

Spotreba energie na drvenie uhlia

Juraj Ďurove¹ a Jozef Lukáč²

Determination of the Power Consumption of Coal Crushing

The power consumption of the crusher in a coal-preparation plant depends on the granularity of charge rather than on the many mechanical properties of coal. In this paper, we intend to present the research results of the crushing tests of brown coals that have been made at two Departments of the Technical University of Košice (Slovakia). The tests were carrying out to determine the power consumption by crushing brown coal under conditions based on the Third Theory of F. C. Bond. The power consumption tests are in the units of the Bond Work Index (W_i). The mean value of W_i for the tested brown coal from Handlová mine (Slovakia) was $W_i = 9,76$ kWh/sht.

Key words: Bond Work Index, crushing tests, brown coal-preparation plant.

Úvod

Drvenie spolu s mletím je energeticky najnáročnejším úpravnickým technologickým procesom (Jusko, 1965; Klán et al., 1972). Už v dávnej minulosti odborníci venovali drveniu a spotrebe energie na drvenie a mletie surovín značnú pozornosť. Rozpracovali mnohé teórie drvenia, z ktorých najznámejšia je tzv. „povrchová teória drvenia“, pochádzajúca od Rittingera. Neskôr Kick vypracoval tzv. „objemovú teóriu drvenia“. Obe teórie pochádzajú z druhej polovice minulého storočia. Aplikácia týchto teórií na konkrétnu surovinu neumožňuje vypočítať reálne číslo udávajúce spotrebu energie v kWh.t⁻¹ drvenej suroviny. Preto tieto teórie boli podrobované kritike, revízií a snahám o vypracovanie takej teórie drvenia, ktorá by umožňovala vypočítať číslo udávajúce spotrebovanú energiu v kWh.t⁻¹ rozdrvenej suroviny.

Túto problematiku úspešne vyriešil F.C. Bond, ktorý rozpracoval tzv. „tretiu teóriu drvenia“, ktorú autori príspevku aplikovali na stanovenie spotreby energie na drvenie handlovského uhlia. Požiadavka na riešenie tohto problému vyplynula z konkrétnej prevádzkovej potreby (Lukáč a Ďurove, 1995), keď energetická frakcia handlovského uhlia (0-20 mm) obsahovala zrná väčšie ako je horná hranica, zmluvne dohodnutá s veľkoodberateľom, a to v množstve dosahujúcom až 15 % z celkovej hmotnosti.

Podstata Bondovej „tretej teórie drvenia“

Pri formulovaní svojej teórie zdobňovania vychádzal Bond z rovnice:

$$y = 80 \cdot \left(\frac{x}{P}\right)^m \quad [1]$$

ktorá bola upravená Taggartom a vyjadruje zrnitostné zloženie sypkého materiálu (Bond, 1957, 1960, 1961, 1964). V uvedenej rovnici jednotlivé symboly znamenajú:

- P - okatosť sita [μm], cez ktoré prepadne 80 % produktu do podsitného (d_{80}),
- m - empirická konštanta, ktorej hodnota je $m = 0,7071$ a platí pre všetky suroviny,
- x - veľkosť zrna [μm],
- y - hmotnostný výnos podsitného produktu [%].

¹ Ing. Juraj Ďurove, CSc., Katedra dobývania ložísk a geotechniky, Fakulta BERG, TU v Košiciach, Park Komenského 19, 040 01 Košice, SR

² Doc. Ing. Jozef Lukáč, CSc., MINERALURGIJA, Výskumné stredisko, Plzeňská 3, 040 11 Košice, SR
(Recenzovaná a revidovaná verzia doručená 30.11.1998)

Ak teda $m = \text{konštanta}$, potom celý súbor zŕn je charakterizovaný jedinou veličinou P . Celková práca W_t potrebná na zdrvenie materiálu na veľkosť P je daná vzťahom:

$$W_t = K \cdot \frac{1}{\sqrt{P}} \quad [2]$$

kde W_t je práca spotrebovaná na drvenie udávaná v kWh.sht^{-1} , pričom sht je tzv. „krátka tona“ rovná $0,907185 \text{ t}$.

Rovnica [2] znamená, že „práca spotrebovaná na zdrobňovanie určitého materiálu je nepriamo úmerná druhej odmocnine veľkosti častíc získaného produktu“ (Dinterová, 1976). V súlade s týmto slovným vyjadrením je potom práca potrebná na zdrobňovanie suroviny z veľkosti F na veľkosť P daná vzťahom:

$$W = W_t P - W_t F = K \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) \quad [3]$$

kde W je spotrebovaná práca v kWh.sht^{-1} .

Rovnica [3] vyjadruje hlavnú Bondovu myšlienku, že celková práca potrebná na zdrobňovanie suroviny z veľkosti F na veľkosť P je daná rozdielom celkových energií, t.j. prác potrebných na zdrobňovanie suroviny z nekonečne veľkých kusov na veľkosť podania do drvenia F ($d_{80} [\mu\text{m}]$) a na zdrobňovanie z tejto veľkosti na veľkosť produktu P ($d_{80} [\mu\text{m}]$).

Pre lepšie charakterizovanie rôznych surovín použil Bond tzv. štandardnú veľkosť zrnitosti a z nej potom určil veličinu W_i .

Táto veličina W_i sa volá Bondov INDEX PRÁCE a charakterizuje odpor suroviny proti jej drveniu alebo mletiu. Predstavuje množstvo energie $[\text{kWh.sht}^{-1}]$, ktoré je nutné spotrebovať na redukciu zrnitosti suroviny z teoreticky nekonečne veľkých kusov na kusy, ktorých 80 % prepadne do pod-sitného produktu cez sito s okatosťou $100 \mu\text{m}$.

Z tejto úvahy potom vyplýva aj hodnota indexu práce W_i , pretože môžeme písať:

$$W_i (\infty \rightarrow F) \cong K \left(\frac{1}{\sqrt{F}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}} \right) = K \frac{1}{\sqrt{F}} = K \frac{1}{\sqrt{100}} = \frac{K}{10} \quad [4]$$

$$K = 10 \cdot W_i = K_B \quad [5]$$

kde K_B je Bondov súčiniteľ úmernosti.

Na základe doteraz urobených úvah môžeme už napísať základnú Bondovu rovnicu v jej známom tvare:

$$W = \frac{10 W_i}{\sqrt{P}} - \frac{10 W_i}{\sqrt{F}} \quad [\text{kWh.sht}^{-1}] \quad [6]$$

príčom pre prevod do jednotiek sústavy SI platí, že 1 kWh.sht^{-1} sa rovná $3,97 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

Ak poznáme ktorékoľvek tri veličiny vo vzťahu [6], potom jeho úpravou môžeme vypočítať štvrtú, neznámu veličinu.

F.C. Bond rozpracoval tri spôsoby laboratórneho stanovovania hodnoty indexu práce W_i :

1. Na princípe nárazu kladiva na surovinu.
2. Skúškou meliteľnosti suroviny v tyčovom mlyne.
3. Skúškou meliteľnosti suroviny v guľovom mlyne.

Autori aplikovali na riešenie predmetnej úlohy metodiku uvedenú v bode 1.

Experimentálne práce

Na určenie energie potrebnej na dodrvenie zrnitostne nevyhovujúcich kusov uhlia nad 20 mm sme vychádzali z Bondovej teórie. Laboratórne pracovné postupy boli formulované do troch hypotéz:

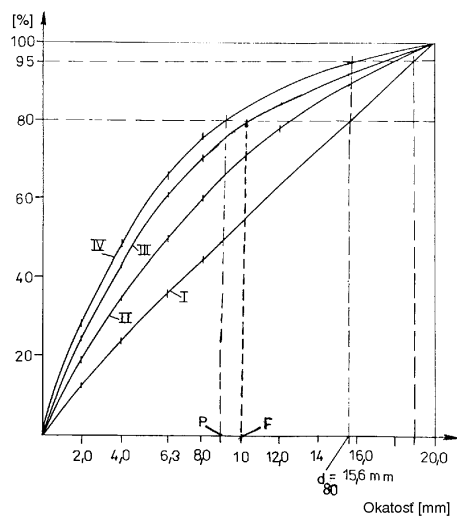
- Energetické uhlie zrnitosti $0 - 20 \text{ mm}$ môže obsahovať len 5 % (hmotnostných) zŕn väčších ako je horná hranica tejto triedy.
- Ak v tejto triede je napr. 20 % hmotnostných zŕn väčších ako je horná hranica, potom 15 % týchto zŕn je treba dodrvovať.
- Aké množstvo energie v kWh.t^{-1} sa musí vynaložiť na dodrvenie tohoto množstva nevhodných zŕn?

Aby sme mohli na uvedenú otázku odpovedať, museli sme určiť spotrebu energie na drvenie jednej tony uhlia. Vychádzajúc z Bondovej teórie drvenia surovín sme pre konkrétne laboratórne pracovné postupy použili dve vzorky handlovskeho uhlia o zrnitosti 0–11,2 mm a 0–20,0 mm. Obidve vzorky boli podrobené sitovej analýze a početne i graficky sú vyhodnotené v tab. 1, 2 a na obr. 1, 2. Východzie hodnoty sitových analýz na obrázkoch aj v tabuľkách sú označené „I“.

Zo sitovej analýzy vzorky uhlia 0-20 mm (krivka I na obr. 1) v zmysle Bondovej teórie vyplynulo: Vzorka uhlia je čo do zrnitosti charakterizovaná hodnotou okatosti sita $d_{80} = 15,6$ mm. Pri jej triedení na tomto site prepadne do podsitného produktu 80 % hmotnostných zrn. Z 20 % nadsitného produktu je 15 % nad povolený limit, ktorý je treba zdrviť pod 15,6 mm. Na to bolo použité zariadenie, tzv. pádostroj, s presne odváženým padacím kladivom (2,4 kg) pohybujúcim sa v kovovej rúre $\varnothing 60$ mm. Vzorka uhlia uvedenej triedy o hmotnosti 340 g bola podrobená rôznemu počtu udierania kladiva z výšky 0,64 m. Po vopred učenom počte pádov kladiva na vzorku uhlia bola urobená sitová analýza, ktorá je početne a graficky vyhodnotená v tab. 1 a na obr. 1. Ide o sumárne podsitné produkty (krivky II, III a IV na obr. 1).

Tab.1. Sitové analýzy produktov po drvení uhlia z Handlovej, 2. sloj, IX. úsek, trieda 0-20 mm.

Okatost' sit [mm]	Počet pádov: 0			Počet pádov: 5			Počet pádov: 5 + 5			Počet pádov: 5 + 5 + 5		
	krivka I [%]	Σ produktov		krivka II [%]	Σ produktov		krivka III [%]	Σ produktov		krivka IV [%]	Σ produktov	
		P	N		P	N		P	N		P	N
20,0-12,0	33,9	100,0	33,9	22,0	100,0	22,0	13,6	100,0	13,6	9,1	100,0	9,1
12,0-8,0	22,0	66,1	55,9	18,0	78,0	40,0	16,0	86,4	29,6	16,0	90,9	25,1
8,0-6,3	7,6	44,1	63,5	9,2	60,0	49,2	10,1	70,4	39,7	10,0	74,9	35,1
6,3-4,0	12,9	36,5	76,4	16,2	50,8	65,4	17,5	60,3	57,2	17,4	64,9	52,5
4,0-2,0	10,7	23,6	87,1	15,4	34,6	80,8	19,5	42,8	76,7	19,7	47,5	72,2
-2,0	12,9	12,9	100,0	19,2	19,2	100,0	23,3	23,3	100,0	27,8	27,8	100,0
	100,0			100,0			100,0			100,0		



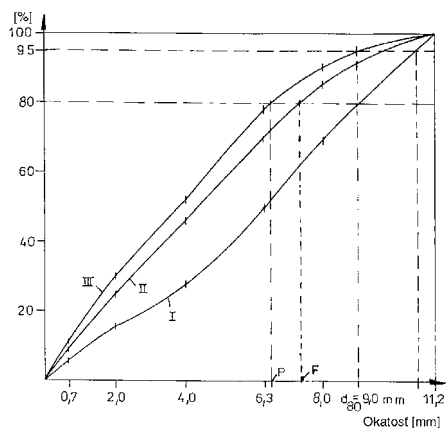
Obr.1. Krivky zrnitosti pre uhlie 0-20 mm.

Počet potrebných pádov kladiva vyplýva z podmienky, že daná vzorka uhlia môže obsahovať len 5 % nevhodných zrn, to znamená, že po jej zdrvení a triedení na site s okatosťou 15,6 mm musí do podsitného produktu prepadnúť 95 % zrn. Aby bola táto požiadavka splnená, musí dopadnúť kladivo uvedenej hmotnosti 15-krát na danú vzorku energetického uhlia (krivka IV, obr. 1).

Pri 10 pádoch kladiva na vzorku uhlia sa požadovaný efekt ešte nedosiahol, pretože na site s okatosťou 15,6 mm ostáva viac ako 8 % nevhodných zrn (krivka III, obr. 1).

Podobná úvaha platí aj pre vzorku uhlia zrnitosti 0-11,2 mm (obr. 2). Túto zrnitosť sme zvolili preto, aby sme mohli konfrontovať vypočítané hodnoty spotreby energie na drvenie na dvoch zrnitostne rozdielnych vzorkách handlovskeho uhlia.

Z krivky I na obr. 2 môžeme vydedukovať: Vzorku uhlia, v zmysle Bondových úvah, charakterizuje čo do zrnitosti hodnota okatosti sita $d_{80} = 9,0$ mm. Zrná v rozsahu 9,0-11,2 mm tvoria tzv. nevhodné zrná s hmotnostným výnosom až 20 %. Na zníženie tohoto hmotnostného výnosu nevhodných zrn na dohodnutú hodnotu 5 % musíme nechať padať kladivo na toto uhlie 15-krát. Pri 10 pádoch sa hmotnostný výnos nevhodných zrn pohybuje ešte okolo 9 % (krivka II, obr. 2).



Obr.2. Krivky zrnitosti pre uhlie 0-11 mm.

Tab.2. Sitové analýzy produktov po drvení uhlia z Handlovej, 2. sloj, IX. úsek, trieda 0-11,2 mm.

Okatost' sít [mm]	Počet pádov: 0			Počet pádov: 10			Počet pádov: 10 + 5		
	krivka I [%]	Σ produktov		krivka II [%]	Σ produktov		krivka III [%]	Σ produktov	
		P	N		P	N		P	N
11,2-8,0	30,6	100,0	30,6	14,1	100,0	14,1	10,0	100,0	13,0
8,0-6,3	20,1	69,4	50,7	16,4	85,9	30,5	11,0	90,0	24,0
6,3-4,0	21,9	49,3	72,6	23,5	69,5	54,0	26,4	79,0	47,4
4,0-2,0	12,2	27,4	84,8	20,9	46,0	74,5	22,9	52,6	70,3
2,0-0,7	10,4	15,2	95,2	15,9	25,1	90,8	17,9	29,7	88,2
-0,7	4,8	4,8	100,0	9,0	9,2	100,0	11,8	11,8	100,0
	100,0			100,0			100,0		

Výpočet kinetickej energie padajúceho telesa a Bondovho indexu práce

Kinetická energia padajúceho telesa na vzorku je všeobecne daná vzťahom:

$$W_t = \frac{m_z \cdot g \cdot h}{m_{vz}}$$

kde: m_z - hmotnosť padajúceho závažia [kg]; g - tiaž. zrýchlenie [$m \cdot s^{-2}$]; h - výška pádu telesa [m];
 m_{vz} - hmotnosť vzorky [kg].

Rozmerové vyjadrenie kinetickej energie je potom:

$$W_t = \frac{kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot m}{kg} = \frac{N \cdot m}{kg} = \frac{J}{kg}$$

Celková energia absorbovaná vzorkou uhlia vo všeobecnom vyjadrení bude:

$$W_t = \frac{N \cdot m}{kg} \cdot \text{poč. pádov kladiva} \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Po dosadení hmotnosti padajúceho telesa a výšky jeho pádu dostaneme energiu absorbovanú vzorkou uhlia z jedného pádu:

$$W_t = \frac{2,4 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,64 \text{ m}}{1 \text{ kg}} = 15,07 \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Po dosadení tejto hodnoty a použitím vzťahu [3] vypočítame jednotlivé pádové energie ako aj spotrebovanú energiu pre obe skúmané triedy. Pre vzorku zrnitosti 0-20 mm platí:

Výpočet pádových energií:

$$W_{tF} = \frac{15,07 \cdot 10}{0,340} = 443,18 \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

$$W_{tP} = \frac{15,07 \cdot 15}{0,340} = 664,77 \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet spotrebovanej energie:

$$W = W_{tP} - W_{tF} = 664,77 - 443,18 = 221,59 \quad [J \cdot kg^{-1}]$$

Výpočet indexu práce W_i :

Hodnoty F a P odčítame z obr. 1: $F = 10\,000 \mu\text{m}$, $P = 9\,000 \mu\text{m}$. Po dosadení:

$$W_i = \frac{W}{\left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{F}}\right)} = \frac{221,59}{\left(\frac{10}{\sqrt{9000}} - \frac{10}{\sqrt{10000}}\right)} = \frac{221,59}{5,410 \cdot 10^{-3}} = 40,96 \quad [kJ \cdot kg^{-1}]$$

Pre vzorku zrnitosti 0-11,2 mm podobným spôsobom určíme index práce W_i :

$$W_i = 36,51 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Poznamenávame, že index práce W_i stanovený experimentálne v laboratórnych podmienkach, slúži na porovnávanie efektívnosti drviacich a mlecích procesov v prevádzkach, na vzájomné porovnávanie drviarní a mlyníc, ako aj na výpočet potrebných príkonov elektromotorov pre drviče a mlyny.

Záver

Autori na experimentálnej báze a s aplikovaním najnovších teoretických poznatkov z oblasti rozpojovania hornín a spotreby energie pri ich rozpojovaní určili množstvo energie v kWh.t^{-1} , ktoré sa spotrebuje na drvenie 1 tony energetického uhlia z Bane Handlová. Spotreba energie W_i na drvenie energetického uhlia pre zrnitosť:

- a) 0-20 mm je $40,96 \text{ kJ.kg}^{-1}$ (po prepočítaní na tzv. „krátku tonu“ – sht – je to $10,32 \text{ kWh.sht}^{-1}$, a po prepočítaní na tonu je to $11,37 \text{ kWh.t}^{-1}$).
- b) 0-11 mm je $36,51 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ($= 9,20 \text{ kWh.sht}^{-1} = 10,14 \text{ kWh.t}^{-1}$).

Priemerná spotreba energie na drvenie 1 tony energetického uhlia z Bane Handlová je teda:

$$W_i = 10,76 \text{ kWh.t}^{-1}.$$

Konkrétna aplikácia Bondovej teórie na skúmanú horninu, na základe autormi vypracovaného laboratórneho postupu, poukazuje na možnosť stanovenia reálneho čísla udávajúceho spotrebu energie na drvenie surovín v kWh.t^{-1} .

Aby bolo možné spoľahlivo stanoviť veľkosť mlyna a výkon elektromotora, zaviedol dodatočne Bond (1961) päť korelačných koeficientov slúžiacich na spresnenie výpočtu hodnoty indexu práce W_i , t.j. spotreby elektrickej energie. Na ilustráciu uvádzame hodnoty W_i podľa Bonda a iných autorov pre niektoré suroviny.

Tab.3. Hodnoty indexu práce pre niektoré suroviny.

Surovina	kWh.sht^{-1}	kWh.t^{-1}	kJ.kg^{-1}	Prameň
Andezit	8,25	20,12	72,45	UVR
Baryt	4,73	5,21	18,78	Allis-Chalmers
Čadič	17,10	18,85	67,89	UVR
Dolomit	11,27	12,42	44,74	Allis-Chalmers
Ferrosilicium	12,83	14,14	50,94	Bond
Grafit	43,56	48,02	172,93	Allis-Chalmers
Hematit – spekularit	15,40	16,98	61,14	Bond
Kremeň	13,57	14,96	53,87	Allis-Chalmers
Magnezit	10,21	11,26	40,53	Bond
Medená ruda	18,00	19,84	71,46	Fahlström
Uhlie	11,37	12,53	45,14	Bond
Vápenec	12,74	14,04	50,58	UVR

Literatúra

- Bond, F.C.: Comminution Exposure Constant by the Third Theory. *AIME Transactions Mining Engineering*, 1957, č. 12.
- Bond, F.C.: Confirmation of the Third Theory. *AIME Transaction* 217, 1960.
- Bond, F.C.: Crushing and Grinding Calculations. *Allis-Chalmers Bulletin, Milwaukee* 1961.
- Bond, F.C.: Crushing Tests by Pressure and Impact. *AIME Transactions*, 169, 1964.
- Bond, F.C.: Three Principles of Comminution, *Mining Congress Journal*, 1960, č. 8.
- Dinterová, L.: Výzkum drtiteľnosti hornin se zřetelem na teorii rozpojování F.C. Bonda (kandidátská disertace). *VŠB Ostrava*, 1976.
- F.C.B. BICO-BRALIN BALL MILL. Firemný prospekt SEPOR Inc. Wilmington, 90748 California, 1982
- Jusko, F.: Štúdium kinetiky mletia rúd a jej význam v úpravníckej praxi (kandidátska dizertácia). *Košice, VŠT – Banícka fakulta*, 1965.
- Karra, V.K.: Simulation of the Bond grindability test. *CIM Bulletin, March* 1981.
- Klán, J., Němec, J., Káš, V.: Laboratorní test pro stanovení melitelnosti uhlí v původním stavu. In: *Acta montana* 23, ČSAV, Praha 1972.
- Lukáč, J., Đurove, J: Spotreba energie pri drvení uhlia. *Výskumná správa pre HB, š.p., Baňa Handlová. F BERG TU v Košiciach*, 1995.