

FYZIKÁLNĚ CHEMICKÁ PODOBNOST PŘI TĚŽBĚ A HUTNICKÉM ZPRACOVÁNÍ POLYMETALICKÝCH A ŽELEZNÝCH RUD

Karel Stránský, Lubomír Stránský, František Kavička, Simona Hutařová, Drahomíra Janová, Bohumil Sekanina, Věra Souchopová, Jiří Merta

V příspěvku je předložena možnost využití teorie fyzikálně chemické podobnosti ke sjednocení pohledu na těžbu a hutnické zpracování polymetalických a železných rud. Je ukázáno, že základní vlastnosti těžených polymetalických a železných rud je možno charakterizovat rozměrovými fyzikálními a chemickými vlastnostmi čistých těžených kovů. K těmto vlastnostem lze počítat měrnou hustotu, teplotu tavení, teplotní vodivost a skupenské (latentní) teplo. Tyto základní rozměrové veličiny charakterizující vlastnosti zmíněných rud je možno doplnit teplotou jejich redukčního zpracování a dobou redukčního žhání v primitivních hutnických pecích vytápěných dřevěným uhlím. Je ukázáno, že těchto šest rozměrových veličin může být ve smyslu tří teorémů fyzikální podobnosti, tj. Pi teorému, teorému rozměrové homogeneity a teorému rozměrové nezávislosti, vyjádřeno cestou dvou bezrozměrových kritérií podobnosti, tj. podobnostních čísel. Kromě proměnlivé doby redukčního tavení značí zbývající čtyři rozměrové veličiny fyzikálně chemické vlastnosti obou druhů rud polymetalických i železných. Běží přitom o rudy, které jsou v přírodě svými vlastnostmi navzájem pevně, tj. stabilně svázány. Pro 20 zmíněných prvků je tato vazba podle dat experimentálně změřených rozměrových veličin velmi silná a uplatňuje se s korelačním koeficientem 0,6129. Tento korelační vztah je pro použitý log-log vztah mezi oběma podobnostními čísly silně statisticky významný.

klíčová slova: fyzikálně chemická podobnost – polymetalické rudy – železné rudy – hutnické zpracování

PHYSICOCHEMICAL SIMILARITY IN MINING AND METALLURGICAL PROCESSING OF POLYMETALLIC AND IRON ORES

This paper is dealing with possibility of using the theory of physicochemical similarities to unite a view of mining and metallurgical processing of polymetallic and iron ores. It is shown that the basic properties of mined polymetallic and iron ores can be characterized by dimensional physical and chemical properties of extracted pure metal. These properties can include specific density, smelting temperature, thermal conductivity and latent heat. These basic dimensional quantities characterizing the properties of ores mentioned above can be completed by reduction-processing temperature and reducing annealing time in primitive metallurgical furnaces heated by charcoal. It is shown that these six dimensional quantities can be described in terms of three theorems of physical similarity, it means Pi theorem, theorem of dimensional homogeneity and dimension independence theorem, via dimensionless similarity criteria, similarity of numbers. In addition to variable time of reducing smelting process remaining four dimensional quantities indicate physicochemical properties of polymetallic and iron ores. These ores are firmly and stably bound in nature. For the 20 elements mentioned this bound is very firm and is applied with a correlation coefficient 0.6129 according to data of experimentally measured dimensional quantities. This correlation relationship is statistically significant for used log-log relationship between both similar numbers.

key words: physicochemical similarity – polymetallic ores – iron ores – metallurgical processing

Teorie fyzikální podobnosti pracuje s rozměrovými veličinami a vztahy mezi nimi cestou bezrozměrových kritérií opřenu o tři základní teorémy – 1) *teorém π* (též *Pi teorém* původně nazývaný *Buckinghamův*), 2) *teorém rozměrové nezávislosti*, podle něhož vztah mezi dvěma veličinami je nezávislý na zvoleném měřítku základních jednotek měření a 3) *teorém rozměrové homogeneity*, který vyžaduje, aby všechny veličiny vstupující do vztahu modelu fyzikálního procesu byly vyjádřeny ve stejné soustavě jednotek měření. Základem teorie podobnosti je teorém π , podle něhož všechny fyzikální vztahy mezi rozměrovými veličinami, které vystupují v určitém problému, je možno vyjádřit funkčními závislostmi mezi bezrozměrovými parametry – *kritérii podobnosti*. Těchto bezrozměrových parametrů je

méně, nanejvýš stejný počet, jako počet výchozích veličin, přičemž kritéria podobnosti, jmenovaná též jako *podobnostní čísla*, mají přitom úlohu *zobecněných proměnných*. Ke stanovení kritérií podobnosti je možno účelně využít rozměrovou analýzu, kde k rozměrovým veličinám lze počítat kromě veličin fyzikálních, též veličiny mechanické, chemické, elektrické, elektromagnetické aj.¹

Cílem tohoto příspěvku je nastin možnost využití teorie fyzikálně chemické podobnosti také ke sjednocení pohledu na těžbu a hutnické zpracování polymetalických a železných rud. Základní vlastnosti těžených polymetalických i železných rud je možno vztáhnout na vlastnosti a charakteristiky čistých kovů, k nimž je možno počítat

1 Kuneš, J. – Vavroch, O. – Franta, V. 1989.

- měrnou hustotu ρ - $\text{kg}^1 \cdot \text{m}^{-3}$
- teplotu tavení T_{liq} - K^1
- teplotní vodivost λ - $\text{kg}^1 \cdot \text{m}^1 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
- skupenské teplo L_{skup} - $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

Z dalších rozměrových veličin, které již značí provozní zpracování většiny polymetalických a železných rud, je to redukční režim charakterizovaný

- redukční teplotou T_{red} - K^1
- časem redukce τ_{red} - s^1

Na základě zkušeností s těžbou a vlastním zpracováním jak polymetalických, tak zejména železných rud v primitivních hutnických pecích bylo v prvním přiblížení k tomuto problému vybráno pouze šest rozměrových veličin.² Základní matice rozměrů těchto šesti rozměrových veličin, zahrnujících vskutku jen základní fyzikální a chemické veličiny polymetalických a železných rud, je uvedena v tabulce 1.

Veličiny	ρ	T_{liq}	λ	L_{skup}	T_{red}	τ_{red}	řádek
exponent	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	
M metr	-3	0	1	2	0	0	1
K kg	1	0	1	0	0	0	2
S sec	0	0	-3	-2	0	1	3
kelvin K	0	1	-1	0	1	0	4

Tab. 1: Matice rozměrových veličin

Ze základní rozměrové matice plyne, že k rozměrové analýze polymetalických a železných rud bylo vybráno šest základních rozměrových veličin, jejichž rozměry je možno ve shodě s jednotkami SI charakterizovat pomocí čtyř základních rozměrů metr, kilogram, sekunda kelvin.³ Ve shodě s teorémem π je možno těchto šest rozměrových veličin nahradit $6 - 4 = 2$, pomocí dvou kritérií podobnosti.⁴

Poznamenejme, že řádky rozměrové matice zároveň definují rovnice pro součet exponentů, neboť v každém ze čtyř řádků matice je součet exponentů nulový. Platí tedy pro součet exponentů v řádcích rozměrové matice vztahy v následující tabulce. Pro stanovení každého ze dvou bezrozměrových kritérií je třeba vždy dva exponenty volit a tuto volbu v daném případě provést dvakrát.

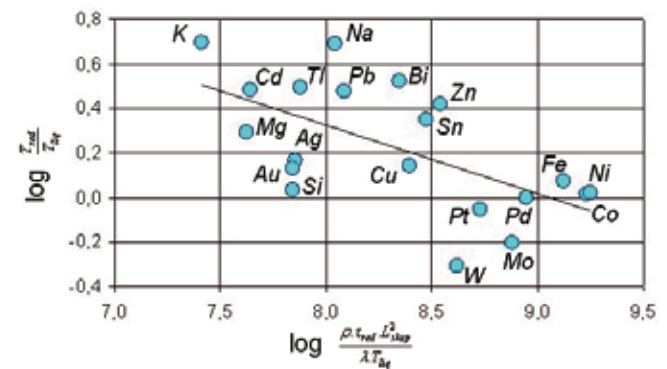
Veličiny	ρ	T_{liq}	λ	L_{skup}	T_{red}	τ_{red}	řádek
exponent	e_1	e_2	e_3	e_4	e_5	e_6	
M metr	-3 e_1	0	+ e_3	+ e_4	0	0	= 0
K kg	1 e_1	0	+ e_3	0	0	0	= 0
S sec	0	0	-3 e_3	-2 e_4	0	+ e_6	= 0
kelvin K	0	+1 e_2	-1 e_3	0	+1 e_5	0	= 0

Výsledkem jsou dvě bezrozměrová kritéria, z nichž první kritérium představuje bezrozměrový simplex tvořený poměrem: $\pi_1 = T_{red} / T_{liq}$, tj. teploty redukčního údobí tavení a teploty likvidu (tavení) čistého těženého kovu. Druhé bezrozměrové kritérium má komplexní

$$\pi_2 = \frac{\rho \cdot \tau_{red} \cdot L_{skup}^2}{\lambda \cdot T_{liq}}$$

V čitateli tohoto kritéria je součin měrné hustoty těženého čistého kovu, času redukčního tavení vytěženého rudy a čtverce, tj. druhé mocniny skupenského tepla čistého těženého kovu. Ve jmenovateli téhož kritéria je součin teplotní vodivosti čistého vytěženého kovu a jeho teploty likvidu.

Příčinný vztah obou bezrozměrových kritérií (podobnostních čísel) je znázorněn graficky ve dvojnásobné log-log stupnici na obr. 1.



Obr. 1: Vzájemný příčinný vztah fyzikálně chemické podobnosti bezrozměrových kritérií polymetalických a železných rud při těžbě a hutnickém zpracování v redukčních hutnických pecích

Graf na obr. 1 znázorňuje korelaci mezi prvky polymetalických a železných rud, v nichž jsou hornicky těžené prvky vázány na sulfidy i oxidy. Rozměrové veličiny obsažené v obou bezrozměrových kritériích – podobnostních číslech byly převzaty z literatury (tabulky T IX s.1049-1411).⁵ Tato korelace vlastností uvedených prvků: K, Cd, Tl, Na, Pb, Bi, Zn, Sn, Fe, Ni, Co, Pd, Mo, Pt, Pt, Cu, Si, Au, Ag, Si a Mg je navzájem svázaná vztahem $y = -0,307x + 2,783$, kde $y = \log T_{red} / T_{liq}$ a $x = \log (\rho \cdot \tau_{red} \cdot L_{skup}^2) / \lambda \cdot T_{liq}$, tj. vztahem mezi oběma bezrozměrovými kritérii. Obě bezrozměrová podobnostní čísla obsahují kromě vlastností čistých hornicky těžených prvků též dvě veličiny, které charakterizují použitý teplotní režim hutnického zpracování. V daném případě je to teplota redukčního žhání T_{red} a doba izotermického redukčního zpracování τ_{red} . Obě rozměrové veličiny přitom s jistou přibližností charakterizují pochod, který byl na Českomoravské vysočině v údobí přechodu středověku až do počátků novověku (9. až počátek 17. století) frekventovaně používán během tavení polymetalických i železných rud v tehdy ještě primitivních hutnických pecích. Citovaný graf na obr. 1 je tak jistým spojením tehdy aplikované a dosti široce rozšířené hutní technologie redukčního tavení polymetalických a železných rud. Při zpracování železných rud byl používán zejména k přímé výrobě kujného železa přímo z rud.

2 Souchopová, V. – Stránský, K. 2008

3 Mezinárodní Unie pro čistou a aplikovanou fyziku komise SUN symboly, jednotky a názvosloví ve fyzice. Dokument UIP 20 (1978) Academia, Praha 1983, 76 s. Vědeckí redaktoři Kovář, Z. – Garaj, J. – Dvořák, J. Z anglického originálu Symbols, Units and Nomenclature in Physics vydaného v roce 1978 IUPAP přeložil Vladimír Roskovec, 1983.

4 Kuneš, J. – Vavroch, O. – Franta, V. 1989

5 Horák, Z. – Krupka, F., Šindelář, V. 1961, tabulky T IX, s. 1049–1411

Pro 20 prvků uvedených na obr. 1 má korelační vztah $v = n - 2 = 20 - 2 = 18$ stupňů volnosti, přičemž koeficient korelace uvedeného log-log vztahu mezi oběma bezrozměrovými kritérii má hodnotu $r_{(n-2)} = 0,6129$. Podle matematicko statistických tabulek je pro 18 stupňů volnosti tato hodnota silně statisticky významná na hladině spolehlivosti zřetelně lepší než $\alpha = 0,01$.⁶ Kritická hodnota koeficientu korelace je pro tuto hladinu spolehlivosti $r_{krit} = 0,5614 < 0,6129$, tj. menší než odpovídá reálnému korelačnímu vztahu obou kritérií $r_{(n-2)}$. Z toho zároveň plyne, že zmíněný korelační vztah se uplatňuje s pravděpodobností větší než 99 %.

REDUKČNÍ TAVENÍ POLYMETALICKÝCH A ŽELEZNÝCH RUD

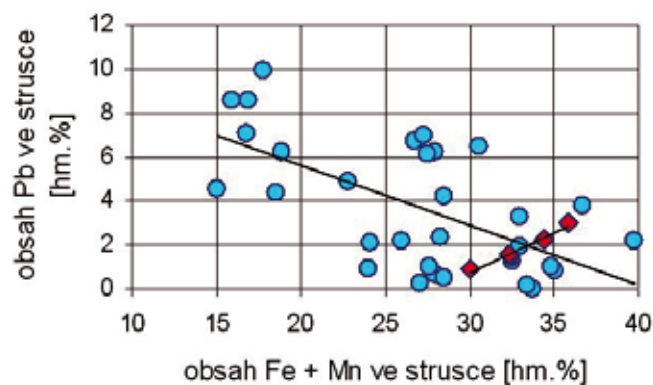
Redukční atmosféra je charakterizována reakcí tvorby oxidu uhelnatého $C + O_2 = CO_{atm}$, která se jako plynná fáze tvoří a udržuje spolu s jistým podílem plynného vzdušného kyslíku během redukčního tavení polymetalických a železných rud v primitivních nevysokých šachtových pecích vytápěných dřevěným uhlím. V dřevouhelných vysokých pecích je tomu podobně, avšak teplota redukčního tavení rud je zde mnohem vyšší. V podstavě vysoké pece stoupá teplota až na 1800 až 1900 i k hodnotě 2000 °C (2073,15 až 2173,15 i k hodnotě 2273,15 Kelvinu). Teplota T_{red} značící teplotu redukčního žíhání jak polymetalických tak železných rud byla zvolena o hodnotě 1 600 °C a v kritériu π_1 je uvedena v Kelvinech, tj. 1 873,15 K. Podobně je tomu i v kritériu π_2 , kde doba redukčního žíhání byla zvolena pro bezrozměrové kritérium τ_{red} o hodnotě 3 600 s, tj. v hodnotě 1 hodina. Vztah mezi bezrozměrovými kritérii na obr. 1 je tudíž vhodný pro malé šachtové pece, tedy pro pece k přímé výrobě železa z rud, a také pro pece, které byly používány k přímé výrobě surového olova, například na Havlíčkovobrodsku již od 13. století.

Zde je třeba zdůraznit, že žádná z těchto či podobných primitivních pecí k redukcí a tavení polymetalických rud se v oblasti bývalých hornických a hutních revírů Havlíčkovobrodsku z této doby nedochovala. Avšak díky iniciativě brněnského Technického muzea v nedávné minulosti byla odkryta a J. Mertou prozkoumána (1984) pec k tavení surového olova poblíž vesnice Lesní Hluboké nedaleko Velké Bíteše, a to u známé dálniční lokality *Tři kříže* v lesní trati uváděné jako: *Zum alten Silberofen*.⁷ Později bylo chemickými analýzami prvků Pb, Cu, Ag aj. v povlacích strusek na kamenné vyzdívice tamní pece prokázáno, že pec vskutku sloužila k tavení surového olova.⁸

Teplota v pásmu dmyšen olovářské pece při redukčním pochodu bývá vyšší než 1 250 °C (1 250 až 1 300 °C). Produkty spalování paliva odcházejí do horní části šachty či prostoru pece, přitom prostupují vsázkou a předávají vsázce své teplo. Teplota odcházejících plynů je v mezích 250 až 400 °C. Složení plynů je při teplotě od 500 do 800 °C tvořeno převážně oxidem uhelnatým CO a v pásmu dmyšen pece při vyšší teplotě již oxidem uhličitým CO₂, neboť obsah CO v plynech postupně s rostoucí teplotou klesá. Při tomto složení plynů již nastává redukce oxidů kovů. Nastává přitom také částečná redukce oxidů železa, přičemž oxidy Cu₂O, ZnO, PbO aj. jsou zcela redukovány a kovy přecházejí do strusky. V redukčních olovářských struskách bývají obsahy PbO kolem 0,4 hm.% i vyšší a obsah FeO nad 35 hm.%, kde byly analýzou

hutnických strusek z lokality Stříbrné Hory z produktů zdejší hutě v 17. století stanoveny průměrné obsahy prvků v sérii sedmi hutnických strusek v hm.% prvků: 0,79 Pb, 0,11 Cu, 2,01 Zn a dokonce 24,93 Fe.⁹ Je přitom nesporně pozoruhodné, že redukční pochod v šachtové peci probíhal v druhé polovině 20. století podle autorů za podmínek velmi blízkých redukčním pochodům v primitivních pecích v 13. století a v šachtových pecích v tavně ve Stříbrných Horách ještě počátkem 17. století, a to taktéž za podmínek blízkých redukčním pochodům.⁷ Usuzujeme tak na základě porovnání analýz chemického složení hutnických strusek z redukčního pochodu v šachtové peci a hutnických strusek rozsáhlého souboru celkem 32 hutnických strusek lokalit v okolí Havlíčkova Brodu.^{9,10} Oba porovnávané soubory strusek jsou graficky znázorněny na obr. 2. Modrými kroužky je znázorněno chemické složení souboru hutnických strusek z lokalit v blízkém okolí Havlíčkova Brodu – strusky byly odebrány z lokalit Grodlův mlýn, Simtany, Bartoušov (Hrubův lesík), Stříbrné Hory (Dolní Dvůr – kde pracovala Tavněna polymetalických rud zaniklá za třicetileté války). Červenými čtverečky je zakresleno chemické složení hutnických strusek z redukčního pochodu pěti taveb hutnických strusek doložených v publikaci z konce padesátých let minulého století.¹⁰

Z obr. 1 je patrné, že přímkou značící průměrné složení hutnických strusek tavených redukčními pochody od 13. do cca poloviny 17. století v Tavně u Dolního Dvora ve Stříbrných Horách se protíná s přímkou značící průměrné složení hutnických strusek z taveb realizovaných redukčními pochody v šachtových pecích v minulém století. Z korelace obou souborů časově velmi rozdílných taveb bylo možno usoudit na velmi podobné podmínky tehdejšího výběru vsázek polymetalických rud, a také teplotních a tepelných režimů taveb v tehdejších hutnických pecích. Tavby vedené v havlíčkovobrodských lokalitách jsou z pohledu hutnického, hornického a z části též historického, podrobněji diskutovány v pracích.¹¹ Poznamenejme, že příznivý vliv zvýšeného obsahu železa na snížení obsahu olova v olovářských hutnických struskách byl v 16. století známý již Georgiu Agricolovi.¹²



Obr. 2: Vztah mezi obsahem olova a součtovým obsahem manganu a železa v redukčních struskách z okolí Havlíčkova Brodu ze 13. století až z druhé poloviny 17. století a ve struskách z redukčních taveb polymetalických rud v šachtových pecích z druhé poloviny padesátých let 20. století

6 Murdoch, J. – Barnes, J. A. 1970: Statistical Tables for Science, Engineering, Management and Business Studies. Macmillan, Cranfield, 40 s. ISBN 333-02584-9

7 Merta, J. 1984

8 Stránský K. – Merta, J. – Buchal, A. 2003

Stránský, K. – Janová, D. – Stránský, L. – Merta, J. 2010

9 Sevrjukov, N. N. – Kuzmin, B. A. – Čeliščev, J. V. 1958, 239

Stránský, K. – Janová, D. – Stránský, L. 2012

Stránský, K. – Janová, D. – Kavička, F. – Stránský, L. – Sekanina, B. 2012

10 Sevrjukov, N. N. – Kuzmin, B. A. – Čeliščev, J. V. 1958

11 Sevrjukov, N. N. – Kuzmin, B. A. – Čeliščev, J. V. 1958

Stránský, K. – Janová, D. – Kavička, F. – Stránský, L. – Sekanina, B. 2012

Stránský, K. – Janová, D. – Stránský, L. 2012

12 Agricola, G. 2006

Na grafu na obr. 1. lze zároveň pozorovat rozdíl v poloze prvků, které jsou hlavním cílem těžby rudného bohatství a tvoří souhrn prvků bezrozměrové analýzy prvního i druhého podobnostního čísla. Prvky tvořící podstatu těžených polymetalických rud, k nimž jako k hlavním můžeme počítat olovo, zinek, cín, měď, stříbro i zlato, zatímco prvků, jež jsou předmětem těžby železných rud, kde je předmětem těžby především železo, nikl, kobalt, molybden aj., mají sice nevýrazné, ale přesto odlišné rozdělení. Prvky těžených polymetalických rud (Pb, Cu, Zn, Sn, Ag, Au) jsou soustředěny převážně v levé polovině grafu 1, zatímco prvky těžených železných rud (Fe, Co, Ni, Mo) se soustřeďují spíše v pravé polovině téhož grafu, přičemž obě skupiny prvků jsou podobnostní analýzou jejich fyzikálních a chemických vlastností takto rozděleny vždy, a to včetně jejich ostatních doprovodných příměsí. Bezrozměrové kritérium polymetalických a železných rud neobsahuje některé další prvky, například antimon, hliník a lithium, které sice splňují podmínku bezrozměrovosti kritéria π_2 , avšak statisticky významně snižují korelační vztah obou kritérií π_1 a π_2 , tj. kritérií zahrnujících jejich vzájemnou příčinnou souvislost.

POZNÁMKA K TĚŽBĚ A ZPRACOVÁNÍ POLYMETALICKÝCH A ŽELEZNÝCH RUD

Poznamenejme krátce, že polymetalické rudy, které jako zdroje těženého olova, mědi, cínu, zinku, stříbra, zlata, platiny, paladia aj. prvků jsou v české přírodě chudší, pokud běží o jejich kovnatost, než rudy železné. Železné rudy, které jako hlavní zdroje těženého železa, manganu, kobaltu, molybdenu, wolframu a dalších, např. tranzitních kovů, jsou na tom lépe. Pokud běží o Českomoravskou vysočinu a v širším slova smyslu i pro české země, bylo to tak po celý středověk až do novověku. Přesto u nás pracovala řada dolů, kde byly dobývány polymetalické rudy. Například na Jihlavsku, kde těžba a hutnické zpracování ve středověku jakostních olovnato-stříbrných rud významně ovlivnila právní systém českého i evropského horního práva, nevyjímaje dolování a zpracování rud polymetalických, zejména olovnato-stříbrných. Podobně tomu bylo v oblasti dnešního Havlíčkova Brodu a též v jižní části Českomoravské vysočiny na Nedvědicu, Pernštejnsku a Dačicku. Avšak počáteční úspěchy hornictví v těchto lokalitách byly již na přelomu 13. a 14. století nepříznivě poznamenány nálezy mnohem jakostnějších polymetalických rud, v podstatě stříbrných rud v Kutné Hoře, později v Příbrami, Jílovém u Prahy, Jáchymově aj. Snad nejlépe vynikne rozdíl mezi polymetalickými a železnými rudami poukázáním na rozdíly mezi nejbohatší stříbrnou rudou, kterou je *argentit* *AgS*, která se nacházela v kutnohorském horním revíru a *galenitu* *PbS*, který má pouze nízkou příměs stříbra, avšak který byl dobýván ve většině jmenovaných horních revírech polymetalických rud. Vzhledem k rudám železným – magnetitu, hematitu, limonitu a goethitu, jejichž ložiska byla dobývána a hutnicky zpracovávána v českých zemích od středověku až po přelom devatenáctého a dvacátého století a měla vyšší kovnatost, byla redukce železa z těchto rud provázena vyšší produktivitou. Zpravidla kovy polymetalických rud, například Pb, Ag vyrobené z galenitu, Ag, Sb ze stefanitu, Ag, Au ze sylvanitu, aj. bylo nutno ještě navzájem separovat.¹³ Zpracování vytěžených polymetalických rud tedy bylo provázeno nutností následně vzájemně separovat vytěžené kovy, jmenovitě olovo a stříbro aj.

Stopy po těžbě a zpracování jakostních polymetalických rud, zejména *AgS* a *galenitu* *PbS*, se zachovaly z dávné minulosti také v hutnických struskách. Např. ve struskách z Kutné Hory nacházíme častěji vyšší obsah stříbra než ve struskách z okolí Havlíčkova Brodu a jsou to také patrně jediné hutnické olovářské strusky z východní

periferní části Českomoravské vysočiny, v nichž byl, byť jenom jako minoritní fáze, mikroskopicky a chemickou analýzou nalezen a stanoven přímo *argentit*.

V železnorudných dolech, hutích a hamrech těžených a hutnicky zpracovávajících přiměřeně jakostní železné rudy byla situace odlišná, neboť výsledný produkt tvořilo převážně železo. Od středověku až po závěr 19. století přináší o těžbě a hutnickém zpracování železných rud, včetně přímé redukce rud k výrobě kujného železa, redukčního tavení železných rud v dřevouhelných vysokých pecích a zkujňování vysokopečnického surového železa ve výhňích, informace soubor prací.¹⁴ Soubor citovaných prací obsahuje konkrétní data o více než 42 lokalitách zaniklých hutí a hamrů na Českomoravské a Drahanské vrchovině do konce 19. století a je zpracován v rozsahu 216 stran.

Například přímo v lokalitě Staré Ransko, jmenované *U obrázku*, dobývala zdejší huť polymetalickou, převážně však železnou rudu o základním složení v hm. %: 0,55 Na₂O, 9,85 MgO, 8,36 Al₂O₃, 9,30 S, 0,29 K₂O, 1,46 CaO, 0,29 TiO₂, 0,15 BaO, 0,30 Cr₂O₃, 0,35 MnO, 38,62 Fe₂O₃, 0,72 NiO, 0,76 CuO, 0,61 ZnO a to až do devadesátých let 19. století, kdy byl provoz této hutě zrušen.¹⁵

Zatímco těžba polymetalických rud postupně zanikala a zůstaly po ní jen ostrovy německých horníků a hutníků na Jihlavsku a Havlíčkovobrodsku, postupně byly uzavírány a opouštěny také doly na polymetalické rudy a to nejčastěji pro málo výnosný provoz.

ZÁVĚR

V příspěvku je předložena možnost využití teorie fyzikálně chemické podobnosti ke sjednocení pohledu na těžbu a hutnické zpracování polymetalických a železných rud. Bylo ukázáno, že základní vlastnosti těžených polymetalických a železných rud je možno charakterizovat rozměrovými fyzikálními a chemickými vlastnostmi čistých těžených kovů. K těmto vlastnostem lze počítat měrnou hustotu, teplotu tavení, teplotní vodivost a skupenské (latentní) teplo. Tyto základní rozměrové veličiny charakterizující vlastnosti zmíněných rud je možno doplnit teplotou jejich redukčního zpracování a dobou redukčního žhání v primitivních hutnických pecích vytápěných dřevěným uhlím. Podobné hutnické pece pracovaly ve středověku až do začátku novověku (17. století) v široké oblasti Českomoravské vysočiny.

Je ukázáno, že těchto šest rozměrových veličin může být ve smyslu tří teorémů fyzikální podobnosti, tj. *Pí teorému*, *teorému rozměrové homogenosti* a *teorému rozměrové nezávislosti*, vyjádřeno cestou dvou bezrozměrových kritérií podobnosti, tj. podobnostních čísel. Rozměrovou analýzou byl stanoven bezrozměrový simplex

$$\pi_1 = \frac{T_{red}}{T_{liq}} \quad \text{vyjadřující poměr teploty redukčního žhání a teploty}$$

tavení čistého těženého kovu a pětičlenný bezrozměrový komplex

$$\pi_2 = \frac{\rho \cdot \tau_{red} \cdot L_{skup}^2}{\lambda \cdot T_{liq}}$$

V čitateli tohoto kritéria je součin měrné hustoty těženého čistého kovu, času redukčního tavení vytěžené rudy a čtverce, tj. druhé mocniny skupenského tepla čistého těženého kovu. Ve jmenovateli téhož kritéria je součin teplotní vodivosti čistého vytěženého kovu a jeho teploty likvidu.

Kromě doby redukčního tavení, která je proměnlivá, značí zbývající čtyři rozměrové veličiny, včetně teplotní vodivosti, fyzikálně chemické vlastnosti obou druhů rud polymetalických i železných. Běží přitom o rudy, které jsou v přírodě svými vlastnostmi navzájem pevně, tj. *stabilně svázané*. Pro 20 prvků na obr. 1 je tato vazba podle

13 Votoček, E. – J. Heyrovský. 1944

14 Stránský, K. – Stránský, L. – Janová, D. – Buchal, A. 2009

Stránský, K. – Ustohal, V. – Rek, A. – Stránský, L. 2003

15 Stránský, K. – Ustohal, V. – Rek, A. – Stránský, L. 2003

dat experimentálně změřených rozměrových veličin uvedených v dnes již klasické učebnici velmi silná a uplatňuje se s korelačním koeficientem 0,6129.¹⁶ Tento korelační vztah je pro použitý log-log vztah mezi oběma podobnostními čísly silně statisticky významný a to na hladině spolehlivosti 0,01.

LITERATURA

- Agricola, G. 2006: Georgius Agricola Dvanásť knih o baníctve a hutníctve. MONTANEX a.s., Ostrava, 546 s. ISBN 80-7225-218-6. (Georgii Agricolae: De re metallica libri XII, Basileae MDLVI).*
- Horák, Z. – Krupka, F. – Šindelář, V. 1961: Technická fyzika. SNTL, Praha, 1435 s.*
- Kuneš, J. – Vavroch, O. – Franta, V. 1989: Základy modelování. Teoretická knihovna inženýra, SNTL Praha. 263 s. ISBN 80-03-00147.*
- Merta, J. 1984: Výzkum tavicí pece v údolí potoka stříbrnice (kat. úz. Lesní Hluboké – okr. Brno – venkov. Archeologia technica 3, s. 108–109.*
- Murdoch, J. – Barnes, J. A. 1970: Statistical Tables for Science, Engineering, Management and Business Studies. Macmillan, Cranfield, 40 s. SBN 333-02584-9.*
- Sevrjukov, N. N. – Kuzmin, B. A. – Čeliščev, J. V. 1958: Obecné hutnictví. SNTL, Praha, 563 s.*
- Souchopová, V. – Stránský, K. 2008: Tajemství dávného železa. Archeometalurgie objektivem mikroskopu. Studie z historie techniky a průmyslu. Technické muzeum v Brně, Brno. 167 s. ISBN 978-80-86413-54-9.*
- Stránský, K. – Janová, D. – Kavička, F. – Stránský, L. – Sekanina, B. 2012: Metalurgie tavení polymetalických rud v okolí Havlíčkova Brodu od 13. do poloviny 17. století. Hutnické listy, roč. LXV, č.1 s. 65-74.*
- Stránský, K. – Janová, D. – Stránský, L. 2012: Metalurgie tavení polymetalických Pb, Cu, Zn, Ag rud v blízkém okolí Havlíčkova Brodu ve 13. až 17. století. In: Z dějin hutnictví 42, Rozpravy NTM, Praha, s. 75–84, ISBN 978-7037-212-8.*
- Stránský, K. – Janová, D. – Stránský, L. – Merta, J. 2010: Průzkum těžby olovnato-stříbrných rud v okolí České Bělé, na Havlíčkovodsku. Slévárenství 2010, LVIII, č. 5–6, s. 213–216.*
- Stránský, K. – Stránský, L. – Janová, D. – Buchal, A. 2009: Železné hamry a hutě Českomoravské a Drahanské vrchoviny. II. část. Vysoké učení technické, FSI, Brno, 107 s. ISBN 978-80-214-3853-8.*
- Stránský, K. – Merta, J. – Buchal, A. 2003: Důlní a hutnická činnost v údolí potoka Stříbrnice. Archeologia technica 15, s. 31–35.*
- Stránský, K. – Ustohal, V. – Rek, A. – Stránský, L. 2003: Železné hamry a hutě Českomoravské a Drahanské vrchoviny. Vysoké učení technické, FSI, Brno, 109 s. ISBN 80-214-2431-1.*
- Votoček, E. – Heyrovský, J. 1944: Chemie anorganická I. a II. díl. Nákladem české chemické společnosti pro vědu a průmysl. Praha, 1000 s.*
- Mezinárodní Unie pro čistou a aplikovanou fyziku komise SUN symboly, jednotky a názvosloví ve fyzice. Dokument UIP 20 (1978) Academia, Praha 1983, 76 s.*