

STŘEDOVĚKÉ BARYEM BOHATÉ STRUSKY PO TAVBĚ POLYMETALICKÝCH RUD NA VYBRANÝCH LOKALITÁCH V JIHLAVĚ

Medieval barium-rich slags after melting of polymetallic ores from selected sites in Jihlava

Jaroslav Kapusta¹, Zdeněk Dolníček¹, Karel Malý²

¹ Katedra geologie PřF UP, 17. listopadu 1192/12, 771 46 Olomouc; e-mail: jaroslav.kapusta@gmail.com

² Muzeum Vysočiny Jihlava, Masarykovo nám. 55, 586 01 Jihlava

(23–23 Jihlava)

Key words: Jihlava Ore District, slags, polymetallic ores, heavy metals, barium

Abstract

The studied slags originating from western part of town of Jihlava are predominantly composed of glass and unmelted corroded grains of quartz. Newly formed phases (barium-rich feldspars and sulphide inclusions) are only accessory. Feldspar contains up to 72 mol. % of celsian component. Sulphides form droplets (typically $XO \mu\text{m}$, rarely bigger than 0.5 mm) composed of pyrrhotite and sphalerite. Bulk slags show elevated heavy metals, especially Pb (up to 0,35 wt. %) and Zn (up to 1.35 wt. %), however, these values are significantly lower than in case of other published localities. The presence of high content of Ba in bulk slag, which is always higher than 5 wt. % BaO, is unique. The WDX analyses of glass showed up to 23.3 wt. % BaO and strongly heterogeneous distribution of Ba. Viscosity index v.i. and dynamic viscosity $\log \eta$ were calculated from bulk chemistry. The calculated values appear to be overestimated due to unusual chemical composition. It would lead to ineffective smelting procedure and/or necessity of very high temperatures. To compare obtained values with reality the melting experiments in an electric oven were realized. Maximum achievable temperature of 1 100 °C led to a complete melting of all samples except the quartz-rich one.

Úvod

Těžba polymetalických rud a jejich zpracování za účelem získání stříbra měly v historii Jihlavy zásadní postavení. Tato činnost zde byla vykonávána s přestávkami téměř po sedm století (Pluskal – Vosáhló 1998). Samotné počátky těžby byly vázány na starohorskou dislokační zónu, která z dnešního pohledu prochází západní částí Jihlavy (dnešní katastr Staré Hory). Časově jsou kladeny přibližně do 30. let 13. století. S nálezem bohatých cementačních zón ložisek byl spojen rychlý rozmach těžby a v důsledku toho i celého města (Vosáhló 2004).

Jihlavský rudní revír má rozlohu přibližně 280 km². Těžiště celé oblasti představuje samotná Jihlava s nejdelší mineralizovanou strukturou v podobě starohorské dislokační zóny.

Na základě izotopického a mineralogického složení a teploty vzniku dělí Malý et al. (2008) mineralizaci jihlavského rudního revíru na vysokoteplotní a mezotermální. Pluskal – Vosáhló (1998) vylučují celkem 6 mineralizací, z toho 4 polymetalické. V kontextu jejich práce je nejrozšířenější mineralizace typu černý sfalerit + kyzý ± karbonáty. Z historického hlediska měla význam především mineralizace světlý sfalerit ± baryt ± karbonáty, která byla těžena i na Starých Horách. Bernardem (1991) je označována jako pol (polymetalická) nebo Pb-Cu-Zn-Ag. Hlavním nositelem stříbra je v těchto zrudněných galenit, jen akcesorická je přítomnost freibergitu (Malý 2004).

Strusky vznikaly jako produkt redukční tavby předpražené rudy. Cílem tehdejších hutníků bylo upravení složení vsázky kvůli dosažení co nejnižší teploty tavení a co nejnižší viskozity vzniklé strusky. Tím bylo zajištěno efektivní oddělení vyredukovaného kovu od strusky. Další funkcí strusky byla fixace nečistot a zabránění oxidace kovu (Ströbele et al. 2010). Na chemismu strusek se nejvýrazněji podílejí SiO₂, FeO a CaO. Tyto hlavní oxidy zároveň

obvykle vykazují nejrozkolísanější obsahy (Bachmann 1982). Neobvyklé není ani anomální složení, kdy ve složení strusky dominuje například PbO (Ettler et al. 2009). Mezi krystalickými fázemi téměř vždy převládá olivín (fayalitem bohatý koncový člen), často se zajímavými obsahy ostatních prvků. Společným jmenovatelem všech struskových fází jsou zvýšené obsahy zinku, u skla a sulfidů i obsahy olova (Ettler et al. 2001, Kapusta et al. 2011).

Metodika

Vzorky byly odebírány povrchovým sběrem ze dvou lokalit vzdálených přibližně 200 m od sebe. První lokalita se nachází v levém břehu řeky Jihlavy (označení JS) na GPS souřadnicích 49° 24' 46,199" N, 15° 34' 27,239" E. Odběr byl proveden ve stometrovém úseku proti proudu od uvedeného bodu. Druhá lokalita se nachází v pravém břehu Červeného potoka (GPS 49° 24' 49,381" N, 15° 34' 39,118" E), přibližně 300 m od soutoku s Jihlavou (označení ČP). Obě uvedená odběrová místa se nacházejí poblíž archeology studovaného středověkého hutnického areálu Staré Hory. Na těchto lokalitách se strusky nacházejí jen izolovaně, netvoří mocnější polohy. Možné je i zanesení materiálu vodním tokem do nynějšího prostoru. Vzhledem k velikosti jednotlivých kusů (až 8 cm) a prakticky nulovému opracování nemohlo jít o příliš daleký transport. Dá se tedy předpokládat, že námi studované výskyty jsou úzce spjaté s úpravnickým areálem na Starých Horách. Distribuce vzorků je v rámci lokalit nahodilá. Nebyly pozorovány přednostně nabohacené polohy, jak je tomu například na lokalitě Plandry (Kapusta et al. 2012).

Jednotlivé fáze byly studovány ve výbrusech prostřednictvím polarizačního mikroskopu v procházejícím a odraženém světle. Jejich chemismus byl analyzován metodou WDX na mikrosondě CAMECA SX100 v Brně na společném pracovišti Přírodovědecké fakulty Masa-

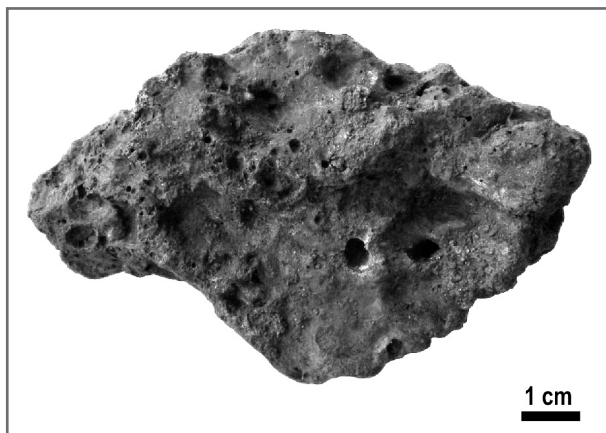
rykovy univerzity a České geologické služby. Podmínky analýzy byly u živců: urychlovací napětí 15 keV, proud 10 nA a průměr paprsku 4 μm . Pro sklo: urychlovací napětí 15 keV, proud 20 nA a průměr svazku 6 μm . Na mikrosondě byly pořízeny i fotografie v odražených elektronech (BSE).

Celkový chemismus byl stanoven v laboratořích ACME v Kanadě metodami ICP-OES, Leco a ICP-MS. Nadlimitní hodnoty Pb (>1 hmot. %), Zn (>1 hmot. %) a Ag (>100 ppm) byly v alikvotních dílech práškových vzorků analyzovány metodou ICP-OES na Katedře analytické chemie PŘF MU v Brně. Index viskozity byl vypočten vzorcem upraveným podle Ettlera et al. (2009a) a dynamická viskozita sérií vzorců uvedených v práci Giordana et al. (2006) se zohledněním obsahů Pb a Zn podle Ettlera et al. (2009).

Pokusné tavby byly provedeny v elektrické peci LM 312.11/2 s plynulou regulací teploty. Na zvolenou teplotu nabíhala pec přibližně tři hodiny. Na zvolených maximálních teplotách byla pec ponechána po dobu jedné hodiny. V průběhu bylo zaznamenáno kolísání teploty $\pm 10^\circ\text{C}$ od nastavené hodnoty. Redukční atmosféry bylo dosaženo vyplněním volného prostoru pece dřevěným uhlím.

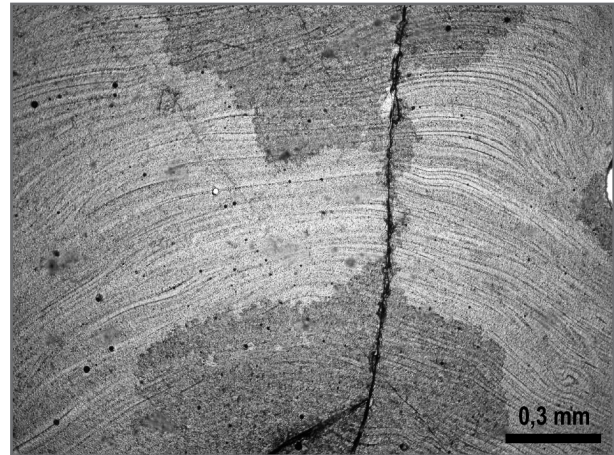
Výsledky

Na obou lokalitách se strusky nacházejí dominantně ve formě fragmentů (obr. 1), méně pak celotvarů. Rozměry jsou proměnlivé, ale nepřesahují 8 cm. Tvar je nepravidelný.



Obr. 1: Sklovitá bublinatá struska z lokality ČP.
Fig. 1: Glassy bubble-bearing slag from location ČP.

Pozorovány byly různé barevně odlišné variety. Převažují strusky černě zbarvené. Méně běžné jsou olivově zelené či modré. Nalezeny byly i vzorky s přechody mezi jednotlivými barvami (nejčastěji zelenošedá-modrá). Povrch je matný, mastný, nejčastěji skelně lesklý a lom lasturnatý. Lomné plochy jsou skelně lesklé. Charakteristická je přítomnost různě velkých sférických i oválných pórů (zpravidla nepřesahují 6 mm), které jsou obvykle nahodile rozmístěny, někdy jsou přednostně nahromaděny v okrajových zónách. Hojně jsou inkluze rozpraskaných izometrických zrn křemene. Strusky s vyšším obsahem křemenných zrn jsou zpravidla více porézní. Makroskopicky pozorovatelné sulfidické inkluze nejsou běžné. Povrch, případně trhliny jsou někdy rezavě zbarveny limonitem.



Obr. 2: Zonálnost a fluidální mikrotextura skla ve výbrusu strusky z lokality JS (PPL).

Fig. 2: Zonation and fluidal microtexture of glass in polished thin section from location JS (PPL).

Společným jmenovatelem všech mikroskopicky studovaných strusek je poměrně jednoduché mineralogické složení s drtivou převahou skelné fáze.

Sklo je ve výbrusu v PPL zelenožluté, zelené, hnědé až opakní. V XPL je izotropní, často se však projevuje anizotropie způsobená postupnou devitrifikací. Viskózní tečení odráží fluidální mikrotextura (obr. 2). Z tabulky 1 je patr-

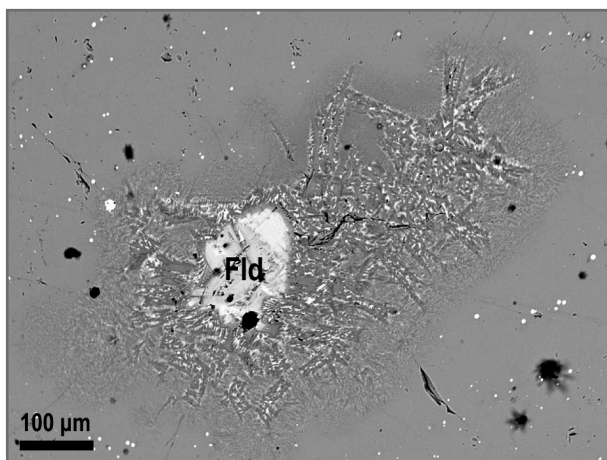
Tab. 1: Výsledky WDX analýz skla a živců. Kationty přepočteny na bázi 8 atomů kyslíku na vzorcovou jednotku.

Tab. 1: Results of WDX analyses of glass and feldspars. Cations are recalculated on basis of 8 atoms of oxygen per formula unit.

	živce		sklo					
	ČP3	JS2	ČP1	ČP3	ČP4	JS1	JS2	JS4
P ₂ O ₅	0,05	0,03	-	-	-	-	-	-
SiO ₂	39,65	45,12	48,77	48,31	44,24	43,72	50,24	43,98
TiO ₂	-	-	0,34	0,53	0,66	0,73	0,41	0,78
Al ₂ O ₃	25,75	24,85	6,06	7,05	6,08	5,74	6,26	6,16
V ₂ O ₃	-	-	0,07	0,01	0,04	0,06	0,01	0,00
BaO	31,29	23,01	8,97	10,41	18,75	23,32	6,69	18,47
CaO	0,29	1,35	7,00	6,75	9,94	10,82	4,94	10,22
FeO	0,26	0,84	21,73	17,89	10,70	7,72	24,19	11,11
SrO	0,20	0,24	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	1,09	1,33	1,26	1,46	1,78	1,24
MnO	-	-	0,89	0,41	0,29	0,24	0,35	0,33
NiO	-	-	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,03
PbO	-	-	0,21	0,12	0,20	0,13	0,31	0,20
ZnO	-	-	1,26	2,43	1,86	1,01	1,14	1,83
K ₂ O	2,90	4,61	2,16	2,38	1,91	1,78	1,84	1,95
Na ₂ O	0,28	0,69	0,50	0,63	0,60	0,54	0,60	0,62
F	-	-	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
suma	100,66	100,73	99,88	98,28	96,56	97,29	98,74	96,93
P	0,002	0,001	-	-	-	-	-	-
Si	2,266	2,420	-	-	-	-	-	-
Al	1,735	1,571	-	-	-	-	-	-
Ba	0,701	0,484	-	-	-	-	-	-
Ca	0,018	0,077	-	-	-	-	-	-
Fe	0,012	0,038	-	-	-	-	-	-
Sr	0,007	0,007	-	-	-	-	-	-
K	0,211	0,316	-	-	-	-	-	-
Na	0,031	0,071	-	-	-	-	-	-
suma	4,983	4,986	-	-	-	-	-	-

né, že více než 90 % hmoty skla představuje suma oxidů: SiO₂ (43,98–50,24 hmot. %), Al₂O₃ (5,74–7,05 hmot. %), FeO (7,72–21,73 hmot. %), BaO (6,69–23,32 hmot. %), CaO (4,94–10,82 hmot. %) a K₂O (1,78–2,38 hmot. %). Zajímavé, a pro tento typ strusek typické, jsou i mírně navýšené obsahy Pb (0,13–0,21 hmot. % PbO) a Zn (1,01–2,43 hmot. % ZnO).

Sulfidy se vyskytují takřka výhradně ve formě drobných kapek (jen několik setin milimetru velkých) uložených ve sklovité hmotě. Jen velmi raritní jsou sulfidické inkluze větší než půl milimetru. V odraženém světle byl zjištěn pyrotin a sfalerit. Oba ve formě okrouhlých zrn v proměnlivém množství obklopených blíže neurčenou hmotou (zřejmě Cu-Fe-S fáze neznámé stechiometrie, srov. Kapusta et al. 2012). Běžné jsou i myrmekitické srůsty pyrotinu se sfaleritem.



Obr. 3: Živec obklopený sklovitou hmotou ve strusce z lokality ČP (BSE). Bílé malé kapky jsou sulfidické inkluze. Sklo je v bezprostředním okolí živce zřetelně devitifikované.

Fig. 3: Feldspar enclosed in glassy matrix in slag from location ČP (BSE). White little droplets are sulphidic inclusions. Glass nearby feldspar is distinctly devitrified.

Až při studiu na mikrosondě byla identifikována ojedinělá drobná zrna živců. Ta jsou přibližně izometrická, oválná, někdy (v obraze BSE) zonální (obr. 3). Typické jsou vysoké obsahy Ba (23,01–31,29 hmot. % BaO; tab. 1). Vyjádřeno koncovými členy v nich dominuje celsianová komponenta (48,4–70,1 mol. % Cn), v menší míře je zastoupen ortoklas (21,1–31,6 mol. %), anortit (1,8–7,7 mol. %) a albit (3,1–7,1 mol. %). Jen nepatrné jsou obsahy Fe (0,26–0,84 hmot. % FeO) a Sr (0,20–0,24 hmot. % SrO).

Jak již bylo uvedeno, křemen představuje neroztavené relikt. Jednotlivá zrna jsou izometrická, oválná, případně méně pravidelných tvarů obvykle s korodovaným okrajem. Typické je silné rozpraskání.

Jak je patrné z tabulky 2, strusky mají nejrozkolísanější obsahy Fe₂O₃ (8,8–22,2 hmot. %) a SiO₂ (43,5–59,4 hmot. %). Nejstabilnější jsou hodnoty Al₂O₃ (5,5–6,3 hmot. %), K₂O (1,8–2,3 hmot. %) a Na₂O (0,4–0,6 hmot. %). Nízké sumy všech analýz (73,5–94,1 hmot. %) jsou ovlivněny nezapočítáním obsahů Ba, které u všech vzorků překročily horní limit stanovitelnosti (5 hmot. % Ba).

Tab. 2: Celkový chemismus strusek (oxidy ve hmot. %, stopové prvky v ppm s výjimkou Au v ppb). TOT/C – celkový uhlík, TOT/S – celková síra, LOI – ztráta žháním. Hodnoty dynamické viskozity log η v Pa*s.

Tab. 2: Bulk chemical composition of slags (oxides in wt. %, trace elements in ppm except for Au in ppb). TOT/C – total carbon, TOT/S – total sulphur, LOI – loss on ignition. Values of dynamic viscosity log η in Pa*s.

	ČP1	ČP5	ČP10	JS1	JS5	JS8
P ₂ O ₅	0,39	0,35	0,34	0,37	0,36	0,43
SiO ₂	56,97	56,85	57,94	44,05	43,48	49,33
TiO ₂	0,24	0,31	0,55	0,48	0,67	0,35
Al ₂ O ₃	5,53	5,91	6,06	5,61	6,18	6,25
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Fe ₂ O ₃ ^{tot}	18,53	21,65	10,00	8,81	11,17	22,20
CaO	4,77	4,57	9,55	10,17	9,84	9,73
MgO	0,79	0,98	1,30	1,40	1,68	1,03
MnO	0,63	0,57	0,31	0,28	0,33	0,24
PbO	0,23	0,15	0,10	0,25	0,35	0,06
ZnO	0,72	0,26	0,23	0,93	1,68	0,28
K ₂ O	2,22	2,33	2,03	1,80	1,97	2,11
Na ₂ O	0,38	0,44	0,48	0,42	0,50	0,46
TOT/C	0,55	0,09	0,17	0,02	0,02	< 0,02
TOT/S	0,80	0,61	0,34	0,53	0,52	0,55
LOI	-0,30	-1,60	-0,70	-1,10	-1,70	-2,30
suma	92,46	93,48	88,71	74,03	77,05	90,72
Ba	> 50000	> 50000	> 50000	> 50000	> 50000	> 50000
Sr	1516	1110	2216	5120	4755	1879
Pb	2164	1376	947	2303	3243	552
Zn	5758	2073	1827	7502	13451	2210
Cu	763	835	890	868	881	463
Ag	51	47	> 100	107	128	13
Au	4,3	8,4	2,4	0,5	< 0,5	1,5
v.i. _{mod}	0,42	0,46	0,36	0,47	0,53	0,61
log η 800 °C	8,70	8,58	8,32	7,56	7,38	7,54
log η 1 000 °C	5,47	5,36	5,08	4,33	4,16	4,34
log η 1 200 °C	3,47	3,37	3,12	2,44	2,29	2,47

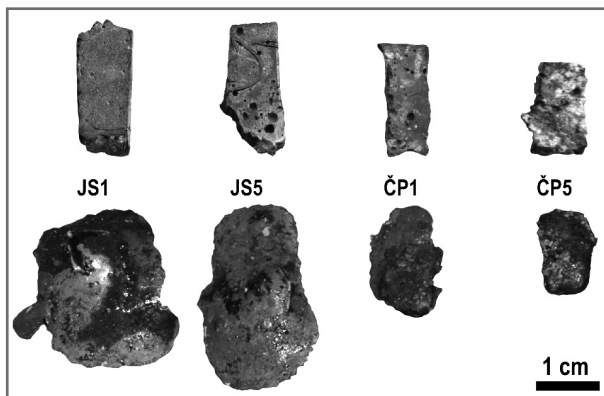
U lokality ČP se setkáváme s velmi variabilními hodnotami Fe₂O₃ (10,0–21,7 hmot. %) a CaO (4,6–9,6 hmot. %) a zároveň průměrně nejvyššími obsahy SiO₂ (55,4 hmot. %). Přítomnost vysokých obsahů Ba je provázána i zvýšením koncentrací Sr (až 0,36 hmot. %) Těžké kovy jsou zastoupeny Pb (až 0,23 hmot. % PbO) a Zn (až 0,95 hmot. % ZnO). Obsahy mědi se pohybují ve stovkách ppm (maximum 974 ppm). Obsahy stříbra silně kolísají (13–128 ppm), obsahy Au nepřesahují 8,4 ppb.

Strusky z JS mají relativně stabilní obsahy SiO₂. Výjimkou je vzorek JS9 (59,4 hmot. %). Obsahy CaO jsou v průměru nejvyšší (8,9 hmot. %). Naopak hodnoty Fe₂O₃ jsou nejnižší s průměrem 13,6 hmot. % (výjimka JS8 22,2 hmot. %). Opět se zde setkáváme s převahou Zn (až 1,68 hmot. % ZnO) nad Pb (0,35 hmot. % PbO). Pozorovat můžeme stejný trend u Sr a Ba jako u strusek z lokality ČP – Sr dosahuje až 5 120 ppm a provází zvýšené obsahy Ba. V rámci obou lokalit se zde setkáváme s nejvyššími obsahy Cu (až 1 859 ppm) a Ag (až 128 ppm).

Celkový chemismus posloužil také pro výpočet indexu viskozity a dynamické viskozity. Index viskozity

představuje na teplotě nezávislou veličinu. Nižší hodnoty odráží vyšší viskozitu a tím pádem nižší efektivitu tavby (lze předpokládat horší oddělení kovu od strusky). U našeho souboru měření se pohybuje $v.i._{mod}$ v intervalu 0,36–0,61. Dynamická viskozita zohledňuje změnu viskozity v závislosti na teplotě. Vypočtené hodnoty $\log \eta$ pro 800 °C (7,38–8,70 Pa*s) se dají velmi přibližně přirovnat k viskozitě odpovídající asfaltu za pokojové teploty. Pro teplotu 1 200 °C byly zjištěny hodnoty $\log \eta$ v rozsahu 2,29–3,47 Pa*s.

Na vzorcích, u kterých byly známé informace o celkovém chemismu, byly provedeny celkem tři pokusné tavby odstupňované po 50 °C. Nejnižší teplota byla zvolena 1 000 °C, která způsobila natavení vzorků JS1 a ČP1. JS5 byl lehce prohnutý a ČP5 zůstal zcela neporušen. Při 1 050 °C byly nataveny JS1 a ČP5. JS5 a ČP1 byly roztaveny. Poslední zvolená teplota (1 100 °C) byla spojená s úplným roztavením všech vzorků až na uzavřeninami křemene bohatý ČP5, ten měl jen otavené hrany (obr. 4).



Obr. 4: Vybrané vzorky před a po hodinovém zahřívání při 1 100 °C.

Fig. 4: Selected samples before and after one-hour-long heating at 1 100 °C.

Diskuze

Zajímavá je sklovitá struktura a zároveň téměř absence (s výjimkou ojedinělých individuí Ba-živce) novotvořených krystalických fází u všech studovaných vzorků strusek. Přitom i v případě rychlého chlazení, jak ukazuje práce Donaldsona (1976), se dá předpokládat alespoň vznik olivínů uspořádaných do spinifexové textury. Je možné, že vysoké obsahy Ba (až 23 hmot. %) ve skle fungovaly jako inhibitor krystalizace. Tomu by odpovídaly i nižší obsahy Ba (maximum 3,7 hmot. % BaO ve skle) společně s přítomností dobře krystalizovaných strusek (až izometrická zrna olivínů) na nedaleké lokalitě Plandry (Kapusta et al. 2012). Absence novotvořených krystalických fází by tak umožňovala snazší průchod vyredukovaného kovu taveninou a tedy i lepší oddělení kovu od strusky. Tomu by odpovídala i nepřítomnost větších sulfidických inkluzí, které jsou na jiných lokalitách běžné (např. Janíčková et al. 2012). Zároveň Ba společně s Ca vytěsňují Pb a Zn

z taveniny, jak dokazují nízké obsahy těchto kovů (maximum 0,35 hmot. % PbO a 1,68 hmot. % ZnO) ve srovnání s jinými lokalitami (např. Manasse – Mellini 2002). Zvýšené obsahy Ba nejsou provázeny zásadní změnou obsahu S (0,34–0,80 hmot. %), ta mohla ovšem odcházet během tavby v podobě oxidů v kouři. Otázkou zůstává, zda bylo přidávání tavidel v podobě barytu do vsázky cílené (viz nalez jámy vyplněné čistým barytovým štěrkem na Starých Horách; Hrubý 2004) nebo zda jsou systematicky vysoké obsahy Ba ve struskách jen odrazem přítomnosti barytu v žilovině zpracovávaných rud.

WDX analýzy skla společně s hodnotami celkového chemismu nabízejí možnost pozorovat, nakolik je chemismus strusek v celém objemu vzorku nehomogenní a jak se liší od průměrného. Vzhledem k tomu, že při stanovování celkového chemismu byl překonán horní limit stanovitelnosti Ba, nastiňují rámcově bodové analýzy skla možné obsahy barya. Pro zvýšené obsahy vápníku je nepochybné zpracování rudy na karbonáty bohatší (až 10,2 hmot. % CaO), případně přidávání tavidel na stejné bázi.

Vypočtené hodnoty $v.i._{mod}$ dosahují v průměru nízkých hodnot, které až téměř vylučují efektivní funkci strusky během tavby za teplotních podmínek dosažitelných tehdejšími metodami. Pro relevantní výsledky by bylo nutné upravit vzorec původně použitý Bachmannem (1982) a upravený Ettlerem et al. (2009) jmenovitě pro každou lokalitu a zohlednit u námi studovaných strusek typické vysoké obsahy Ba. Zároveň by bylo nutné z materiálů bohatších na křemen odstranit všechny křemenné inkluze, které ovlivňují celkový obsah SiO_2 .

Stejně jako u $v.i._{mod}$ i u dynamické viskozity se setkáváme s nadhodnocením vypočítaných hodnot. To je způsobeno tím, že opět nebylo možné zohlednit zvýšené obsahy Ba. Na druhou stranu výhodou je realizace výpočtu bez zahrnutí možných zkreslených obsahů SiO_2 .

Tvrzení, že jsou vypočítané hodnoty $v.i._{mod}$ a dynamické viskozity nereálné, podporují i realizované tavby, kdy v teplotním intervalu 1 050–1 100 °C došlo během 1 h s výjimkou jednoho vzorku ke kompletnímu roztavení všech studovaných strusek. V tomto teplotním intervalu vypočítaná dynamická viskozita přibližně odpovídá například andezitovému–dacitovému magmatu za stejné teploty.

Suma zjištěných těžkých kovů (Pb a Zn), které jsou vázány takřka výhradně ve skle a představují jediné environmentální riziko těchto materiálů, nepřesahuje 2 hmot. procenta. V porovnání s tuzemskými i zahraničními lokalitami se jedná o hodnoty velmi nízké. Zároveň je to (především z pohledu Pb) ukazatelem dobře zvládnuté technologie hutnění.

Poděkování

Studie byla finančně podpořena projekty IGA UP PrF/2012/004 a IGA UP PrF/2013/010. Autoři děkují P. Gadasovi (MU Brno) za asistenci při práci na mikrosondě.

Literatura

- Bachmann, H. G. (1982): The identification of slags from archaeological sites. – University of London, occasional publication No. 6. London.
- Ettler, V. – Červinka, R. – Johan, Z. (2009): Mineralogy of medieval slags from lead and silver smelting (Bohutín, Příbram district, Czech Republic): Towards estimation of historical smelting conditions. – *Archaeometry*, 51, 6, 987–1007.
- Donaldson, C. H. (1976): An experimental investigation of olivine morphology. – *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 57, 187–95.
- Giordano, D. – Mangiacapra, A. – Potuzak, M. – Russell, J. K. – Romano, C. – Dingwell, D. B. – Di Muro, A. (2006): An expanded non-Arrhenian model for silicite melt viscosity: A treatment for metaluminous, peraluminous and peralkaline liquids. – *Chemical Geology*, 229, 42–56.
- Hrubý, P. (2004): Středověká hornická aglomerace na Starých Horách u Jihlavy. – *Stříbrná Jihlava 2004*, 5–21.
- Janičková, K. – Dolníček, Z. – Malý, K. (2012): Fázové složení strusek po tavně stříbrných rud na Havlíčkovobrodsku. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 19, 186–189.
- Kapusta, J. – Dolníček, Z. – Malý, K. (2012): Fázové složení středověkých strusek po tavně Pb-Ag rud z hutnického areálu Plandry u Jihlavy. – *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku*, 19, 190–194.
- Malý, K. (2004): Mineralogické zhodnocení starohorských nálezů. – *Stříbrná Jihlava 2004*, 62.
- Malý, K. – Dobeš, P. – Fojt, B. (2008): Stable isotope and fluid inclusion study of polymetallic mineralization in Jihlava Ore District (Czech Republic). – *Mineralogia – Special Papers*, 32, 111–112.
- Manasse, A. – Mellini, M. (2002): Chemical and textural characterization of medieval slags from the Massa Marittima smelting sites (Tuscany, Italy). – *Journal of Cultural Heritage*, 3, 187–98.
- Pluskal, O. – Vosáhlo, J. (1998): Jihlavský rudní obvod. – *Vlastivědný sborník Vysočiny*, 13, 157–191.
- Ströbele, F. – Wenzel, T. – Kronz, A. (2010): Mineralogical and geochemical characterization of high-medieval lead-silver smelting slags from Wiesloch near Heidelberg (Germany) – an approach to process reconstruction. – *Archaeological and Anthropological Sciences*, 2, 191–215.
- Vosáhlo, J. (2004): Hornická činnost na starohorské dislokační zóně z pohledu historických pramenů. – *Stříbrná Jihlava 2004*, 22–32.