsledků a získaných parametrů taveb, lze poukázat na několik důležitých poznatků, které výrazně ovlivnily proces redukce. Na první místo bych radil jako významný činitel jakost a druh zpracovávané železné rudy, která výrazně ovlivňuje vznik železa. Dalším důležitým faktorem je i množství vháněného vzduchu s kterým přímo souvisí i rychlost průchodu vsázky šachtou. Je-li dmýchání příliš slabé, nedosahuje se tak vysokých teplot, tudíž i výsledek je menší, je-li naopak vzduchu přebytek, následkem zpětné oxidace nastává zbytečná ztráta železa, která přechází do strusky. Doba aktivního chodu pece je zároveň rozhodující při redukcí železné rudy. Ovlivňuje jednak množství vsazené železné rudy, tudíž i potenciační výtěžek, ale i čas při kterém jednotlivé kousky Fe rudy přicházejí do kontaktu s redukčním prostředím a ovlivňuje tak množství vznikajícího železa. Domněnka o efektivnosti pasivního údobí tavby⁴ se nám zatím při tak malých a rozdílných výsledcích taveb nepodařila potvrdit. Množství nauhličené železa, případně chemické složení železa a železné strusky potvrdí až chemické rozborý, kterými budeme v nejbližší době některé vzorky podrobovat.

Výsledky z těchto pokusných taveb dokazují, že v Podbořanském železářském zařízení lze pomocí nejjednodušších prostředků a s minimálními znalostmi chemických pochodů, poměrně jednoduchou cestou získat železo.

³ Přesné parametry uvedeny v tabulce 1.

⁴ Stránský, K. – Souchopová, V. – Merta, J.: Rekonstrukce pochodů přímé výroby železa z rud, Archeologia technica 11; s. 17.–18.

Pokus s výrobou dřevěného uhlí v milíři

Proces výroby dřevěného uhlí je vlastně tepelný rozklad dřeva bez přístupu vzduchu (ve skutečnosti s velmi malým přístupem vzduchu). Dřevo se skládá z mnoha látek, ale především z uhlíku, kyslíku, vodíku a dusíku. Po přeměně na dřevěné uhlí je toto složení asi 80 % uhlíku, 3 % vodíku a zbytek tvoří různé minerální látky původně obsažené ve dřevě.

Náš experiment probíhal 14.–19. 8. 2007 ve středisku experimentální archeologie Villa Nova Uhřetín pod Deštnou v Orlických horách. Pálení dřevěného uhlí probíhalo s cílem vytvořit surovinovou základnu pro železářské pokusy.

Milíř byl založen na přirozené terase v mírném svahu a na místě, kde již několik pálení dřevěného uhlí proběhlo. Námi vystavěný milíř byl kombinací středověkého typu milíře německého a alpského. Použili jsme dřevo různého stáří, kvality a také i různých druhů (buk, dub, borovice a smrk) o objemu cca 5 m³. Experimentu se zúčastnilo 6 osob.

Jako první věc jsme vytvořili hliněnou základnu pro stavbu milíře. Byla to kruhová plocha, sbíhající se mírně do středu ve tvaru kužele. Ze čtyř kůlů jsme vytvořili krále (středovou součást) a vyplnili ho suchým jehličnatým chřastím. Na dno milíře jsme vyskládali ve vodorovné poloze paprskovitě základnu z polen a naproti sobě byly vytvořeny 2 vzduchové kanály. Jednotlivé naštípané kusy dřeva jsme svisle obkládali natěsně kolem krále ve dvou vrstvách nad sebou. Dále jsme dřevěnou část milíře obložili drny a mezery byly zatěsněny hlinou smíšenou s mourem. Druhý den ráno jsme milíř zapálili vsypáním žhavých uhlíků do krále. Po rozhoření byl zacpán vrchní otvor a přístup vzduchu byl regulován spodními kanály. Milíř pak velice silně dýmil štiplavým kouřem do doby než byly veškeré falešné přístupy vzduchu utěsněny. Během 2. dne jeho prohořívání se na jednu stranu naklonil, ale byl okamžitě podepřen. Bylo neustále kontrolováno a usměrňováno hoření v milíři (vytváření a redukci vzduchových otvorů). Čtvrtý den po jeho zapálení už klesla výška na 1/3 své původní výšky a odpoledne byl milíř rozebrán. Celkem bylo tímto experimentem získáno 240 kg dřevěného uhlí. Cca 1,3 m³, zhruba 30 % výtěž.

Tento experiment považujeme v rámci našich tehdejších znalostí a technických možností za zdařilý.

Literatura:

DRAGOUN B. – MATOUŠEK V.: Archeologie ve středních Čechách 8, Praha, str. 727–772.

MALINOVÍ R. a J.: Vzpomínky na minulost; Ostrava 1982.

PLEINER R.: Základy slovanského železářského hutnictví v českých zemích; Praha 1958.

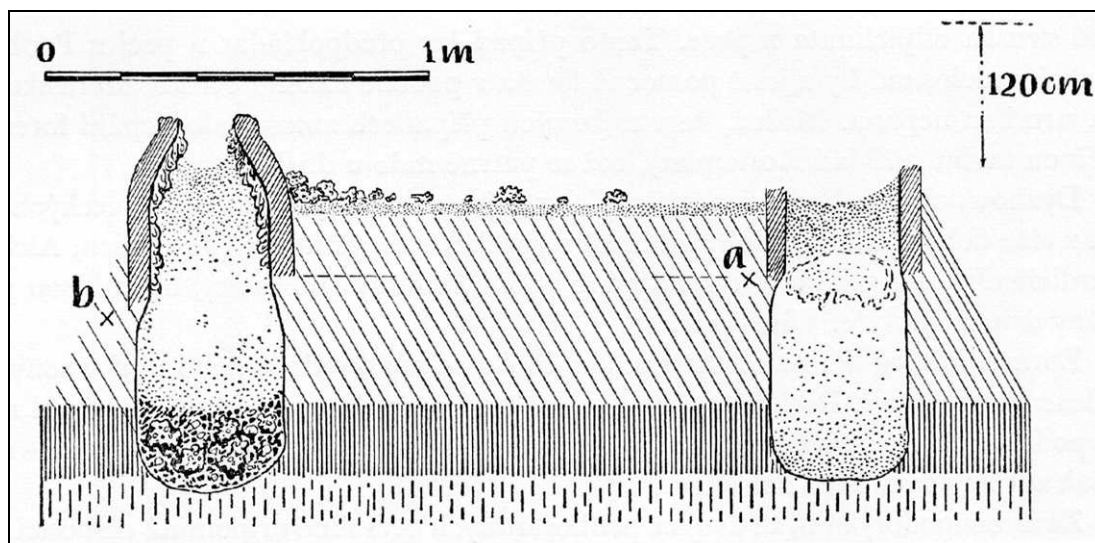
STRÁNSKÝ, K. – SOUCHOPOVÁ, V. – MERTA, J.: Rekonstrukce pochodů přímé výroby železa z rud, Archeologia technica 11, str. 12.–22.; Brno 1999.

Tabulka 1 Základní parametry jednotlivých taveb v polozahloubených šachtových pecích typu Podbořany

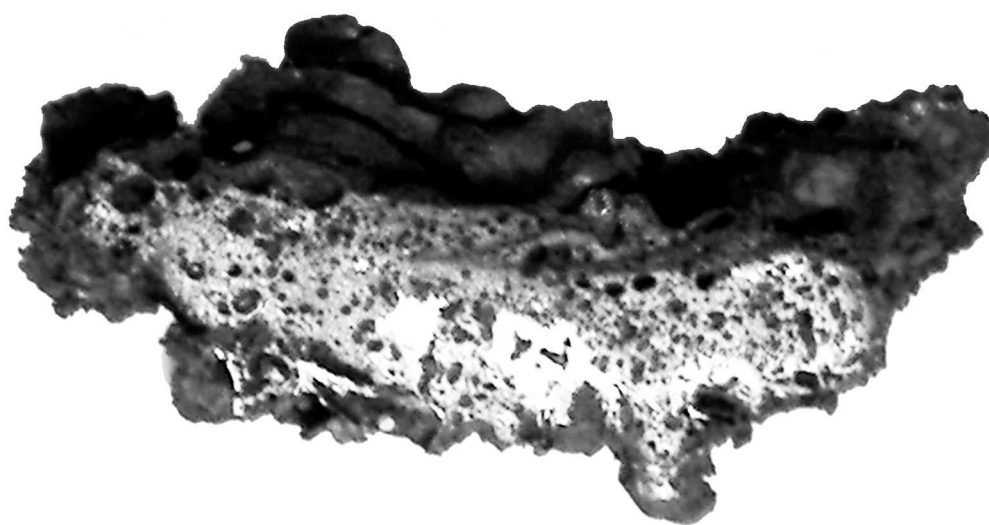
	5.8.2007	12.8.2007	18.8.2007	1.9.2007	13.10.2007
	T1	T2	T3	T4	T5
Výtěžek z množství vsazené rudy *	0 kg/0,00%	0,8 kg/6,20%	5,53 kg/34,60%	2,95 kg/42,10%	0 kg/0,00%
Průměrná rychlost průchodu ž. r. a paliva vsázkou	4kg/h	2,3 kg/h	3,1kg/h	1,4 kg/h	2,5 kg/h
Množství vsazené rudy	12 kg	13 kg	16 kg	7 kg	14 kg
Kovnatost rudy	89% Fe ₂ O ₃	89% Fe ₂ O ₃	89% Fe ₂ O ₃	89% Fe ₂ O ₃	20–30% Fe ₂ O ₃
Spotřeba dřevěného uhlí	20kg	26kg	30kg	19kg	24kg
Množství přiváděného vzduchu **	108 dm ³ /min	100 dm ³ /min	120 dm ³ /min	50 dm ³ /min	104 dm ³ /min
Doba přehřevu	1 h 30 min	2 h 10 min	1 h 50 min	1 h 15 min	1 h 5 min
Doba aktivního chodu pece	3 h	5 h 45 min	5 h 17 min	5 h 15 min	5 h 40 min
Doba pasivního chodu pece	6 h 30 min	1 h	1 h 20 min	17 h 40 min	10 h 30 min
Průměr pece v úrovni dyzen/průřez	37 cm/10,7 dm ²	35 cm/9,6 dm ²	35 cm/9,6 dm ²	30 cm/7,1 dm ²	30 cm/7,1 dm ²
Objem pece + nístěj	34dm ³ + 28dm ³	43dm ³ +26dm ³	30dm ³ +33dm ³	32dm ³ +50dm ³	32dm ³ + 40dm ³
* Houbovitý útvar, zbavený strusky, s nezaručeným množstvím metalického železa					
** Hodnota naměřena velice orientačně					

Tabulka 2 Kvantitativní analýzy vzorků strusky z R2 a R4

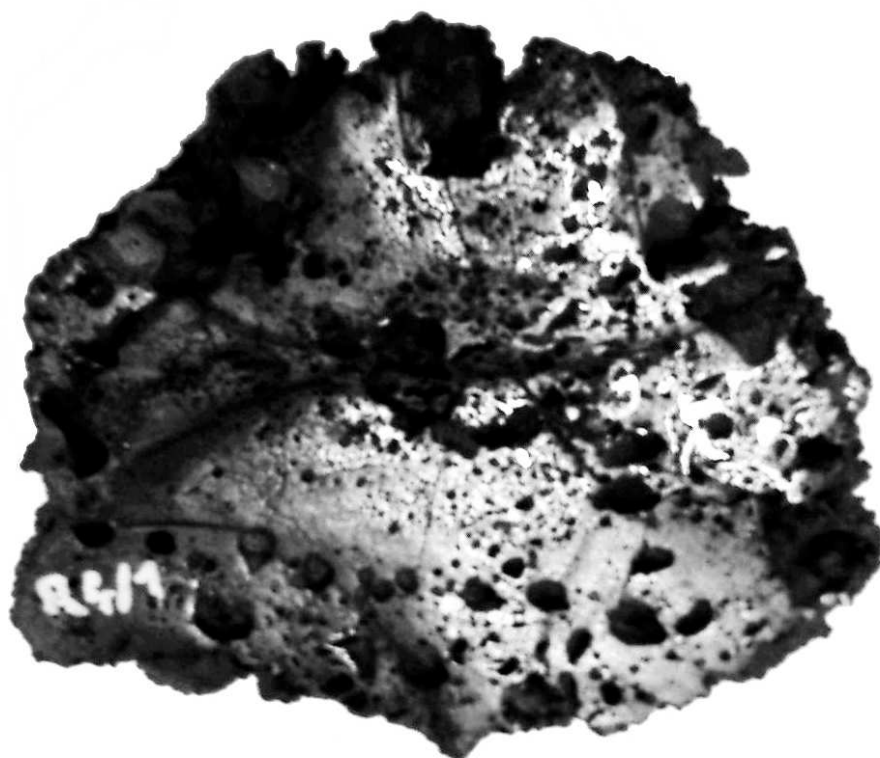
Složka	Ukazatel	Výchozí surovina	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Jednotka
Uhlík	C	0	0,08	0,08	0,13	0,25	hm. %
Oxid vápenatý	CaO	1,58	1,14	0,29	0,85	0,71	hm. %
Oxid hořečnatý	MgO	1,166	0,23	0,64	0,27	0,08	hm. %
Oxid křemičitý	SiO ₂	7,36	2,14	3,02	0,73	4,07	hm. %
Oxid hlinitý	Al ₂ O ₃	0,22	0,57	0,05	0,33	1,62	hm. %
Mangan	Mn	0,02	0,05	0,07	0,05	0,17	hm. %
Fosfor	P	0,007	0,06	0,03	0,02	0,09	hm. %
Síra	S	0,0089	0,03	0,03	0,04	0,05	hm. %
Železo	Fe	63,55	65,22	66,62	78,8	71,27	hm. %
Oxid železitý	Fe ₂ O ₃	88,85	95,36	95,67	97,37	91,84	hm. %
Oxid železnatý	FeO	1,72	–	–	–	–	hm. %
Oxid draselný	K ₂ O	0,15	0,28	0,03	0,11	0,53	hm. %
Oxid sodný	Na ₂ O	0,06	–	–	–	–	hm. %
Oxid titaničitý	TiO ₂	0,002	0	0,05	0,03	0,07	hm. %
Zinek	Zn	0,002	–	–	–	–	hm. %
Chrom	Cr	0,004	0,06	0,04	0,03	0,17	hm. %
Olovo	Pb	0,0001	–	–	–	–	hm. %
Chlor	Cl	0	0,05	0	0,04	0,35	hm. %
Vlhkost	Wrt	2,00	–	–	–	–	hm. %
Vzorek 1, 2 – Struska z R2; Vzorek 3, 4 – Struska z R4							



Obr. 1 Nálezová situace železářských pecí v Podbořanech (Podle Pleinera; 1958)



Obr. 2 Řez houbovitým produktem z tavby č. 2 (12 x 12 x 5 cm)*



Obr. 3 Řez houbovým produktem z tavby č.4 (17 x 20 x 17 cm)*

*Fotografie odpovídají nálezovým okolnostem v peci (přívod vzduchu veden vodorovně zleva)



Obr. 4 Sebranice u Litomyšle, experimentální železářská kusová pec typu Podbořany při práci



Obr. 5 Uhřínov pod Deštnou v Orlických horách, stavba milíře – král



Obr. 6 Uhřínov pod Deštnou v Orlických horách, stavba milíře



Obr. 7 Uhřínov pod Deštnou v Orlických horách, zapálený milíř před utěsněním



Obr. 8 Uhřínov pod Deštnou v Orlických horách, milíř před rozebráním



Obr. 9 Uhřínov pod Deštnou v Orlických horách, rozebírání milíře