

Rekonstrukce pochodů přímé výroby železa z rud

Karel Stránský, Věra Souchopová, Jiří Merta

Přímá výroba železa z rud představuje až dosud časově nejdelší období výroby železa a v českých zemích pokrývá rozpětí od konce pravěku až do začátku 17. století, kdy je vystřídána mnohem produktivnější výrobou nepřímou. Na území Moravského krasu je doloženo zpracování železa od údobí halštatu (tj. od 6. až 5. století před n.l.) až po současnost, i když vysoké pece a Adamově a Blansku vyhasly už ve třetí čtvrtině devatenáctého století. Oblast Moravského krasu je mimo jiné známá četnými archeologickými nálezy slovanských hutnických dílen a pecí z 8. až 11. století, které sloužily k přímé výrobě železa z rud. Je proto přirozené, že podobně jako v jiných zemích s obdobnou železářskou tradicí (Tylecote 1992), tak i u nás, a to přímo v brněnském a blanenském regionu, vznikly a uskutečnily se pokusy o oživení starých, dávno zaniklých hutnických technologií výroby železa v hutnických pecích rekonstruovaných na základě místních archeologických nálezů.

Takto byly nejprve uskutečněny pokusné tavby v nadzemních šachtových pecích podle nálezů na Olomučansku spadajících do 11. století a slovanského osídlení kraje, a také pokusy v šachtových pecích podle nálezů z 3. až 4. století v okolí Sudic a Pamětic na Boskovsku, spadajících do doby římské. Následně pak proběhly pokusné tavby ve vestavěných pecích s tenkou hrudí, a to podle nálezů datovaných do 9. století a odkrytých v olomučanském polesí.

Připomeňme si, že v uvedených typech pecí, používaných k přímé výrobě železa z rud, je hlavním redukčním činidlem oxid uhelnatý. Působením plynného oxidu uhelnatého, který v peci obklopuje povrch zahřáté železné rudy a vniká do jejích dutin a pórů, začíná redukce železa, již při teplotě nad asi 570 °C (Quadrat 1953, Myslivec 1971). Přímý redukční vliv uhlíku se sice může uplatnit již od teploty 700 °C, avšak pásmo jeho působení v uvedených typech pecí je úzké, více méně ohraničené pouze na blízké okolí zaústění dyzen do pece, takže doba jeho styku s povrchem železné rudy je krátká a jeho podíl na redukci oxidů železa je podřadný. Hlavní redukční účinek má proto plynný oxid uhelnatý. Ten vzniká nedokonalým spalováním a jeho přebytek v atmosféře spalin pece byl zajišťován mimo jiné také tím, že nistějí pece, nacházející se pod úrovní dyzen, byla před zapálením pece vyplněna dřevěným uhlím.

Další, nejčastěji se vyskytující příměsi železných rud, kterými jsou křemík a mangan (a přirozeně také hliník), chemicky vázané v rudě ve formě oxidů, nemohou být vyredukovány, neboť jejich redukce probíhá v oblasti vysokých teplot, kterých se v uvedených, jednoduchých typech šachtových pecí nedosahuje. (Quadrat 1953, Myslivec 1971). Za zvýšených teplot však může docházet v rudách obsahujících fosfor k částečné redukci fosforu, který se následně rozpouští ve vyredukováném kujném železe. Mikroanalýzou bylo při pokusných tavbách nalezeno ve vyredukováném železe místně jedno až dvě hmotnostní procenta rozpuštěného fosforu.

Železo vyredukované v popisovaných typech pecí a tvořící železnou houbu tak bývá, s výjimkou fosforu, velmi čisté, je však prostoupeno struskou, obsahující z více než dvou třetin oxidy železa. Zbytek oxidických podílů strusky obsažené v železné houbě tvoří nevyredukované oxidy křemíku, manganu a hliníku, dále část nevyredukováného fosforu a oxidické složky pocházející z popela dřevěného uhlí, nebo z případných přísad a z reakcí se stěnami pecí (například oxid hořečnatý, draselný, vápenatý aj.).

Během posledních více než 25 let bylo uskutečněno a moderními metodami dokumentováno šest taveb v nadzemních šachtových pecích (v letech 1972 až 1978 - Souchopová-Stránský 1983, 1989) a devět taveb ve vestavěných pecích s tenkou hrudí (v letech 1980 až 1986 - Stránský-Souchopová-Merta 1995), celkem tedy patnáct taveb, které po archeometalurgickém vyhodnocení a po konfrontaci s poznatky v odborné literatuře (Pleiner 1969, 1975; Tylecote 1992) umožnily poněkud přiblížit práci slovanských hutníků osmého až jedenáctého století.

Výroba železa z rud v šachtových pecích

První série taveb (čtyři tavby)

První čtyři pokusné tavby byly provedeny v rekonstrukci nadzemní šachtové pece s kotlovitě zahloubenou nistějí, jejíž části byly nalezeny při archeologickém výzkumu mladohradištní hutnické dílny v obci Olomučany u Blanska (Souchopová 1995, Souchopová-Stránský 1983, 1989). Protože se původní výš-

ka šachty v terénu nedochovala, byly postupně odzkoušeny výšky šachty od úrovně dyzen - 37 cm (I. tavba), - 51 cm (II. a III. tavba) a 80 cm (IV. tavba). Dyzny k dmýchání vzduchu byly zhotoveny ze šamotu a jejich vnitřní průměr byl 50 mm při světlosti 18 mm. Vnitřní průměr pece v úrovni dyzen činil asi 220 mm a směrem vzhůru, k vrcholu šachty se kuželovitě zmenšoval až asi na 180 mm. Hloubka nístěje měřená od úrovně dyzen byla přibližně 32 cm, takže celkové výšky pece, měřeno od dna nístěje po vrchol šachty byly přibližně odstupňovány v řadě 69 cm (I. tavba), 83 cm (II. a III. tavba) a 112 cm (IV. tavba).

Nadzemní šachta pece byla sestavena z mírně kuželových grafitových kelímků s odřezanými dny a pro lepší tepelnou izolaci byl od druhé tavby nasazován na kelímky ocelový plášť, přičemž mezera mezi ním a kelímkou byla utěsněna křemičitým pískem.

Vzduch do pece byl dmýchán dvěma dyznami pomocí ventilátoru o příkonu 0,25 kW. Měřením pomocí dvou sériově zařazených rotačních průtokoměrů bylo ověřeno, že šachtou pece projde 60 litrů dmýchaného vzduchu za minutu při jejím zaplnění dřevěným uhlím do výšky asi 30 cm. Uvedené množství vzduchu bylo při pokusech vztaženo na polohu regulační klapky přívodu vzduchu. Regulační klapka sloužila při jednotlivých tavbách k řízení mezniho množství vzduchu přiváděného do pece.

Vsázka do pece sestávala z komerčního bukového uhlí o velikosti vlašského ořechu až dětské pěsti a ze směsi dvou druhů železné rudy - místního, olomučanského limonitu s obsahem necelých 50 hm.% oxidu železa a ve zbytku s oxidem křemičitým, hlinitým a vápenatým, a z jakostního indického hematitu s malým (několikaprocentním) množstvím dalších příměsí. Železná ruda byla drcena na velikost hrachu až vlašského ořechu a před vsázkou upravena pražením.

Pro všechny čtyři i další tavby, které budou popsány, byl společný základní režim, který sestával ze tří údobí:

- 1) zapálení a předehtívání pece zaplňované pouze dřevěným uhlím (šlo o *přípravné údobí*);
- 2) rovnoměrného přísazování dřevěného uhlí a železné rudy při zachování přibližně konstantního poměru obou složek (*aktivní údobí*);
- 3) dohořívání a chladnutí pece až do vyjmutí železné houby (závěrečné, *pasivní údobí*).

Teplotní režim v peci, při stěnách pece přibližně v úrovni dyzen, byl udržován s maximy teplot v rozmezí 1140 až 1230 °C a s průměrnou teplotou v 2. údobí tavby 1035 °C a její střední odchylkou 64 °C. Plyny vystupující z šachty pece, byly krátce po zapálení a předehtání pece rovněž zapáleny, což bylo kritériem, že obsahovaly oxid uhelnatý, který zaručoval převládající redukční atmosféru uvnitř pece. Měření teploty bylo zajištěno termočládky a průběh teplot byl snímán zapisovačem.

První čtyři tavby proběhly ve školní slévárně Vojenské akademie v Brně počátkem sedmdesátých let. Měřitkem jejich hutnické (metalurgické) úspěšnosti byl poměr hmotnosti vyredukované železné houby k hmotnosti rudné vsázky, který byl označen jako *výtěžek*.

První tři tavby této série, které byly charakterisovány nižšími výškami nadzemní šachty, ve vsázce převládající místní, poměrně chudou olomučanskou železnou rudou (poměr hmotností olomučanské rudy k rudě indické byl ve sledu prvních tří taveb 5/1, 1/2 a 6/0), nízkou rychlostí průchodu přísazované železné rudy šachtou pece, ta činila v průměru 1,9 kg/hod. se střední odchylkou 0,6 kg/hod., přičemž železná houba byla vyjímána z nístějí asi po 17 hodinách, poskytly velmi nízký výtěžek. Ten byl v průměru nižší než asi 3 % železné houby prostoupené struskou z rudné vsázky. Poměr hmotnosti paliva a rudy byl přitom v pořadí taveb ~3/1, ~1/1 a ~1/2. Je zřejmé, že při tak nízkém výtěžku mohly být takto vedené tavby jen ztěžím hodnoceny jako úspěšné.

Teprve čtvrtá tavba této série, vedená v peci s celkovou výškou 112 cm, s převládající vsázkou indického hematitu (jeden díl olomučanské rudy na pět dílů rudy indické), při vyšší rychlosti spalování dřevěného uhlí a charakterisovaná více než trojnásobnou rychlostí průchodu rudné vsázky šachtou pece (7 kg/hod.), se ukázala jako úspěšná a poskytla výtěžek 31 % z přísazených 13 kg železné rudy.

Při této tavbě byla pec předehtívána asi 1 hodinu a vlastní tavba probíhala celkem 2 hod. a 45 min a poměr hmotnosti paliva a rudy byl v aktivním (druhém) údobí tavby 1/1. Po ukončení tavby byla pec i s vyredukovanou železnou houbou na vrcholu šachty přikryta žáruvzdornou cihlou a ponechána přes noc k samovolnému chladnutí. To trvalo v redukční atmosféře celkem 20 hodin a 15 minut. Při vybourání pece se nejvyšší teplota železné houby prostoupené struskou pohybovala ještě kolem 840 °C.

Metalografické analýze byly podrobeny vzorky železné houby z I. a IV. tavby. V okrajových částech železné houby se nacházely navzájem oddělené, nespojené částice kovového železa uložené ve strusce, tvořené převážně oxidy železa (z více než 70 %) a ve zbytku oxidem křemičitým, hlinitým a v malé míře několika procent oxidem vápenatým. Okrajová část houby byla velmi křehká a snadno se ulamo-

vala. Směrem ke střední části železné houby přecházely částice železa ve spojitou, poměrně pevnou a houževnatou kostru, s různým stupněm nauhličení. Nauhličení železné houby bylo velmi nerovnoměrné.

U I. tavby, se vyskytovaly ve struktuře železné houby oblasti od téměř čistého železa až do podeutektoidní koncentrace uhlíku a struktura byla feritická až feriticko - perlitická. U IV. tavby, měly některé oblasti nadeutektoidní koncentraci uhlíku, přičemž převládala struktura perliticko - feritická až perlitická se spojitým vyloučením sekundárního cementitu po hranicích původních austenitických zrn.

Druhá série taveb (dvě tavby)

Další dvě tavby byly vedeny v rekonstrukcích nadzemní šachtové pece z doby římské. Tento typ pece byl nalezen ve velkém hutnickém středisku z 3. až 4. století n. l. v Sudicích u Boskovic v počtu 134 nístěj. Rekonstrukce peci byla připravena z žáruvzdorného jílu, s vnitřními průměry šachet v rovině dyzen 450 a 380 mm a s výškami šachet nad úrovní dyzen 130 a 100 cm. Ve směru k vrcholu šachet se průměry obou pecí rovnoměrně kuželovitě zmenšovaly na 340 mm u první pece a 260 mm u pece druhé. Hloubky nístěj obnášely 27 a 35 cm, takže celkové výšky pecí měřené od dna nístějí byly 157 cm a 135 cm.

Tavby proběhly na nádvoří blanenského zámku koncem sedmdesátých let a vzduch byl do peci dmýchán ventilátorem dvěma dýznami. První tavba, u které byl poměr místní paměťkové rudy k rudě indické 6/0, rychlost průchodu rudné vsázky šachtou 3,8 kg/h, průměrná teplota v aktivním údobí při stěně pece v úrovni dyzen 1310 °C, poměr hmotnosti paliva k hmotnosti rudy v tomtéž údobí ~2/1, přičemž pec byla vybourána bezprostředně po ukončeném dmýchání vzduchu, neposkytla v podobě celistvé železné houby žádný výtěžek. Metalografickou analýzou feromagnetických úlomků strusky bylo zjištěno, že granule vyredukovaného (kovového) železa obsažené ve strusce byly pouze ojedinělé a v žádném případě netvořily celistvou, spojitou kostru.

U druhé tavby byl poměr hmotností místní paměťkové rudy k rudě indické 1/6, rychlost průchodu rudné vsázky šachtou pece 14,7 kg/hod, průměrná teplota v aktivním údobí 1010 °C, poměr hmotnosti paliva a rudy ~1/1 a pec byla vybourána krátce po ukončeném dmýchání vzduchu, stejně jako u předchozí tavby. Kleštěmi za žhava vyjmutá celistvá železná houba byla ihned po vyjmutí ochlazená ve vodě. Přitom bylo dosaženo výtěžku 13 % hmotnosti železné houby z přisazené rudné vsázky.

Metalografický rozbor této železné houby prokázal značně rozdílný stupeň nauhličení. V náhodně vybraných a oddělených granulích železa základní kostry železné houby, se obsah uhlíku pohyboval od stopových množství až po průměrné obsahy 2,4 hm.% se střední odchylkou 0,4 hm.%. Ze strukturních složek a fází byly přitom zjištěny: ferit, martensit, sekundární cementit a grafit. Existence grafitu ve struktuře takto vyrobené železné houby svědčí o tom, že během nauhličování vyredukovaného železa bylo v peci intenzivně působící redukční prostředí a teplota nad 1150 °C, takže během nauhličování došlo až k jejímu místnímu natavení. Po vyjmutí houby z pece a ochlazení pak proběhla krystalizace grafitického eutektika, které je charakteristickou složkou slévárenských surových želez. Pochod byl tedy veden tak, že byly vyrobeny granule surového železa (*Souchopová - Stránský, 1983*). Místní výskyt této tvrdé a křehké, a kování nepracovatelné struktury, která odpovídá struktuře šedé litiny, byl při přímé výrobě železa z rud nežádoucí, byl už ale zjištěn i při jiných experimentálních tavbách v podobných typech pecí (*Tylecote - Austin - Wraith, 1973*). Tento produkt byl původně hutníky označován jako *pig-iron*, nebo *swine-iron* (v českých zemích se ve slévárenství pro podobné zmetky dosud lidově používá označení *svině*).

Souhrnné hodnocení taveb v nadzemních šachtových pecích

Na základě zhodnocení výtěžků a technologických znaků obou sérií taveb v olomučanské i sudické variantě nadzemních šachtových pecí bylo poté možno také zhodnotit vliv parametrů, které příznivě ovlivňují velikost výtěžku železné houby vzhledem k rudné vsázce. Ukázalo se, že to je v první řadě jakost železné rudy, to znamená její kovnatost, dále rychlost průchodu rudné vsázky šachtou pece a s touto rychlostí těsně spojená rychlost hoření paliva (tj. dřevěného uhlí). Z porovnání vlivu geometrií olomučanské a sudické varianty šachtových pecí - vnitřní průměr šachty olomučanské pece byl až dvojnásobně menší než pecí sudických, pak bylo zjištěno, že spojovacím kritériem pro obě varianty pecí je rychlost průchodu rudné vsázky o příslušné kovnatosti šachtou pecí, přičemž tato rychlost je vztažena na průřez dané pece. S tímto parametrem je dále spojena odpovídající rychlost hoření paliva, která je vztažena opět na průřez uvažované pece.

Číselné hodnoty parametrů jsou vypočteny a uspořádány v tab.I. Výtěžek η je přitom možno vyjádřit v závislosti na dílčích parametrech V_p , Vir , Vdr a F empirickou funkcí ve tvaru

$$\eta = A + B(V_p.V_{ir}/F^2 + 0,5.V_p.V_{dr}/F^2) = A + B.P,$$

kde symbolem $P = V_p.V_{ir}/F^2 + 0,5.V_p.V_{dr}/F^2$, je označen souhrnný parametr uvedený rovněž v tab.I. V parametrické rovnici vyjadřuje konstanta 0,5, že v domácích rudách (olomučanské a pamětické) je přibližně poloviční koncentrace železa jako v rudě indické. Metodou nejmenších čtverců zjištěné konstanty této empirické funkce jsou $A = 0,001835$ a $B = 0,09699$, přičemž korelační koeficient má hodnotu $r = 1,00$ a je pro čtyři stupně volnosti, kterými je soubor šesti pokusných taveb charakterisován, silně statisticky významný.

Výroba železné houby ve vestavěných pecích s tenkou hrudí

Ve střední části Moravského krasu, v polesí Olomučany, bylo zkoumáno několik lokalit železářského hutnictví datovaných do 8. až 11. století. Z výsledků výzkumu těchto lokalit vyplynulo, že zdejší hutě z 8. a 9. století se vyznačovaly plánovitým uspořádáním vlastních areálů pracovišť, podle něhož je možno usuzovat na vysokou produktivitu práce tehdejších hutníků. Byla zde soustředěna velká hmotnost strusek a také velké množství dyzen. Zřejmě už tehdy šlo o specializované hutní výrobní útvary, kterými se tyto dílny odlišovaly, a to velmi zřetelně, od hutnických pracovišť následujícího 10. a 11. století.

Například plošně zkoumaná hutnická dílna z 9. století se nacházela na jižní terase, upravené v poměrně strmém svahu nad potokem v lesním oddělení 98/1-Olomučany. Okraj této dílny byl lemován odpadovými haldami železářských strusek, dyzen a zbytků nezpracovaných železných rud o celkové délce asi 7 m a výšce asi 0,9 m, což odpovídá asi 6,3 m³ odpadních a zčásti i vsázkových surovin. Při spyné hmotnosti asi 2000 kg/m³ se zde nacházelo přibližně 12,6 t převážně struskového odpadu.

Přitom je pozoruhodné, že v této hutnické dílně byly zjištěny dva typy pecí. Byly to nadzemní šachtové pece s mělce zahloubenými nístějemi (celkem pět pecí) a do rostlé zeminy vestavěné pece s tenkou hrudí (rovněž pět pecí). Čtyři z vestavěných pecí s tenkou hrudí byly zapuštěny do šikmých stěn jedné obslužné jámy a byly poněkud zahloubeny, zatímco pátá pec byla postavena odděleně. Byla taktéž zapuštěna do lavice rostlé hlíny, přičemž její hrudní partie, s výrazným a pečlivě provedeným formovým otvorem, byla vymodelována jen ze žáruvzdorné hlíny. Nístěj této pece se mírně skláněla ve směru k formě.

V rekonstrukcích převládajícího typu *vestavěných pecí s tenkou hrudí*, které byly postaveny podle zachovaných tvarů a rozměrů, bylo v osmdesátých letech uskutečněno celkem devět pokusných taveb (*Stránský - Souchopová - Král - Čípek, 1985; Stránský - Souchopová, 1993*). Vnitřní prostor těchto pecí se podle nálezů v terénu přibližuje tvaru visící hrušky s rovně odříznutým vrchlíkem a takto byl též pro pokusné tavby modelován. Výška pece připravené k pokusným tavnám, se pohybovala, měřeno od dna po ústí šachty, v rozmezí 650 až 750 mm a rozměry eliptického průřezu nístěje v úrovni zaústění dyzny kolísaly v rozmezí $d_1 = 370$ až 400 mm, při konstantním $d_2 = 340$ mm. Průměr vnitřního otvoru dyzny byl u prvních šesti taveb 26 mm, u zbývajících tří 18 mm a úhel odklonu dyzny od horizontální roviny se pohyboval mezi 2 až 4 úhlovými stupni. Osa dyzny přitom směřovala přibližně do středu zaoblené části hrušky. Průměr otvoru pece při ústí šachty činil 140 až 160 mm.

První série taveb (tři tavby)

První série tří taveb v rekonstrukcích těchto pecí proběhla na území zahrady blanenského zámku v roce 1983 a pec byla postavena přímo v terase terénu z žáruvzdorných jílu. Teplota v peci byla průběžně měřena termočlánkem typu chromel-alumel, umístěným v rovině ústí dyzny na její protilehlé straně. Vzduch do pece byl dmýchán ventilátorem a regulován škrtkou klapkou. Železná houba byla po ukončeném pochodu vyjímána kleštěmi tak, že se nejdříve vylomila dyznová cihla. Ke vsázce byla používána brazilská ruda - hematit, s velmi malým obsahem příměsí.

Režim tavby sestával z již zmíněných tří údobí a tavby byly zahájeny předehříváním pece vyplněné dřevěným uhlím s průměrnou dobou předehřevu 1 hod. a 37 min., při střední odchylce 21 minut. Ve druhém - aktivním údobí byl poměr hmotností paliva a rudy odstupňován v pořadí taveb 1/1,2, 1/1,8 a 1/1,2, při průměrné teplotě všech tří taveb 1160 °C se střední odchylkou 150 °C a průměrném trvání aktivního údobí 1 hodina a 43 minut, při střední odchylce 29 min. Délka třetího - pasivního údobí byla odstupňována v pořadí taveb 51 min., 50 min. a 1 hod. 45 min.

Množství zpracované rudy v tavnách činilo 11,0, 8,0 a 5,8 kg. Průměrná rychlost hoření paliva vztažená na průřez pece v úrovni dyzen činila 0,3022 kg/(h.dm²) při střední odchylce 0,1485 kg/(h.dm²).

Průměrná rychlost průchodu železné rudy vsázkou byla $0,4083 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$, při střední odchylce $0,1724 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$. Výtěžek železné houby byl za těchto podmínek poměrně nízký, v pořadí taveb 3,9 , 2,8 a 1,3 %, a v průměru 2,67 %, při střední odchylce 1,31 %. První sérii taveb tedy nebylo možno hodnotit jako úspěšnou.

Druhá série taveb (čtyři tavby)

Druhá série taveb zahrnovala čtyři tavby, které proběhly v letech 1982 až 1983 ve slévárně podniku ČKD Blansko a pec byla zhotovena pomocí předem připraveného děleného dřevěného modelu. Tento model a upravený formovací rám s otvory pro ústí šachty a dyznovou cihlu pak sloužily k výrobě dělené slévárenské formy. Dělicí rovina modelu i formy přitom procházela osou hrušky. K zaformování modelu bylo použito šamotové formovací směsi. Vysušená forma s dutinou pece byla po vyjmutí modelu sevřena svěrkami s klíny a postavena tak, aby *hruška pece* měla svislou polohu. Do boční stěny pece byly zabudovány po její výšce termočlánky typu chromel-alumel k průběžnému snímání teplot šestibodovým zapisovačem. Do vstupního otvoru pece byla zasazena šamotová dyznová cihla s kovovou dyznou, do níž byl zaváděn vzduch přímo z ústředního rozvodu ze sítě, s možností snadné regulace přiváděného množství.

Výhoda takového uspořádání spočívala v tom, že po ukončení tavně mohla být pec pomocí jeřábu skloněna do vodorovné polohy a po uvolnění klínů a svěrek bez porušení snadno otevřena. Vyjímání železné houby z pece i stanovení její polohy v peci tak bylo po ukončení tavně neobyčejně usnadněno.

Tavby byly zahájeny zapálením a předehřátím pece vyplněné dřevěným uhlím při průměrné době předehřevu 59 min., se střední odchylkou 26 min. Ve druhém - aktivním údobí byl poměr hmotnosti paliva a rudy odstupňován v řadě 1/1 , 1/1,3 , 1/1,3 a 1/1 při průměrné teplotě všech čtyř taveb $1159 \text{ }^\circ\text{C}$ se střední odchylkou $63 \text{ }^\circ\text{C}$ a průměrném trvání aktivního údobí 1 hod. 49 min., při střední odchylce 38 minut. Délka třetího - pasivního údobí byla odstupňována u prvních tří taveb 1 hod. 35 min, 1 hod. 29 min. a pouhých 46 min. u třetí tavně, zatímco u čtvrté tavně to bylo 22 hodin. Množství zpracované rudy v tavních činilo 16,0 , 14,0 , 17,5 a 20,0 kg. Průměrná rychlost hoření paliva byla $0,6919 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$ při střední odchylce $0,1389 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$. Průměrná rychlost průchodu rudy vsázkou přitom byla $0,6927 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$, při střední odchylce $0,3488 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$. Výtěžek byl za těchto podmínek u prvních dvou taveb 6,70 a 7,16 %, u třetí tavně, s nejkratší dobou dohořívání a chladnutí pece do vyjmutí železné houby z níštěje (46 min.) činil pouhých 1,80 % a u čtvrté tavně, s nejdelsí dobou dohořívání a chladnutí pece (22 hod.) obnášel 44,0 %.

Pokusy druhé série taveb tedy ukazovaly, že významný vliv na výtěžek má opět rychlost hoření paliva a rychlost průchodu rudy pecí s poměrně nízkou šachtou, avšak také doba, kterou setrvá již zčásti vyredukovaná železná houba v redukční atmosféře níštěje pece. Příznivě se také projevila celkově zvýšená hmotnost zpracovávané rudy, která byla u první série v průměru 4,6 kg na tavně a u druhé 16,9 kg na tavně. Podle tohoto předběžného závěru byly zvoleny podmínky série posledních dvou taveb.

Třetí série taveb (dvě tavby)

Třetí série taveb zahrnující dvě tavby se uskutečnila rovněž ve slévárně ČKD Blansko, a to v peci, která byla připravena stejným způsobem jako při předchozí sérii pouze s tím rozdílem, že k zaformování modelu pece bylo použito nevazné, křemičité chemicky tvrzené formovací směsi (označované jako CT směs) a nikoli, jako v předchozích případech šamotové, sušené směsi.

Tavby byly opět zahájeny zapálením a předehřátím pece vyplněné dřevěným uhlím při průměrné době předehřevu 38 min., se střední odchylkou 11 min. Ve druhém - aktivním údobí byl poměr hmotností paliva a rudy v obou tavních stejný, a to 1/1. Tavby probíhaly při průměrné teplotě $1070 \text{ }^\circ\text{C}$ se střední odchylkou $46 \text{ }^\circ\text{C}$ a trvání aktivního údobí 3 hod. 8 min. (první tavně) a 4 hod. 14 min. (druhá tavně). Při první tavně této série bylo zpracováno 20 kg, při druhé tavně 30 kg jakostní brazilské železné rudy. Délka třetího - pasivního údobí taveb se řádově odlišovala. U první tavně to bylo 19 hod. 55 min. (železná houba setrvala v redukčním prostředí pece přes noc) a u druhé tavně 1 hod. 12 min., což znamená, že houba byla z pece vyjmuta brzy po rovnoměrném přisazování paliva a železné rudy a po ukončeném dmýchání.

Průměrná rychlost hoření paliva v tavních byla $0,5369 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$ při střední odchylce $0,0395 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$ při střední odchylce $0,0395 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$ a při střední odchylce $0,0395 \text{ kg}/(\text{h}\cdot\text{dm}^2)$. Výtěžek byl za těchto podmínek u první tavně 46,5 % a u tavně druhé 31,7 %. Na výtěžku se přitom u obou taveb projevil příznivě vliv celkově zvýšeného množství zpracovávané železné rudy a nepříznivě kratší doba setrvání železné houby v peci v pasivním třetím údobí u druhé a poslední tavně.

Souhrnné hodnocení

Výsledné střední metalurgické parametry taveb vedených v rekonstruovaných vestavěných pecích s tenkou hrudí jsou uvedeny v tab.II. Z porovnání výtěžků železné houby vztažených na rudnou vsázku je zřejmé, že nejnižší výtěžky byly získány u první série taveb, v průměru 2,67 %, a nejvyšší výtěžky poskytla poslední, třetí série pokusných taveb, a to v průměru 39,1 %. Druhá série taveb poskytla výtěžky v rozmezí 1,8 až 44,0 %. Ve zmíněné tabulce II jsou uspořádány hlavní parametry redukčního pochodu, které se při souhrnném zpracování výsledku taveb projeví jako významné. Patří k nim parametr označený jako *rychlost hoření paliva (tj. dřevěného uhlí)* a obdobně označený parametr *rychlost průchodu rudné vsázky pecí*. Tyto dva parametry se ukázaly jako statisticky silně významné již u pokusných taveb v rekonstrukcích nadzemních šachtových pecí a proto byly u pokusných taveb ve vestavěných dýmačkách udržovány přibližně konstantní, a zvoleny podle analogie s předchozími pokusy (Souchopová-Stránský 1983). Parametry udávají množství paliva, popřípadě železné rudy, které se spotřebuje, popřípadě zpracuje za jednu hodinu na jeden decimetr čtvereční normovaného průřezu pece v rovině dyzen. Z hodnot v tabulce II. je patrné, že se u jednotlivých sérií taveb tyto parametry výrazně neměnily a jejich vliv na výtěžek proto není v daném souboru devíti taveb statisticky významný.

Ve srovnání s tím mají u vestavěných pecí s tenkou hrudí další dva parametry, označené jako *doba aktivního chodu pece* t_a (tj. doba rovnoměrného přísazování paliva a železné rudy - 2. údobí) a *doba pasivního chodu pece* t_p (tj. doba dohořívání a chladnutí pece až do vyjmutí železné houby), velmi silný vliv na výtěžek. Z tab.II. je patrné, že výtěžek roste jak s dobou aktivního chodu pece, tak s dobou pasivního chodu pece. Obě veličiny se postupně zvyšovaly, první s posloupností sérií taveb A, B, C: 1,55, 1,82, 3,68 hodin a druhá s posloupností sérií taveb A, B, C: 1,14, 6,45, 10,56 hodin.

Přítom vliv doby pasivního chodu pece, kdy je železná houba ponechána v redukční atmosféře uzavřené pece, vyplývá z porovnání průběhu taveb druhé série. U prvních tří taveb série B byla železná houba vyjmuta z pece krátce po ukončení dmýchání vzduchu a pravidelném přísazování paliva a železné rudy, u čtvrté tavy téže série byla železná houba ponechána v peci přes noc, to znamená asi 22 hodin. První tři tavy přitom poskytly nevelké výtěžky v rozmezí asi 2 až 7 %, zatímco čtvrtá tava poskytla výtěžek kolem 44 %.

Účinky doby aktivního a pasivního chodu pece na výtěžek železné houby byl ještě ověřen u poslední, třetí C - série taveb. U první z těchto taveb byla prodloužena doba aktivního chodu pece, avšak především se zvětšila doba pasivního chodu pece, a to asi na 20 hodin. Přítom bylo dosaženo výtěžku 47 %. U druhé z těchto taveb byla významně prodloužena doba aktivního chodu pece na více než čtyři hodiny, přičemž při zachování konstantních hodnot zbývajících parametrů bylo dosaženo poměrně dobrého výtěžku železné houby 32 %, a to i při poměrně krátké pasivní době chodu pece 1,2 hodiny.

Prodloužení aktivní doby chodu pece, to znamená druhého údobí, při zachování stejné průchodnosti paliva a železné rudy pecí, však zároveň znamená, že se zpracuje větší množství železné rudy a spálí více paliva. Například u poslední, třetí série taveb se vsázka jak železné rudy, tak i paliva zvýšila ve druhém údobí v pořadí taveb z 20 kg na 30 kg. Pokusné tavy tak ukazují, že u vestavěných pecí s tenkou hrudí bylo zapotřebí také zpracovat jisté minimální množství železnorudné vsázky k tomu, aby se dosáhlo dobrého výtěžku železné houby. Z pokusných taveb zároveň plyne, že prodloužení doby, po níž setrvává železná houba v redukční atmosféře pece, významně zvyšuje výtěžek celistvé železné houby.

Měrná spotřeba paliva, tj. dřevěného uhlí, byla při provedených pokusných tavebách svázána s výtěžkem železné houby, to znamená s parametry v tab.II, ke kterým patřily: doba aktivního chodu pece, doba pasivního chodu pece, rychlost hoření paliva, rychlost průchodu rudné vsázky pecí a celkové množství zpracované železné rudy včetně paliva. Vidíme, že s růstem výtěžku železné houby v pořadí sérií taveb A, B a C rostl výtěžek s posloupností 2,7, 7,9 a 39,1 % železa na rudnou vsázku, přičemž se snižovala měrná spotřeba paliva v pořadí 89,2, 26,4 a 4,68 kilogramů dřevěného uhlí na kilogram vyredukované železné houby.

Pokud hutníci postupovali při zpracování železnorudné vsázky podobným způsobem, potom dosahovali úspory paliva úměrně k dobrému výtěžku, který byl také svázán s jistým minimálním množstvím zpracované rudné vsázky. Při celkově malém množství zpracované železnorudné vsázky zcela přirozeně následovala vysoká měrná spotřeba paliva, neboť pec, šachta i mělká nístěj, byla zaplněna především dřevěným uhlím, které shořelo bez užitku, aniž by mohlo předat své teplo rudné vsázce.

Metalografická analýza vzorků železné houby vytavené ve vestavěné peci s tenkou hrudí ukázala, že železná houba je tím více nauhličena, čím déle setrvává v redukční atmosféře nístěje uzavřené pece. I když je velmi obtížné podat vskutku objektivní metalografickou charakteristiku železné houby vyreduko-

vané v jednotlivých pokusných tavnách, neboť tato houba je prakticky vždy co do rozložení uhlíku výrazně chemicky heterogenní a navíc prostoupená struskou, které obsahuje 15 až 25 objemových procent, zdá se, že uvedené pravidlo: *obsah uhlíku v železné houbě roste s časem setrvání železné houby v uzavřené peci*, se významně uplatňuje.

Vzorky odebrané z houby po dlouhodobém setrvání v redukční atmosféře nístěje pece jsou více nauhličený a mají téměř v celém objemu převážně perliticko-cementitickou strukturu, charakteristickou pro nadeutektoidní ocel, s četnými částicemi cementitu uvnitř původních austenitických zrn i po jejich hranicích (Stránský-Souchopová-Merta 1995). Naproti tomu vzorky odebrané z houby, která byla předčasně vyjmuta z pece, jsou méně nauhličený a mají převážně feriticko-perlitickou strukturu, která odpovídá podeutektoidní oceli a měkkému železu.

Ukazuje se tedy, že prodloužení údobí rovnoměrného přísazování paliva a železné rudy, spojené se zpracováním většího množství železné rudy i paliva a následně dlouhodobé setrvání železné houby za vysokých teplot v redukční atmosféře nístěje uzavřené vestavěné pece po ukončení tavby, vede k většímu výtěžku a k větší celistvosti vyredukované železné houby a také k jejímu celkově většímu stupni nauhličení. Nezbytně nutnými podmínkami jsou v takovém případě ještě: jistá minimální rychlost hoření paliva a jistá minimální rychlost průchodu železnorudné vsázky pecí a zcela samozřejmě její dostatečně vysoká kovnatost. Výsledným produktem tavby v redukční vestavěné peci s tenkou hrudí může být v takovém případě jakostní eutektoidní až nadeutektoidní ocel.

Podle číselných hodnot parametrů taveb ve vestavěné peci s tenkou hrudí, lze obdobně jako tomu bylo u nadzemních šachtových pecí, učinit pokus o kvantitativní vyjádření závislosti výtěžku na dvou nejvýraznější se uplatňujících parametrech taveb, kterými jsou u vestavěných pecí *doba aktivního chodu pece* - t_a a *doba pasivního chodu pece* - t_p . Průměrné výtěžky železné houby v jednotlivých sériích taveb A, B a C vztažené na rudnou vsázku byly metodou nejmenších čtverců korelovány podle empirické rovnice

$$\eta = A + B \cdot [t_a \cdot t_p] ,$$

kde zjištěné konstanty mají hodnoty $A = 0,02372$ a $B = 0,009556$ a korelační koeficient $r = 1,00$. Zároveň je pozoruhodné, že výtěžek η je úměrný průměrným hodnotám veličin t_a , t_p a m_r jednotlivých sérií taveb.

Souhrnný závěr

Na základě zhodnocení výtěžků a technologických parametrů taveb v olomučanské i sudické variantě nadzemních šachtových pecí (celkem šest taveb) bylo možno zhodnotit vliv parametrů, které příznivě ovlivňují velikost výtěžku železné houby vztažené k železnorudné vsázce. Ukázalo se, že to je v první řadě jakost železné rudy, to znamená její kovnatost, dále jistá minimální rychlost průchodu rudné vsázky šachtou pece a s touto rychlostí těsně spojená jistá minimální rychlost hoření paliva (tj. dřevěného uhlí). Za jinak stejných podmínek se výtěžek železné houby zvyšoval s rostoucí výškou šachty pece. Z porovnání vlivu geometrií olomučanské a sudické varianty šachtových pecí - vnitřní průměr šachty olomučanské pece byl až dvojnásobně menší než pecí sudických, pak bylo zjištěno, že spojovacím kritériem pro obě varianty pecí je rychlost průchodu rudné vsázky o příslušné kovnatosti šachtou pecí, přičemž tato rychlost je vztažena na průřez dané pece. S tímto parametrem je dále spojena odpovídající rychlost hoření paliva, která je vztažena rovněž na průřez uvažované pece.

Na podkladě zhodnocení průběhu a výsledků experimentálních taveb ve vestavěných pecích s tenkou hrudí, bylo možno usoudit, že tyto pece měly díky svému zabudování v rostlé půdě výbornou izolační schopnost a mohly tím plnit funkci vyhřívacích pecí i po zastavení dmýchání vzduchu. Dlouhým setrváním železné houby při poměrně vysoké teplotě v redukční atmosféře nístěje vestavěné pece, mohli tehdejší hutníci vyrobit v těchto pecích celistvou a nauhličenou železnou houbu - ocel, a to poměrně úsporným způsobem. Tím se vestavěné pece také odlišovaly od nadzemních šachtových pecí bez zahloubené nístěje, u kterých byla tepelná izolace nepoměrně horší. Zatímco u šachtové pece bylo zpravidla nutno železnou houbu (později kus, plik) vylomit krátce po ukončeném dmýchání, neboť rychle chladla, u vestavěných pecí mohla tato houba setrvat v nístěji pece, díky její výborné tepelné izolaci, nepoměrně déle za vysokých teplot, přičemž docházelo k jejímu difúznímu spékání, slinování a nauhličování.

Výsledky experimentálních taveb tedy potvrzují možnost výroby jakostní železné houby v uvedených typech pecí, které pracovaly na Blanensku a Boskovsku v období od 8. až 11. století a jsou zároveň

příspěvkem k rozsáhlým a četným teoretickým i experimentálním pracím R. Pleinera, specializovaným na oblast slovanského železářského hutnictví (1969; 1975).

Kovářské zpracování železné houby

K experimentům s kovářským zpracováním železné houby byla vybrána houba ze čtvrté tavby první série taveb uskutečněných v nadzemních šachtových pecích. Při této tavbě bylo do pece přisazeno celkem 7 kg železnorudné vsázky složené z 6 kg železné rudy importované z Indie a z 1 kg železné rudy olomučanské. Výtěžek této čtvrté tavby tvořily dva koláče železné houby o hmotnostech 0,73 kg (menší kus) a 1,41 kg (větší kus). Tavba proběhla, jak uvedeno, ve školní slévárně na Vojenské akademii v Brně v roce 1973. Kovářské zpracování obou kusů železné houby se uskutečnilo 8. října 1988 v kovárně tehdejšího JZD v Hroznatině na Třebíčsku a podjal se ho vyučený a zkušený vesnický kovář pan Josef Vrba (*1916) za asistence pana Václava Kafky (*1913) a prvních dvou autorů následujícího příspěvku (*Stránský-Šenberger-Rek-Kafka-Souchopová 1993*), který obsahuje podrobné údaje o kovářském zpracování této železné houby.

K ohřevu koláčů železné houby byla použita kovářská výheň s ventilátorem pro přívod vzduchu o příkonu cca 350 W. Jako paliva bylo ve výhni použito ostravské kovářské uhlí velikosti vlašského ořechu. Koláče železné houby byly nejdříve vloženy do roztopené výhně, aby se z nich odstranila struska a vyhořely zbytky dřevěného uhlí, které v ní zůstaly uzavřeny po redukcí v hutnické peci. U menšího koláče trvalo vyhřívání před vlastním kovááním 48 minut, větší koláč byl vyhříván 27 minut. Po této operaci vypadaly rozžhavené koláče železné houby podle slov vesnického kováře *jak prožrané od mravenců*.

Menší koláč železné houby byl kován na deset ohřevů i s meziohřevy celkem 42 minut, kdy se rozpadl na dvě části. Z nich větší díl byl poté vykovan na tři meziohřevy za deset minut do tvaru čtvercového průřezu o rozměrech cca 11x11x150 mm, menší díl pak na dva meziohřevy za devět minut do téhož tvaru o rozměrech cca 11x11x90 mm. Po vykování chladly oba díly volně na vzduchu. Větší koláč železné houby byl kován na šest ohřevů i s meziohřevy po dobu 29 minut, a to do tvaru kostky o hraně cca 30 mm. Po konečném vytvarování byla kostka ochlazená ve vodě. Po zvážení měly menší díly ve tvaru tyčí hmotnost 0,225 kg a hmotnost kostky činila 0,210 kg.

Během kováání bylo použito dvou základních kovářských operací, a to *pěchování a prodlužování a kovářského svařování z ohně*. Svařování z ohně probíhalo při světležluté až bílé barvě pěchované železné houby, což odpovídá teplotě svařované houby asi 1150 až 1300 °C. Ze svařovaných částí houby přitom mírně sršely jiskry. Ztráty okujením byly poměrně značné. Jestliže měly u menšího koláče o původní hmotnosti houby 0,730 kg dohotovené tyče hmotnost 0,225 kg, pak to znamená, že výtěžek kovářsky zpracovaného železa činil $(0,225/0,730) \cdot 100 = 30,82 \%$.

U většího koláče o původní hmotnosti 1,410 kg a hmotnosti vykované kostky 0,210 kg, činil výtěžek 14,89 % kovářsky zpracovaného železa. Z železné houby o původní celkové hmotnosti 2,140 kg tak bylo po vykování v průměru získáno 0,435 kg kovářsky zpracovaného železa, což je 20,33 %. Zbytek 79,67 % činí v daném případě ztráty odpadem okrajových částí houby, okujením, vyteklou původní hutnickou struskou a vyhořením zbytků dřevěného uhlí.

Uvážíme-li dále, že hutnický výtěžek železné houby čtvrté tavby v nadzemní šachtové peci činil 31,0 % (vztaženo na rudnou vsázku) a kovářský výtěžek čistého vykovaného železa 20,33 %, potom součin $0,310 \cdot 0,203 = 0,063$ udává výtěžek již vykovaného železa vztažený na původní rudnou vsázku nadzemní šachtové pece. Přepočteno na 100 kg směsi indické a olomučanské rudy v poměru 6/1, tak bylo možno získat 6,3 kg kovářsky zpracovaného železa.

Z vykovaných tyčí byly také odebrány vzorky k metalografické analýze. Touto analýzou byly ve struktuře zjištěny četné struskové vměstky protažené ve směru protváření. Struktura vzorků byla tvořena směsí perlitu a feritu. Jehlicovitý ferit, vyloučený na způsob Widmanstättenovy struktury měl přitom mikrotvrdot 250 HV_{0,02} a u polygonálního feritu byla změřena mikrotvrdot 138 HV_{0,02}. Hrubý lamelární perlit ve smíšené feriticko-perlitické struktuře měl mikrotvrdot 269 HV_{0,02} a mikrotvrdot jemného lamelárního perlitu v oblastech s eutektoidní koncentrací byla zmařena mikrotvrdot 310 HV_{0,02}.

Ve vykovaných polotovarech byla uskutečněna rovněž mikroanalýza struskových vměstků, jejíž výsledky byly porovnány s analýzou kovářské strusky a strusky hutnické (*Stránský – Šenberger – Rek – Kafka – Souchopová 1993*). Porovnání chemického složení hutnické redukční strusky, dále strusky z kovářské výhně a struskových vměstků ukázalo, že nejnižší koncentraci fosforu má *hutnická redukční struska* (0,0 hm.% P₂O₅), poté následuje *struska z kovářské výhně* (0,3 hm.% P₂O₅) a nejvyšší koncentraci fosforu obsahují *struskové vměstky* (0,6 hm.% P₂O₅). Obsah oxidu fosforečného ve struskových

vměstcích se zvyšuje následkem přechodu fosforu z železa do strusky během kovářského zpracování železné houby v oxidační atmosféře kovářské výhně. Struskové vměstky mají rovněž zvýšený obsah síry následkem přechodu síry z ostravského kovářského uhlí během ohřevu železné houby v kovářské výhni. V pořadí analýz: hutnická struska - kovářská struska - struskové vměstky, se koncentrace síry zvyšuje s posloupností (hm.%): 0,0 - 0,2 - 1,1.

Archeometalurgické zhodnocení

Soubor experimentálně získaných výsledků kovářského zpracování hutnicky, tj. přímo z rud vyrobené železné houby, prokázal její dobrou technologickou zpracovatelnost. Ukázalo se, že zejména v prvních fázích kování železné houby, je zapotřebí postupovat velmi opatrně a při zpracování je zapotřebí mít zkušenosti s kovářským svařováním železa v ohni. Je to způsobeno zejména tím, že poté co po ohřevu houby na vysokou teplotu z ní vyteče struska a vyhoří zbytky dřevěného uhlí, je původní koláč charakterisován vysokou pórovitostí a tím také velkým měrným povrchem. To zvyšuje sklon povrchu k oxidaci vzdušným kyslíkem v atmosféře výhně. Pórovitost houby je zapotřebí úplně odstranit kovářským svařením z ohně spojeným s následujícím prokováním. To vyžaduje zkušenost a zručnost, neboť je zapotřebí začít svařovat včas, při správné teplotě, rychle a pokud možno s ohřevem v redukční atmosféře, aby se zabránilo oxidaci (tj. okujení) pórů původní houby. Dalšími kovářskými operacemi, v daném případě bylo použito pýchování a prodlužování, je nutno alespoň zčásti odstranit zbytky hutnické strusky zachycené v pórech původní houby a poté vtisknout houbě požadovaný tvar.

Podle výsledků metalografické analýzy a zkoušek mikrotvrdosti mají vykované polotovary (tyče a kostka) strukturu a vlastnosti odpovídající uhlíkové oceli o pevnosti v tahu kolem 450 MPa, což přibližně odpovídá značce oceli podle ČSN 411500, která má modus obsahu uhlíku 0,3 hm.% a používá se na málo namáhané strojní součásti, nejčastěji v normalizačně žíhaném stavu.

Vykované polotovary jsou přitom prosté křemíku a mají velmi nízké obsahy manganu, fosforu a síry. Mají zároveň výtečnou svařitelnost, což je podle O. *Quadrata* (1953) dáno způsobem vazby kyslíku výhradně na oxid železnatý, který je v takto hutnicky vyrobeném železe obsažen jenom ve struskových vměstcích, zatímco v oceli vyrobené v tekutém stavu (například v elektrických pecích obloukových, indukčních, Siemsenových-Martinových, v kyslíkových konvertorech) je kyslík vždy zčásti rozpuštěn v kovové matici železa, což je na újmu svařitelnosti. Vyrobený kovářský polotovar lze pokládat za vhodný k výrobě podkov, závěsných háků, třmenů, šipek do střel ke kuším, článků řetězů aj.

Literatura:

- [1] MYSLIVEC, T., 1971: Fyzikálně chemické základy ocelářství. SNTL/ALFA, Praha, Bratislava.
- [2] PLEINER, R., 1969: Experimental smelting of Steel in Early Medieval Furnaces. Památky archeologické (PA) LX, s. 458-487.
- [3] PLEINER, R., 1975: Počátky šachtové pece v evropském pravěku. Rozpravy NTM v Praze - Z dějin hutnictví 2, s. 77-82, Praha.
- [4] QUADRAT, O., 1953: Základy metalurgie železa. SNTL, Praha.
- [5] SOUCHOPOVÁ, V. 1995: Počátky západoslovanského hutnictví ve světle pramenů z Moravy. Studie Archeologického ústavu Akademie Věd ČR v Brně, XV, Brno.
- [6] SOUCHOPOVÁ, V. - STRÁNSKÝ, K., 1983: Poznatky z experimentálních taveb železa v rekonstrukcích nadzemních šachtových pecích z Blanenska. Památky archeologické (PA) LXXIV, s. 527-544.
- [7] SOUCHOPOVÁ, V. - STRÁNSKÝ, K., 1989: Experimental Iron Smelting in the Blansko Region, Czechoslovakia. Archeomaterials, Vol. 3, No. 2, pp. 149-161.
- [8] STRÁNSKÝ, K. - SOUCHOPOVÁ, V., 1993: Experimentální tavby železa v rekonstrukcích vestavěných pecí s tenkou hrudí z 9. století n.l. In: Rozpravy NTM v Praze sv. 134 - Z dějin hutnictví 23, Praha, s. 41-49.
- [9] STRÁNSKÝ, K. - SOUCHOPOVÁ, V. - KRÁL, J. - ČÍPEK, K., 1985: Tavby v rekonstrukcích vestavěných dýmaček z období Velké Moravy. Slévárství, 33, č. 9, s. 393-399.
- [10] STRÁNSKÝ, K. - SOUCHOPOVÁ, V. - MERTA, J., 1995: Experimentální tavby železa v Blansku v rekonstrukcích železářských pecí z 9. století n.l. Študijné zvesti Archeologického ústavu SAV, 31, s. 207-215, Nitra.
- [11] STRÁNSKÝ, K. - ŠENBERGER, J. - REK, A. - KAFKA, V. - SOUCHOPOVÁ, V., 1993: Kovářské zpracování železné houby vytavené v šachtové peci olomučanského typu rekonstruované podle nálezů z 11. století n.l. In: Archeologia Technica 9, TM Brno, s. 15-25.
- [12] TYLECOTE, R.F., 1992: A History of Metallurgy. The Institute of Metallurgy. London.
- [13] TYLECOTE, R.F. - AUSTIN, J.N. - WRAITH, A.E., 1973: Iron Smelting Experiments with a Shaft Furnace of the Roman Period. In: Die Versuchssmelzen und ihre Bedeutung für die Metallurgie des Eisens und dessen Geschichte. Schaffhausen-Prag, s. 25-49.

Tabulky

Karel Stránský, Věra Souchopová a Jiří Merta

Tab.I Základní metalurgické parametry taveb v rekonstruovaných nadzemních šachtových pecích

- v olomučanské (O) a sudické variantě (S) pecí

Tavba	Parametr	OI	OII	OIII	OIV	SI	SII
	Rychlost hoření paliva V_p [kg/h]	4,2	1,6	1,3	7,0	8,2	13,8
	Rychlost průchodu indické rudy V_{ir} [kg/h]	0,23	1,07	0,0	6,0	0,0	12,6
	Rychlost průchodu domácí rudy V_{dr} [kg/h]	1,17	0,53	2,60	1,00	4,80	2,10
	Průřez pece v úrovni dyzen F [dm ²]	3,80	3,80	3,80	3,80	15,9	11,3
	Parametr [kg.h ⁻¹ .dm ⁻²] ² $(V_p/F).(V_{ir}/F)$	0,067	0,118	0,000	2,91	0,000	1,35
	Parametr [kg.h ⁻¹ .dm ⁻²] ² $(V_p/F).(V_{dr}/F)$	0,340	0,059	0,234	0,415	0,123	0,225
	Parametr P [kg.h ⁻¹ .dm ⁻²] ²	0,237	0,148	0,117	3,118	0,062	1,463
	Výtěžek η [-]	0,03	0,02	0,02	0,31	0,00	0,13

Poznámka: - úplná dokumentace průběhu taveb a metalografické analýzy je obsažena v práci (Souchopová-Stránský, 1983).

Tab.II Základní metalurgické parametry taveb v rekonstruovaných vestavěných pecích s tenkou hrudí

Parametr	Rozměr	Série A (1980) 3 tavby	Série B (1982-1983) 4 tavby	Série C (1986) 2 tavby
Množství železné rudy m_r	[kg]	8,45 ±2,16	16,88 ±2,53	25,0 ±5,0
Rychlost hoření paliva $m_p/(t_a d_1 d_2)$	[kg/(h.dm ²)]	0,3022 ±0,1485	0,6919 ±0,1389	0,5369 ±0,0395
Rychlost průchodu rudy $m_r/(t_a d_1 d_2)$	[kg/(h.dm ²)]	0,4083 ±0,1724	0,6927 ±0,3488	0,5369 ±0,0395
Doba aktivního chodu pece t_a	[h]	1,55 ±0,24	1,82 ±0,64	3,69 ±0,78
Doba pasivního chodu pece t_p		1,14 ±0,53	6,45 *) ±10,35 2,51**) +8,54 -1,94	10,56*) ±9,36 4,89**) +30,75 -4,22
Výtěžek tavby (železná houba) $\eta = m_{Fe}/m_r$	[kg/kg]	0,0267 ±0,0131	0,1549*) ±0,1906 0,079**) +0,213 -0,057	0,3910 ±0,0740
Spotřeba paliva na 1 kg železné houby $\Sigma m_p/m_{Fe}$	[kg/kg]	89,2 ±64,9	42,7*) ±43,1 26,4**) +66,2 -18,9	4,68 ±0,48

Poznámky: - v tabulce je všeobecně uváděn aritmetický průměr sledovaných a měřených veličin a jejich střední odchylka σ_{n-1} pro normální (Gaussovo) rozdělení, pouze u série taveb B a C je u některých veličin uveden navíc průměr a odchylky pro logaritmicko-normální rozdělení, přičemž pro rozlišení jsou jedny a druhé hodnoty označeny takto: *) - normální rozdělení a **) - logaritmicko-normální rozdělení; u poslední série taveb C jsou uváděny střední odchylky σ_n , kde index n značí počet taveb dané série. Úplná dokumentace jednotlivých taveb je obsažena v práci (Stránský-Souchopová-Merta 1995).