



# Experimentální tavba železné rudy v malé redukční peci

Vedoucí práce: RNDr. Marek Matura, Ph.D.

Jakub Koutník, Františka Ektrtová, Andrea Suchánková, Ester Burgerová,  
Tomáš Kudláček, Vojtěch Bruthans, Jáchym Galuška, Ondřej Kučera

Praha  
červen, září - říjen 2018

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha I** Seznam použitého vybavení pro stavbu pece a provedení tavby
- Příloha II** Schéma pece s uvedenými rozměry
- Příloha III** Vyhodnocení použitého postupu, materiálu a vybavení během tavby a návrhy na úpravu; fotodokumentace
- Příloha IV** Záznamové tabulky dokumentující průběh tavby
- Příloha V** Schéma nálezu tavenin v peci

## OBSAH

|          |                                      |          |
|----------|--------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>ÚVOD.....</b>                     | <b>1</b> |
| <b>2</b> | <b>TEORETICKÝ ÚVOD .....</b>         | <b>2</b> |
| <b>3</b> | <b>POSTUP PRÁCE.....</b>             | <b>2</b> |
| 3.1      | Těžba železné rudy .....             | 2        |
| 3.2      | Pražení železné rudy.....            | 2        |
| 3.3      | Stavba pece.....                     | 3        |
| 3.4      | Proces tavby .....                   | 4        |
| 3.5      | Ukončení tavby, chladnutí pece ..... | 4        |
| 3.6      | Získávání železa .....               | 4        |
| <b>4</b> | <b>VÝSLEDKY A DISKUZE.....</b>       | <b>4</b> |
| 4.1      | Pražení železné rudy.....            | 4        |
| 4.2      | Stavba pece.....                     | 4        |
| 4.3      | Proces tavby .....                   | 5        |
| <b>5</b> | <b>ZÁVĚR.....</b>                    | <b>6</b> |
|          | <b>LITERATURA.....</b>               | <b>7</b> |



# 1 ÚVOD

Železo je druhým nejrozšířenějším kovem na Zemi. Objev železa, jeho výroba a využití byl jedním ze zlomových bodů vzniku současné civilizace. Dnes se železo vyrábí ve vysokých pecích a proces výroby je z velké části laické veřejnosti neznámý. O to více je pak neznámý proces výroby, který byl využíván před nástupem vysokých pecí, během kterého se železo získávalo tavbou v nepřilíš vysoké hliněné peci.

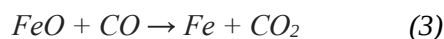
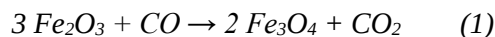
My jsme se rozhodli postavit kopii takové pece a provést v ní vlastní experimentální tavbu železné rudy. Proces stavby i samotné tavby jsme chtěli důkladně zdokumentovat a ověřit, jak náročné je tavbu realizovat ve školním prostředí např. pro didaktické účely.

Naším cílem bylo

- a. postavit funkční pec a provést v ní tavbu železné rudy,
- b. zdokumentovat proces tavby a sledovat spotřebu materiálu, vývoj teploty a stav pece,
- c. vytvořit časosběrný snímek dokumentující celý proces od stavby pece až po její rozebírání po tavbě.

## 2 TEORETICKÝ ÚVOD

Čisté železo ( $\text{Fe}^0$ ) lze získávat nepřímou redukcí v peci za vysoké teploty ze železné rudy (např. hematit -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; limonit -  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , siderit –  $\text{FeCO}_3$  apod.). Výroba železa nepřímou redukcí probíhá v následujících krocích [1]:



Reakce (1) probíhá při pražení rudy před samotnou tavbou v peci. Nemagnetický hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se částečně redukuje, mění svou strukturu a přechází na magnetický magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Následně (2) je magnetit redukován v peci za teploty cca  $1200^\circ\text{C}$ , tedy po zapálení tzv. kychtových plynů ( $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_x$  a  $\text{NO}_x$ ). Při druhé (2) a třetí (3) reakci se kyslíky z magnetitu oddělují a váží na oxid uhelnatý. Vznikající oxid uhličitý uniká do atmosféry. Čisté železo zůstává v peci spolu s vytavenými částmi sedimentů ze železné rudy v podobě strusky [1].

## 3 POSTUP PRÁCE

### 3.1 Těžba železné rudy

Pro tavbu byla použita oolitická na železo relativně chudá (max. 30 %) ruda ze sedimentů ordovického stáří na břehu vodní nádrže Ejpovice, nedaleko Plzně. Pro tavbu bylo vlastnoručně natěženo (krumpáče, polní lopatky, geologická kladiva; další vybavení použité při práci viz Příloha I) 105 kg rudy.

### 3.2 Pražení železné rudy

Před samotnou tavbou probíhala redukce rudy podle rovnice (1) v otevřeném ohni – tzv. pražení, při kterém se hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) přeměňuje na snáze vytavitelný magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Díky tomu byla snížena energetická náročnost tavby v peci.

Před pražením byl v ohništi vytvořen žhavý základ, na který byla poté přihazována železná ruda. Ta byla před pražením roztlučena na menší kousky (cca  $2 \text{ cm}^3$ ), aby její pražení bylo co nejefektivnější. Do ohniště pak byla přihazována polními lopatkami. Po pražení byl z vychladlého ohniště magnetit vytahován magnetem. Než začala tavba, byl magnetit vyseparovaný z ohniště očištěn od popela apod. a byl roztlučen na menší kousky (cca  $0,5 \text{ cm}^3$ ), aby byla snížena energetická náročnost tavby a rudy bylo vytaveno co nejvíce.

### 3.3 Stavba pece

Stavba pece byla nejnáročnější z celého projektu, především časově. Při stavbě pece bylo postupováno převážně podle práce Dominiky Adamcové [2], přesto bylo v postupu práce při stavbě provedeno několik změn (viz níže).

Po výběru vhodného místa pro stavbu pece (dál od stromů, s fotogenickým pozadím a blízkým zdrojem elektřiny) byly v daném místě vykopány základy pro pec. Ty byly poté vymazány jílem, který byl předem připraven z dovezeného drceného žáruvzdorného jílu typu WBTS, písku, vody a suché trávy/sena. Jakmile zaschl výmaz základů pece, byly v něm jílem opraveny pukliny, které vznikly při schnutí. Do základů byla umístěna otep z několika desítek živých, různě tlustých prutů, které byly obaleny igelitem a vycpány trávou – ty tvořily formu pro komín pece, na kterou byl později nahazován jíl. Tuto otep ve správné pozici držela trojnožka vytvořená ze silnějších větví o délce cca 3,5 m, které byly nahoře spojeny provazem.

Na otep byla nahozena první vrstva jílu a začal vznikat komín pece. Do vykopaných základů bylo současně zabodáno několik prutů po obvodu komína, které se směrem vzhůru sbíhaly – měly sloužit jako výztuž. Pruty pak byly překryty další vrstvou jílu. Přes tu byla po obvodu natažena jutová tkanina, která po výpalu měla zajistit větší pevnost pece, což byla inovace v původním postupu práce [2]. Síťovina byla znovu překryta vrstvou jílu. Ta byla znovu přetažena síťovinou a nakonec překryta poslední vrstvou jílu. Kolem otepi vznikl 81 cm vysoký komín kónického tvaru s průměrnou šířkou stěny 5 cm.

Otep zůstala na místě ukotvena trojnožkou a pec po dobu čtyř dní schla. Během schnutí bylo několikrát nutné pec zakrýt plachtou kvůli dešti.

Po vyschnutí pece byla odstraněna trojnožka a postupně začala být rozebírána otep. Když byla z komína vyjmuta celá otep, bylo nutné vymazat jílem vnitřek pece. Zároveň byly jílem zamazány praskliny, které vznikly na peci schnutím a postupným sesedáním komína.

Po vyschnutí byla z komína pece vyříznuta dvířka, která se směrem do pece zužovala. Do těchto dvířek byl pod mírným sklonem směrem dolů vyříznut otvor na šamotovou trubku. Ta byla do dvířek pečlivě zamazána jílem. Na šamotovou trubku byla nasazena kovová trubka k vysavači, který měl do pece během tavby vhánět vzduch.

Na peci byly znovu zamazávány další vznikající pukliny, na hrud' pece byl vyryt znak školy s rokem provedení tavby a v peci byl proveden první výpal dřevem. Pec byla důkladně vysušena, ale bylo nutné zamazat nové pukliny vzniklé výrazným zvýšením teploty v peci.

Než byla zahájena tavba byla pec ještě jednou vysušena ohněm a vyschlá pec byla také změřena a její rozměry byly uvedeny do nákresu (Příloha II).

### 3.4 Proces tavby

Tavba začala po čtyřech dnech vysychání pece a dvou vysoušeníh ohněm. Nejprve byla nístěj pece až k dolnímu okraji dvířek naplněna žhavými uhlíky zbylými z vysoušení. Poté byla nasazena dvířka s dyšnou a pec byla až po okraj naplněna drceným kovářským uhlím. Po vsazení uhlí byl k dyšně připojen slabší z dvoucestných vysavačů a do pece začal být vháněn vzduch. Do dosažení teploty potřebné pro tavbu železné rudy ( $T \approx 1200^{\circ}\text{C}$ ) bylo do pece komínem přikládáno pouze dřevěné uhlí.

### 3.5 Ukončení tavby, chladnutí pece

Po vložení poslední vsázky uhlí a rudy byl odpojen vysavač, pec byla zakryta betonovou deskou a trubka pro přívod vzduchu byla utěsněna jílem. Proces tavby se nechal setrvačně dokončit za pouhého sledování teploty na hrudi pece ve čtvrt hodinových intervalech.

### 3.6 Získávání železa

Po zhruba desetihodinovém chladnutí pece byla sejmuta vrchní deska a pec se začala postupně rozebírat s použitím geologických kladiv. Z pece bylo vyndáno nespotřebované uhlí a příliš velké kusy magnetitu a kusy strusky, které měly obsahovat vytavené kousky železa. Rozložení vytaveného materiálu v peci bylo zaznamenáno do schématu (viz Příloha V).

Všechny vzorky vytažené z pece byly popsány, místo jejich nalezení bylo zakresleno do schématu pece a byly zabaleny. V Praze poté byly vzorky nafoceny. Kladivy, pilníky a magnety byly ze strusky získány kousky vytaveného železa.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1 Pražení železné rudy

Během pražení železné rudy bylo nejčastějším problémem zoxidování vypraženého magnetitu nechaného na dešti bez zakrytí. Proto bylo nutné zoxidovaný materiál znovu pražit. Proces se tím zbytečně prodloužil. Zároveň bylo opakovaným pražením v ohništi mezi popelem a dalším ztraceno několik kilogramů železné rudy.

Pro samotný proces tavby se také ukázalo jako optimální rozbít zredukovanou rudu na co nejmenší kusy. Velké kusy (více než  $3\text{ cm}^3$ ) často zůstávaly ve strusce nebo nevytavené mezi uhlím.

### 4.2 Stavba pece

Při stavbě pece se velmi osvědčila aplikace jutové tkaniny, která v předešlých letech [2] nebyla použita. Díky této tkanině komín držel po hromadě. Po vypálení a během tavby držela vypálená zuhelnatělá vlákna tkaniny držela pec pohromadě i v místech prasklin (viz Příloha III).



Naopak pruty, které byly během stavby komína zamýšlené jako výztuž a podpěra se neukázaly jako ideální. V některých místech se pod vahou komína během jeho sesedávání při vysoušení vybořili. V těchto místech pak pec velmi popraskala.

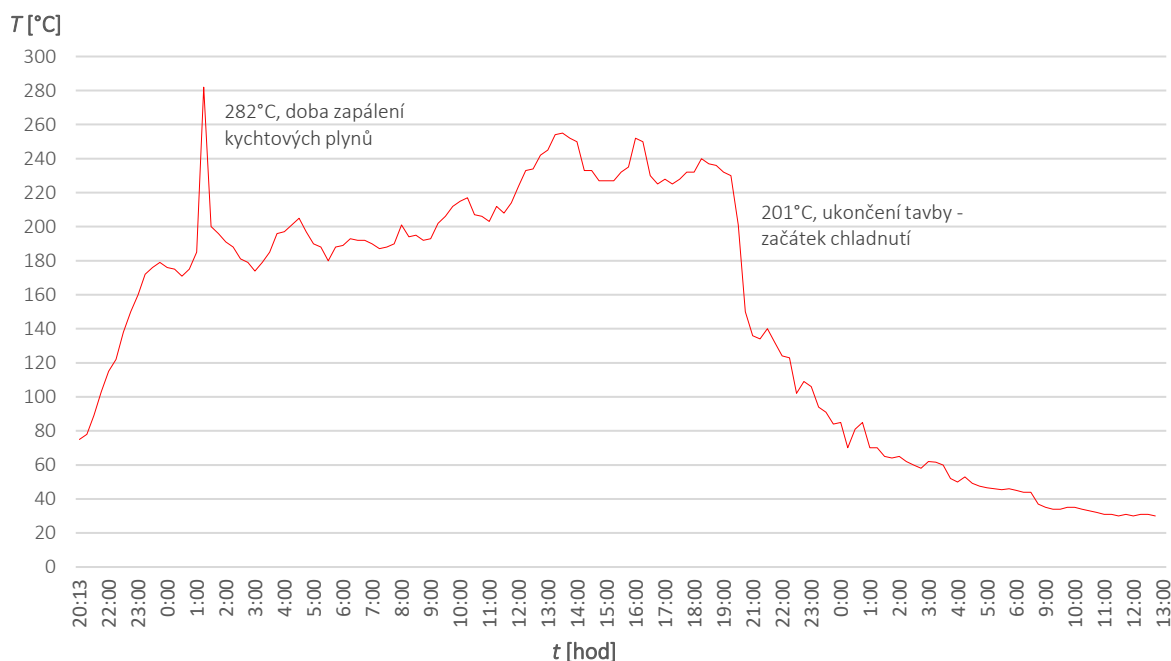
### 4.3 Proces tavby

V průběhu tavby byl shledán jeden zásadní problém, a to přerušení dmýchání vzduchu vysavačem. Během procesu se dmýchalo dvěma dvoucestnými vysavači, které se v nepravidelných intervalech střídaly.

Při přikládání uhlí a rudy byly vždy kvůli bezpečnosti vypnuty, což se ukázalo jako velký problém. Během současného přikládání a dmýchání však nehrozil žádný úraz. Kvůli přerušení dmýchání pak došlo ke snížení teploty v peci, zhasly kychtové plyny a místo tavené železo začalo chladnout. To poté mohlo částečně ucpat trubku pro přívod vzduchu. Nejvyšší teploty mělo být dosahováno před dyšnou kde se zároveň mělo tavit železo, ale kvůli přerušení dmýchání se toto místo přesunulo nad ní. To ovlivnilo výtěžek tavby. Zhasnutí kychtových plynů se také projevilo na dyšně, kde před zhasnutím byla naměřena teplota okolo 350°C. Po zhasnutí plynů se teplota razantně snížila a do ukončení tavby se držela okolo 90°C (viz Příloha III).

Použité uhlí bylo pro tavbu ideální, mělo vysokou výhřevnost. Pořízených 55 kg k tavbě se ukázalo jako málo. Uhlím bylo potřeba v průběhu procesu šetřit. Jeho vsázení podle poměru 1:3 by nemělo být závazné, ale orientační – občas kvůli malému množství uhlí hasly kychtové plyny.

V průběhu tavby a během chladnutí pece byla na hrudi pece laserovým teploměrem *Testo 830-T4* měřena teplota (Graf 1, Příloha IV), která korelovala s tavbou prováděnou Martinem Barákem v roce 1995 [3]. Teplota až do ukončení tavby stoupala. Nejvyšší naměřenou teplotou je 282°C, která byla naměřena po 317 minutách tavby. Tato teplota byla naměřena v době, kdy zažehly kychtové plyny.



**Graf 1** Vývoj teploty sledovaný na hrudi pece během tavby a chladnutí.

## 5 ZÁVĚR

Podařilo se postavit zcela funkční redukční pec, ve které byla provedena tavba železné rudy. Tavba probíhala 24 hodin a bylo při ní použito 35 kg magnetitu (zredukované hematitické Fe-rudy).

Z vyjmutých 25 kg vytaveného materiálu bylo získáno 148 g čistého železa o velikosti jednotlivých kusů od cca 2 mm do 2-3 cm.

Na základě dokumentace tavby bylo označeno jako největší problém celého procesu přerušované dmýchání vzduchu. To způsobovalo dočasné snížení teploty v peci a v jednom případě také přesunutí oblasti tavení železné rudy a snížení účinnosti tavby. V příštím experimentu by bylo vhodné zkusit dmýchat s menší intenzitou, ale kontinuálně. Velmi se osvědčila jutová tkanina, která držela pec pohromadě i v místech prasklin. Kromě těchto dvou zásadních poznatků byly na základě práce a dokumentace shledány klady a zápory částí postupu práce, použitého vybavení apod. a případně bylo navrženo jejich upravení pro příští pokusy (viz Příloha III).

Provedenou tavbu lze vzhledem k průběhu, k množství vyseparovaného železa a zejména vzhledem k získaným zkušenostem jednoznačně označit za úspěšnou. Detailní záznam tavby a časosběrný dokument by mohly v budoucnu přispět k plynulejšímu průběhu podobných experimentů a ke zvýšení výtěžku tavby. Realizace ukázala, že provedení tavby je také možné pojímout jako edukační experiment v rámci výuky chemie, fyziky a historie na školách.

## LITERATURA

- [1] OPAVA, Zdeněk. *Chemie kolem nás*. Albatros, nakladatelství pro děti a mládež, Praha, 1986
- [2] ADAMCOVÁ, Dominika. *Tavba železné rudy v rekonstrukci středověké pece* [online]. Praha, 2013 [cit. 2018-09-12]. Dostupné z WWW: <<http://archiv.prirodniskola.cz/profilove-prace/2013-2014/PP-Adamcova-2014.pdf>> Ročníková práce. Gymnázium Přírodní škola, o. p. s.
- [3] BARÁK, Martin. *Experimentální výroba železa v peci z dob Velké Moravy* [online]. VUT Brno, 1995 [cit. 2018-09-12]. Dostupné z WWW: <[http://www.starahut.com/sites/default/files/arheologiatechnica\\_pdf/DiplPrace.compressed.pdf](http://www.starahut.com/sites/default/files/arheologiatechnica_pdf/DiplPrace.compressed.pdf)> Diplomová práce. VUT Brno