Keverőmalmok bemutatása és alkalmazási előnyei

Mannheim Viktória

Miskolci Egyetem Eljárástechnikai Tanszék

ejtviki@uni-miskolc.hu

Demonstration and Application Advantages of a Stirred Ball Mill

Stirred ball mills are generally used for fine and ultrafine grinding of ceramic materials and paint pigments in food- and chemical industry. This paper presents a summary of the professional literature for wet grinding with laboratory stirred ball mills. Due to the high centrifugal forces they usually operate with greater energy efficiency than alternative grinding devices. The summary of the professional literature and experimental results too have shown that the particle size of products is finer in the stirred ball mills. This equipment is still up-to-date and relatively new one and only few investigations have been previ-

ously published on the scale-up of stirred ball mills. The main question concerning the scale-up of stirred ball mills is which conditions have to be fulfilled to produce identical grinding results with differently sized machines and how different stirred media mills should be operated to achieve optimum results. The laboratory stirred ball mill is operating with turbulent flow. The scale-up model is possible in case of similar geometry, equal grinding media and equal filling ratios and can be used in both mills (industrial and laboratory stirred ball mill). The power consumption of the stirred ball mill for scale-up was determined by a method based on the dimensional analysis. A new scale-up model has been presented on the basis of the laboratory measurements on the laboratory mill.

1. Bevezetés

A keverő golyósmalmok különleges, finomörlésre megfelelő örlőberendezések. Alkalmazásuk viszonylag egyszerű felépítésük és kedvező energiafelhasználásuk folytán került az utóbbi években előtérbe. Az örlőtestek és a keverőszerkezet egyidejűleg történő működése megnöveli az aprítási eredményt, és megrövidíti a szükséges örlési időt. Keverő golyósmalmokkal, a nagyobb centrifugális erők következtében, lényegesen finomabb szemcseméret-eloszlásokat érhetünk el, mint hagyományos golyósmalmokban. A hagyományos golyósmalom működését – az igen finom őrlmények előállításakor – törés nélküli szemcse-súrlódás, kinetikus és potenciális energiavesztések, felmelegedés, erős zajhatás és alacsony energetikai hatásfok jellemzi. A gazdasági szempontokat figyelembe véve pedig megemlítenéd, hogy a keverő golyósmalmok beruházási költsége kisebb, mint a hagyományos golyósmalmoké. A szakirodalmi háttérrel alaposan áttekintve született a gondolat, hogy a finomörlés területén végzett kutatásaimat keverő golyósmalommal végezzem. Keverő golyósmalmokat napjainkban elsősorban festék- és kerámiái anyagok finomörléséhez, valamint az élelmiszer-, gyógyszer- és alapanyagiparban alkalmaznak. Alkalmazásuk a biotechnológiában a mechanikai sejtfeltáráshoz, illetve nagy koncentrációjú szén-víz és szénolaj szuszpenziók gyártásánál is elterjedt [1, 2].

2. Keverőmalmok általános bemutatása

2.1. Történelem: a múlt

Az első keverő golyósmalom kialakítása 1928-ban Klein és Szegvári [3] tervei alapján történt. Az általuk megalkotott,

ún. „lassú járású keverő golyósmalom” alapját egy vertikális hengeres örlőtér jelentette, amelyben keverőelemként egy centrálisan kialakított, üreges keverőtengelyre szerelt keverőtárcsák szolgáltak, ahol a malomátmérő- és a malomhosszméretetek megegyeztek. A kavicskeverékből álló örlőtestek töltési foka ebben a malomban még rendkívül magas (90%) volt. A Szegvári [4] által 1950-ben továbbfejlesztett vertikális, gyorsabb járású keverő golyósmalom geometriai méreteiben (kisebb malomátmérő és nagyobb malomhossz) és a keverőtengely kerületi sebességében (nagyobb kerületi sebesség) tér el elődjétől. A centrális tengelyen elhelyezett keverőelemként keverőpálcák szolgálnak. 1958-ban a Hochberg és Bosse [5] munkássága alapján elkészült gyors járású, tömött keverőtárcsás „homokmalom” hódította meg a világot, amelyet festékpigmentek előállításához alkalmaztak. Örlőtestként kis szemcseméretű (0,42–0,84 mm) Ottawa-homok szolgált, amelynek töltési foka a malomban 50%. A homokmalom az 1963-ban elsőként kialakított, mai „gyorsjárasú keverő golyósmalom” alapja.

2.2. Történelem: a jelen

A napjainkban alkalmazott gyors járasú keverő golyósmalmok (a továbbiakban: „keverőmalmok”) elődjeiktől a keverő beépítési módjában, az örlőtér és a kihordás kialakításában különböznek. A különleges finom (ultrafinom) örlésre megfelelő keverőmalmokban az örlőtestek mozgását az örlőtérben centrálisan beépített keverőszerkezet végzi. Az örlőtestek az aprításhoz szükséges mozgási energiájukra a keverőszerkezet forgatásával tesznek szert a keverő és az örlőtestek, valamint az örlőtestek között fellépő súrlódó erő közvetítésével. A számos alkalmazási

területnek megfelelően a keverőmalmok műszaki kivitelezésének is számos formája lehetséges. Az őrlőtér és a keverőszerkezet különböző kialakítási lehetőségének függvényében Engels [6] három csoportba osztotta a picon elérhető berendezéseket a keverőelemek kialakítása szerint, amelyek az alábbiak: teljes őrlőtér (lyuktárcsás, tömör tárcsás vagy réstárcsás keverőelemekkel), körőrlőtér (tüskés keverőelemek) és pálcás őrlőtér (pálcás keverőelemek) keverőmalmok. A keverőmalmok igen elterjedt típusa a nedves és száraz üzemmódban is működő, 10 µm alatti termék előállítására alkalmas „SALA keverőmalom” (rövidítése: SAM, gyártó: SALA International AB, Svédország) [2].

Az alkalmazott őrlőtestek többnyire 0,2–3,0 mm közötti golyók, amelyeket főként üvegből, acélból, homokból, műanyagból vagy kerámiából készítenek. Őrlőtestként azonban más alakú őrlőtestek (cylpebs, ballpebs, kocka stb.), a feladott anyag durvább szemcséi (autogén keverőmalmok) vagy idegen anyag szemcséi is szolgálhatnak. A malmok üzemelhetnek folytonosan vagy szakaszosan, osztályozóval zárt vagy nyitott folyamatban, továbbá száraz vagy nedves üzemmódban.

3. Nedvesőrlési folyamat keverőmalmokban

3.1. Nedvesőrlési folyamatot befolyásoló jellemzők

A keverő őrlés fő műszaki paramétereit számos eljárás-technikai körülmény, jellemző befolyásolja. A keverőmalomban történő nedvesőrlési folyamatot befolyásoló paraméterek közül – Mölls és Hörnle [7] (1972) – összesen 44 fontosabb jellemzőt emeltek ki, amelyek az őrlés során változtathatók, beleértve a kihordásnál elhelyezett szita jellemzőit is. A leírt paraméterek között vannak olyanok, amelyek a nedvesőrlés folyamán optimálhatók és a továbbiakban állandó értéken tarthatók, pl. a keverőtengely kerületi sebessége és malomfaltól való távolsága, és természetesen vannak olyan jellemzők, amelyeknek optimálása – adott malom esetén – nem lehetséges, pl. a keverőelemek átmérője.

A fentiekben említett jellemzők csoportosítása az alábbiak szerint történik:

- *geometriai jellemzők*: az őrlőtér, az őrlőtestek és a keverő geometriája, az őrlőtér falának kialakítása;
- *üzemi jellemzők*: a feladás tömegárama, a keverőtárcsa kerületi sebessége, a mozgatás módja, a szilárdanyag-tömegkoncentráció (nedvesőrlés) és az őrlőtestek töltési foka;
- *anyagjellemzők*: a keverő, az őrlemény és az őrlőtestek anyagtulajdonságai.

3.2. Őrlési finomság és fajlagos őrlési energia

Korábbi őrlési vizsgálatok eredményei alapján megállapították, hogy az aprítási eredményt elsősorban a bevezetett

fajlagos energia határozza meg. Nedvesőrlés során a malomban a szemcseaprításra fordított energiát elsősorban az őrlőtestek, ill. az őrlőtestek és az őrlendő anyag között fellépő súrlódási folyamat és részecskeütközések, valamint a folyadéksúrlódás emésztí fel [8].

Az őrlemény finomsága, azonos őrlőtestek és azonos őrlési feltételek alkalmazása mellett, a fajlagos energia függvényeként írható le. A fajlagos energia (E_M) növelésével egyre finomabb őrleményt kapunk az őrlés során, és az őrlemény szemcseméret-eloszlási görbéje egyre inkább az origó felé tolódik el a feladáshoz képest.

Charles [9] szerint az *átlagos szemcseméret* az alábbi összefüggésekkel adható meg:

$$\bar{x} = C \cdot E_M^{\frac{1}{m-1}} \quad (3.1)$$

$$dE_M = C \cdot \frac{dx}{x^m} \quad (3.2)$$

A (3.2) egyenlet integrálása után ($m \neq 1$) a *fajlagos őrlési energiát* leíró összefüggéshez jutunk:

$$E_M = \frac{C}{m-1} \cdot \left(\frac{1}{x_1^{m-1}} - \frac{1}{x_0^{m-1}} \right) \quad (3.3)$$

Az egyenletekben x_1 az őrlemény, x_0 a feladott termék szemcsemérete, C és m az üzemi körülményekre és az anyagra jellemző állandók, m értéke: 1,5–2.

Stehr [10] szerint a fajlagos energiát az üzemi jellemzők közül a keverőtárcsa kerületi sebessége, a szilárdanyag-tömegkoncentráció és a szuszpenzióátáramlás befolyásolja. Az őrlőtérbe bevezetett fajlagos energia értékét, nyomatókmérés adataiból, folyamatos őrlésre az alábbi összefüggéssel határozzuk meg [1]:

$$E_M = \frac{P - P_0}{\dot{m} \cdot c_m} = \frac{(M - M_0) \cdot 2\pi \cdot n}{\dot{m} \cdot c_m} \quad (3.4)$$

Szakaszos őrlés esetén:

$$E_{M(t)} = \frac{\int_0^t (M(t) - M_0) \cdot 2\pi \cdot n \cdot dt}{m_a} \quad (3.5)$$

Az egyenletekben P az őrlőtérbe bevezetett teljesítmény, $\dot{m}$ a szuszpenzió tömegárama, M és M_0 a hajtómotor forgatónyomatéka és annak értéke üresjáratban, és m_a az aprított anyag tömege.

A fajlagos energia szoros kapcsolatban áll az *őrlőtestek töltési fokával*. Az őrlőtestek töltési foka az ún. „őrlésaktív térfogat” relatív mennyiségének és ezzel együtt az összes bevezetett energia meghatározó mértéke. Az őrlőtestek töltési foka keverőmalmokban általában 40–80%. Ennél kisebb töltési fok az őrlőtestek közötti távolságot megnövelve kisebb terhelési intenzitást eredményez [3]. Csökkenő töltési fokkal csökken az őrlésaktív térfogatok relatív mennyisége, nő az azonos aprítási eredmény eléréséhez szükséges energiaszükséglet, és ezzel egyidejűleg durvább terméket kapunk. Viszont a bevezetett fajlagos energia, mint meghatározó tényező, nem elegendő ahhoz,

hogya leírjuk vele a töltési foknak az aprítási eredményre gyakorolt hatását.

Bunge [11] szerint a fajlagos energia meghatározható a *terhelési intenzitás* (BI) és a *terhelési gyakoriság* ($BH = \omega t$) szorzataként is:

$$E_M = BI \cdot BH \quad (3.6)$$

Kwade [12, 13] feltételezése szerint a terhelési intenzitást az őrlőtestek mérete (d_g), az őrlőtestek sűrűsége (ρ_g) és a keverőtárcsa kerületi sebessége (v_k) határozzák meg:

$$BI = d_g^3 \cdot \rho_g \cdot v_k^2 \quad (3.7)$$

Más oldalról, a fajlagos őrlési energia keverőmalomban az őrlőgolyók keverőtengely és a malomfal közötti helyzeti energia különbségével egyenlő, ami átalakul kinetikus energiává. Következésképpen a fajlagos energia a keverőtárcsa átmérőjével (d_k), az őrlőtestek tömegével (m_g) és a centrifugális gyorsulással arányos (a_c) [8]:

$$E_M \propto d_k \cdot V_g \cdot (\rho_g - \rho_f) \cdot a_c \cdot \frac{1}{V_i} = d_g^3 \cdot (\rho_g - \rho_f) \cdot v_k^2 \cdot \frac{1}{V_i} = \frac{BI}{V_i} \quad (3.8)$$

Minden előírt őrlési finomsághoz az igénybevétel intenzitásának egy meghatározott optimális értéke tartozik, ezért az intenzitást befolyásoló üzemi jellemzőket bármilyen körülmények között úgy kell megváltoztatni, hogy az intenzitás értéke mindig optimális értéken maradjon. Ha a terhelési intenzitás az optimális értéktől eltér – túl alacsony vagy túl magas –, nő a fajlagos energiafelhasználás. Azonos fajlagos energia és nagyobb őrlőtér mellett kapjuk a legfinomabb terméket, mert ebben az esetben kisebb terhelési intenzitás lép fel, vagyis az optimum mélyebben van.

Stehr [10], Mankosa [14] és Stadler [15] kutatási eredményei azt mutatják, hogy az aprítási eredmény és a fajlagos energia közötti kapcsolatot az őrlőtestek geometriai, anyagi és fizikai tulajdonságai határozzák meg. A legfontosabb jellemző az *őrlőtestek mérete*. Az őrlőtest méretének a feladásra kerülő szilárd anyag szemcseméretéhez kell igazodnia, mert a termék maximális szemcseméretét elsősorban az őrlőtestméret határozza meg. Kisebb őrlőtestméret megnöveli az őrlőtestek közötti érintkezések számát, nagyobb terhelési gyakoriságot és finomabb őrlésményt eredményez. Előzetes őrlési vizsgálatok azt mutatják, hogy túl kicsi méretű őrlőtestek ($< 0,2$ mm) alkalmazásával alig történik aprítás, mert nagyon kicsi a terhelési intenzitás ahhoz, hogy az őrlésmény szemcséi aprózódjanak. Nagyobb szilárdságú anyag őrlése és/vagy finomabb őrlésmény előállítás a fajlagos energiafelhasználás növelésével jár. Ahhoz, hogy egy meghatározott termékfinomság eléréséhez szükséges fajlagos energiaszükségletet minimalizáljuk, olyan őrlőtesteket kell alkalmaznunk, amelyek kemény és kicsi primer részecskékből épülnek fel. Az őrlésmény mediánértékét (x_{50}) vizsgálva megfigyelhető, hogy növekvő őrlőtestátmérővel ez az érték egy minimum értékig csökken; a minimumpontnál az őrlőtest mérete optimális. Vagyis az optimális érték eléréséig, azonos fajlagosener-

gia-befektetés mellett, kisebb őrlőtestátmérővel kisebb mediánérték érhető el. Az őrlőtest méretének további növelésével ismét növekszik a mediánérték, az őrlőtérben az őrlőtestpályák összeszűkülnek, és egyes őrlőtestek nem haladnak át a magas energiasűrűségű területeken. Így az aprítás céljának és az igényelt termékminőségnek megfelelően kiválasztható az optimális őrlőtestátmérő, amelynél a szükséges fajlagos energia minimális. Az őrlőtest sűrűségének a szuszpenzió viszkozitásához kell igazodnia. Meghatározott termékfinomság az őrlőtestméret és a töltési fok optimális értékének kiválasztásával érhető el [8, 16].

A két őrlőtest közötti felületet a köztük lévő őrlésményszemcsék terhelik, ún. háromszemcsés abrazív kopás jön létre. Növekvő töltési fokkal az *őrlőtestek kopása* nem kerülhető el, de ez az őrlőtestek megfelelő kiválasztásával csökkenthető. Tehát, a keverőmalomban történő őrlés esetén fontos jelentőséggel bír az őrlőtestek helyes kiválasztása.

4. Teljesítményszükséglet meghatározása keverőmalomban

A keverőmalom szakirodalmának tanulmányozásából kitűnt, hogy a malom teljesítményszükségletének meghatározására a ma rendelkezésre álló ismeretek nem elégségesek. A keverőmalom teljesítményszükségletének meghatározását dimenzióanalízis alkalmazásával tartottam célszerűnek. Kísérleti tapasztalatok szerint egy folyadékkeverő teljesítményszükséglete (P_k) a tartály és a keverő méreteitől (D_k , d_k), a keverő fordulatszámától (n), a kevert folyadék sűrűségétől (ρ_f) és dinamikai viszkozitásától (μ_f), ill. – ha a keverőtartályban folyadéktöltésér keletkezik – még a nehézségi erőtől (g) is függ [17]:

$$P_k = \varphi(d_k, w_k, D_k, H, n, \rho_f, \mu_f, g) \quad (4.1)$$

ahol

w_k a keverő szélessége, m és

H a folyadék magassága a tartályban, m.

A keverőmalom teljesítményszükségletét (P_m) az előbbieken felsorolt paraméterek mellett egyéb tényezők is befolyásolhatják. Elsősorban azért, mert a keverő mellett őrlőtestek (őrlőgolyók) végzik az őrlést, ill. a folyadékközeg mellett szilárd anyag is jelen van. Ilyen paraméterek például az őrlendő anyag és az őrlőgolyók fizikai és geometriai sajátosságai (d_g), az őrlőtestek töltési foka (φ_g), valamint a szilárdanyag-tömegkoncentráció (c_m). A kutatásaimhoz vertikális, tömör tárcsás laboratóriumi keverőmalmost alkalmaztam.

Feltételeztem, hogy a

$$P_m = \varphi(d_k, w_k, D_m, n, c_m, \varphi_g, d_g, \rho, \mu, g) \quad (4.2)$$

összefüggés létezik, ahol D_m a keverőmalom belső átmérője, m.

A (4.2) összefüggés felírható hatványfüggvény formájában [16]:

$$P_m = A \cdot d_k^a \cdot w_k^c \cdot D_m^e \cdot d_g^f \cdot n^h \cdot \rho_s^i \cdot \mu^m \cdot g^n$$

$$\frac{ML^2}{T^3} = L^a \cdot L^c \cdot L^e \cdot L^f \cdot \left(\frac{1}{T}\right)^h \left(\frac{M}{L^3}\right)^i \left(\frac{M}{LT}\right)^m \left(\frac{L}{T^2}\right)^n \quad (4.3)$$

A behelyettesítés és az ismeretlen kitevők szerinti csoportosítás után:

$$P_m = A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho \left(\frac{d_k^2 n \rho}{\mu}\right)^{-m} \left(\frac{d_k n^2}{g}\right)^{-n} \times$$

$$\times \left(\frac{w_k}{d_k}\right)^c \cdot \left(\frac{D_m}{d_k}\right)^e \cdot \left(\frac{d_g}{d_k}\right)^f \quad (4.4)$$

A (4.4) egyenletben felismerhető a keverési Reynolds-szám (Re) és a Froude-szám (Fr). Abban az esetben, ha az üzemi készülék geometriailag hasonló a laboratóriumi berendezéshez, akkor a következő geometriai arányok azonosak lesznek:

$$\frac{w_k}{d_k}, \frac{D_m}{d_k}, \frac{d_g}{d_k}$$

A kifejezés a dimenziómentes Euler-szám (Eu, ellenállás-tényező), így az egyenlet leegyszerűsödik:

$$\frac{P_m}{d_k^5 n^3 \rho} = Eu = A \cdot Re^{-m} \cdot Fr^{-n} \quad (4.5)$$

Az A konstans értéke a keverőmalom geometriai arányaitól és az örlési paraméterektől függ:

$$A = f\left(\frac{w_k}{d_k}, \frac{D_m}{d_k}, \frac{d_g}{d_k}, c_m, \varphi_g\right)$$

Az m , n hatványkitevők, valamint az A állandó meghatározása csak kísérleti úton lehetséges. Ha a keverő nem diszpergál levegőt a szuszpenzióba, akkor a nehézségi erő kifejezésre juttató Froude-szám (és Vortex-szám) hatása nem érvényesül, és semmiféle szerepe nincs a keverőmalom teljesítményszükségletében. (A levegőbeszívás nem kívánatos jelenség a keverésnél, ezt az üzemállapotot célszerű elkerülnünk, amit az $n < n_{krit}$ mindenkor betartásával érhetünk el). Ha egy meghatározott keverőmalom-típussal végzünk teljesítményszükséglet-méréseket, akkor a mérési pontoknak az Eu-Re diagramban egy közös görbére kell esniük:

$$Eu = A \cdot Re^{-m} \quad (4.6)$$

A Re-szám ismeretéhez, a geometriai méretek és üzemi paraméterek ismerete mellett, fontos a szuszpenzió térfogati koncentrációjának (c_v), a szuszpenzió sűrűségének (ρ) és dinamikai viszkozitásának (μ) az ismerete is:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_k \cdot d_k}{\mu} \quad (4.7)$$

A szuszpenzió dinamikai viszkozitása reológiai mérésekkel határozható meg, amelynek során a szuszpenzió folyási tulajdonságait ismerjük meg. A mérések eredménye a τ - du/dy reogram, ami alapján a szuszpenziót valamely folyadéktípusba besorolhatjuk. (Az időtől, azaz a reológiai előéletől is függő folyási viselkedést mutató közegeknél a mérési eljárás értelemszerűen bonyolultabb.)

Áttekintve az elméleti [18] és kísérleti vizsgálatokat [16], az abszolút viszkozitási tényező az alábbi matematikai formában írható fel ($c_v > 0.01$ esetén):

$$\frac{\mu}{\mu_0} = 1 + 25 \cdot c_v + 4600 \cdot c_v^5 \quad (4.8)$$

Az összefüggésben szereplő μ_0 a szemcse nélküli szuszpenziós közeg viszkozitása, az állandók és az n kitevő értékét matematikai úton határoztam meg. A kísérleti vizsgálatok azt mutatják, hogy az alkalmazott szuszpenzió (gyöngyösoroszi meddőből) $c_v = 0.1$ értékig időben állandó newtoni szuszpenzió. A laboratóriumi keverőmalomban kapott Reynolds-szám értéke 10^5 és 10^6 között van, következésképpen a berendezés turbulens tartományban dolgozik. *Turbulens tartományban* az Eu-szám függetlenné válik a Re-számtól ($m = 0$), az Eu-Re görbe az $Eu = A$ szerinti vízszintes egyenessel helyettesíthető, és így a keverőmalom teljesítményszüksége:

$$P_m = A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho \quad (4.9)$$

A laboratóriumi keverőmalom üzemi alkalmazására vonatkozóan (scale-up modellt alkalmazva) olyan szempont szerint járhatok el, amelynek során a térfogategységre vonatkoztatott teljesítményigény értéke a laboratóriumi (l index) és az ipari méretre azonos, azaz érvényesül az alábbi összefüggés:

$$\frac{A \cdot d_k^5 \cdot n^3 \cdot \rho}{d_k^3} = \frac{A \cdot d_{k,l}^5 \cdot n_l^3 \cdot \rho}{d_{k,l}^3} \quad (4.10)$$

Ha az A és ρ értékek azonosak, akkor az ipari keverőmalom keverőtengelyének fordulatszáma kifejezhető a laboratóriumi keverőmalom fordulatszámának ismeretében:

$$n = n_l \left(\frac{d_l}{d_k}\right)^{2/3} = n_l \cdot k^{-\frac{2}{3}} = n_l \left(\frac{1}{k}\right)^{2/3} \quad (4.11)$$

Irodalom

- [1] Reinsch, E. – Bernhardt, C. – Husemann, K.: Zum Energieverbrauch bei der nassen Feinstzerkleinerung in Rührwerksmühlen, Aufbereitungstechnik, 3/1997 (38. Jahrgang), pp. 152–160.
- [2] Forssberg, E. – Wang, Y. – Persson, H.: Trockene Feinstmahlung von Dolomit mit der Rührwerkskugelmühle SAM 7.5 – Einfluss von Mahlkörper und Mahlhilfsmittel, Aufbereitungstechnik, 5/1995 (36. Jahrgang), pp. 211–217.
- [3] Engels, K.: Die Dispergierverfahren in der Lack- und Farbenindustrie unter besonderer Berücksichtigung der schnelllaufenden Rührwerksmühlen, Farbe und Lack, 5/1965 (71. Jahrgang), pp. 375–385.
- [4] John, W.: Von der Trommelmühle zur Ringkammermühle, Farbe und Lack, 6/1973 (79. Jahrgang), pp. 537–542.

- [5] *Kraus, W. – Giersiepen, G.*: Technische Informationen über die Sandmühle, Farbe und Lack, 5/1961 (67. Jahrgang), pp. 302–306.
- [6] *Engels, K.*: Perlsandmühlen mit ringförmigen Mahlraumquerschnitt, Farbe und Lack, 11/1984 (90. Jahrgang), pp. 910–915.
- [7] *Stehr, N.*: Zerkleinerung und Materialtransport in einer Rührwerkskugelmühle, PhD Dissertation, Braunschweig, 1981.
- [8] *Mannheim, V.*: A finom őrlés eljárás technikai jellemzői keverőmalmokban, BKL-Bányászat, 132/6., 1999, pp. 471–478.
- [9] *Tarján, G.*: Mineral Processing. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1986.
- [10] *Stehr, N.*: Nassfeinstmahlung mit Rührwerksmühlen in der Keramik, Symp. Moderne Mahlverfahren in der Keramik, 1988.
- [11] *Bunge, F.*: Mechanischer Zellaufschluss in Rührwerkskugelmühlen, VDI-Verlag: Reihe 3, Nr. 287, Düsseldorf, 1992.
- [12] *Becker, M. – Kwade, A. – Schwedes, J.*: Feinstzerkleinerung keramischer Rohstoffe und Mahlkörpersverschleiß in Rührwerksmühlen, Aufbereitungstechnik, 8/1997 (38. Jahrgang), pp. 430–438.
- [13] *Kwade, A. – Blecher, L. – Schwedes, J.*: Beanspruchungsintensität und Bewegung der Mahlkörper in Rührwerksmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 69 (1997), pp. 836–839.
- [14] *Mankosa, M.J. – Adel, G.T. – Yoon, R.H.*: Effect of media size in stirred ball mill grinding of coal, Powd. Tech. 49 (1986), pp. 75–82.
- [15] *Stadler, R. – Polke, R. – Schwedes, J. – Vock, F.*: Nassmahlung in Rührwerksmühlen, Chem.-Ing.-Techn. 62 (1990), pp. 907–915.
- [16] *Mannheim, V.*: Ércbányászati meddő-komponensek fizikai feltárásának kutatása nedves őrléssel, PhD értekezés, Miskolc, 2005.
- [17] *Fonyó, Zs. – Fábry, Gy.*: Vegyipari művelettan ismeretek, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
- [18] *Tarján, I.*: A mechanikai eljárás technika alapjai, Miskolci Egyetemi Kiadó, 1997.