

## Tavba v železářské peci galořímského typu, experiment v replice pece typu Les Martys

Jiří Merta, Karel Stránský

---

*O průběhu experimentu a výsledcích tavby, včetně metalografických rozborů bylo referováno na 44. semináři Z dějin hutnictví, konaném 12. listopadu 2003 v NTM Praha. Přednáška (Jiří Merta) byla doplněna promítnutím videozáznamu experimentu zpracovaného Romanem Kučerou.*

*Text příspěvku s bohatší obrazovou přílohou byl publikován v Nožičských listech č. 8, vydaných Technickým muzeem v Brně v roce 2004 (ISBN 80–86413–15–0).*

V rámci Dnů evropské kultury 2003 byla v areálu kulturní památky Stará huť u Adamova, situované ve stejnojmenné kulturní rezervaci, realizována série experimentů v replikách železářských kusových pecí. Experimenty byly provedeny v týdnu od 15. do 18. září skupinou amatérů – tavičů experimentátorů z Francie, jejichž návštěvu inicioval kovář Pavel Řiháček společně s Kateřinou Hostinskou během účasti na Dnech železa konaných každoročně v průběhu druhého červencového týdne v Pierpont v Bretani. Těchto, takřka lidových slavností se tým francouzských tavičů spolu s řadou dalších každoročně zúčastňuje. Předvádí experimentální tavby pro širokou veřejnost v různých typech pecí rekonstruovaných podle historických předloh jak evropských, tak mimoevropských (např. japonských). Součástí slavností jsou ukázky kovářské a nožířské práce, případně prodej předmětů zúčastněných řemeslných výrobců. Skupinu francouzských nadšenců pro paleometalurgii, kteří přicestovali do České republiky vedl pan Ludovic Masille, dalšími účastníky byli pánové Dominique Bargiel, Pascal Coupry a Claude L'Hyver. Experiment byl proveden dvakrát v replice galořímské pece a jedenkrát v upravené replice slovanské šachtové pece užití při dřívějších akcích Technickým muzeem v Brně (Den muzeí a otevření Cesty železa Moravským krasem, květen 2003). Potřebné nářadí včetně dvojčinného měchu si přivezli experimentátoři s sebou. Dřevěné uhlí a žáruvzdorné hlíny spolu s dalšími nezbytnými materiály pro stavbu repliky galořímské pece připravili pracovníci muzea. Žárupevný jíl byl získán z lokality Seč u Rudice, tvárnice pro stavbu šachty pece byly vyrobeny z cihlářské hlíny (cihelna Hodonín) v rozebírací tradiční cihlářské formě. Byly připraveny tenké kmeny pro vytvoření nosné konstrukce měchu, to vše podle předem zaslanych požadavků francouzských tavičů. S přípravou uvedených materiálů pomohli odborní pracovníci TMB.

Sponzorem akce byly Veletrhy Brno, spoluorganizátorem Národní památkový ústav Praha, technicky zajišťovalo celou akci TMB. Sponzorská firma určila termín konání experimentu, který probíhal současně se strojírenským veletrhem. Současně probíhal Celostátní seminář muzejních konzervátorů pořádaný TMB, v jehož stínu akce v Josefově probíhala. Přesto experimentům přihlíželo na padesát zájemců z řad archeologické obce, muzejníků, muzejních konzervátorů, kteří se mimo program semináře experimentů zúčastnili. Zájem laické veřejnosti byl spíše náhodný, přestože byla organizována místní doprava historickým autobusem TMB. Kromě jiných navštívil lokalitu i prof. Westphal (univerzita Darmstadt), odborník na výrobu damaskové oceli spolu s několika dalšími konzervátory z německých muzeí.

Konstrukce vlastní pece respektovala předlohu pece z lokality Les Martys. Archeologicky zkoumaná lokalita Les Martys (departement Aude) leží v pohorí Montaigne Noire. Vrstva o průměru 250 m a mocnosti až 20 m obsahuje 1 až 3 miliony tun železářských strusek, které byly ve třicátých letech minulého století průmyslově zpracovávány k výrobě speciálních cementů. Na lokalitě proběhl archeologický výzkum v sezónách 1972 až 1978, 1988 až 1990 a pokračuje i v současné době. Podle sdělení profesora R. Pleinera, DrSc, předneseného na 44. semináři Z dějin hutnictví (12. listopad 2003) v NTM, výzkum na lokalitě Les Martys odkryl v minulých sezónách další keltské, resp. galořímské pece, pracující již ve 2. století př. n. l. Při starších výzkumech z osmdesátých let minulého století byly odkryty kusové železářské pece situované v baterii o třech exemplářích, případně ve dvojicích či jednotlivě. Provoz pecí je datován od roku 50 př. n. l. do dvacátých let našeho letopočtu, kdy keltské železáři pracovali pro potřeby Říma. Všechny zkoumané pece byly shodného typu. Spodní část konstrukce pecí byla vystavěna z masivních granitových kamenných bloků, dosahujících výšky

0.9 m na podkovovitém půdorysu. Nad nimi byla vystavěna část pece z malých plochých kamenů. Horní část šachty, patrně zhotovená z jílu, se nezachovala.

Sokl rekonstruované pece byl sestaven na podkovovitém půdoryse do výše 50 cm z balvanů. Překlad nad pracovním ústím pece tvořil plochý kámen (vše místní vápence). Šachta pece byla vystavěna z předem připravených obsušených tvárníc (materiál: cihlářská hlína Hodonín) a vyzdvížena do výše 140 cm. Půdorysný rozměr nístěje dosahoval 350 x 300mm, horní rozměr kónicky se zužující šachty 190 x 190 mm. Celý profil pece byl opatřen výmazem ze dvou dílů jemně podrceného prachu z dřevěného uhlí a jednoho dílu podrceného šedého jílu (Seč u Rudice). Stavbu pece řídil Dominique Bargiel (jediný nepochází z Bretaně, ale z Auvergne ze jihozápadní Francie), který se aktivně zúčastňuje taveb v Pierpont. Kromě jiných řídil v roce 2002 stavbu a tavbu v replice japonské pece typu Tataka, při níž byla vytavena na 350 kg hmotná železná houba.

Vsázku tvořil hematit z lokality Kaymar/Averon velmi jemné substance (zrno do 1 mm), před tavbou vypražený (provedeno mimo vlastní experiment). Při každé z obou taveb v galořímské peci bylo vsazeno celkem 18,7 kg v dávkách po cca 500g. Jako paliva bylo užito komerčního dřevěného uhlí, podrceného do velikosti zrna 40 mm, kterého bylo vsazeno celkem 23 kg pro každou z taveb, to je objemově cca 115 l. Dmýcháno bylo ručně ovládaným dvojčinným měchem o objemu 55 l, umístěným na konstrukci z kmínků, pomocí dvojzvrtné páky. Dmýchání se dělo v rytmu 1 zdvihu/1 min. keramickou dyšnou o vnitřním průměru 30 mm s možností průhledu dyšnou do nístěje pece pro kontrolu teploty v peci a chodu pece. Po 3 hodinách a 45 minutách byla vypuštěna tekutá struska. Tavba trvala 4 hodiny 30 minut. Průběh experimentu byl dokumentován na celkem šesti formátech A4, záznam zahrnoval jak časový průběh experimentu, dávkování vsázky do pece a poznámkami o všech technických detailech ovlivňujících redukční pochod tavby.

Vytavená železná houba z první tavby o celkové hmotnosti 2 250 g byla na místě kovářsky zpracována Pavlem Řiháčkem a Patrikem Bártou a rozdělena na dvě části. Kovářské zpracování houby bylo provedeno ve výhni umístěné ve větším z dřevěných objektů areálu experimentálního okrsku. K dmýchání bylo užito cylindrického ručně ovládaného dvojčinného měchu. Část vykované polotovaru byla další den kovářsky homogenizována Danielem Hlobilem. Z ní bude později vykována replika části keltského roštu ze Stradonic pro expoziční účely. Z jedné části lupy byl odebrán vzorek o rozměrech 13,5x16x50 mm<sup>3</sup> k chemické a metalografické analýze a k analýze tvrdosti. Pro účel rozboru byl předám i vzorek strusky. Rozbory provedla laboratoř VUT v Brně, výsledky zpracoval a vyhodnotil prof. Karel Stránský, DrSc.

## Shrnutí

Práce velmi dobře sešraného francouzského týmu byla odborně na výši. Experiment dosáhl znamenitých výsledků. Jestliže francouzští partneři projeví zájem, TMB uspořádá týdenní workshop PALEOMETALURGIE ve Staré huti (srpen 2004) s předpokladem lepší propagace akce v pro veřejnost přijatelném termínu s případným zapojením do systému Evropské cesty železa.

## Analýzy

### Analýza železářské strusky

K mineralogické a chemické analýze železářské strusky sloužily dva vzorky o přibližné velikosti vlašského ořechu. Struska byla dosti silně feromagnetická. Vzorky této strusky byly nejprve mechanicky kladivem rozdraceny na úlomky velikosti čočky až hrachu a poté během 24 hodin rozemlety na speciálním achátovém mlýnku na prášek o velikosti 1 až 10  $\mu\text{m}$ .

Z větší části homogenního objemu práškového vzorku (o objemu cca 2 cm<sup>3</sup>) bylo v digitální formě sejmuto rentgenové difrakční spektrum. K sejmutí spektra a k jeho testování se souborem standardů sloužil rentgenový difraktometr Kristalloflex D500 firmy SIEMENS, vybavený databází obsahující 80.10<sup>8</sup> difrakčních spekter různých minerálů a prvků. Difrakční spektrum práškového vzorku železářské strusky bylo sejmuto během čtyřadvacetihodinové expozice v rozsahu difrakčních úhlů 2 $\theta$  (5 až 120°). Porovnáním (testováním) sejmutého difrakčního spektra se spektry standardů známých minerálů bylo zjištěno, že strusku tvoří minerály: – fayalit (FeMn)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, – křemen SiO<sub>2</sub>, – titanit CaTiSO<sub>5</sub>, – a metalické železo Fe. Výsledná mineralogická analýza (přesněji, její digitální rentgenové difrakční spektrum) byla následně zpracována kvantitativně metodou podle Rietvelda s cílem stanovit

podíly jednotlivých mineralogicky samostatných složek. Výsledky obou částí mineralogické analýzy, tj. kvalitativní i kvantitativní, jsou obsaženy v *tabulce 1*.

**Tabulka 1** Mineralogická analýza železářské strusky tavby číslo 1 v keltsko-římské peci

Fáze	minerál	stechiometrie	hmotnostní %	číslo standardu
1	železo	Fe	0,68	6-0696
2	fayalit	(Fe Mn) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	70,08	12-0220
3	titanit	CaTiSO <sub>5</sub>	3,53	25-0177
4	křemen	SiO <sub>2</sub>	25,70	33-1161

Z *tabulky 1* plyne, že dominantní mineralogické složky železářské strusky tvoří fayalit a křemen, jejichž celkový součet činí 95,78 hm. %.

Malá část objemu práškového vzorku strusky byla nanášena na karbonovou pásku a analyzována metodou energiově disperzní rentgenové spektrální mikroanalýzy v analytickém komplexu PHILIPS-EDAX. Ve třech náhodně vybraných oblastech práškového vzorku proběhla plošná analýza zahrnující celkovou analyzovanou plochu 3,0 mm<sup>2</sup> (oblasti 1, 2 a 3), ve třech dalších, náhodně vybraných oblastech proběhly bodové analýzy (oblasti 3, 4 a 5). K bodovým analýzám byly vybrány části prášku s vysokou intenzitou odražených elektronů, to znamená místa obsahující složky prášku s prvky o vyšších atomových číslech. Výsledky této analýzy jsou obsaženy v *tabulce 2*.

**Tabulka 2** Chemická mikroanalýza práškového vzorku železářské strusky [hm.%]

Analýza Složka	plošná analýza vzorku – plocha 1,0 × 1,0 mm <sup>2</sup>					bodová analýza vzorku		
	oblast 1	oblast 2	oblast 3	průměr	odchylka	oblast 4	oblast 5	oblast 6
NaO	1,28	1,14	1,27	1,23	0,08	0,16	0,00	0,33
MgO	2,57	2,56	2,79	2,64	0,13	0,22	0,22	1,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,10	13,30	13,19	13,20	0,10	1,58	0,48	1,84
SiO <sub>2</sub>	49,57	50,43	49,42	49,81	0,55	5,15	0,72	4,67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,38	0,31	0,40	0,36	0,05	0,36	1,69	0,50
S	0,28	0,24	0,24	0,25	0,02	0,05	0,13	0,16
K <sub>2</sub> O	3,35	3,46	3,42	3,41	0,06	0,32	0,14	0,22
CaO	5,26	5,52	5,55	5,44	0,16	0,58	0,20	0,45
TiO <sub>2</sub>	1,10	1,16	1,32	1,19	0,11	0,00	0,20	0,24
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,19	0,00	0,06	0,11	0,00	0,33	0,14
MnO	9,93	10,07	9,49	9,83	0,30	16,75	0,57	0,72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,79	11,62	11,84	12,08	0,62	1,29	93,99	89,60
BaO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	72,23	0,00	0,00
NiO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,33	0,00

*Poznámka:* – urychlovací napětí elektronového paprsku 20 kV, doba expozice 100 s, k analýze aplikován systém korekcí ZAF (zahrnující korekce na atomové číslo – Z, absorpci rtg. záření pod povrchem antikatody – A, fluorescenční zesílení – F).

Z analýz v *tabulce 2* plyne, že struska obsahuje v průměrný součtový obsah oxidů železa a manganu 21,9 hm.% a součtový obsah oxidů křemíku a hliníku 63,0 hm.%. Obsah bazického oxidu vápenatého činí 5,4 hm.%. Index bazicity stanovený ze vzorce  $IB = (MnO + Fe_2O_3 + CaO) / (Al_2O_3 + SiO_2) = 27,35/62,67 = 0,436$  je menší než číslo jedna, což značí, že jde o strusku kyselé povahy. Nízký obsah oxidu fosforečného – v průměru 0,36 hm. % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> vypovídá o tom, že struska pochází z redukčního pochodu. Obsah oxidu manganatého – MnO je poměrně vysoký – 9,83 hm.%, což svědčí o tom, že výchozí železnorudná vsázka obsahovala dosti vysoký oxidu manganatého, který se v redukční peci použitého typu neredukuje, obdobně jako oxid křemičitý, hlinitý a vápenatý. Prakticky téměř všechny čtyři uvedené oxidy přecházejí z rudné vsázky do strusky.

### Analýza chemického složení kovářsky zpracované železné houby

Vzorek kovářsky zpracovaného houbovitého železa o citovaných rozměrech 13,5x16x50 mm<sup>3</sup> byl analyzován na certifikovaném analyzátoru emisního spektra SPECTRUMAT GDS 750 na ploše vybroušeném a vyleštěném jako pro metalografický výbrus. Analýza proběhla celkem v pěti místech vzorku na ploškách o průměru 4 mm a její výsledky jsou uspořádány v *tabulce 3*.

**Tabulka 3** Analýza chemického složení vzorku kovářsky zpracovaného železa [hm. %]

Prvek	C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cu	Al	Co
aritmetický průměr	0,31	0,05	0,03	0,078	0,003	0,14	0,01	0,097	0,017	0,15
směrodat. odchylka	0,22	0,01	0,02	0,012	0,001	0,01	0,00	0,005	0,015	0,01
relativ. odchylka %*	69,53	17,33	55,08	15,02	40,11	6,09	4,86	4,85	85,40	7,00
minimum	0,06	0,04	0,01	0,068	0,002	0,13	0,01	0,093	0,000	0,14
maximum	0,67	0,06	0,06	0,100	0,005	0,15	0,01	0,105	0,042	0,17

Poznámka: – analýzou nalezené obsahy Cr, V, W a Ti činily 0,00 hm.%, \*) variační koeficient

Z tabulky plyne, že kovářsky zpracovaný vzorek železné houby již představuje *ocel*, se středním obsahem uhlíku 0,31 hm.%, s velmi nízkými obsahy manganu, křemíku, fosforu, síry, molybdenu, mědi a hliníku, jejichž obsahy jsou v průměru menší než 0,1 hm.%. Kromě uhlíku jsou pouze obsahy niklu a kobaltu vyšší než 0,1 hm.%. Uhlík je ve vzorku oceli velmi nerovnoměrně rozložen, což potvrdila rovněž metalografická analýza. Vysoká heterogenita (nestejnorodost) v rozložení uhlíku zároveň signalizuje velmi nerovnoměrné strukturní a mechanické vlastnosti výkovku.

### Metalografická analýza kovářsky zpracované železné houby

Metalografický vybrus byl připraven běžným způsobem, tj. za mokra broušením na metalografických papírech s doleštěním na diamantových pastách do zrnitosti pod 1  $\mu\text{m}$ , a po vyleštění byl naleptán 3 procentním *nital*em (tj. v tříprocentním roztoku kyseliny dusičné v ethylalkoholu). Charakteristické struktury kovářsky zpracovaného vzorku železné houby dokládají snímky na *obr. 3 až 6*.

Na *obr. 3* je znázorněna struktura oblasti vzorku s velmi nízkým obsahem uhlíku, kolem 0,06 hm.% C, sestávající z velkého podílu poměrně rovnoměrných feritických zrn a z menšího podílu nerovnoměrných zrn perlitických, vyloučených převážně po hranicích zrn feritu. V této části vzorku je zrna poměrně jemná a jeho velikost se pohybuje mezi stupněm 5 a 6 podle ČSN (resp. podle ASTM, neboť obě stupnice jsou identické).

Na *obr. 4* je znázorněna struktura vzorku v oblasti s rostoucím obsahem uhlíku, v místech, kde zároveň přechází poměrně jemnozrná feriticko perlitická struktura s acikulárním (jehlicovitým) feritem do hrubozrné perlitické struktury s feritem vyloučeným po hranicích perlitických, původně austenitických zrn. Ve feriticko perlitické oblasti struktury je velikost zrna ještě mezi stupněm 5 a 6 avšak v perlitické oblasti je velikost původního austenitického zrna kolem stupně 1 až 0.

V oblastech vzorku s nejvyšším nauhličením (*obr. 5*) je možno pozorovat po hranicích původních austenitických zrn tenkou obálku nespojitého síťoví cementitu. Perlit je velmi jemný, místně se podobá hornímu bainitu a hrubost původního austenitického zrna se pohybuje mezi stupněm 3 až 5. Strukturu velmi jemného perlitu, jakož i obálku síťoví sekundárního cementitu vyloučeného po hranicích původních austenitických zrn je možno v podrobnostech pozorovat na *obr. 6*. Velikost zrna se v těchto místech pohybuje též mezi stupněm 3 až 5 (podle ČSN, resp. ASTM).

Zobrazené struktury oceli na *obr. 3 až 6* svědčí zároveň o tom, že vzorek oceli získaný kovářským zpracováním železné houby byl v poslední fázi kovářských operací poměrně rychle ochlazen, nejspíše ponořením do mírně teplé vody.

### Zkoušky tvrdosti kovářsky zpracované železné houby

Na stejném vzorku, z něhož byla provedena chemická analýza a též analýza metalografická byla změřena v pěti různých oblastech stejné analyzované plochy jako v předchozích případech tvrdost HRb, tj. podle Rockwella. Tato tvrdost byla poté podle empirických vztahů přepočítána na tvrdost podle Brinella a též na pevnost v tahu. Výsledky jsou přehledně uvedeny v *tabulce 4*.

**Tabulka 4** Změřená tvrdost výkovku v HRb a odhady tvrdosti HB a pevnosti

Parametr	tvrdost HRb	tvrdost HB	pevnost v tahu MPa
aritmetický průměr	51,6	98,4	343
směrodatná odchylka	28,9	53,0	184
relativní odchylka %*	56,0	53,9	53,6

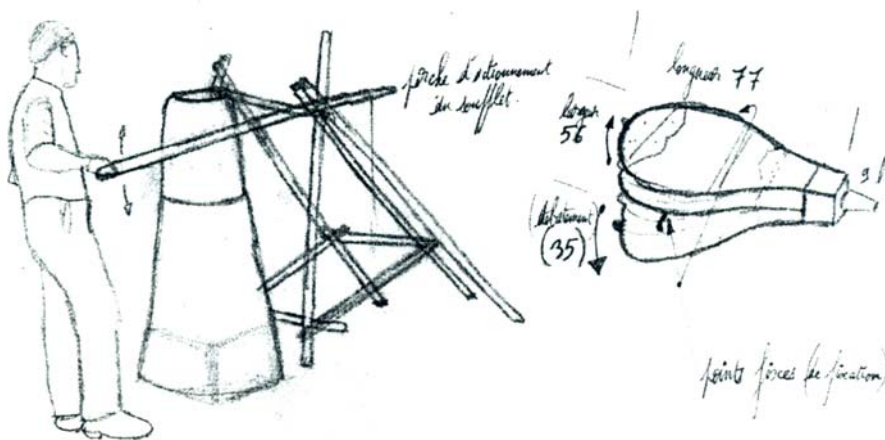
Poznámka: – \*) variační koeficient

Z výsledků měření tvrdosti vzorku plyne, že mechanické vlastnosti výkovku získaného kovářským zpracováním železné houby jsou velmi nerovnoměrné a jeho pevnost, vymezená vztahem: aritmetický průměr  $\pm$  směrodatná odchylka, odhadnutá podle semiempirických vztahů se bude měnit v širokých mezích, přibližně od 159 MPa do 502 MPa. Užití výkovku s takovými vlastnostmi může být účelné spíše pro předměty spíše podřadnější až střední důležitosti v dávnějším zemědělství, např. na železné části koňských postrojů, udidla aj., kování zemědělských povozů, bednářské obruče, kování kol a snad i koňské podkovy.

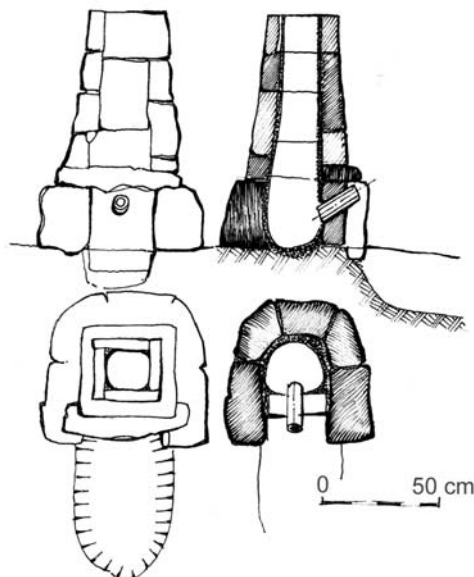
Ke speciálnímu, náročnějšímu užití výkovku, by bylo účelné další kovářské zpracování, spojené s větším stupněm přetvoření, se snížením podílu struskových vměstků a s homogenizací uhlíku. Kovová matrice výkovku je velmi čistá a dobře kovářsky zpracovatelná.

### Literatura

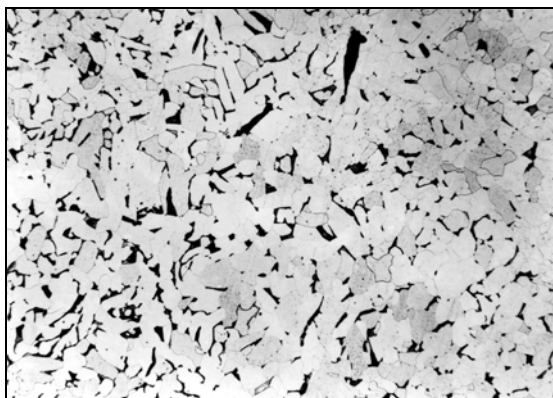
DOMERGUE, CLAUDE: Archéologie sidérurgique aux Martys (Aude, France) des fourneaux a la forge?  
In: Paleometallurgie du fer & cultures. s. 313–315.



Obr. 1 Galořímská pec s konstrukcí pro dmýchání měchem (kresba Claude L'Hyver)

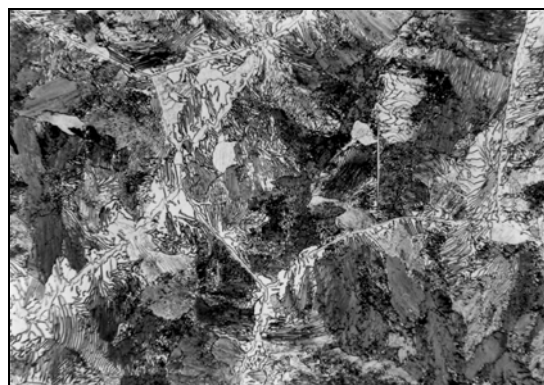
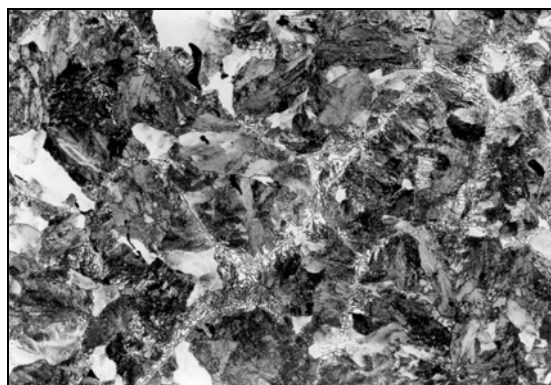


Obr. 2 Schéma galořímské pece použité při experimentu (kresba Jiří Merta)



**Obr. 3** Mikrostruktura kovářsky zpracované železné houby v oblasti s nízkým obsahem uhlíku. Leptáno nitaem, zvětšeno 100x

**Obr. 4** Mikrostruktura kovářsky zpracované železné houby v oblasti přechodu od nízkého k vysokému obsahu uhlíku. Leptáno nitaem, zvětšeno 100x



**Obr. 5** Mikrostruktura kovářsky zpracované železné houby v oblasti s vysokým (mírně nadeutektoidním) obsahem uhlíku. Leptáno nitaem, zvětšeno 200x

**Obr. 6** Detaily mikrostruktury kovářsky zpracované železné houby v oblasti s vysokým (mírně nadeutektoidním) obsahem uhlíku. Leptáno nitaem, zvětšeno 500x