

## Návrh technológie mletia serpentinitovej suroviny z dobšinských hald

Michal Leško<sup>1</sup>, Milan Búgel<sup>1</sup>, Tomáš Bakalár<sup>1</sup> a Alena Pietriková<sup>2</sup>

### *Technological project of serpentine raw material milling from Dobšiná heaps*

*Serpentine heaps in the surrounding of Dobšiná are an old ecological problem of the city and at the same time a suitable material for the production of MgCl<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>. The technology of the production is based on the chemical processing of the raw material, which is preceded by the raw material preparation comprising of the mechanical and hydraulic sorting, milling and the magnetic separation operations.*

**Key words:** *milling, milling kinetics, sorting, circulating batch, magnetic separation.*

### Úvod

Využitie priemyselných odpadov je dôležité nielen z hľadiska ochrany životného prostredia, ale má d'alekosiahly význam aj ako zdroj druhotných surovín. Serpentinitové haldy v Dobšinej, ktoré sú pozostatkom z ťažby a spracovania chryzotilového azbestu v minulom období, svojim zložením evokujú ich využitie v rôznych oblastiach priemyslu. Jednou z možností je využitie serpentinitových odpadov na chemickú výrobu čistého oxidu kremičitého a chloridu horečnatého (Búgel et al., 2003). Návrh technologickej linky predpokladá jej zloženie z dvoch relatívne samostatných častí zameraných na :

- mechanickú úpravu suroviny,
- chemickú výrobu oxidu kremičitého a chloridu horečnatého.

V tomto príspevku sú rozoberané predovšetkým otázky mletia suroviny so zameraním na jej využitie v nadväzujúcej chemickej prevádzke.

### Charakteristika serpentinitového odpadu

Serpentinitový odpad dobšinských hald je tvorený zvyškom po spracovaní chryzotilu, z ktorého sa získavali vlákna azbestu a v neskoršom období serpentinitová drvina na výrobu kameniva.

Množstvo suroviny uložené na haldách je odhadované na cca 1,3 milióna ton. Haldy tvoria nasypané kužele s vysokým sypným uhlom. Vo východnej časti je jeden kužel haldy otvorený stenou, ktorá sa vytvorila v dôsledku ťažby haldy, pretože tento materiál slúžil po vytriedení jemných podielov ako posypový materiál na cesty. Odkryv poskytuje pohľad na úplný rez haldou a vytvára najvhodnejšie podmienky pre odber vzoriek (Búgel et al. 2002).

### Zrnitostná charakteristika serpentinitového odpadu

Časť zhomogenizovaných vzoriek odobratých z haldy bola využitá na zrnitostný rozbor suchou cestou, pri ktorom boli realizované tri paralelné stanovenia. Zistené výsledky sú uvedené v tab. 1. Zrnitostný rozbor zrnitostnej triedy 0-1 mm bol realizovaný na sítach 0,15; 0,4 a 0,71 mm mokrou cestou.

Pri príprave materiálu na chemický výskum bola časť materiálu triedená na site okatosti 1 mm. Po roztriedení jednej šarže materiálu určeného na chemické spracovanie v množstve 22,8 kg bol zistený nasledujúci hmotnostný výnos zrnitostných tried :

- zrnitostná trieda 0 – 1 mm 85,2 %,
- zrnitostná trieda + 1 mm 14,8 %.

Tento údaj sa veľmi dobre zhoduje s hodnotami zvýraznenými v tab. 1.

Rozdiely medzi paralelnými meraniami sa využili na previerku presnosti a správnosti zrnitostného rozboru. Vyhodnotený rozdiely kumulovaných hmotnostných výnosov sú uvedené v tab. 2.

<sup>1</sup> prof. Ing. Michal Leško, CSc., doc. Ing. Milan Búgel, CSc., Ing. Tomáš Bakalár, Katedra mineralurgie a environmentálnych technológií, F BERG TU v Košiciach, Park Komenského 19, 043 84 Košice, [Michal.Lesko@tuke.sk](mailto:Michal.Lesko@tuke.sk), [Milan.Bugel@tuke.sk](mailto:Milan.Bugel@tuke.sk), [Tomas.Bakalar@tuke.sk](mailto:Tomas.Bakalar@tuke.sk)

<sup>2</sup> doc. Ing. Alena Pietriková, CSc., Katedra technológií v elektrotechnike, FEI TU v Košiciach, [Alena.Pietrikova@tuke.sk](mailto:Alena.Pietrikova@tuke.sk)  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 2. 9. 2005)

Najväčší rozdiel je zvýraznený. Zo štatistického Kolmogorovovho-Smirnovovho testu (Leško et al., 1986) vyplýva, že uvedený rozdiel je štatisticky nevýznamný a predstavuje ani nie 3 % relatívnu chybu. Na základe uvedeného môžeme konštatovať, že výsledky sú správne a nasledujúca analýza potvrdzuje, že aj presné.

Presnosť rozboru sa dá vyhodnotiť z hmotnosti navážok pred a po zrnitostnom rozbere. Hodnoty sú uvedené v tab. 1 – spodné riadky. Celková relatívna chyba vypočítaná podľa vzťahu

$$\varepsilon_R(m) = \sqrt{\varepsilon_{R_1}^2 + \varepsilon_{R_2}^2 + \varepsilon_{R_3}^2} = \sqrt{\left(\frac{2}{1000}\right)^2 + \left(\frac{5}{1000}\right)^2 + \left(\frac{1}{1000}\right)^2} = 0,005$$

čo predstavuje 0,5 % a pre daný druh práce je veľmi malá. Zistené rozdiely sú štatisticky nevýznamné a z hľadiska praktického sú nepodstatné. Presnosť zrnitostného rozboru je veľmi vysoká.

Tab. 1. Zrnitostný rozbor serpentinitového odpadu (Bügel et al. 2002)

Tab. 1. Particle size analysis of the serpentine waste (Bügel et al. 2002)

Zrnitostná trieda [mm]	Hmotnostný výnos [%]							
	Vzorka 1		Vzorka 2		Vzorka 3		Priemerná vzorka	
	$\eta$	$\Sigma\eta$	$\eta$	$\Sigma\eta$	$\eta$	$\Sigma\eta$	$\eta$	$\Sigma\eta$
0 – 0,15	35,3		>62,9		>62,5		>62,4	
0,15 – 0,4	26,6	61,9	12,1	62,9	10,9	62,5	12,2	
0,4 – 0,71	13,7	75,6	10,4	75,0	11,3	73,4	10,5	74,6
0,71 – 1	9,7	<b>85,3</b>	8,8	<b>85,4</b>	8,5	<b>84,7</b>	8,8	<b>85,1</b>
1 – 2,5	9,1	94,4	2,0	94,2	2,4	93,2	2,2	93,9
2,5 – 4	2,1	96,5	1,5	96,2	1,4	95,6	1,6	96,1
4 – 5	1,8	98,3	2,3	97,7	3,0	97,0	2,3	97,7
+5	1,7	100,0		100,0		100,0		100,0
Hmotnosť vzorky [g]	1000,0		1000,0		1000,0		pred analýzou	
	998,0		995,0		999,0		po analýze	

Z uvedeného vyplýva, že zrnitostné zloženie sa môže vyjadriť priemernými hodnotami – posledný stĺpec tab. 1.

Na stanovenie podielu 0 – 0,25 mm (požiadavka chemického spracovania suroviny) v zrnitostnej triede 0 – 1 mm bolo použité mokré triedenie na site okatosti 0,25 mm. Výsledky troch paralelných analýz sú nasledujúce :

Zrnitostná trieda [mm]	Hmotnostný výnos [%]
0 – 0,25	58,9
<u>0,25 – 1</u>	<u>41,1</u>
0 – 1	100,0

Z uvedeného vyplýva, že na domieľanie je určený cca 40 % podiel suroviny zrnitostnej triedy 0 – 1 mm.

Tab. 2. Vyhodnotenie správnosti zrnitostného rozboru

Tab. 2. Evaluation of the particle size analysis accuracy

Zrnitostná trieda [mm]	Rozdiely kumulovaných hmotnostných výnosov tried [%]		
	Vzorka 1 – 2 $\equiv \Delta_{12}$	Vzorka 1 – 3 $\equiv \Delta_{13}$	Vzorka 2 – 3 $\equiv \Delta_{23}$
0 – 0,4	-1,0	-0,6	0,4
0,4 – 0,71	0,6	2,2	1,6
0,71 – 1	-0,1	0,6	0,7
1 – 2,5	0,2	1,2	1,0
2,5 – 4	0,3	0,9	0,6
4 – 5	0,6	1,3	0,7
+5	-	-	-

### Chemické zloženie serpentinitového odpadu

Účelom chemického rozboru bolo zistiť skutočné zastúpenie hlavných zložiek SiO<sub>2</sub> a MgO. Teoretické chemické zloženie serpentínu, resp. chryzotilu 3MgO.2SiO<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O sa môže vyjadriť v nasledujúcich hmotnostných podieloch: 43,63 : 43,33 : 13,04 %. Chemický rozbor bol urobený v Geoanalytických laboratóriách ŠGÚ v Spišskej Novej Vsi, výsledky sú uvedené v tab. 3.

Porovnaním údajov v stĺpcoch 1, 2 a 3 vidieť, že rozdiely v obsahoch SiO<sub>2</sub> a Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sú malé. Relatívne vysoký obsah Fe môže byť spôsobený prítomnosťou oxidov železa, napr. aj magnetitu Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Uvedený problém je potrebné riešiť vo fyzikálnej časti úpravy magnetickou cestou.

Rozdiely hodnôt prvého a druhého stĺpca tab. 3 sú minimálne, čo je potvrdením skutočnosti zistenej zrnitostným rozborom, že zastúpenie triedy –1 mm predstavuje až 85 % z celkového množstva materiálu.

Mineralogický rozbor suroviny z haldy špeciálne pre potreby riešenia tejto úlohy nebol urobený. V rámci geologického prieskumu ložísk v okolí Dobšinej výsledky mineralogického rozboru z hľadiska

kvality sú známe (Fischerová et al., 1983; Grecula et al., 1995; Koděra et al., 1989), ale chýba kvantitatívny mineralogický rozbor.

V dostupných prameňoch (Grecula et al., 1995; Koděra et al., 1989) je uvedené, že základnými minerálmi ložiska sú lizardit a chryzotil, ďalej sú prítomné zvyšky pôvodnej horniny olivínu a enstatitu pred serpentinizáciou.

Horčík v serpentinite môže byť substituovaný železom, mangánom, niklom, chrómom, ale aj hliníkom. Vyskytujú sa pyroxeny, pyroaurit, aj amfibol. Z rudných minerálov magnetit, chromit, zriedka chromspinelit, minerály Ni a Co, ako aj stopové prvky Ag, Co a Ga.

Tab. 3. Chemické zloženie serpentinitového odpadu  
Tab. 3. Chemical composition of the serpentine waste

Zložka [hmot. %]	Halda 1	Zrnitostná trieda -1 mm 2	Zrnitostná trieda + 1 mm 3
SiO <sub>2</sub>	38,59	38,44	40,05
MgO	37,00	37,15	36,34
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,46	1,41	1,73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,03	7,89	7,41
CaO	1,22	1,21	0,99
FeO	1,15	0,67	0,91
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,38	0,40	0,43
NiO	0,25	0,26	0,26
MnO	0,11	0,12	0,12
Strata žíhaním	12,58	12,77	12,49

Z fyzikálnych vlastností je potrebné spomenúť hustotu, ktorá sa pre hlavné minerály pohybuje v intervaloch 2,5 – 2,7 g.cm<sup>-3</sup>, hoci niektoré zložky, hlavne minerály rúd, majú podstatne vyššiu hodnotu.

Štruktúra, resp. textúra nemá z technologického hľadiska spracovania tejto suroviny praktický význam, pretože na haldách sa surovina vyskytuje prevažne v zrnitostnej triede pod 1 mm. Pôvodná hornina sa vyznačuje dobrou štiepatelnosťou a je krehká, nižšej tvrdosti (3-5 stupeň Mohsovej stupnice), čo sa priaznivo odráža na pomerne dobrej drviteľnosti. Horšia meliteľnosť (Fischerová et al., 1983) je pravdepodobne spôsobená prítomnosťou azbestových žíl.

Z ostatných vlastností minerálov dôležitých pre úpravu je potrebné uviesť magnetické a elektrické vlastnosti. Magnetit, resp. chromspinelit patria k feromagnetickým minerálom, ostatné minerály sú para, resp. diamagnetické. Z hľadiska elektrickej vodivosti patrí surovina do skupiny nevodičov a niektoré rudné minerály, ktorých zastúpenie je nepatrné, sú polovodiče.

### Návrh technológie úpravy serpentinitovej suroviny

Zloženie serpentinitovej suroviny a vlastnosti hlavných zložiek determinujú voľbu metódy jej fyzikálnej úpravy. Prvoradým cieľom úpravy je pripraviť surovinu na vstup do chemickej časti prevádzky. Z toho teda vyplývajú tieto úlohy :

- úprava zrnitosti, ktorá by mala dosiahnuť hodnotu 96 % pod 0,25 mm,
- zníženie obsahu železa vo vsádzke, pretože jeho prítomnosť zvyšuje spotrebu chemikálií pri lúhovaní a hmotnosť filtračného koláča zo spracovania kvapalnej fázy po lúhovaní.

Z týchto predpokladov vychádza predkladaný návrh technológie úpravy.

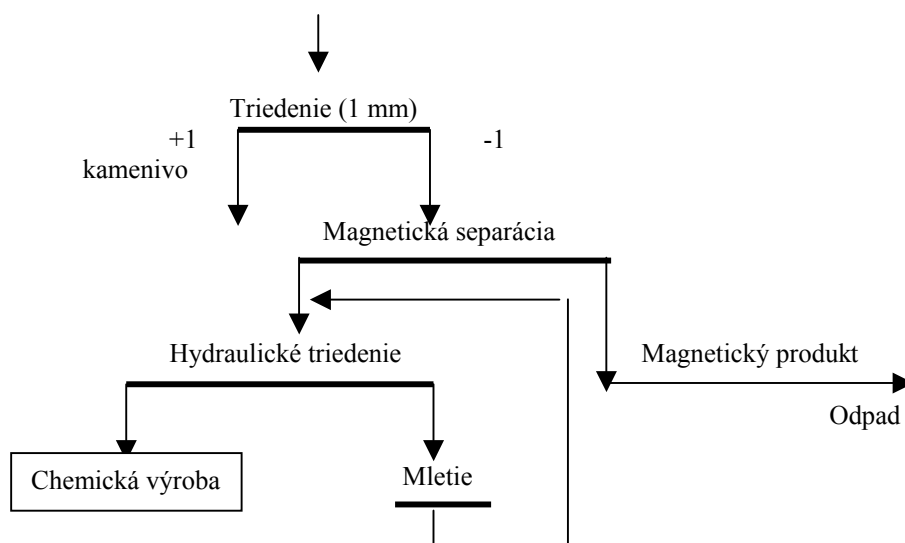
Technológia vstupnej časti úpravy serpentinitovej suroviny z dobšinských hald je tvorená operáciami triedenia a mletia, ktoré môžu byť v technologickej schéme zaradené spôsobom zobrazeným na obr. 1.

Voľba technologického postupu je závislá na vlastnostiach suroviny. Z hľadiska chemickej úpravy (Neubauer et al., 2002) ku škodlivým zložkám patria všetky kovy, predovšetkým najviac zastúpené železo, tab. 3. Zaradenie operácie magnetickej separácie je závislé na distribúcii železa v jednotlivých zrnitostných triedach. Distribúcia železa v prepočte na Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> do jednotlivých zrnitostných tried je nasledovná:

Zrnitostná trieda [mm]	Obsah Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]
- 0,15	7,61
0,15 – 0,40	8,06
0,40 – 0,71	7,66
0,71 – 1,00	7,30
1,00 – 2,50	7,50
vlákná azbestu	3,55

Z uvedeného vyplýva, že železo sa vo všetkých zrnitostných triedach vyskytuje rovnomerne, a preto odporúčame zaradiť magnetickej separácii pred operáciu mletia.

O tom, či sa magnetická separácia do výrobného cyklu zaradiť alebo nie, rozhodujú mnohé technologické faktory, ale predovšetkým ekonomická efektívnosť takého kroku.



Obr. 1. Návrh technologickej schémy úpravy serpentinitového odpadu  
Fig. 1. Proposal of technological scheme of the serpentine waste processing

Technologické operácie v navrhovanom technologickom postupe majú plniť tieto úlohy :

#### Operácia mechanického triedenia

Triedenie sa môže realizovať na mechanickom triediči na **štrbinových sitách** s využitím intenzívneho sprchovania triedeného materiálu. Produkty triedenia sú :

- podsitný –1 mm, je dopravovaný na magnetickú separáciu,
- nadsitný produkt +1 mm, tvorený aj hrubším materiálom než 5 mm v množstve okolo 2,3 %.

#### Operácia magnetickej separácie

Technologický uzol magnetickej separácie môže byť dôležitou súčasťou celku, pretože má zabezpečiť zníženie obsahu Fe v nemagnetickom materiáli vstupujúcom do chemickej prevádzky minimálne na úroveň 3 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, po prepočte na železo na úroveň 2,5 – 2,7 % Fe.

Pochybnosti o potrebe zaradenia magnetickej separácie do technologickej schémy vyvoláva skutočnosť, že obsah železa v čistých vláknach chryzotilového azbestu, ktoré sa dajú získať pri mokrom triedení na sitách je 2,50 % Fe (3,57 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Z toho vyplýva, že znížiť obsah železa pod hranicu 2,50 % pri akceptovateľnom hmotnostnom výnose je problematické, demonštrujú to aj výsledky uvedené v tab. 4.

Tab. 4. Výsledky magnetickej separácie serpentinitovej suroviny (Leško et al., 2004)

Tab. 4. Results of the magnetic separation of the serpentine raw material (Leško et al., 2004)

Sýtiaci prúd	MP – Magnetický produkt			NP – Nemagnetický produkt			Výtťažnosť Fe [%]	
	Hmot. výnos	Kovnatosť	Množstvo kovu	Hmot. výnos	Kovnatosť	Množstvo kovu	$\epsilon_{MP}$	$\epsilon_{NP}$
[mA]	$\chi$ [%]	$\lambda_i$ [%]	$\chi \lambda_i$ [%]	$\chi$ [%]	$\lambda_i$ [%]	$\chi \lambda_i$ [%]		
68,7	39,97	9,61	3,841	60,03	2,79	1,675	69,63	30,55
47,5	29,69	11,75	3,488	70,31	3,08	2,166	61,69	38,31
27,5	26,22	12,25	3,212	73,78	3,15	2,324	58,02	41,98

Z uvedeného vyplýva, že otázka zaradenia magnetickej separácie do technologickej schémy je predovšetkým otázkou ekonomickou.

#### Operácia hydraulického triedenia

V podsitnom produkte zrnitosti –1 mm je zrnitostná trieda 0 – 0,25 mm zastúpená skoro 60 % podielom (58,9 %), z hľadiska úspory nákladov na mletie je účelné túto zrnitostnú triedu z mlecieho cyklu vylúčiť. Pri mletí by táto zrnitostná trieda pôsobila ako faktor znižovania intenzity mletia.

Prepad hydraulického triediča tvorí vsádzku do chemickej časti prevádzky. Podmienkou vstupu tohto prepadu vo forme suspenzie do chemickej časti je hustota suspenzie, ktorá nemá klesnúť pod hodnotu 1510 kg.m<sup>-3</sup>.

### Mletie serpentinitovej suroviny

Mlecie skúšky boli realizované preto, aby sa :

- stanovili základné podmienky mletia s možným návrhom mlecej jednotky,
- vyrobilo potrebné množstvo materiálu pre experimenty v rámci chemickej výroby.

Mletie sa realizovalo v laboratórnom bubnovom mlyne s priemerom 316 mm pri nasledujúcich podmienkach:

Stále faktory :

- hmotnosť navážky materiálu 3 000 g,
- hmotnosť guľovej náplne – stáleho zloženia 20 000 g.

Menené faktory :

- zriedenie suspenzie definované vzťahom  $R = m_w/m$ ,  $R = 1850/1000 = 1,85$ , kde  $m_w$ ,  $m$  – hmotnosť vody a hmotnosť tuhej fázy,
- merné otáčky mlyna  $\varphi = (n/n_{kr}) \cdot 100$  [%], kde  $n_{kr}$  – kinetické otáčky 75,2 [ $\text{min}^{-1}$ ].

Sledované parametre mletia :

- rýchlosť tvorby novej zrnitostnej triedy (NZT) [ $\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$ ],
- spotreba energie na vytvorenie jednotkového množstva novovytvorenej zrnitostnej triedy NZT 0 – 0,25 mm [ $\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$ ].

Efektívnosť využitia energie pri mletí je veľmi úzko spojená s efektívnosťou triedenia v uzatvorenom cykle mletia.

Rýchlosť mletia bola popísaná štandardnými rovnicami kinetiky mletia.

#### Kinetika mletia

Všeobecne prevláda názor (Jusko, 1965; Magdalinovič et al., 1994; Spravočník, 1980), že rýchlosť mletia je úmerná množstvu hrubších zŕn nachádzajúcich sa v danom momente v mlyne. Uvedené tvrdenie sa môže vyjadriť diferenciálnou rovnicou

$$\frac{dR}{d\tau} = -k \cdot R^n, \quad (1)$$

ktorej riešenie nadobúda známy tvar :

$$R(\tau) = R(0) \cdot e^{-k\tau}, \quad (2)$$

kde  $R(\tau)$ ,  $R(0)$  – zvyšok na site zvolenej okatosti v čase  $\tau$  a na začiatku mletia,  
 $k$  – rýchlostná konštanta mletia,  
 $n$  – rád reakcie,  
 $\tau$  – čas.

Do kategórie poloempirických patrí vzťah, ktorý na základe veľkého množstva mlecích skúšok, predložili V.V. Tovarov a V.P. Romadin v tvare

$$\frac{dR}{d\tau} = -k \cdot m \cdot R \cdot \tau^{m-1}. \quad (3)$$

Riešenie tohto vzťahu má tvar

$$R(\tau) = R(0) \cdot e^{-k\tau^m}. \quad (4)$$

Parameter  $m$  – charakterizuje zmenu rýchlosti mletia s časom. Meliteľnosť materiálu s časom sa mení (Spravočník, 1980) a pre rôzne zrnitostné triedy je vždy iná. Vzťah (4) veľmi dobre opisuje proces mletia v guľových mlynch v rozsahu zrnitosti 5 ÷ 90 % (Šinkorenko, 1984).

Súbežne sa vyvíjali a vznikali rôzne modifikácie týchto rovníc. S. F. Šinkorenko (Šinkorenko, 1984) pri mletí rôznych typov železných rúd Krivého Rogu za najvhodnejší model kinetiky mletia považuje modifikovaný vzťah V. V. Tovarova

$$R(\tau) = R(0) e^{-k[\tau \cdot \ln(\tau+1)]}. \quad (5)$$

Veľkou výhodou uvedených rovníc je ich jednoduchosť, relatívne bezproblémové získavanie údajov a možnosť grafického vyhodnotenia.

Veľkým nedostatkom je, že neumožňujú bez ďalších doplnujúcich informácií vytvárať model mletia, resp. navrhovať prevádzkové mlecie jednotky.

Sledovanie prírastku novovytvorenej triedy pri skúškach sa realizovalo v 5 minútových intervaloch. Mlelo sa vždy stanovenú dobu, a to 5, 10, 15 a 20 minút. Po skončení mleckej skúšky celý objem vzorky 3000 g materiálu + voda sa podrobil zrnitostnému rozboru na sitách.

Výsledky mlecích skúšok pre rôzne zrnitostné zloženie vsádzky sú uvedené v tab. 5, pričom vsádzka typ P – obsahuje 58,9 % materiálu zrnitosti 0 – 0,25 mm a typ B – obsahuje 15,0 % materiálu zrnitosti 0 – 0,25 mm

Tab. 5. Výsledky mlecích skúšok serpentinitového odpadu (Leško et al. 2005)  
Tab. 5. Results of serpentine waste milling experiments (Leško et al. 2005)

Doba mletia [min.]	Vsádzka – typ P					Vsádzka – typ B				
	Rýchlosť tvorby NZT			Spotreba energie		Rýchlosť tvorby NZT			Spotreba energie	
	[g]	[g.s <sup>-1</sup> ]		[J.g <sup>-1</sup> ]		[g]	[g.s <sup>-1</sup> ]		[J.g <sup>-1</sup> ]	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	535		1,78		207,5	886		2,95		125,3
5		1,78		207,5			2,95		125,3	
5	311		1,04		356,9	496,7		1,65		160,6
10		1,41		262,4			2,30		223,8	
5	213		0,71		484,7	299,4		1,13		193,4
15		1,18		314,4			1,91		327,4	
5	75		0,25		1480,0	175,9		0,40		241,2
20		0,96		391,5			1,53		928,9	

Mlecie skúšky preukázateľne potvrdili nasledujúce skutočnosti (Leško et al., 2004):

- Zriedenie suspenzie  $R = m_w/m$  vyjadrené hmotnostným pomerom kvapalnej  $m_w$  a tuhej fázy  $m$  nemá v rozpätí  $R = 1,67 \div 3,0$  významný vplyv na rýchlosť mletia.
- Zrnitosť vsádzky, hlavne obsah zrnitostnej triedy vo vsádzke 0 – 0,25 mm, má zásadný vplyv na rýchlosť mletia.
- Otáčky mlyna v rozpätí  $\varphi = 64 \div 93$  % významným spôsobom ovplyvňujú vznik novej zrnitostnej triedy 0 – 0,25 mm pri mletí.
- Spotreba energie s rastúcim časom mletia rastie a podstatným spôsobom závisí na obsahu zrnitostnej triedy 0 – 0,25 mm vo vsádzke, typ P, resp. B.

Vypočítané parametre kinetických rovníc sú uvedené v tab. 6.

Tab. 6. Vypočítané parametre kinetických rovníc  
Tab. 6. Calculated parameters of the kinetic equations

Typ vsádzky Parameter		Rovnica (4) $R(\tau) = R(0).e^{-k\tau^m}$	Rovnica (5) $R(\tau) = R(0).e^{-k(\tau+1)^m}$
Typ – P	ln k	- 2,33205	- 2,309911
	k	0,097097	0,09927
	m	1,092863	0,789007
Typ – B	ln k	- 2,142701	- 2,128014
	k	0,117337	0,119074
	m	0,812319	0,587

Kinetické rovnice charakterizujú rýchlosť úbytku hrubšej zrnitostnej triedy (0,25 – 1 mm) pri mletí. Vybrané aproximujúce funkcie, až na rovnicu (2), pomerne dobre opisujú empirické hodnoty. Štatistické hodnotenie Pearsonovým  $\chi^2$  – testom ukázalo, že funkcie (4) a (5) môžeme využiť v úlohe aproximujúcich funkcií, pretože vypočítané hodnoty kritéria  $\chi^2 = (\text{vsádzka P} : 2,24; 2,48; \text{vsádzka B} : 0,83; 1,61)$  sú menšie ako tabuľková kritická hodnota  $\chi_{0,05;2}^2 = 5,99$ .

Podstatnejšie závery pre návrh mletia poskytujú údaje v tab. 5:

1. Rozdiel v prírastku novovytvorenej triedy pri mletí vsádzky typu B a P je nepochybniteľný, stĺpec 2, 3 a 4, resp. stĺpec 7, 8 a 9.
2. Rýchlosť tvorby novovytvorenej zrnitostnej triedy 0 – 25 mm, ako demonštrujú stĺpce 3, 4 a 8, 9, s pribúdajúcim časom mletia exponenciálne klesá.
3. S rastúcou dobou zdržania suroviny enormne narastá spotreba energie, stĺpec 6 a 11. Signalizuje to, že nahromadením veľkého množstva jemných podielov a tiež chryzotilových vlákien dochádza k tlmiacemu účinku vsádzky na pohybujúce sa gule, čo vedie k poklesu účinnosti mletia.

- Spotrebu energie veľkou mierou ovplyvňuje účinnosť mechanického prenosu krútiaceho momentu z elektromotora na mlyn, preto namerané hodnoty energie vytvárajú možnosť iba pre relatívne porovnanie, nie pre stanovenie absolútnej spotreby energie pri mletí jednotlivých typov suroviny.
- Sledovaná rýchlosť mletia pre zrnitosť rôzne vsádzky ukazuje, že v mlecíom cykle musí byť zaradená operácia predtriedenia.

### Návrh riešenia mlecieho cyklu

Z uvedených výsledkov mletia vyplývajú rôzne možnosti riešenia operácie mletia. Rozoberme niektoré z možných spôsobov riešenia :

Vsádzku predstavuje 3 000 g materiálu typu P, čo je vlastne pôvodná vsádzka zrnitosti 0 – 1 mm, ktorá obsahuje 58,9 % zrnitosti triedy 0 – 0,25 mm. Predpokladajme 10 minútovú dobu mletia, počas ktorej sa mletím vyrobí 846 gramov materiálu zrnitosti 0 – 0,25 mm. Po mletí máme k dispozícii  $3000 \cdot 0,589 + 846 = 2613$  g materiálu o zrnitosti –0,25 mm, čo predstavuje 87,1 % zastúpenie vyhovujúcej zrnitosti triedy, nedomletý hrubší materiál tvorí 12,9 %.

Ďalší postup reprezentujú nasledujúce alternatívy :

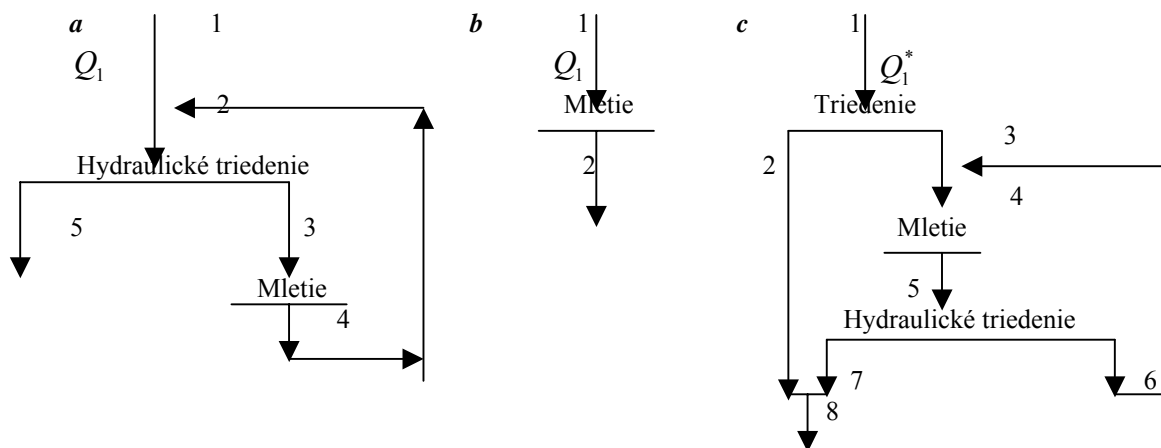
#### 1. alternatíva – mlieť bez hydraulického triedenia, obr. 2 b.

Výhody – úspora operácie triedenia

Nevýhody – nedomletý materiál zvyšuje spotrebu chemikálií a predlžuje dobu lúhovania,

– premieľaním sa enormne zvyšuje spotreba energie, dokumentujú to stĺpec 6, resp. 11, tab. 5.

Môže sa akceptovať iba vtedy, ak dôjde k úspore chemikálií a skráteniu doby lúhovania.



Obr. 2. Uzatvorená (a), otvorená (b) a alternatíva uzatvorenej schémy mletia (c)  
 Fig. 2. Closed (a), open (b) and the alternative of closed scheme of milling (c)

#### 2. alternatíva – mletie v uzatvorenom cykle s hydraulickým triedičom, obr. 2 a.

Hydraulické triedenie zaraďujeme ako operáciu predtriedenia a kontrolného triedenia v jednom stroji, obr. 2a.

Výhody – zvýšenie výkonu mleckej jednotky suroviny,  
 – úspora elektrickej energie.

Nevýhody – inštalácia hydraulického triediča.

Situáciu, ktorá nastane po realizácii 2. alternatívy je potrebné bližšie analyzovať. Výstup z mlyna :

V závislosti na účinnosti triedenia obsah jemnej zrnitosti triedy v pieskoch triediča sa môže pohybovať v rozpätí od 6 do 24 % – čomu zodpovedá účinnosť triedenia 90 – 60 %. Hodnota 24 % signalizuje nízku účinnosť triedenia. Keď uvažujeme priemernú účinnosť 78 %, tak obsah sledovanej zrnitosti triedy v pieskoch triediča dosiahne hodnotu 15 %.

Obsah vyhovujúcej zrnitosti napr. 5 po 10 minútach mletia na výstupe z mlyna:

- v prvom prípade bude  $(3000 \cdot 0,15 + 886) \cdot 100 = 44,5 \% = x_4$
- a v druhom prípade bude  $(3000 \cdot 0,15 + 1382,7) \cdot 100 = 61,1 \% = x_4$ .

Cirkulujúca vsádzka dosiahne hodnotu, ktorú vypočítame z bilančných rovníc:

$$Q_2 \cdot x_2 = Q_1 x_1 + Q_4 x_4$$

$$Q_2 \cdot x_2 = Q_5 \cdot x_5 + Q_3 \cdot x_3$$

$$Q_2 = Q_1 + Q_4$$

$$Q_1 = Q_5 ; Q_3 = Q_4$$

$x_i$  – obsah sledovanej zrnitosti triedy (0-0,25 mm) v i-tom produkte,

$x_5=0,95$  – v prepade hydraulického triediča predpokladáme 95 % obsah sledovanej triedy,

$Q_1$  – hmotnosť i-tých produktov.

Po úprave dostávame vzťah na výpočet cirkulujúcej vsádzky :

$$Q_4(x_4 - x_3) = Q_1(x_5 - x_1)$$

$$Q_4 = Q_1 \frac{x_5 - x_1}{x_4 - x_3}$$

Cirkulujúca vsádzka je definovaná pomerom  $C = Q_4/Q_1$  z čoho plynie, že cirkulujúca vsádzka sa určuje podľa vzťahu

$$\text{– pre prvý prípad } C = \frac{0,95 - 0,589}{0,445 - 0,15} = 1,2$$

$$\text{– pre druhý prípad } C = \frac{x_5 - x_1}{x_4 - x_3} = \frac{0,95 - 0,589}{0,611 - 0,15} = 0,8$$

Zaťaženie okruhu sa môže vyjadriť vzťahom

$$Q_2 = Q_1(1 + 1,2) = 2,2 Q_1$$

$$Q_2 = Q_1(1 + 0,8) = 1,8 Q_1$$

### 3. alternatíva – mletie s predtriedením.

V dôsledku vytriedovania zrnitostne vyhovujúceho materiálu, obr. 2c, v samostatnej operácii dôjde k zvýšeniu výkonu mlecieho cyklu. Vyplyva to z nasledujúcej úvahy a bilancie zrnitosti triedy 0 – 0,25 mm v operácii predtriedenia :

$$Q_1^* = Q_2 + Q_3$$

platí :

$$Q_2 = Q_1^* x_1 \eta^{-d}$$

Keď predpokladáme nižšiu účinnosť triedenia  $\eta^{0,25} = 70$  %, produkt 3, ktorý predstavuje vsádzku do mlyna bude zodpovedať vsádzke typu A. Po úprave, ak predpokladáme, že výkon mlyna podľa schémy (b) a (c) má byť rovnaký, dostávame vzťah, ktorý umožňuje určiť výkon mlecieho cyklu (c) v porovnaní s cyklom (b).

$$Q_1^* = Q_1^* x_1 \eta^{-d} + Q_3$$

$$Q_1^* = \frac{Q_3}{1 - x_1 \eta^{-d}} = \frac{Q_3}{1 - 0,589 \cdot 0,7} = 1,8 Q_1$$

Z uvedeného vyplýva, že keď  $Q_3 = Q_1$ , tak výkon cyklov podľa schémy (c) je o 80 % vyšší, než pri schéme (b).

### Záver

Podobným postupom pri zohľadnení aj energetickej náročnosti sa môžu analyzovať iné varianty riešenia. Rozhodnutie o voľbe variantu musí vychádzať z riešenia optimalizačnej úlohy. Na tieto účely sa s výhodou môžu využívať uvedené aproximujúce funkcie popisujúce rýchlosť mletia. Vhodným nástrojom pri riešení optimalizačných úloh sú aj statické modely mletia a využitie rozdeľovacích funkcií hydraulického triediča v oboch prípadoch v maticovom tvare.

Na riadenie technologického uzla mletia je potrebné vytvoriť dynamický model : mlyn – hydraulický triedič (Magdalinovič, 1994).

*Podakovanie: Autori ďakujú Agentúre na podporu vedy a techniky za finančnú podporu projektu APVT-20-014502.*

### Literatúra - References

Búgel, M., Leško, M.: Technologický postup spracovania druhej serpentinitovej nerastnej suroviny z dobšinských hald., *Správa, Košice 2002.*



- Búgel, M., Leško, M., Pietriková, A., Bakalár, T.: Hydrometallurgical Processing of Serpentine Waste Heap. *Proc. of 7<sup>th</sup> Conference on Environment and Mineral Processing, Part I, Ostrava 2003*, p. 23 – 27, ISBN 80-248-0247-3.
- Fischerová, R. a kol.: Serpentinity – možnosti ich využitia. *VP, záv. správa SGÚ Bratislava, GP, n.p., Spišská Nová Ves, 1983*.
- Grecula, P. a kol.: Ložiská nerastných surovín Slovenského rudohoria. *Zväzok 1, Bratislava 1995*.
- Jusko, F.: Štúdium kinetiky mletia rúd a jej význam v úpravníckej praxi. *Kandidátska dizertačná práca, Kremnica 1965*.
- Koděra, M. a kol.: Topografická mineralógia Slovenska. *VEDA, vydavateľstvo SAV, 1. diel, Bratislava 1989*.
- Leško, M.: Úpravnícka technologická analýza., *Priklady, ES VŠT Košice, 1986*.
- Leško, M., Búgel, M., Bakalár, T., Pietriková, A.: Possible processing of serpentinite raw material from Dobšina heap. *Proc. of 7<sup>th</sup> Conference on Environment and Mineral Processing, Part I, Ostrava 2003*, p. 183 – 188, ISBN 80-248-0247-3.
- Leško M., Búgel, M., Pietriková, A., Bakalár, T.: Kinetics of Serpentine Waste Milling, *Proc. of 9<sup>th</sup> Conference of Environment and Mineral Processing, Part II, Ostrava 2005*, p. 335 – 338, ISBN 80-248-0787-4
- Leško, M., Búgel, M., Pietriková, A., Bakalár, T.: Transformácia výsledkov mletia serpentinitového odpadu z laboratórnych na prevádzkové prostriedky. *Zb. Odpady 2004 Sp. Nová Ves, str. 13-16*.
- Magdalinovič, N., Budič, I., Čalič, N., Tomanec, P.: Kinetika mlevenja. (Kinetics of Grinding), *Univerzited u Beogradu. TF Bor 1994*.
- Neubauer, M., Búgel, M., Pietriková, A.: Spôsob výroby oxidu kremičitého SiO<sub>2</sub> zo serpentinitovej nerastnej suroviny. *Patent SK 283183, Banská Bystrica 2002*
- Spravočník po obogaščeniju rud černых metallo. *Nedra, Moskva 1980*.
- Šinkorenko, S., F.: Technologia izmelčeniya rud černых metallo., *Nedra, Moskva 1984*.