

A szubmikronos száraz keverőalmi őrlés lehetőségei és problémái, 2. rész

RÁCZ Ádám

(1985) 2008-ban végzett a Miskolci Egyetem, Műszaki Földtudományi Karán, előkészítéstechnikai mérnök szakon. Ugyanebben az évben felvételt nyert a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskolába, ahol jelenleg harmadéves doktorandusz hallgató. Kutatási témája a száraz ultrafinom keverőalmi őrlés, kutatási témavezetői Prof. Dr. Csöke Barnabás, egyetemi tanár és Dr. Muksi Gábor, adjunktus.

RÁCZ ÁDÁM ▪ Miskolci Egyetem, Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet
▪ ejtracz@uni-miskolc.hu

Érkezett: 2011.08.02. ▪ Received: 02.08.2011. <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.12>

Possibilities and problems of the submicron dry grinding in stirred ball mill (Part II)

The development of the grinding technologies is basically important to satisfy the industry's growing demand for the fine- and ultrafine ground materials and decrease the specific grinding work demand of production. The policy of development can be divided into three parts; firstly, technical development of grinding is necessary in order to optimize the operation and design of the equipment. Secondly, the mechanochemical transformation is taken into consideration, which is of fundamental importance from the viewpoint of more economical applications. Finally, the experiments on the effect of grinding aids are performed. In the present article the optimization of the operation of dry stirred media mill is performed. The influence of ball filling ratio, material filling ratio and the rotor circumferential speed was investigated in case of dry limestone grinding. It was found that the optimal material filling ratio is between 50–70%, the optimal ball filling ratio is 60%, and the bigger rotor circumferential speed resulted in finer ground material.

Keywords: ultrafine dry grinding, stirred media mill

1. Bevezetés

A korábban jelen újság hasábjain megjelent első részben [4] ismertetésre kerültek a száraz keverőalmi őrlés elméleti alapjai, a berendezések geometriai alapon történő csoportosítása és az őrlést befolyásoló tényezők hatása. A második részben az őrlés hatékonyságára, eredményére legjelentősebb befolyást kifejtő tényezők, mint az őrlőtest töltési fok, anyag töltési fok és rotor kerületi sebesség hatásának kísérleti úton történő vizsgálatára kerül sor. A kutatás célja, hogy kísérleti eredményekkel támassza alá a keverőalmok száraz ultrafinom őrlés területén való energiahatékony alkalmazhatóságát, és bemutassa az egyes üzemeltetési gépi paraméterek fajlagos felületre, az őrlemény mediánjára és az őrlőhatósági mutatóra gyakorolt hatását.

2. Kísérleti eszközök és kiértékelési módszerek

A laboratóriumi őrlési kísérletek elvégzéséhez, egy tárcsás keverőalmot alkalmaztam, mely a Nyersanyagelőkészítési és Környezeti Eljárástechnikai Intézet egyedi tervezésű és építésű berendezése. A keverőalom kerámia (Al_2O_3) béléssel és keverőtárcsákkal van ellátva, melyek nagy kopásállóságúak. A malom rotorján 5 db, speciális kialakítású keverőtárcsa található (1. ábra). A malom köpenyhűtéses, a hűtőközeg víz. A malom hasznos térfogata 530 cm^3 , melyet 50–80% őrlőtest töltési fok mellett 80–120 g anyag őrlésére használhatunk.

A malom hajtómotorjának üzemeltetése egy frekvenciaváltón keresztül történik, mellyel szabályozható a rotor fordulatszáma ill. kerületi sebessége. A malom motor teljesítményszükségletét egy Carlo Gavazzi WM1-DIN típusú energiaméter segítségével mérhetjük.

Az őrlési kísérletek során az őrleményeket egy HORIBA LA-950V2 típusú lézeres szemcsenagyság-elemzővel vizsgáltam, mellyel a minták szemcseméret-eloszlását és számított fajlagos felületét határoztam meg (2. ábra).



1. ábra Laboratóriumi keverőalom 0,8-1 mm-es őrlőtestekkel töltve
Fig. 1. Laboratory scale stirred media mill filled with 0.8-1 mm grinding media



2. ábra HORIBA LA-950V2 lézeres szemcsenagyság-elemző
Fig. 2. HORIBA LA-950V2 laser particle size analyser

Tekintettel arra, hogy a száraz finom őrléskor a friss őrlemény jelentős feltapadását tapasztalhatjuk az őrlőgolyókra és a malomfalára (ultrafinom őrléskor a szemcsék agglomerációját, sőt agglomerálódását is észlelhetjük), az őrlési kísérleteket a következőképpen végeztem. Annak érdekében, hogy minden beállítás mellett az őrlés teljes kinetikája kimérésre kerüljön, az őrlési idő függvényében vizsgáltam minden beállítást. A malom tisztíthatósága miatt azonban mindezt hatékonyan csak a következőképpen tudtam elvégezni. A mérések során a malmot feltöltöttem a meghatározott tömegű őrlőtesttel és őrlendő anyaggal, majd fedél lezárása és a hűtővíz keringetésének beindítása után elindítottam a malmot. Adott idő elteltével a malmot leállítottam és a szabadon mozgó anyagrészt a golyótöltettel együtt kiöntöttem. Egy laboratóriumi szitán ezután leválasztottam az őrlőtesteket az őrleménytől és megmértem a tömegét, amiből a szabadon mozgó (nem feltapadt) tömeghányadra következtethetünk, majd mintát vettem ebből az anyagrészből, melyet lézeres szemcsenagyság-elemzővel vizsgáltam. Ezt követően a golyótöltetet és szabadon mozgó anyagrészt vizszoztöltöttem a malomba és a kísérletet folytattam tovább, adott időig. Az előre eltervezett idő lejártával a malmot kiürítettem,

majd a falazatra tapadt anyagrészből is mintát vettem. Ennek a mintának a szemcseméret-eloszlását felhasználva korrigáltam a szabadon mozgó anyaghányadból vett minta szemcseméret-eloszlását és fajlagos felületét a szabadon mozgó anyaghányad és a betapadt rész tömeghányadának függvényében. Valójában összegeztem a két anyagrész eloszlásfüggvényét a tömeghányadaik arányában, majd kiszámítottam gömb szemcsére és 1,4-es alak tényezőre a számított fajlagos felületet. Az őrlési kísérletek kiértékeléséhez meghatároztam a számított fajlagos felület és fajlagos őrlési munkából származtatott ún. őrlhetőségi mutatót, mely megadja az egységnyi energia-bevitel hatására keletkező új „külső” fajlagos felületet. Számítása a következők szerint történt:

$$A = \frac{S_{\text{örlemény}} - S_0}{W_{\text{örlés}}} \quad (1)$$

ahol

A – őrlhetőségi mutató [m²/kJ]

S_{örlemény} – őrlemény fajlagos felülete

S₀ – feladás fajlagos felülete

W_{örlés} – mért fajlagos őrlési munka [kJ/kg].

3. Őrlési kísérletek

Több őrlési kísérlet sorozatot hajtottam végre az őrlőtest töltési fok, az anyag töltési fok, és a rotor kerületi sebesség hatásának vizsgálatára oly módon, hogy minden őrlést vizsgáltam az őrlési idő függvényében is. Az őrlőtest töltési fok esetében három különböző őrlési sorozatot hajtottam végre, 50, 60, 70% töltési fok mellett, állandó 50%-os anyagöltési fokkal, 6 m/s kerületi sebességgel, ZrO₂ 0,8–1 mm-es őrlőtestekkel – őrlést segítő anyag alkalmazása nélkül. Az anyag töltési fok vizsgálatára 5 mérést végeztem, 60%-os őrlőtest töltési fok mellett, sorra 40, 50, 60, 80, 100% anyagöltési fokkal. Az anyag töltési fokot a golyótöltet pórústérfogatára vonatkoztattam. A kerületi sebesség minden esetben 6 m/s, az őrlőtestek átmérője 0,8–1 mm, őrlést segítő anyagot nem alkalmaztam. A kerületi sebes-

ség hatásának vizsgálatára 4 különböző őrlési kísérletsorozatra került sor, 4, 5, 6, 7 m/s rotor kerületi sebesség mellett. A további paraméterek következők voltak: anyag töltési fok 50%, őrlőtest töltési fok 60%, őrlőtestek átmérője 0,8–1 mm volt, őrlést segítő anyagot nem alkalmaztam. Az őrlési idők minden esetben 0,5; 1; 2; 3; 5; 8 perc, a feladás anyaga mézskő, melynek szemcsemérete 45–100 μm közé esett.

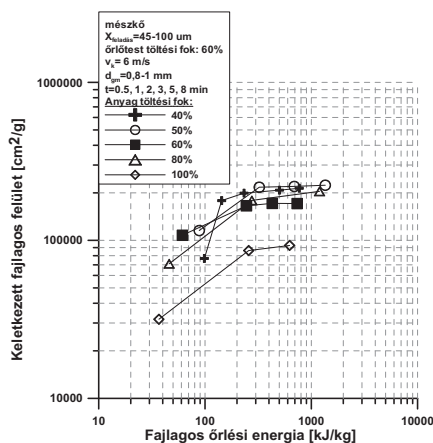
3.1. Anyag töltési fok hatása

Az anyag töltési fok hatását az őrlési idő függvényében a 3, 4, 5. ábrák foglalják össze. Megfigyelhető, hogy a legnagyobb keletkezett fajlagos felület értéket 100 kJ/kg fajlagos őrlési energia bevitele mellett az 50 és 60% töltési foknál értem el. 300 kJ/kg fajlagos őrlési energia bevitelnél pedig az 50%-os töltési fok szolgálta a legnagyobb keletkezett fajlagos felület értéket. Meg kell azonban jegyezni, hogy a 40, 60, és 80% töltési fok sem marad el sokkal ettől a maximális, 216 911 cm²/g értéktől. A 100%-os töltési fok azonban egyértelműen elmarad a többi töltési foktól a keletkezett fajlagos felület tekintetében (3. ábra).

Az őrlemények mediánjának tekintetében az 50%-os anyag töltési fok 4,1 μm-es értékkel eredményezte a legkisebb szemcseméretet. Nem sokkal maradt el ettől az értéktől az 50, 60 és 80%-os anyag töltési fok, a 100%-os azonban jóval magasabb, azonos 300 KJ/kg fajlagos őrlési energia mellett 6,5 μm-es medián értéket eredményezett (4. ábra).

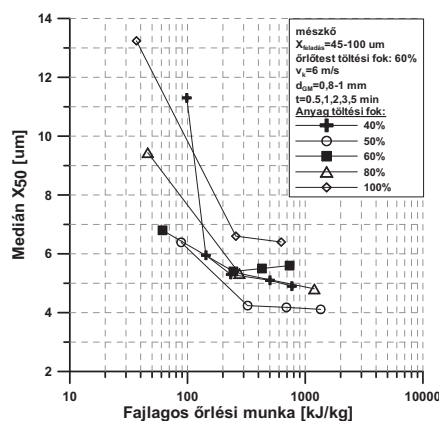
Az őrlhetőségi mutató tekintetében a maximális értéket 60%-os anyag töltési fok mellett 175 m²/kJ értékkel, 1 perces őrlési időnél érte el (5. ábra). Maximális érték tekintetében nem sokkal maradt el a 40, 50 és 80% anyag töltési fok sem. Minden esetben a maximális értéket 1 perces őrlésnél értem el.

A 100%-os anyag töltési fok minden mért paraméterben (3, 4, 5. ábra) messze alulmarad a kisebb töltési fokkal szemben, ezért egyértelműen kijelenthető, hogy az őrlőtestek közötti pórústér 100%-osan való kitöltése nem hatékony, ellentétben a golyósmalmokban történő őrlésekkel. Golyósmalmok üzemeltetésekor az anyag töltési fok meghatározásakor azt a logikát követik, hogy az őrlőtestek összeütődésekor ne egymásnak ütközzenek, mert akkor az energia nem az anyag eltörésére,



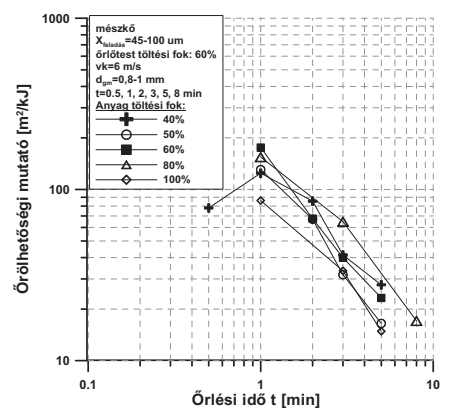
3. ábra Az anyag töltési fok hatása a keletkezett fajlagos felületen a fajlagos őrlési energia függvényében

Fig. 3. The influence of the material filling ratio on the specific surface area as a function of the specific grinding work



4. ábra Az anyag töltési fok hatása az őrlemények mediánjára a fajlagos őrlési energia függvényében

Fig. 4. The influence of the material filling ratio on the median plotted against the specific grinding work



5. ábra Az anyag töltési fok hatása az őrlhetőségi mutatóra az őrlési idő függvényében

Fig. 5. The influence of the material filling ratio on the grindability index plotted against the grinding time

hanem az őrlőtestek deformációjára és hő illetve hang fejlődésére fordítódik. Látható, hogy keverőmalomok esetében ez a megfontolás nem helytálló. Ennek okai a következők lehetnek. A 100%-os töltési fok esetén az őrlendő szemcsék száma az őrlőtestek számához képest annyira megnő, hogy nincsen elegendő számú igénybevétel, ami képes minden szemcsét eltörni. A nagyobb őrlendő anyagmennyiség miatt az őrlőtestekre és a falazatra is hamarabb betapad az anyag, ami az őrlés hatékonyságának idő előtti romlásához vezet.

Ezt támasztják alá Kwade és szerzőtársai [1, 2, 3] keverőmalmi őrlésről alkotott munkái, amelyekben megfelelő magyarázatot kaphatunk jelen eredményekre. Kwade és szerzőtársai [1, 2, 3] szerint az igénybevételek száma és az őrlőtestek intenzitása határozza meg a keverőmalmi őrlés hatékonyságát. Az igénybevételek száma (SN) egyenesen arányos az ütközések számával (Nc) és a törés valószínűségével (PC) illetve fordítottan arányos a szemcsék számával (Np). Amennyiben végiggondoljuk, hogy állandó rotor kerületi sebesség és őrlőtest töltési fok mellett az ütközések száma és a törés valószínűsége is állandónak tekinthető. Ezáltal az egy szemcsére jutó igénybevételek számát valójában a feladásban lévő szemcsék száma határozza meg. Ami ugyanúgy egy optimummal rendelkező érték, hiszen jelen mérésekből egyértelműen látszik, hogy túl sok szemcse esetén nem hatékony az őrlés, de ugyanúgy túl kevés szemcse esetén sem, hiszen akkor a befektetett energia az őrlőtestek deformációjára illetve hő és hang fejlődésére megy el.

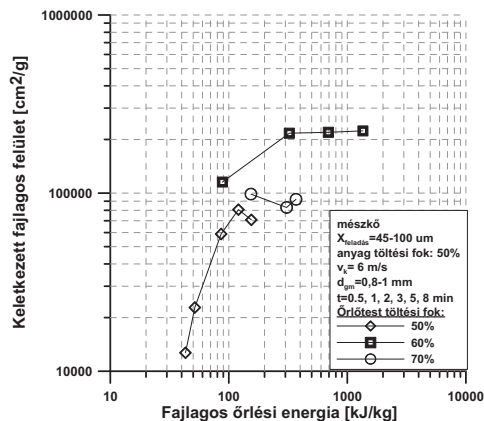
Fontos kérdés azonban, hogy valójában a szemcsék száma az őrlési idő függvényében növekszik, hiszen az őrlés előrehaladtával egyre több szemcse van az őrlőtérben. Ugyanakkor száraz őrlés esetén közbeszól a tény, hogy a finom szemcsék elkezdnek az őrlőtestek felületére illetve a malom falazatára tapadni, így azok az őrlési folyamatban a továbbiakban korlátozottan vagy egyáltalán nem vesznek részt, csak hátráltatják azt, hiszen az őrlőtestek felületére tapadva gyakorlatilag egy puha, párnázott réteget hoznak létre, minek következtében az őrlőtestek elveszítik a töréshez szükséges felületi keménységet, ami az őrlés hatékonyságának romlásához vezet. Mindez leginkább az őrlhetőségi mutató idővel történő jelentős csökkenésén keresztül figyelhető meg.

A hatékony őrlés – az adhézió elkerülésére, csökkentésére – tehát megköveteli a körfolyamatos őrlés alkalmazását a kellően finom rész leválasztását.

3.2. Őrlőtest töltési fok hatása

Az őrlőtest töltési fok hatása a 6, 7. ábrán figyelhető meg. A 70%-os őrlőtest töltési fok mérési sorozatánál üzemelési hiba lépett fel, a továbbiakban nevezük az őrlőtestek elakadásának, törésének. Az őrlési folyamat során az egyre finomodó anyag feltapad az őrlőtestekre, a malom falazatára és a keverőtárcsákra. Nem megfelelő beállítások mellett malom falazatra feltapadó anyag és a keverőtárcsák éle között olyan szűkké válik a hézag (mely normál állapotban az alkalmazott őrlőtest legalább 5–6-szorosa), hogy közte az őrlőtestek nem tudnak zavartalanul áthaladni, egy-egy pillanatra beszorulnak, és a rotor elkezd törni azokat. A jelenség a fajlagos őrlési energia nagymértékű megugrásán illetve az őrlőtestek törése miatt keletkező lüktető, ismétlődő erős hanghatáson keresztül ismerhető fel. A jelenség következtében a keverőtárcsák anyagától függően komoly

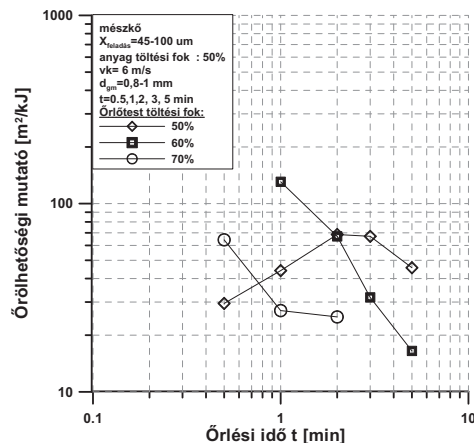
problémák is felléphetnek, mint a keverőtárcsák eltérése, bizonyos élek lepattanása.



6. ábra Az őrlőtest töltési fok hatása a keletkezett fajlagos felületre a fajlagos őrlési energia függvényében

Fig. 6. The influence of the ball filling ratio on the specific surface area as a function of the specific grinding work

A keletkezett fajlagos felület tekintetében (6. ábra) minden fajlagos őrlési energia befektetés mellett egyértelműen a 60%-os őrlőtest töltési fok érte el a legmagasabb értéket, szemben az 50 vagy 70%-os értékkel.



7. ábra Az őrlőtest töltési fok hatása az őrlhetőségi mutatóra az őrlési idő függvényében

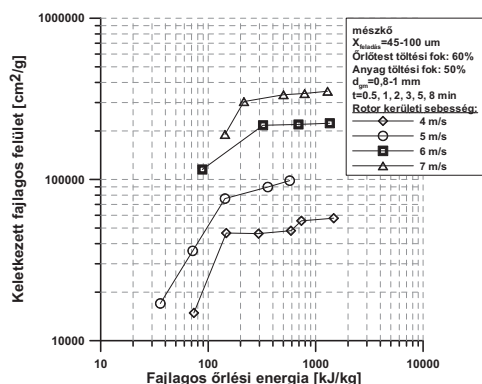
Fig. 7. The influence of the ball filling ratio on the grindability index plotted against the grinding time

Az őrlhetőségi mutató tekintetében (7. ábra) is a 60%-os őrlőtest töltési fok mellett értem el a legnagyobb értéket, azonban további összefüggések feltárása a 70%-os őrlőtest töltési fok melletti mérés félbeszakadása miatt nem lehetséges.

3.3. Rotor kerületi sebesség hatása

A száraz keverőmalmi őrlés hatékonyságát legjobban befolyásoló paraméter a rotor kerületi sebesség. Mint a következő 8, 9. ábrán jól látható, a kerületi sebesség növelésével jelentősen növekedett a maximálisan elért keletkezett fajlagos felület és az őrlhetőségi mutató. Kwade és szerzőtársai [1, 2, 3] keverőmalmi őrlésről alkotott elmélete szerint minél nagyobb kerületi sebességet alkalmazunk a keverőmalomokban kristályos anyagok esetén, az elérhető maximális finomság annál nagyobb lesz. Jelen mérési eredmények (8–9. ábra) egyértelműen alátámaszt-

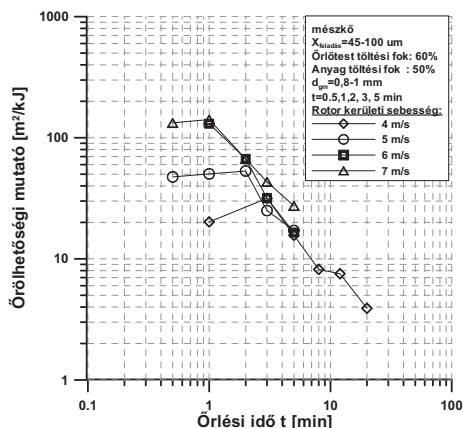
ják mindezt, hiszen a kerületi sebesség 4 m/s-ról 7 m/s-ra történő növelésével a keletkezett fajlagos felület, adott 200 kJ/kg fajlagos őrlési energia bevitele mellett 46 150 cm²/g-ról 304 200 cm²/g-ra emelkedett, mely 258 050 cm²/g növekedést jelent. Százalékosan kifejezve mindezt, az abszolút növekedés 659%, a relatív növekedés 559,15% volt.



8. ábra A rotor kerületi sebesség hatása a keletkezett fajlagos felületre a fajlagos őrlési energia függvényében

Fig. 8. The influence of the rotor circumferential speed on the specific surface area plotted against the specific grinding work

Az őrlhetőségi mutató tekintetében is jelentős javulás érhető el, hiszen a maximális érték 31 m²/kJ-ról 141 m²/kJ-ra növekedett, mely 110 kJ/kg növekedést jelent. Százalékosan kifejezve 454,8%-os abszolút és 354,8%-os relatív növekedést.



9. ábra A rotor kerületi sebesség hatása az őrlhetőségi mutatóra az őrlési idő függvényében

Fig. 9. The influence of the rotor circumferential speed on the grindability index plotted against the grinding time

Az őrlhetőségi mutató változása az őrlés teljes időtartamában megfigyelhető a 9. ábrán. Az őrlést ebből a tekintetből két jól elkülöníthető részre bonthatjuk. Az őrlés kezdeti szakaszán az őrlhetőségi mutató folyamatosan nő, ez a szakasz az őrlés első egy-két percére tehető, ebben a szakaszban a szemcsék aprítása hatékonyan megy végbe, azonban mivel még a keletkezett termék szemcsemérete nem túl kicsi, ezért a fajlagos felület növekedése egységnyi energia befektetés mellett nem túl nagy. Az őrlhetőségi mutató növekedése egy meghatározott értékig történik, adott őrlési idő mellett optimumot vesz fel, ezt követően pedig csökken. Ennek a magyarázata az őrlés malom falazatára illetve őrlőtestekre történő tapadásával illetve az aggregáció, agglomeráció jelenségével magyarázható. Mindezen jelenségek

közül véleményem szerint az egyik legmeghatározóbb jelenség az őrlőtest felületére történő tapadás. Ugyanis ez által egy puha réteg rakódik az őrlőtest felületére, melynek hatására rugalmas ütközés megy végbe és a mozgási energia nem a szemcsék eltörésére, hanem ennek a bevonatnak a deformációjára fordítódik. Megfigyelhető továbbá, hogy az őrlhetőségi mutató lefutási szakasza minden kerületi sebesség mellett közel megegyezik, vagyis jól illeszthető rá egy görbe, ami mentén a lefutás megtörténik. Valójában nem csak, hogy a lefutás egyezik meg, de minden kerületi sebességnél az optimum is ezen a görbén helyezkedik el. Ez azt jelenti, hogy a kerületi sebesség növelésével az őrlési optimum eléréséhez egyre kevesebb őrlési időre van szükség, illetve az egységnyi fajlagos energia bevitele mellett is nagyobb keletkezett fajlagos felületet érünk el.

4. Összefoglalás

Őrlési kísérleteket végeztem, hogy meghatározzam a száraz keverőmalmi őrlés optimális őrlőtest és anyag töltési fokát, illetve egy adott őrlőtest átmérőhöz és sűrűséghez tartozó optimális kerületi sebességet. Az elvégzett kísérleti eredményekből a következő következtetéseket vonhatjuk le. 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. A rotor kerületi sebesség értékét érdemes minél nagyobbra választani. Nagyobb rotor kerületi sebesség mellett az elérhető finomság jelentősen megnő, a szükséges őrlési idő lerövidül. A hatékonyabb őrlés – az adhéziós jelenségek elkerülésére, csökkentésére – tehát megkövetelné a körfolyamatos őrlés alkalmazását a kellően finom rész leválasztását.

5. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném köszönetemet nyilvánítani tudományos témavezetőim, Prof. Dr. Csóke Barnabás, és Dr. Mucsi Gábor felé az áldozatos munkájukért, mellyel a kutatási munkámat segítik. Köszönettel tartozom továbbá Dr. Bóhm József Intézetigazgató Úrnak, akinek nagyon sokat köszönhetek a kutatási munkám háttérének biztosításában.

Szintén köszönettel tartozom a „Kiválósági Központok Projekt” TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 projektnek, amelynek keretében a jelen munkám készült, a támogatásért.

Felhasznált irodalom

- [1] A. Kwade – J. Schwedes: *Breaking characteristic of different materials and their effect on stress intensity and stress number in stirred media mills*, 2002, Powder Technology, Volume 122, Issues 2–3, 109–121.
- [2] S. Breitunk-Faes – A. Kwade: *Nano particle production in high-power-density mills*, 2008, Chemical Engineering Research and Design, Volume 86, Issue 4, 390–394.
- [3] A. Kwade: *Wet comminution in stirred media mills – research and its practical application*, 1999, Powder Technology, Volume 105, Issues 1–3, 14–20.
- [4] Rácz. Á.: *A szubmikronos száraz keverőmalmi őrlés lehetőségei és problémái, 1. rész*. Építőanyag, 61. évf. 2. szám (2010), 34–38. p.

Ref.: <http://dx.doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2011.12>

Rácz Ádám: *A szubmikronos száraz keverőmalmi őrlés lehetőségei és problémái, 2. rész*. Építőanyag, 63. évf. 3–4. szám (2011), 68–71. p.