

# Mikrovlnný ohrev nerastných surovín pre úpravnicke účely

Ivan Florek<sup>1</sup>

## Microwave heating of mineral raw materials for treatment purposes

Specific characteristics and conditions of microwave heating of minerals and their mixtures are described. Application of this type of heating in mineral processing is recommended predominantly for drying and modification of properties of mineral raw materials. The influence of grain size of the charge on the effectiveness of processes mentioned is evaluated.

**Key words:** Microwaves, Minerals, Drying, Heating.

## Úvod

Uplatnenie mikrovlnnej energie pre účely ohrevu je v súčasnosti rozšírené vo väčšine priemyselných odvetví a služieb. Tento spôsob ohrevu predstavuje špecifický prípad dielektrického ohrevu a presadzuje sa viacerými prednosťami. Z technologického hľadiska sú z nich najdôležitejšie:

- vznik tepelného efektu súčasne v celom objeme látky, absorbujúcej mikrovlny,
- selektívnosť tepelného efektu mikrovln podľa elektrických vlastností ožarovaných látok,
- rýchlosť vzniku tepelného efektu,
- ekologická nezávadnosť uvedeného procesu.

Spomenuté prednosti mikrovlnného ohrevu prispeli k jeho rozšíreniu predovšetkým v oblasti potravinárskeho, chemického, gumárskeho a ropného priemyslu (Metaxas et al., 1983). Okrem využitia v procesoch tepelného spracovania, napr. pri sušení, odparovaní, spekaní a tavení, stále väčšia pozornosť sa venuje jeho katalytickým a aktivačným účinkom. V oblasti úpravy nerastných surovín bolo uplatnenie mikrovlnného ohrevu odskúšané pre účely sušenia a tepelného spracovania rudných koncentrátov, desulfurizácie uhlia, intenzifikácie rozpojovania rúd a modifikácie magnetických vlastností rúd (Florek et al., 1996). Výskum sa tiež sústreďuje na ovplyvnenie priebehu mokrych procesov úpravy prostredníctvom mikrovln, napr. v prípade lúhovania Au koncentráta (Hague, 1987), tetraedritu (Florek et al., 1996), alebo flotácie fluoritu (Roussy et al., 1986).

Vzhľadom na klesajúcu kvalitu ťažených nerastných surovín, zvlášť rúd, je nutné upravovať jemnozrnú multikomponentnú minerálnu surovinu, ktorá často obsahuje škodlivé prímеси. Pre tento účel treba sledovať možnosť uplatnenia mikrovlnného ohrevu a ním podmienených ďalších efektov v úpravnicových procesoch. Uvedená problematika bola v posledných štyroch rokoch zahrnutá do náplne práce Ústavu geotechniky SAV v Košiciach.

## Predpoklady mikrovlnného ohrevu

Rozhodujúcim predpokladom mikrovlnného ohrevu nerastných surovín, podobne ako aj ostatných látok, je absorpcia uvedeného druhu energie. Predstavuje prvú zo základných interakcií látok s mikrovlnami, ďalšie dve tvorí reflexia a transmisia mikrovln. Rozsah mikrovlnného ohrevu danej látky sa dá posudzovať na základe absorbovaného výkonu mikrovln ( $P_{ab}$ ) podľa vzťahu

$$P_{ab} = 2 \pi \cdot \epsilon_0 \cdot f \cdot \epsilon'' \cdot E^2, \quad [W \cdot m^{-3}] \quad (1)$$

kde  $\epsilon_0$  - permitivita vákua [ $8,859 \cdot 10^{-12} F \cdot m^{-1}$ ],  $f$  - frekvencia použitého elektromagnetického poľa

<sup>1</sup> Ing. Ivan Florek, CSc. Ústav geotechniky SAV, Watsonova 45, 043 53 Košice  
(Recenzovali: Doc. Ing. Michal Leško, CSc. a Prof. Ing. Tobiáš Lazar, DrSc. Revidovaná verzia doručená 22.10.1997)

[Hz],  $\varepsilon''$  - imaginárna zložka komplexnej elektrickej permitivity ožiarenej látky [J.SI],  $E$  - intenzita elektrického poľa [ $A.m^{-1}$ ].

Možnosť mikrovlnného ohrevu určitej látky podľa (1) vyjadruje jej imaginárna zložka komplexnej permitivity. Ostatné parametre možno ovplyvniť výberom prístrojového zariadenia.

Pre mikrovlnný ohrev majú vhodnú hodnotu imaginárnej zložky komplexnej permitivity dielektrické minerály. Elektricky vodivé minerály prejavujú reflexiu mikrovln a nevodivé obyčajne ich transmisiu.

Pri reflexii mikrovln môže vzniknúť silný tepelný efekt v povrchovej vrstve ožiareného minerálu. Jeho intenzita sa dá posúdiť prostredníctvom hodnôt hĺbky prieniku a stupňa absorpcie mikrovln (Florek et al., 1995). Premena absorbovanej energie na teplo je ovplyvňovaná aj tepelnými vlastnosťami minerálov.

Možnosť mikrovlnného ohrevu homogénnych nerastných surovín sa dá posudzovať podľa vzťahu (1). Väčšina ťažených nerastov pozostáva z viacerých minerálnych komponentov, ktoré majú rozdielne hodnoty imaginárnej zložky komplexnej permitivity. Absorpčný výkon pre takúto surovinu možno vypočítať na základe priemernej hodnoty uvedenej veličiny, ktorá sa určí použitím Wiedemannovho zákona aditivity podľa vzťahu (Brož et al., 1974)

$$\varepsilon''_p = m_1 \varepsilon''_1 + m_2 \varepsilon''_2 + \dots + m_n \varepsilon''_n, \quad (2)$$

ak platí  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ , kde  $m_{1,2,\dots,n}$  - relatívny podiel hmotnosti zložiek daného nerastu.

Náročnosť merania imaginárnej zložky komplexnej permitivity rôznych minerálov si vynútila charakterizovať ich mikrovlnný ohrev experimentálne stanoveným zvýšením teploty za jednotku času (tab. 1). Tieto hodnoty sa síce pre rovnaké minerály z rôznych ložísk podstatne líšia, vzhľadom na rozdiely v obsahu hlavných zložiek, prímiesiach, zrnitosti alebo vlhkosti, ale predsa umožňujú rozdeliť minerály podľa rýchlosti ich mikrovlnného ohrevu do troch skupín (Harrison et al., 1995):

1. minerály s vysokým stupňom ohrevu (minimálne 175 °C), napr. chalkopyrit, galenit, pyrit.
2. minerály so stredným stupňom ohrevu (medzi 50 °C a 110 °C), napr. hematit, ilmenit, kasiterit.
3. minerály so slabým stupňom ohrevu (maximálne 50 °C), napr. kremeň, silikáty a väčšina žilných výplní.

Minerály 1. skupiny, do ktorej patria najmä elektricky dobre vodivé sulfidy, vykazujú vplyvom mikrovlnného ohrevu radikálne fázové zmeny, ktoré ovplyvňujú ich fyzikálne a chemické vlastnosti. Minerály 2. skupiny, ktorá zahŕňa predovšetkým oxidy kovov, vyžadujú dlhší čas ohrevu. Pre minerály 3. skupiny nie je uvedený spôsob ohrevu efektívny.

Údaje z tabuľky 1 dokazujú, že absorbovaný výkon, vypočítaný pre vybrané minerály podľa vzťahu (1), alebo podľa rýchlosti mikrovlnného ohrevu, je dostatočnou informáciou pre ich zaradenie do klasifikačnej skupiny.

Tab.1. Parametre mikrovlnného ohrevu vybraných minerálov.

Minerál	Chemický vzorec	$\varepsilon''$	Absorbovaný výkon $P_{ab}$ [ $W.m^{-3}$ ]	Nárast teploty $\Delta T$ [ $^{\circ}C.min^{-1}$ ]
chalkopyrit	$CuFeS_2$	2,28	320 167	920
galenit	$PbS$	0,41	181 965	137
siderit	$FeCO_3$	0,36	11 516	69
magnezit	$MgCO_3$	0,30	14 606	56
kremeň	$SiO_2$	0,02	x	11

ú údaje z literatúry (Walkiewicz et al., 1988)

### Aplikácie mikrovlnného ohrevu

Známe možnosti využitia mikrovlnného ohrevu pri úprave nerastných surovín predstavujú procesy sušenia a tepelnej úpravy. Prednosťou mikrovlnného sušenia je vhodnosť jeho použitia

pre všetky druhy minerálov, bez ohľadu na ich imaginárnu zložku komplexnej permitivity, lebo v tomto procese dochádza k priamemu ohrevu vody. Uvedený jav umožňuje vysoká hodnota imaginárnej zložky komplexnej permitivity vody, ktorá má v prípade destilovanej vody hodnotu 12,0 a prevyšuje túto hodnotu u bežných minerálov (tab. 1). V prípade sušenia nerastných surovín, absorbujúcich mikrovlny, sa jeho rýchlosť zvyšuje teplom, vznikajúcim v ich tuhej fáze. Príkladom môže byť sušenie troch druhov minerálov zrnitosti pod 0,04 mm, s vlhkosťou 14 %, u ktorých sa čas sušenia skrátil u sideritu

o 34,2 % a u galenitu o 83,6 %, v porovnaní s kremeňom, sušeným len ohrevom vody.

Z technologického hľadiska je dôležitá závislosť času mikrovlnného sušenia na zrnitosti daného produktu. Priebeh tejto závislosti vyjadruje skracovanie času sušenia pri znižovaní zrnitosti produktu a je opačný ako u konvenčných spôsobov sušenia. Napríklad skrátenie času mikrovlnného sušenia zrnitostných tried 0,28-0,5 mm a pod 0,04 mm je pre kremeň 12,5 % a pre galenit, ktorý sa sám tiež rýchle ohrieva, až o 27,8 % v prospech jemnejšej triedy. Tento jav sa dá vysvetliť vyššou hodnotou imaginárnej zložky komplexnej permitivity u jemnejších zrn dotyčného minerálu a ich väčším merným povrchom.

Mikrovlnný ohrev nerastných surovín je závislý predovšetkým na elektrických a tepelných vlastnostiach ich komponentov. Teplo (Q), vzniknuté týmto spôsobom v určitom mineráli je dané vzťahom

$$(3) \quad Q = V \cdot \rho \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad , \quad [ J ]$$

kde V - objem minerálu [ $m^3$ ],  $\rho$  - hustota minerálu [ $kg \cdot m^{-3}$ ], c - stredná merná tepelná kapacita minerálu [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ],  $T_1$ ,  $T_2$  - pôvodná a zvýšená teplota minerálu [K]. Zo vzťahu (3) vyplýva priama závislosť medzi vzniknutým teplom a objemom daného minerálu, preto je výhodnejší jeho mikrovlnný ohrev vo forme hrubozrnného produktu. Pre multikomponentnú nerastnú surovinu sa dá vzniknuté teplo určiť po zanedbaní strát sálaním a vedením, podľa vzťahu (2), ako súčet týchto tepiel, vzniknutých v jednotlivých komponentoch. Veľké rozdiely v tepelných vlastnostiach týchto komponentov neumožňujú zanedbanie strát ich tepla vedením, lebo tieto sú vysoké z dôvodu ohrevu komponentov, u ktorých je absorpcia mikrovln zanedbateľná. Tento jav sa dá výhodne využiť pre ohrev zrnitostnej zmesi minerálov, absorbujúcich a transmitujúcich mikrovlnnú energiu. Príkladom je zmes sideritu a barytu zrnitostnej triedy 0,5 - 1 mm, v hmotnostnom pomere 1:1, ktorej teplota pri mikrovlnnom ohreve vzrástla až o 67 %, pri porovnaní s teplotou samotného barytu, pričom samotný siderit dosahuje zvýšenie teploty až o 100 %.

Uplatnenie mikrovlnného ohrevu pri úprave nerastných surovín je investične a energeticky náročné. Hospodárnosť jeho zavedenia treba hodnotiť na základe efektívnosti využitia energie, ako aj po zvážení už spomenutých technologických predností. Pri mikrovlnnom ohreve, vrátane strát jeho zdroja, predstavuje efektívnosť využitia energie 30 - 48 % (Perkin, 1983), ale u konvenčného elektrického ohrevu len okolo 20 % (Metaxas et al., 1983).

### Záver

Technologické využitie mikrovlnnej energie pri úprave nerastných surovín je závislé predovšetkým na elektrických a tepelných vlastnostiach ich minerálnych komponentov. Tepelný efekt mikrovln dá sa využiť predovšetkým v procesoch sušenia a tepelného spracovania. V porovnaní s konvenčnými spôsobmi má mikrovlnný ohrev, zvlášť pri úprave zrnitých multikomponentných minerálnych zmesí prednosti, ktoré predstavuje efektívnejšie sušenie jemnejších produktov a prenos tepla na zrná minerálov slabo absorbujúcich mikrovlny.

**Pod'akovanie** Autor ďakuje Slovenskej grantovej agentúre VEGA za finančnú podporu grantového projektu č. 1370/94, z riešenia ktorého pochádzajú zverejnené poznatky.

### Literatúra

Brož, J. a kol.: Základy fyzikálných měření, II. díl. *Stát. pedagog. nakl., Praha 1974, s. 529.*

- Florek, I., Lovás, M. & Murová, I.: The effect of microwave radiation on magnetic properties of grained iron containing minerals. *In: Proc. of 31<sup>st</sup> Microwave Power Symposium, Boston, USA, 1996, p. 203-207.*
- Florek, I., Lovás, M. & Murová, I.: Influence of microwave radiation on the leaching of tetrahedrite. *Mineralia Slovaca, 28, 1996, p. 450-454.*
- Florek, I. & Lovás, M.: The influence of the complex electric permittivity and grain size on microwave drying of the grained minerals. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii, 29, 1995, p. 127-133.*
- Harrison, P.C. & Rowson, N.A.: The effect of microwave radiation on mineral properties. *Minerals Engineering, 8, 1995, 2, p. 129-134.*
- Haque, K.E.: Microwave irradiation pretreatment of a refractory gold concentrate. *In: Proc. Int. Symp. on Gold Metallurgy, Winnipeg, Canada, 1987, p. 327-339.*
- Metaxas, A.C., Meredith, R.J.: Industrial Microwave Heating. London, *Peter Peregrinus, Ltd., 1983, p. 313.*
- Perkin, R.M.: The drying of porous materials with electromagnetic energy generated at radio and microwave frequencies. *In: Wakeman R.J. (ed.): Progress in Filtration and Separation 3, Elsevier Scient. Publ. Co., Amsterdam, 1983, p. 208.*
- Roussy, G., Vauborg, J.P. & Thiebaut, J.M.: Fluorite flotation under electromagnetic irradiation. *Journal Microwave Power, 21, 1986, 4, p. 241-242.*
- Walkiewicz, J.W., Kazonich, G. & McGill, S.L.: Microwave heating characteristics of selected minerals and compounds. *Minerals and Metallurg. Processing 5, 1988, 1, p. 39-42.*