

KEVERÉKEK ŐRÖLHETŐSÉGÉNEK JELLEMZÉSE, KÜLÖNLEGESEN FINOM ŐRLEMÉNYEK ELŐÁLLÍTÁSA

CSŐKE BARNABÁS¹–RÁCZ ÁDÁM²–MUCSI GÁBOR³

Összefoglaló: A TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt keretében a Nyersanyag-gazdálkodás K+F szakmai műhelyben a környezetbarát feldolgozás témájában két fő területen folyt kutatómunka. A két részterület a különböző apríthatósági tulajdonsággal rendelkező keverékek őrlhetőségének jellemzése és a különlegesen finom őrlemények előállítása, feldolgozása. A keverékek őrlhetőségének vizsgálata során Bond és Hardgrove őrlhetőségi vizsgálatokat folytattunk le, továbbá különböző szimulációs és számítási metódusokat alkalmaztunk az eltérő összetételű keverékek Bond-munkaindexének meghatározására. A kutatás eredményeként összehasonlítottuk a különböző mérési módszerek szolgáltatta eredményeket, és feltártuk az egyes mérési eljárások alkalmazási lehetőségeit és korlátait. A finomőrlemények előállítása, feldolgozása területén vizsgáltuk a tárcsás keverőmalomban történő száraz ultrafinom őrlés lehetőségét. Feltártuk az egyes őrlési paraméterek és az őrlést segítő anyagok alkalmazásának hatását a termék eljárás technikai jellemzőire (szemcseméret-eloszlás, fajlagos felület, fajlagos őrlési energia), mellyel megalapoztuk az ipari ásványok tárcsás keverőmalomban történő száraz ultrafinom őrlésének lehetőségét.

Kulcsszavak: száraz finomőrlés, keverőmalom, keverékek őrlhetősége, Bond-munkaindex, Hardgrove-index

1. Bevezetés

A finomőrlés és ultrafinom őrlés iránt az elmúlt évtizedekben egyre növekvő igényt mutat az ipar. A nagy finomságú (<3...5 µm) termékekre elsősorban a gyógyszeripar, élelmiszeripar, vegyipar, festékipar és kerámiaipar tart igényt. Az ilyen nagy finomságú őrlemények előállításának azonban fő problémája a nagy fajlagos őrlési energiaszükséglet. Ma a világ megtermelt energiájának körülbelül 3–5%-a aprításra, őrlésre fordítódik, s az őrlési finomsággal az őrlés fajlagos munkaszükséglete exponenciálisan nő. Ezért igen fontos, hogy az őrlést hatékonyan valósítsuk meg.

Az őrlés hatékonyságát legerőteljesebben az őrlési sebesség határozza meg, amely az anyag szemcseméretének, a szemcsék mechanikai jellemzőinek, mikroszerkezetének, a kohéziós erők és a hibahelyek száma, eloszlása által meghatározott őrlhetőségének, valamint a képződő finom szemcsék felületi tulajdonságainak (adhézióra hajlamának) éppen úgy függvénye, mint az őrlőgépben megvalósuló igénybevételi módnak (ütés, dörzsölés...), az

¹ DR. CSŐKE BARNABÁS, egyetemi tanár
ejtcsoba@uni-miskolc.hu

² RÁCZ ÁDÁM, tudományos segédmunkatárs
ejtracz@uni-miskolc.hu

³ DR. MUCSI GÁBOR, egyetemi docens
ejtmucsi@uni-miskolc.hu

Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárás Technikai Intézet
3515 Miskolc-Egyetemváros

örlőgép kialakításától és technológiai jellemzőktől függő igénybevételi intenzitásnak (bevitt energia fajlagos mértékének). Az őrlendő anyag adottsága, őrléssel kapcsolatos sajátságait csak korlátozottan szabályozhatjuk (őrlési segédanyagok). Alapvető fontosságú tehát az őrlési eljárások és berendezések fejlesztése a mikro- és nanoőrlemények előállítására.

Az őrléstechnikai kutatások terén kezdetben az ásványelőkészítésben elterjedt berendezéseknek számító dobmalomok, golyósmalmok fejlesztésére került sor, idővel viszont nyilvánvalóvá vált, hogy az ultrafinom (szubmikronos) tartományban történő őrléshez ezek a berendezések már nem alkalmazhatóak energiahatékonyan, így egyéb malomtípusok alkalmazása és kutatása került előtérbe, úgymint a rezgő-, planéta, keverőmalom.

A kompozitanyagok őrlhetőségének meghatározása egy összetett feladat. Inhomogén anyagok Bond-munkaindexe legtöbbször csak nagy szórással mérhető a különböző alkotók őrlhetőségének jelentős eltérése miatt. A Bond-munkaindex többféle módon is meghatározható: hagyományos standard eljárással Bond-malomban, Hardgrove malomban, a Hardgrove-módszerrel kapott eredmény átszámításával, a standard Bond-eljárásnál munkatakarékosabb Karra-algoritmussal, ahol a Bond-eljárás első két lépcsőjének eredményéből becsüljük meg a Bond-munkaindexet.

Az egyes mérési eljárások eredményei jelentős különbségeket mutatnak az ilyen anyagok őrlhetősége vonatkozásában. Szükséges tehát olyan átfogó kísérletsorozatot, mely összehasonlítja a különböző mérési módszerek szolgáltatata eredményeket, és az egyes mérési eljárások alkalmazási lehetőségeit, korlátait feltárja.

Jelen tanulmányban egyszerre mutatjuk be a kutatómunka főbb eredményeit mindkét résztema esetén.

2. Szakirodalmi alapok

A kutatómunka részeként a jelentős szakirodalmi kutatás zajlott, melynek eredményeképpen több hazai és nemzetközi folyóiratban is jelent meg cikk ezen témakörökben. Jelen tanulmány határolt terjedelmét figyelembe véve ennek részletes bemutatása nem megtehető, ezért csak címszavakban tárgyaljuk azokat, elsősorban hivatkozva azon cikkekre, melyeket a projektben részt vevő kutatók írtak a fentebbi témákban.

Csőke és szerzőtársai [1] kompozitok őrlhetősége témakörében végzett szakirodalmi kutatásuk alapján rámutattak, jelentős számú cikk foglalkozik a kétkomponensű keverékek őrlésével. Ugyanakkor csak néhány tanulmányozza az őrlhetőség vizsgálati módszereit és azok is főként csak egy eljárásra koncentrálnak.

Rácz [2] Kwade és szerzőtársai [3–8] munkássága alapján bemutatta a nedves keverőmalommal őrlés modellezésére alkalmazott úgynevezett igénybevételi modelleket.

Rácz és Mucsi [9] szakirodalmi feldolgozásuk során bemutatták a keverőmalom típusait, történetüket, fejlődésüket.

Mucsi és szerzőtársai [10] bemutatták a cement mechanikai aktiválásának szakirodalmi hátterét. Rámutattak, hogy habár a keverőmalom egy nagy energiasűrűségű őrlőberendezés, mégis csak néhány cikk foglalkozik (Pilevneli et al. [11], Kumar et al. [12]) a cementek keverőmalomban történő mechanikai aktiválásával.

3. Kísérleti eszközök és kiértékelési módszerek

A különböző apríthatósági tulajdonsággal rendelkező keverékek őrlhetőségének jellemzése során a mérések kivitelezéséhez egy hagyományos Bond-golyósmalmot és egy Hardgrove-malmot alkalmaztunk.

A hagyományos Hardgrove-indexet a következő képlettel számítottuk:

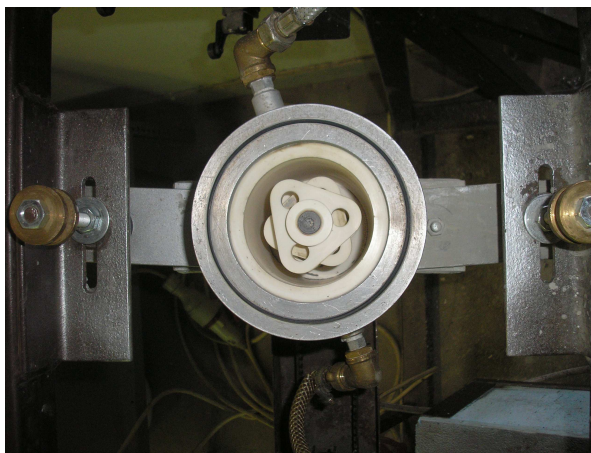
$$\text{HGI} = 13 + 6,93 m_p, \quad (1)$$

ahol m_p a 75 μm alatti termék tömege. Ebből az értékből a Bond-munkaindex a következő empirikus képlettel számítható:

$$W_{i,B,H} = \frac{468}{\text{HGI}^{0,82}}. \quad (2)$$

A Bond-méréseket a standard eljárás szerint végeztük, melyet Bond [13] írt le. A Bond-őrlhetőség teszt szimulálására a Karra-algoritmust [14] alkalmaztuk.

A különlegesen finom őrlmények előállítása, feldolgozása területén a fő alkalmazott berendezés az 1. ábrán látható keverőmalom volt, mely a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet egyedi tervezésű és egyéni építésű berendezése. A keverőmalom kerámia béléssel és keverőtárcsákkal lett ellátva, melyek nagy kopásállóságúak. A malom rotorjára 5 db 35 mm sugarú keverőtárcsa lett felhelyezve, melynek kialakítása az 1. ábrán látható.



1. ábra. Kerámiabéléses tárcsás keverőmalom

A malom köpenyhűtéssel van ellátva, melyre átfolyó vizet kötve a malom hűtése megoldható. A malom hasznos térfogata 530 cm^3 , melyet 50–80% őrlőtest töltöttség mellett 80–120 g anyag őrlésére használhatunk. A malom hajtómotorjának üzemeltetése egy frekvenciaváltón keresztül történik, mellyel szabályozhatjuk a rotor fordulatszámát, kerületi sebes-

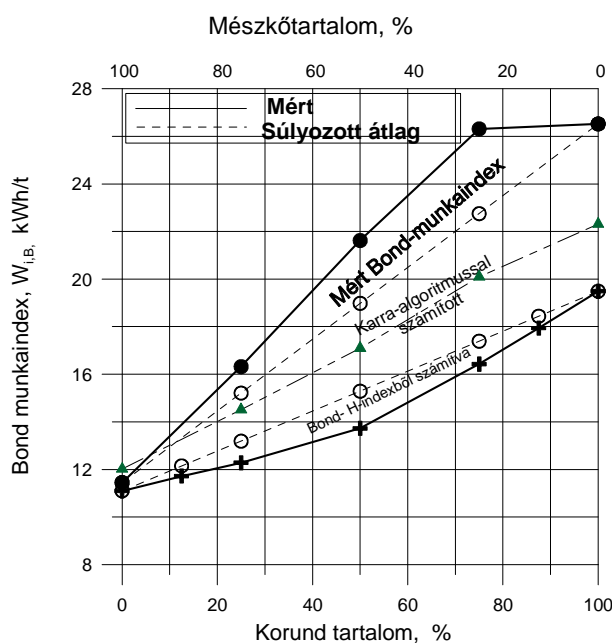
ségét. A malom motorjának teljesítményszükségletét egy Carlo Gavazzi 70 típusú energiáméter segítségével mérhetjük.

Az őrlemények szemcseméret-eloszlását, számított fajlagos felületét egy Horiba LA-950 V2 típusú lézeres szemcsenagyság-elemzővel mértük. A szemcsék alakját egy Zeiss Axio Imager M2m típusú optikai mikroszkóppal vizsgáltuk.

4. Kísérleti eredmények és következtetések

4.1. A különböző apríthatósági tulajdonsággal rendelkező keverékek őrlhetőségének jellemzése területén elért néhány eredmény

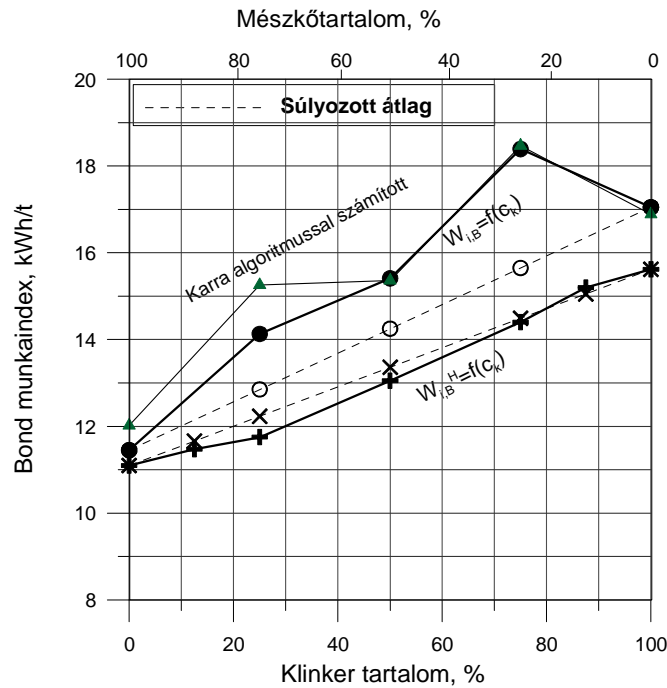
A mérések során Bond és Hardgrove őrlhetőségi kísérleteket végeztünk különböző összetételű mészkő-korund és mészkő klinker kétalkotós keverékekkel. A 2. ábrán látható mészkő-korund keverékek esetén a mért Hardgrove-számból számított Bond-munkaindex, és súlyozott átlagként számított változata, továbbá összehasonlításként fel vannak tüntetve a hagyományos Bond mérés és a Karra-algoritmussal becsült értékek is.



2. ábra. A különböző módon nyert Bond-munkaindexek összehasonlítása mészkő-korund keverékek esetén

Az összetételbeli eltéréssel összhangban, valamint a Hardgrove vizsgálati módból következően, nevezetesen, hogy a Hardgrove-eljárásnál az őrlési index meghatározásának alapja a meghatározott őrlési idő után kapott őrleményben lévő $<74 \mu\text{m}$ szemcseméretű

frakció tömege, a Hardgrove-mérések eredménye jelentősen eltér a hagyományos Bond-eljárással kapott eredményektől.



3. ábra. A különböző módon nyert Bond-munkaindexek összehasonlítása mészkő-klinker keverékek esetén

A 2. ábrán látható, hogy az egyes keverékek esetén a Hardgrove-indexből számított $W_{iB}^H = f(c_K)$ Bond-munkaindex a mért $W_{iB} = f(c_K)$ Bond-munkaindexhez képest drasztikusan alacsonyabb. A két érték közötti $\Delta W_{iB} = W_{iB} - W_{iB}^H = f(c_K)$ eltérés a nehezebben örölhető anyag arányának növekedésével a feladásban egyre nő, pontosabban a $\Delta W_{iB} f(c_K)$ eltérés maximummal rendelkezik: a legnagyobb eltérés a két módszerek között 25–75%-os keverék-összetétel esetén jelentkezik ($\Delta W_{iB} = W_{iB} - W_{iB}^H = 26.2 - 16.2 = 10 \text{ kWh / t}$), a különbség relatív értéke: 63%.

A mészkő-klinker keverékek Hardgrove mérése esetén az előzőekhez hasonló tendenciákat láthatunk (3. ábra). A Hardgrove számból számított Bond-munkaindex értéke mind a Bond-malomban mért munkaindextől, mind pedig a Karra-algoritmussal becsült értékeitől eltér. Az eltérés mértéke azonban lényegesen kisebb a korund-mészkő keverékhez képest. A legnagyobb eltérés az egyes módszerek között a Hardgrove indexből számított és a standard módon mért Bond-munkaindexek között adódott 50-50%-os keverék-összetétel esetén,

a különbség relatív értéke 15.3%. Ebben az esetben feltűnő, hogy a Karra-algoritmus kis (csaknem elhanyagolható) eltéréssel adta meg a keverék várható Bond-munkaindexét a standard eljárással mérthez képest.

A körfolyamatos Bond eljárás tekinthető a legmegbízhatóbbnak. A Hardgrove-mérésből származó becslés adta rendre a legalacsonyabb értékeket. Az eredeti Bond-méréshez képest ez a módszer terhelt a legnagyobb hibával, melynek legfőbb oka maga a Hardgrove-módszer, amely lehetővé teszi, hogy a könnyebben őrlhető anyag jelentősen feldúsuljon a <74 μ m-es termékben, amelynek tömege a Hardgrove-index, illetve a belőle kapható Bond-munkaindex számításának az alapja.

A nagy őrlhetőségbeli eltérés esetén a Karra-algoritmussal való számítás sem vezetett megfelelő eredményre, nagy hibával becsli a Bond-munkaindexet.

Mind a Karra-algoritmussal, mind pedig a Hardgrove-számból való Bond-munkaindex becslés hibája a nehezebben őrlődő komponens (a korund, klinker) arányának keverékben való növekedésével szignifikánsan nő.

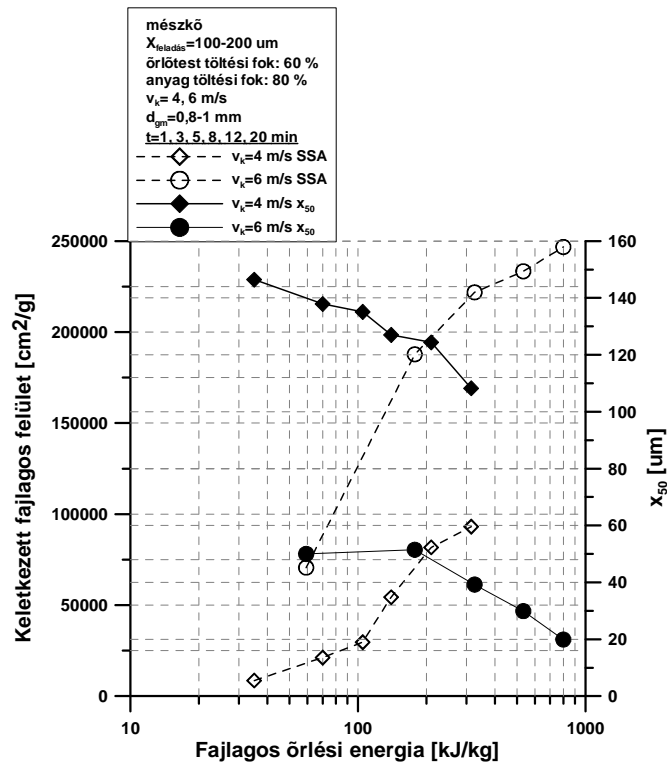
Az egyes alkotók Bond-munkaindexének ismeretében a keverék Bond-munkaindexének számításával becsült Bond-munkaindex is jelentős eltérést ad, még a kisebb őrlhetőségbeli eltérés esetén is.

4.2. A különlegesen finom őrlmények előállítása, feldolgozása területén elért néhány eredmény

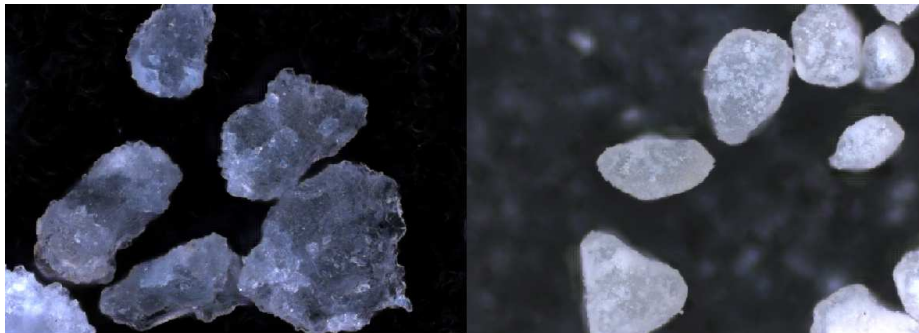
Két különböző rotor kerületi sebesség (4, 6 m/s) mellett végeztünk kísérleteket 100–200 μ m szemcseméretű feladás mellett. Az őrlés további körülményei: az őrlőtestek átmérője 0,8–1 mm, anyag ZrO₂, őrlőtest töltési fok 60%, anyag töltési fok 80%.

Jól látható, hogy mind 4 és 6 m/s-os kerületi sebesség mellett is megfigyelhető jelentős fajlagos felület növekedés (4. ábra), azonban igazán szignifikáns mediáncsökkenést csak a 6 m/s-os kerületi sebesség mellett értünk el. Ennek a magyarázata, hogy a 4 m/s-os kerületi sebesség mellett az őrlőtestek nem rendelkeztek a megfelelő intenzitással a szemcsék eltöréséhez, hanem csak a felületükön lévő kiszögelléseket, csúcsokat törték le, így valójában nem a klasszikusnak nevezhető őrlés, hanem alakformálás, gömbszerűsítés valósult meg.

Ezen elmélet bizonyítására mikroszkópban vizsgáltuk meg a feladás és a 4 m/s és 20 perc őrlési idő mellett kapott mintákat. A mikroszkópi felvételeken jól látszik (5. ábra), hogy a feladás szemcséi éles törésvonalakkal, oldalakkal rendelkeznek, míg az alacsony intenzitású őrlés hatására a felületen lévő csúcsok, kiszögellések eltűntek, a szemcsék lekekedtek. A 6 m/s-os kerületi sebességnél azonban már megvolt a kellő intenzitás a szemcsék töréséhez, ezért a medián szignifikánsan csökkent, és a fajlagos felület is jóval magasabb értéket vett fel, mint alacsonyabb kerületi sebesség mellett. 0,8–1 mm-es őrlőtest átmérő és 4 m/s rotor kerületi sebesség alkalmazása mellett nem a klasszikus értelemben vett őrlés megy végbe, hanem a szemcsék alakjának formálása, gömbszerűsítés.



4. ábra. A keletkezett fajlagos felület és a medián a fajlagos őrlési energia függvényében



5. ábra. A feladás és egy őrlemény mikroszkópi képe

A további kísérleteink eredményeképpen a következő főbb következtetéseket fonhattuk le. Az őrlést segítő anyag adagolása jelentősen növelte a keverőmalmi száraz őrlés hatékonyságát. Az ideálisnak tekinthető adagolás a mészkö és kvarc esetén 0,1 m/m%, míg klinker esetén 0,15%.

Az anyag töltési fok kis mértékben befolyásolja az őrlés hatékonyságát, optimális értéknek az 50–70% közötti töltési fok tekinthető.

Az optimális őrlőtest töltési fok 60%, ettől nagyobb töltési fok alkalmazása veszélyeztetheti a malom működését, míg alacsonyabb töltés mellett az őrlés nem hatékony.

Kristályos anyag száraz keverőmalmi őrlése esetén a rotor kerületi sebesség értékét érdemes minél nagyobbra választani. Nagyobb rotor kerületi sebesség mellett az elérhető finomság jelentősen megnő, a maximális őrlési finomság eléréséhez szükséges őrlési idő le rövidül.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány/kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] CSŐKE, B.–RÁ CZ, Á.–MUCSI, G. (2012): *Determination of the Bond workindex of composite materials*. International Mineral Processing Congress, New Delhi, India.
- [2] RÁ CZ Á. (2012): *A nedves keverőmalmi őrlés modellezésének alapjai*. Magyar Kémikusok Lapja, LXVII/10. 290–294.
- [3] KWADE, A.: *Wet comminution in stirred media mills – research and its practical application*. 1999, Powder Technology, Vol. 105, Issues 1–3, 14–20.
- [4] KWADE, A.–SCHWEDES, J.: *Breaking characteristic of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills*. 2002, Powder Technology, Vol. 122, Issues 2–3, 109–121.
- [5] BECKER, M.–KWADE, A.–SCHWEDES, J.: *Stress intensity in stirred media mills and its effect on specific energy requirement*. 2001. International Journal of Mineral Processing. 61_2001. 189–208.
- [6] KWADE, A.: *Mill selection and process optimization using a physical grinding model*. 2004. International Journal of Mineral Processing 74S (2004) S93–S101.
- [7] KWADE, A.: *Determination of the most important grinding mechanism in stirred media mills by calculation stress intensity and stress number*. 1999. Powder Technology 105 (1999), 382–388.
- [8] KWADE, A.: (1997): *Wet Comminution in Stirred Media Mills*. KONA 15, S91–S101.
- [9] RÁ CZ Á.–MUCSI G. (2012): *Ultrafinom őrlmények előállítása keverőmalomban*. Bányászati és Kohászati Lapok, 145. évf. 2012/5. 42–45.
- [10] MUCSI, G.–RÁ CZ, Á.–MÁ DAI, V.: *Mechanical activation of cement in stirred media mill*. Powder Technology. Elsevier, 235 (2013), 163–172.
- [11] PILEVNELI, C. C.–KIZGUT, S.–TOROGLU, I.–CUHADAROGLU, D.–YIGIT, E.: *Open and closed circuit dry grinding of cement mill rejects in a pilot scale vertical stirred mill*. Powder Technology 139 (2004), 165–174.
- [12] KUMAR, S.–KUMAR, R.–BANDOPADHYAY, A.–ALEX, T. C.–RAVI KUMAR, B.–DAS, S. K.–MEHROTRA, S. P.: *Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement*. Cement & Concrete Composites 30 (2008), 679–685.
- [13] BOND, F. C. (1954): *Crushing and grinding calculations*. Bulletin, Vol. 47, No. 507, 466–472.
- [14] KARRA, V. K. (1981): *Simulation of the Bond grindability test*. CIM Bulletin, Vol. 74, No. 827, 195–199.