

## Finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségi vizsgálata

Mucsi Gábor

Miskolci Egyetem

Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet

ejtmucsi@uni-miskolc.hu

### *Grindability test for fine brittle materials*

*The most of nowadays used and widespread laboratory grindability methods can be applied for grinding of standard size – relatively coarse – particles. The Bond method demands  $x < 3,36$  mm, the Hardgrove- and Zeisel-processes require  $x = 0,59 \dots 1,19$  mm and  $x = 0,75 \dots 1,00$  mm particle size intervals respectively.*

*The more reliable dimensioning demands the investigation of fine grained brittle materials grindability, where the feed particle size may be much lower ( $< 100 \mu\text{m}$ ) than standard values. One of the main aims of grindability research carried out by University of Miskolc, Department of Process Engineering is*

*to develop a grindability determination method for fine materials by means of the improvement of Hardgrove and Bond measuring methods and devices. Therefore the Hardgrove- and Bond mills were equipped with power input measuring instruments (torque-meter, electric power measurer). Standard Bond and Hardgrove tests were carried out systematically with different kinds of materials which have determined grindability where the specific grinding work was measured. Then these grindability numbers were compared with the results of standard processes. Specific grinding work obtained by the Universal Mill method may be used reliably for daily controlling even with fine particles. The new grindability test is fast and easy to carry out.*

## 1. Bevezetés

A malmok méretezéséhez szükséges őrlhetőségi mérőszámok és kísérletek fontosságát mi sem bizonyítja jobban, mint az a tény, hogy a fejlett országok összes energiafogyasztásuk kb. 5%-át az aprításra fordítják. Ebből jelentős részt képvisel az ún. finom és ultrafinom őrléményeket –  $x < 50$  ( $5$ )  $\mu\text{m}$  – eredményező őrlésre fordított energia. Az ilyen finom őrlémények előállításánál azonban gyakran a feladás is mindössze néhány száz mikronos szemcseméretű. Máskor eleve finom szemcseméret-eloszlású (pl. erőműi pernye, timföld) anyag keletkezik, amelyet tovább kell őrlni.

A napjainkban használatos és elterjedt laboratóriumi őrlhetőségi módszerek nagyrészt azonban egy meghatározott – viszonylag durva – szemcseméret összetételű mintaanyag laboratóriumi őrlésére alkalmazhatjuk. A Bond módszer  $x < 3,36$  mm, a Hardgrove-eljárás  $x = 0,59 \dots 1,19$  mm és a Zeisel-eljárás pedig  $x = 0,75 \dots 1,00$  mm szemcseméretet igényel [1, 2].

A megbízhatóbb méretezés megköveteli a finom szemcseméretű rideg anyagok őrlhetőségi vizsgálatát is, ahol a feladási szemcseméret akár egy nagyságrenddel is kisebb ( $x < 100 \mu\text{m}$ ) lehet a szabványos értékektől.

A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézetében Csöke által irányított őrlhetőségi kutatások egyik fő célja a finom anyagok őrlhetőségének meghatározására szolgáló módszer kifejlesztése, elsősorban a Hardgrove és a Bond berendezések és mérési módszerek továbbfejlesztésével.

## 2. Előzmények

Csőke és szerzőtársai [4] szerint az ún. „üzemi Bond-munkaindex” meghatározása sok esetben nyújt megoldást a finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségi mutatójának a meghatározására.

$$W_{iB,i} = \frac{W_B}{\left( \frac{10}{\sqrt{x_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{80}}} \right)} \quad (1)$$

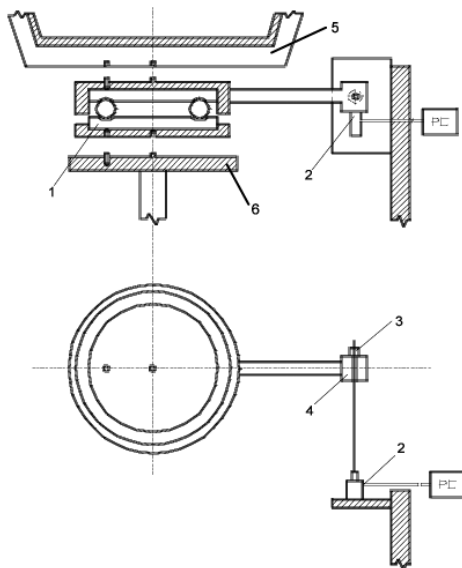
A feladás ( $X_{80}$ ) és a termék ( $x_{80}$ ) 80%-os szemcsemérete valamint a fajlagos őrlési munka ( $W_B$ ) ismeretében (1) összefüggéssel  $W_{iB,i}$  kiszámítható. Ahol  $W_B$  fajlagos munkát a mért motor által felvett  $P$  hasznos teljesítmény és  $Q$  malomkapacitás ismeretében –  $P[\text{kW}]/Q[\text{t/h}]$  – nyerjük.

A közelmúltban megjelent tanulmányokban egymástól függetlenül Daniel [6] és Mucsi [7] a fajlagos őrlési munka elektromos teljesítménymérésén alapuló meghatározásáról írnak. Megállapították, hogy laboratóriumi Bond-malomban történő őrlés során az alkalmazott digitális energiaméterek a megfelelő korrekciós tényezők figyelembevétele mellett alkalmasak a fajlagos aprítási energia meghatározására.

### 3. Kísérleti berendezések

#### 3.1. A Hardgrove malom átalakítása

A jelzett kutatási cél érdekében a szabványos Hardgrove malmot az őrlési nyomaték mérésére alkalmas eszközökkel szereltük fel [5], így a berendezés alkalmas az őrlésre fordított munka mérésére. Az őrlő nyomaték mérési rendszere az 1. ábrán látható. Az őrlőtér (5) és az emelőszerkezet (6) között egy axiális csapágó (1) biztosítja a gyakorlatilag szabad elmozdulást, amelyet felül sem gátol semmi, mivel a tégely (5) nem ér hozzá a fedélhez. Az (2) erőmérő távadó a berendezés falához van rögzítve. A távadó drótkötéllal csatlakozik a (4) nyomatékmérő karhoz. A drótkötél végén csavarral rögzíthető véglezáró (3) található, amivel a szükséges kötélhossz beállítható, ill. a nyomatékmérő kar végén található nútból kivehető. Ezáltal a nyomatékmérő rendszer könnyen szétszerelhető.



1. ábra. Nyomatékmérő rendszer  
Fig. 1. Torque measuring system

A nyomatékmérést szolgáló rendszer részei:

- 1 – axiális csapágó,
- 2 – erőmérő-távadó a nyomaték mérésére,
- 3 – véglezáró,
- 4 – nyomatékmérő kar,
- 5 – őrlőtégely,
- 6 – emelőszerkezet.

#### 3.2. Új Bond-malom

A Miskolci Egyetem Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézete által tervezett új laboratóriumi dobmalom (2. ábra) hajtása centrikus és mérete meg egyezik a szabványos Bond-maloméval. A fordulatszámot frekvenciaváltó segítségével szabályozhatjuk. Továbbá a vízszinteshez képest az őrlőtér  $\pm 45^\circ$ -kal dönthető, így lehetővé téve az egyszerűbb töltést és ürítést.

A Bond-féle golyósmalmi kísérletek során egy Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú mikroprocesszorral vezérelt digitális energiamétert használtunk, aminek a segítségével a  $P(t)$  pillanatnyi elektromos teljesítményen túl az  $W_0$  őrlési időre vonatkozó munkát is mérhetjük.



2. ábra. Bond-malom és energiaméter fényképe  
Fig. 2. Photo of Bond mill and energy meter

### 4. Mintaanyagok

Az őrlési munka direkt módon történő méréséhez mészkő, zúzott kavics, barnaszén, bauxit és bazalt minta szolgált. Származási helyüket és fő ásványos összetevőiket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat

Mintaanyagok származása és fő ásványos összetevője  
Origin and main mineral components of samples

Minta	Származási hely	Fő összetevő
Mészkő	Miskolc-Tapolca	$CaCO_3$ tart.: 95%
Zúzott kavics	Nyékládháza	$SiO_2$ tart.: 86%
Barnaszén	Oroszország	-
Bazalt	Uzsa	-
Bauxit (böhmites)	Görögország	$Al_2O_3$ tart.: 59,6%

A timföld mintát a MAL Zrt. bocsátotta rendelkezésünkre a finom szemcseméretű anyagok őrlhetőségének vizsgálata céljából. Az anyag maximális szemcsemérete 150  $\mu m$ .

## 5. Módszerek és mérési adatok kiértékelése

### 5.1 Szabványos eljárások

*Bond-eljárás.* Örölhetőségi mutatója kidolgozásához Bond többszáz üzemi mérést végzett el. Laboratóriumi körülmények között egy Ø305x305 mm méretű dobmalomban megvalósított száraz őrléssel egy Ø2,44x2,44 m-es malomban elvégzett nedves őrlést modellez. A késztermék aránya a visszajáró durva anyag mennyiségéhez 1/2,5. A körfolyamatos őrlést a finom rész ( $x_{\max}$ ) eltávolításával és friss feladással történő helyettesítésével az egyensúly beálltáig (G értéke utolsó 3 lépcsőben állandó) végezzük. [1-3] A feladott anyag mennyisége 700 cm<sup>3</sup>.

A  $W_{iB}$  Bond-munkaindex a következő empirikus képlet segítségével határozható meg:

$$W_{iB} = \frac{4,9}{x_{\max}^{0,23} G^{0,82} \left( \frac{1}{\sqrt{x'_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{X'_{80}}} \right)} \quad (2)$$

ahol  $x_{\max}$  a kész finom termék maximális szemcsemérete [ $\mu\text{m}$ ] (általában  $x_{\max} = 100 \mu\text{m}$ ),  $X'_{80}$  és  $x'_{80}$  a feladás és az őrlemény 80 %-os szemcsemérete [ $\mu\text{m}$ ], G pedig, az örölhetőségi tényező [g/fordulat] a laboratóriumi malomban 1 fordulat alatt képződő friss  $x_{\max}$  alatti anyag mennyisége az egyensúlyi állapotban.

*Hardgrove-eljárás.* A „Babcock & Wilcox” cég által USA-ban 1931-ben bejegyzett Hardgrove malom különböző rideg anyagok örölhetőségének a meghatározására szolgál. Az őrlőtérben 8 db 1” átmérőjű golyó 290 N terhelés mellett 60 fordulaton keresztül végzi az őrlést. A feladott anyag tömege 50 g [1].

A Hardgrove-index számításánál a következő empirikus képletet állapították meg:

$$HGI = 13 + 6,93m_{74} \quad (3)$$

ahol  $m_{74}$  a 74  $\mu\text{m}$  alatti őrlemény tömege. Az így nyert dimenzió nélküli Hardgrove számból a Bond-munkaindex a Csöke által javasolt képlettel meghatározható:

$$W_{iB}^H = \frac{468}{HGI^{0,82}} [\text{kWh/t}] \quad (4)$$

### 5.2 Fajlagos őrlési munka és Bond munkaindex meghatározása nyomatók ill. teljesítménymérési adatokból

Az Univerzális Hardgrove malom esetében az őrlés során kifejtett  $M$  nyomatók folyamatosan történő mérésének köszönhetően állandó  $n = 20 \text{ min}^{-1}$  fordulatszám mellett a nyomatók  $\tau$  őrlési időre vonatkozó integrálásával és a képződött termék  $m$  tömegével való elosztásával megha-

tározható a fajlagos őrlési munka értéke. A kísérlet során megmérjük az üres és az anyaggal töltött őrlőtérre ható nyomatókat, és ezek különbsége határozza meg a vizsgált mintaanyag őrlésére fordított nyomatókát.

A fajlagos őrlési munka integrál alakban  $\tau$  őrlési időre vonatkozóan:

$$W_B = \frac{\int_0^{\tau} 2\pi n [M(t) - M_0] dt}{m} \quad (5)$$

ahol

$M(t)$  - a nyomatók;

$M_0$  - az üresjárás nyomatók;

$n$  - a fordulatszám;

$m$  - az anyagtömeg.

Az így kapott  $W_B$  fajlagos őrlési munkát (1) összefüggésbe behelyettesítve kapjuk meg a  $W_{iB}$  üzemi Bond-munkaindexet.

A Bond malmi őrlési kísérleteknél, pedig az elektromos teljesítményt ill. munkát meghatározva, a termék tömegének és a 80%-os szemcseméretek mérése után kapott értékeket felhasználva ugyancsak az (1) képlet segítségével jutunk az üzemi Bond-munkaindexhez.

## 6. Kísérletek

Négy mérési sorozatot hajtottam végre, melyeknek célja a fajlagos őrlési munka, ill. a Bond-munkaindex meghatározása volt.

- 1) Elsőként a mintaanyagokkal szabványos módon folytattam le a mérést mind a Hardgrove, mind pedig a Bond-módszer szerint.
- 2) A második mérési sorozatban a procedúra szabványos volt, de a kiértékelést (azaz az őrlési munka és Bond-munkaindex meghatározását) a nyomatók (Hardgrove) és a villamos teljesítmény (Bond-malom) mért adataiból végeztük el.
- 3) Harmadik mérési sorozatban a gyorsabban kivitelezhető és ezért előnyösebb Hardgrove-eljárás pontosságának javítása érdekében a Hardgrove malomban is a Bond-eljáráshoz hasonlóan körfolyamatos őrlést valósítottam meg, azaz őrlés után a  $>106 \mu\text{m}$ -es szemcsék visszajáratásával (ismételt feladásával).
- 4) A 4. mérési sorozatban (miután az 1...3 sorozat igazolta, hogy a Hardgrove és Bond-eljárás a teljesítmény mérésével helyettesíthető) a szabványosnál finomabb szemcsékre a teljesítmények mérésével határoztam meg a fajlagos őrlési munkát.
- 5) Végül ezeket az eredményeket valódi ipari mérések adataival vettem össze.

## 7. Eredmények

### 7.1 Szabványos Bond- és Hardgrove mérések és teljesítmény mérések összevetése

Szabványos Bond és Hardgrove kísérleteket valamint a – korábban bemutatott módszerrel – direkt módon történő munkaméréseken alapuló őrléshatósági vizsgálatokat párhuzamosan végeztem. A különböző módon nyert őrléshatósági mutatókat a 2. táblázat tartalmazza.

Megállapítható, hogy az eredeti Bond és Hardgrove továbbá az Univerzális Hardgrove malommal (nyomatékmérés) végzett mérésekből származó munkaindex értékek közötti különbség a barnaszén kivételével elfogadható mértékű. A szabványos Bond-eljárással meghatározott és a Hardgrove-malommal a (4) képlettel nyert munkaindex értékek közötti eltérés a  $-10,4$ – $+10,1\%$  tartományban van, valamint a nyomatékmérésből származó „Bond-munkaindex” a szabvány szerinti  $W_{iB}$ -hez képest  $-12,5$ – $+4,9\%$ -ban tér el.

Az elektromos teljesítmény-méréseken alapuló Bond méréssel nyert ún. üzemi Bond-munkaindexek pedig nagyobbra adódtak, mint a szabványos módon kapott munkaindexek. Ez a csapágyúrlódással magyarázható. A két módszer értékei közötti korrekciós tényező  $0,92$ -re adódott a tört kavics és a mészkő esetében, a bauxitnál pedig  $0,84$  volt, azaz  $W_{iB} = kW_{iB,ü}$ , ahol  $k=0,92$  ill.  $0,84$ .

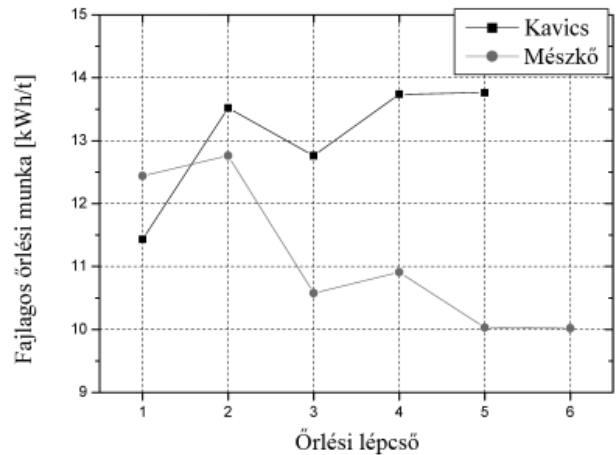
### 7.2 Zárt ciklusú Univerzális Hardgrove malmi kísérletek

A körfolyamatos száraz közegű őrlési kísérleteket a körfolyamat egyensúlyi állapotának eléréséig végeztem (állandósult fajlagos őrlési munkáig) az ún. Univerzális Hardgrove Malommal. A feladási szemcseméret meg egyezett a Bond eljárásban rögzített tartománnyal, azaz  $<3,36$  mm. A további paraméterek a következők voltak:

- őrlési idő: 3 min, 60 fordulat minden lépcsőben (20 ford./min),
- őrlőtestekre ható nyomóerő: 290 N,
- száraz szitálás:  $106 \mu\text{m}$ -nél (termék maximális szemcsemérete).

A fajlagos őrlési munkákat a 3. ábra szemlélteti. Az állandósult fajlagos őrlési munka értékét, a képződött termék ( $<106 \mu\text{m}$ ) tömegét valamint a termék és feladás  $80\%$ -os szemcseméretét az 1. összefüggésbe behelyettesítve megkapjuk az „üzemi Bond-munkaindexet”.

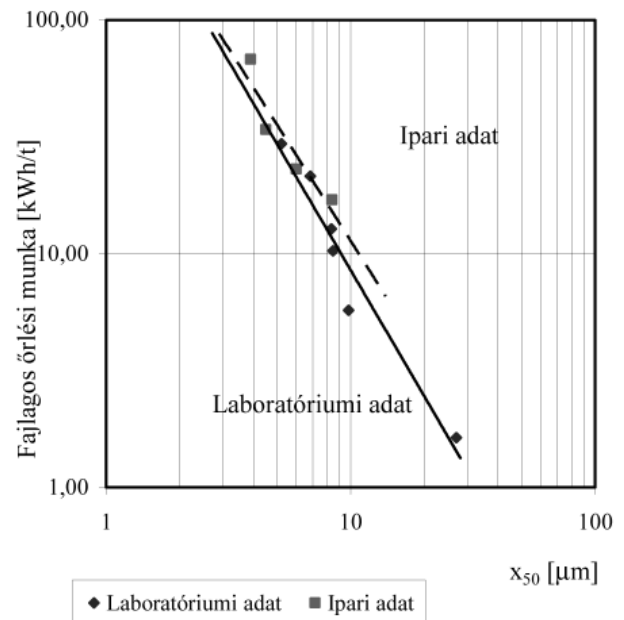
Ezek értékei **14,86 kWh/t** és **10,58 kWh/t**-ra adódtak a tört kavics és mészkő esetében. A szabványos Bond és az Univerzális Hardgrove Malommal körfolyamatos őrléssel meghatározott értékek közötti különbség kavics esetén **5,4%** és a mészkő esetében pedig **2,4%**.



3. ábra. Fajlagos őrlési munka változása az egyes őrlési lépcsők során  
Fig. 3. Specific grinding work as function of grinding cycles

### 7.3 Finom szemcseméretű anyagok őrléshatósága

A finomőrlés fajlagos energiaigényének meghatározását célzó laboratóriumi méréseket timföld mintán végeztem az Univerzális Hardgrove malommal. A feladás és a termékek szemcseméret-eloszlását egy Fritsch Analysette 22 típusú lézeres elemzővel mértem meg. Az őrlendő alumínium-oxid mediánja  $45,95 \mu\text{m}$  ( $X_{80}=77,77 \mu\text{m}$ ) volt. A kiértékelés során a nyomatékmérés elvén meghatározott fajlagos őrlési munkát hasonlítottam össze az ipari méretű golyósmalom hasonló adataival. Az eredményeket a 4. ábra szemlélteti.



4. ábra: Az őrlemény 50%-os szemcsemérete és fajlagos őrlési munka közötti kapcsolat  
Relationship between product median and specific grinding work

Különböző módon meghatározott Bond-munkaindexek összehasonlítása  
Comparison of Bond indices obtained by different methods

	Bond malom		Univerzális Hardgrove Malom	
	Szabvány módszer	Teljesítménymérés	Szabványból számított	Nyomatékmérésből származó
Feladási szemcseméret	< 3,36 mm		0,6–1,18 mm	
Termék max. szemcsemérete	106 $\mu$ m		75 $\mu$ m	
Mészke, $W_{i,B}$ [kWh/t]	10,84	11,82	11,07	10,47 $x_{80}=58 \mu\text{m}, X_{80}=1063 \mu\text{m}$
Tört kavics, $W_{i,B}$ [kWh/t]	15,71	17,02	17,3	16,48 $x_{80}=57 \mu\text{m}, X_{80}=998 \mu\text{m}$
Barnaszén, $W_{i,B}$ [kWh/t]	12,82	-	16,34	11,91 $x_{80}=59 \mu\text{m}, X_{80}=1031 \mu\text{m}$
Bazalt, $W_{i,B}$ [kWh/t]	18,65	-	17,14	18,31 $x_{80}=63 \mu\text{m}, X_{80}=1060 \mu\text{m}$
Bauxit, $W_{i,B}$ [kWh/t]	17,65	20,93	15,81	15,44 $x_{80}=61 \mu\text{m}, X_{80}=1020 \mu\text{m}$

Az ipari méretű timföldörlést egy korábbi tanulmányban bemutatott kerámia béléssel ellátott golyósmalomban végezték el alumínium-oxid örlőgolyókkal [4]. A mintavételezés a malom örlemény anyagáramból történt; a folyamat során mérték a motor elektromos teljesítményét.

Az örlemény 50%-os szemcsemérete és a fajlagos őrlési munkaigény értékei közötti kapcsolat hatványfüggvénnyel írható le az ipari golyósmalom és a laboratóriumi Univerzális Hardgrove malom esetében egyaránt.

Megállapítható, hogy a laboratóriumi és üzemi fajlagos őrlési munka értékek azonos tartományba esnek, ezért a vizsgált esetben az üzemi fajlagos őrlési munkaigény korrekciós tényező alkalmazásával a laboratóriumi kísérlet eredményéből jól megbecsülhető.

## 8. Összefoglalás

A nyomaték- és elektromos teljesítménymérésen alapuló kísérletekből megállapítható:

- A Bond-munkaindex meghatározása külön-külön, mind a Hardgrove, mind pedig a Bond-eljárás esetében visszavezethető a teljesítmény mérésére. A mintaanyagokon elvégzett különböző mérések között jó egyezés figyelhető meg.
- Az Univerzális Hardgrove malommal végrehajtott zárt körfolyamatú száraz őrlés eredményei jó közelítéssel megegyeznek a szabványos Bond módszerrel mért munkaindexszel (átlagos eltérés 3,9%).
- A Bond-féle mérés egyszerűsítését (helyettesítését) a mérések igazolták. A Hardgrove malommal elvégzett körfolyamatos őrlés pontosabb közelítést nyújt a Bond-eljárással meghatározott munkaindexre, mint a nyitott körfolyamatú.

- Az Univerzális – nyomatékmérésen alapuló – Hardgrove malommal nyert fajlagos őrlési munka megbízhatóan alkalmazható napi üzemi ellenőrzésre. A finom anyagok esetében a kísérletek eredményei jó egyezést mutattak az ipari értékekkel.
- A módszer fő előnyei a következők: egyszerű és jól szabályozható laboratóriumi malom használata, továbbá mindössze 50 g minta elegendő a méréshez, ami mindössze 60–90 perc alatt elvégezhető, szemben a Bond-féle vizsgálat 8-10 óra munkaidejével.
- Az egyszerűsített módszer  $\pm 2$ –5%-os átlagos pontosság mellett alkalmazható a Bond-munkaindex becslésére.

## Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni Dr. Csőke Barnabásnak és Dr. Fajtli Józsefnek a szakmai irányítás és a mérés technika területén nyújtott segítségét.

### Irodalom

- [1] Pethő Sz., Csőke B.: Hazai közetek Bond-munkaindexének meghatározása. Építőanyag 1983.11. szám p. 401-407.
- [2] F. C. Bond: Crushing and grinding calculations I-II. British Chemical Engineering. 1961.
- [3] F. C. Bond: Berechnungsmethode zur Feinzerkleinerung. (Evaluation of fine particle grinding) Aufbereitungs-technik Nr. 5. 1964. pp. 211-218.
- [4] B. Csőke, G. Mucsi, Csende, Z. Balogh: Quality Control For the Production of Alumina Grinds Using Ball Mills. XXIII. IMPC, Istanbul (2006) pp. 121-126.
- [5] G. Mucsi, B. Csőke, D. Papanastassiou, K. Solymár: Fast determination of grindability of bauxites in function of temperature. Symposium of ICSOBA 2005. Nagpur, India pp. 97-103.
- [6] M. J. Daniel: Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill. XXIII. IMPC Turkey, Istanbul
- [7] G. Mucsi: Laboratory determination of fine grained brittle materials grindability. 11<sup>th</sup> Symposium on Comminution, 2006. Budapest, Hungary (CD-ROM)