

SZILIKÁTTUDOMÁNY

Az aprítási elmélet néhány aktuális kérdése – képlékeny viszkoelasztikus anyagok aprítása görgőjáraton

Gömze A. László

Miskolci Egyetem, Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszék

1. Bevezetés

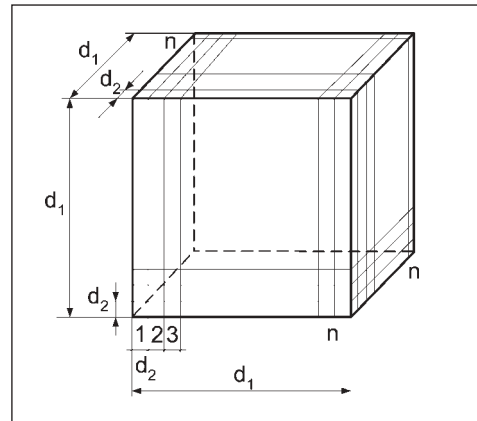
Szilárd halmazállapotú anyagok feldolgozásánál az aprítás és az őrlés az egyik legfontosabb technológiai művelet. Mind az élelmiszer-, a gyógyszer- és a vegyiparban, mind a bányászatban és a kohászatban aprítással, illetve őrléssel érik el a felhasznált vagy előállított alap-, adalék- és segédanyagok kívánt szemcseméretét és szemcsealakját – azaz a technológiailag előírt fajlagos felület nagyságát. Volumetrikus nagyságának köszönhetően különösen fontos szerepet játszik az aprítás és az őrlés a szilikátipari és az építőanyag-ipari technológiáknál, ahol a diffúzió által vezérelt kémiai átalakulások és szilárd fázisú reakciók [1, 2, 3, 4, 5 és 6] sebessége és minősége alapvetően függ az „érintkező” felületek nagyságától. Ezért ma már nem elégséges csak az aprítás és őrlés technológiai energiaigényét meghatározni, választ kell találni azokra a kérdésekre is, hogy milyen lesz az adott aprító- vagy őrlőberendezésen, gépen előállított szemcsék mérete, alakja, makroszerkezete (pl. repedések száma, mérete, jellege), valamint egymáshoz való térbeli viszonya, eloszlása.

A továbbiakban a görgőjárat mint aprítógép példáján teszünk kísérletet ezekre a kérdésekre választ találni.

2. Az aprítási elméletek fejlődéstörténetének áttekintése

2.1. Klasszikus mechanikai szemléletű aprításelmélet fejlődése

Az infrastrukturális beruházások – vasút és az úthálózat kiépülése és bővülése, valamint az aprítási elméletek fejlődése között érdekes párhuzam figyelhető meg. A XIX. század közepén a poroszországi (német) vasúthálózat dinamikus fejlődésének mintegy „melléktermékeként” Rittinger 1867-ben megalkotta az aprítás energiaszükségletének alaptörvényét [7], melynek lényege, hogy az aprítás energiaigénye arányos a keletkezett felülettel.



1. ábra. A d_1 élhosszúságú kocka „feldarabolása” egymástól d_2 távolságban lévő párhuzamos síkokkal (A Rittinger-féle aprítási elmélet értelmezése)

A Rittinger-féle aprítási elmélet könnyen megérthető az 1. ábra segítségével, ahol a d_1 élhosszúságú kockát párhuzamos síkokkal d_2 élhosszúságú kockákra aprítjuk. Ekkor aprítás után a keletkezett új kockák száma:

$$N_k = n^3. \quad (1)$$

Míg a keletkezett töretfelület nagysága:

$$A = 2 \cdot 3(n-1)d_1^2, [\text{m}^2]. \quad (2)$$

Az 1. ábra alapján ugyanakkor könnyű belátni, hogy a d_1 élhosszúságú kockán a törési síkok száma csupán:

$$N_{ts} = 3(n-1), \quad (3)$$

ahol n egyben az aprítási fok is, mivel:

$$n = \frac{d_1}{d_2}. \quad (4)$$

Amennyiben az egységnyi élhosszúságú kocka egyetlen törési sík mentén történő aprításának energiaigénye W_1 , úgy a d_1 élhosszúságú kocka d_2 élhosszúságú kockára

történő aprításához szükséges energia mennyisége:

$$W = d_1^2 \cdot N_{ts} \cdot W_1, [\text{Nm}]. \quad (5)$$

A (3) és (4) kifejezések (5)-be történő behelyettesítésével megkapjuk a d_1 élhosszúságú kocka d_2 élhosszúságú kockára történő aprításához szükséges energia Rittinger-féle egyenletét:

$$W = 3d_1^2 W_1 \left(\frac{d_1}{d_2} - 1 \right), [\text{Nm}], \quad (6)$$

amely az alábbiakat tételezi fel:

- a törőerő arányos az aprítás energiaigényével;
- a felület mentén a feszültség egyenletesen oszlik meg;
- az aprításhoz szükséges energia nagysága független az aprított anyag mechanikai és reológiai tulajdonságaitól, ugyanakkor arányos a keletkezett új felület nagyságával!

Az 1800-as évek utolsó harmadában az Európában lezajlott vasútépítési bumm során Oroszországban Kirpicsev [8] és az Egyesült Királyságban Kick [9] 1885-ben szinte egy időben alkotta meg az aprítás energiaigényének második elméletét, az úgynevezett „térfogatelmélet”. Tapasztalataik szerint a vasúti töltésekhez használt kőzetek aprításakor a töretfelületek nem párhuzamos síkok mentén, hanem a legkülönbözőbb geometriai alakzatban, sztochasztikusan jöttek létre – gyakorlatilag lehetlenné téve ezáltal az új töretfelületek nagyságának meghatározását.

Tapasztalati adatok és elméleti fejtegetések alapján Kirpicsev és Kick arra a következtetésre jutottak, hogy a szilárd testek töréséhez szükséges energia arányos az aprítandó szemcse térfogatával, valamint a testben ébredő feszültség és a rugalmas alakváltozás szorzatával. Azaz, egy d_1 élhosszúságú, kocka alakú szilárd test törésig való megfeszítéséhez szükséges energia mennyisége:

$$W = d^3 \int_0^{\epsilon} \sigma de. \quad (7)$$

Ha figyelembe vesszük, hogy a rugalmas alakváltozás nagysága a

$$de = \frac{1}{E} d\sigma. \quad (8)$$

összefüggés szerint határozható meg, akkor (7) a következő alakban írható át:

$$W = d^3 \cdot \frac{1}{E} \int_0^{\sigma} \sigma d\sigma = d^3 \frac{\sigma^2}{2E}, [\text{Nm}], \quad (9)$$

ahol: σ – az anyagra jellemző törőszilárdság, $[\text{N}/\text{m}^2]$;

E – az aprítandó anyag rugalmassági modulusa, $[\text{N}/\text{m}^2]$.

Az aprítás „harmadik” elmélete csak a XX. század közepén, 1952-ben született meg. Nem véletlen, hogy ezt egy amerikai kutató, F. C. Bond [10] dolgozta ki, hiszen az 1940-es évektől kezdődően az USA – amely ekkor már Földünk vezető gazdasági és katonai hatalma – eddig

még soha és sehol nem tapasztalt vasút- és autópálya-építési dömping színhelye.

Bond elméletének lényege, hogy egy adott szemcse aprításához szükséges törési energiái meghatározásakor a felület- és a térfogatelmélet alapján kapott értékek mértani középértékét kell a számítás alapjául venni. Könnyű belátni, hogy a „Bond-törvény” szerint egységnyi térfogatú, aprítás előtt d_1 szemcseméretű szilárd test aprítási (törési) energiaigénye arányos az aprítás utáni és előtti szemcseméretnek négyzetgyökeinek reciprokával.

Vagyis:

$$W = C_B \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right), [\text{Nm}]. \quad (10)$$

Az aprítás három „klasszikus” energiaelméletét 1957-ben R. J. Charles [11] sikeresen leírta egyetlen általános összefüggéssel:

$$dW = -C \frac{d(d)}{d^a}. \quad (11)$$

A d_1 szemcseméretű szilárd anyag d_2 szemcseméretűre történő aprításához szükséges törési energia értékét Charles a (11) kifejezés integrálásával határozta meg az alábbiak szerint:

$$W = -C \int_{d_1}^{d_2} \frac{1}{d^a} d(d), [\text{Nm}]. \quad (12)$$

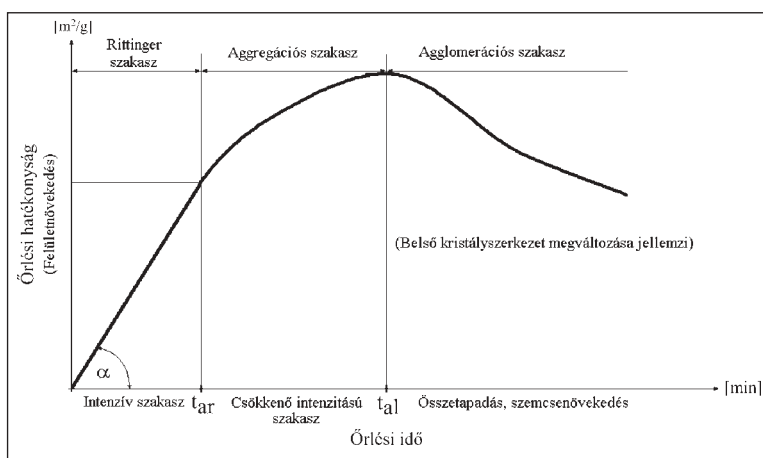
A (12) kifejezést az aprítás „alapegyenletének” is szokták nevezni, mivel az a hatványkitevő értékétől függően belőle származtathatók a Kirpicsev-Kick- ($a = 1$), a Bond- ($a = 1,5$) és a Rittinger-féle ($a = 2$) aprítási energiaegyenletek.

Az aprítás klasszikus mechanikai szemléletű elméleteit elsősorban az aprító- és őrlőberendezések – gépek – erőjáték-vizsgálatához és energiaszükségletének meghatározásához igyekeztek felhasználni. Számos tekintélyes gépészmérnök [12, 13, 14, 15] (és még sokan mások) ugyanis abból a koncepcióból indult ki, hogy az aprítógépek energiaszükséglete a következők szerint oszlik meg:

- aprításra (őrlésre) hasznosuló energia, amely arányos a keletkezett új felülettömeggel;
- aprításra nem hasznosuló, az aprított szemcsék felmelegedésére és rugalmas alakváltozásra fordítódó „káros” energia (ennek értékét fenti szerzők egzakt matematikai úton soha nem tudták meghatározni!);
- az aprítógép külső és belső súrlódására fordítódó energia.

2.2. Mechanokémiai szemléletű aprításmélet kialakulása, fejlődése

A klasszikus mechanikai szemléletű aprítási elméletek nem adtak választ a finomszemcsék előállításakor (őrlés-kor) jelentkező mechanokémiai folyamatokra; a finom-őrlést kísérő olyan részecske-kölcsönhatási jelenségekre, mint az aggregáció és az agglomeráció [16]. Az aprítási



2. ábra. A finomörlés hatékonysága
(Átvéve: Juhász A. Zoltán: *Mechanokémia és agglomeráció* című előadásából [22].
Elhangzott: MTA olvasóterme, Bp., 2003. április 16.)

elméletek mechanokémiai szempontból történő felülvizsgálatának – kiegészítésének – gondolatát elsőként szovjet tudósok [17, 18 és 19] vetették fel az 1960-as években. A mechanokémiai szemléletű aprításmélet alapjainak kidolgozásában, továbbfejlesztésében és nemzetközi elfogadtatásában azonban egy magyar tudós, Juhász A. Zoltán [20, 21, 22], a Veszprémi Egyetem professzora játszott meghatározó szerepet.

A mechanokémiai szemléletű aprításmélet szerint mechanikai terhelés hatására a szilárd anyagban reverzibilis és irreverzibilis folyamatok egyaránt lejátszódnak. Az, hogy a törés pillanata milyen feszültség és deformációértékek (nagyságok) mellett következik be, az függ az aprítás jellegétől és az aprításnak kitett anyag (szemcse) reomechanikai tulajdonságaitól.

Ugyanakkor töréskor a szemcsékben anyagszerkezeti változások mennek végbe, miközben szabad energia szabadul fel, és ezáltal a szemcsék felülete „aktivizálódik”. Az aprítandó szemcse anyagszerkezeti változásaira jellemző a diszlokáció, a vakancia és az interstíció; miközben a vakanciákban mechanikai feszültségcsúcsok alakulnak ki.

A mechanokémiai szemléletű aprításmélet választ ad a finomörléskor tapasztalható szemcse-összetapadás (agglomeráció) okaira; rámutatva, hogy a szemcsék finomaprításakor a keletkező „új” felület **aktív** válik, és ezen az aktív felületen új kötések, új kristályszerkezetek jönnek létre (2. ábra).

A finomörlés hatékonyságának mechanokémiai szemléletű vizsgálata ma már valamennyi iparilag fejlett országban ismert és elfogadott. Kidolgozásában és hazai elterjesztésében Juhász professzor mellett meghatározó szerepet vállalt és játszik ma is Opoczky Ludmilla [23, 24, 25], akinek kutatásai nagymértékben hozzájárultak a felületaktív anyagok őrlést segítő hatásmechanizmusának tisztázásához és ezen anyagok cementipari alkalmazásához.

2.3. Technológiai szemléletű aprításmélet kialakulása, fejlődése

Az 1970-es évek elején a Szovjetunió olyan óriási szociális és infrastrukturális fejlesztések, beruházások színvonalára, mint a házigyári és égetett kerámia lakásépítési program, a szövetséges köztársaságok közötti nyugat-kelet és észak-dél autópálya-építési és úthálózat-bővítési program, valamint a Bajkál–Amur vasútvonal (BAM) építési programjának indítása. Ezek a gigantikus építkezések a legkülönbözőbb fizikai és mechanikai tulajdonságú, kémiai és ásványi összetételű anyagok eddig még sehol nem tapasztalt mennyiségű aprítását tette szükségessé. Mindezt a legkülönbözőbb szemcsemérettel és szemcseszerkezettel. Ez technológiailag minden korábbinál hatékonyabb, ugyanakkor energiatakarékosan működtethető aprítógépek és őrleberendezések kifejlesztését és tömeges üzembe állítását tette szükségessé. Így nem véletlen, hogy az aprítandó anyag fizikomechanikai és reológiai tulajdonságait, valamint az aprítógép (őrleberendezés) geometriai és műszaki-technológiai paramétereit egyaránt figyelembe vevő technológiai szemléletű aprításmélet az 1970-es évek elején a Szovjetunióban született meg [26, 27, 28 és 29].

Az **új**, anyagspecifikus és berendezésorientált technológiai szemléletű aprítási elmélet alapjainak kidolgozásában – moszkvai ösztöndíjas diákként [26, 27], majd később itthon kezdő mérnökként – jelen tanulmány szerzőjének sikerült a kezdetektől részt venni. Így a képlekeny viszkoelasztikus, bányanedves agyagásványok reológiai modelljéből és reomechanikai anyagegyenletről kiindulva elsőként határozta meg az aprító simahengermű részébe behúzott agyagásványok áramlási és deformációs sebességviszonyait leíró matematikai egyenleteket [29] – számíthatóvá téve ezzel az adott aprítógépen tapasztalt intenzív keveredést és homogenizálódást. Hasonlóan sikerült matematikailag levezetnie és megha-

tározni a hengerrésen áthaladva aprózódó képlékeny viszkoelasztikus agyagásványokban ébredő csúsztató- és nyomófeszültségek nagyságát a résben elfoglalt pillanatnyi geometriai helyzet függvényében [30, 31 és 32].

1980-ban megszületett a viszkózus üveglvadék hengerlésének matematikai modellje [33], majd 1982-re szovjet tudósokkal [34] együtt sikerült matematikailag leírni olyan viszkorugalmas anyagok simahengerekkel történő aprításának elméleti összefüggéseit, mint amilyen a mészkő vagy a kőszén.

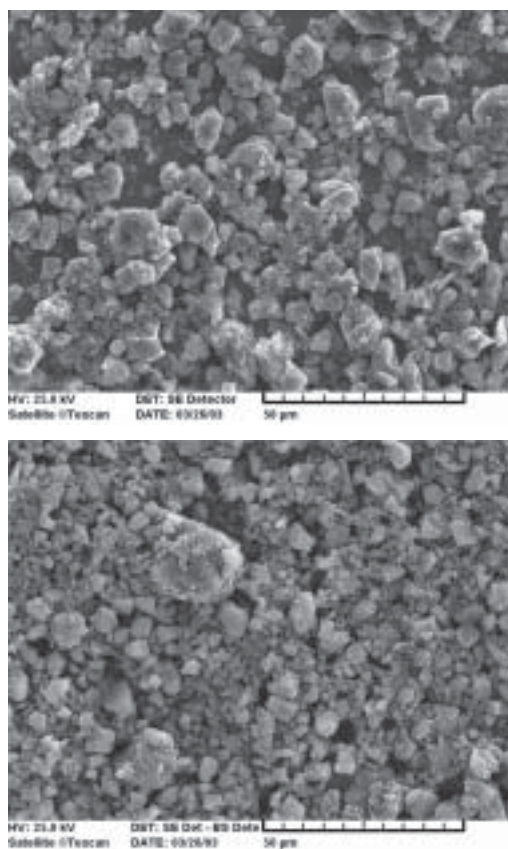
A technológia szemléletű – az aprítandó anyag reomechanikai tulajdonságait és annak aprítás közben végbemenő változásait, valamint az aprító gép geometriai és műszaki-technológiai paramétereit figyelembe vevő [35] – aprítási elmélet előnye, hogy anyag- és berendezésspecifikusan tárja fel és határozza meg a szemcsék aprítódására és egymáshoz viszonyított elmozdulására (keveredésére és homogenizálására) fordítandó energiaszükségletet mint technológiailag hasznos energiát.

3. Mechanokémiai jelenségek előállítása és igazolása görgőjáraton

A Miskolci Egyetemen a **Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszék** rendelkezik olyan laboratóriumi görgőjárat – kollerrel – (3. ábra), amely kiválóan alkalmas a különböző kémiai és ásványi összetételű, valamint fizikomechanikai és reológiai tulajdonságú anyagok aprítására, őrlésére, keverésére és homogenizálására. Multifunkcionális tulajdonságainak köszönhetően ezt a berendezést előszeretettel használják oktatóink a tanszéken oktatott szinte valamennyi tárgy gyakorlatánál a finomőrléskor lejátszódó mechanokémiai jelenségek bemutatására, valamint az adott laboratóriumi gyakorlat által megkívánt szemcseméretű és szemcseszerkezetű anyagok – keverékek – előállítására.



3. ábra. A Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszéken használt laboratóriumi görgőjárat



4. ábra. A STRONG & MIBET Rt. által használt mészkőliszt laboratóriumi görgőjáraton 20, ill. 40 percig történő továbbőrlés után készített SEM-felvétele

Az aprításkor, finomőrléskor jelentkező mechanokémiai jelenségek a görgőjáraton (kollerén) történő aprításkor is megfigyelhetők. Az aprítás hatékonyságára a 2. ábrán bemutatott jelleggörbe felvételéhez – az aggregáció kezdeti idejének (t_{ar}) és az agglomeráció kezdeti időpontjának (t_{al}) meghatározásához – az alábbi függvénykapcsolat állítható fel:

$$t_{ar} = f(Q, m, D, n, t_0), \text{ [min]}, \quad (13)$$

$$t_{al} = F(Q, m, D, n, t_0), \text{ [min]}, \quad (14)$$

ahol:

Q – a görgőjáratra finomőrlésre egyszerre feladott anyag ásványi és kémiai összetétele (ez lehet 1-1 konkrét anyag típus, vagy többféle anyagból készített keverék is);

m – az egy időben aprított anyag tömege, [kg];

D – a feladott anyag legnagyobb szemcsemérete, [mm];

n – a görgőjárat királytengelyének fordulatszáma, [1/min];

t_0 – a görgőn előre beállított névleges rés méret, [mm].

Fenti független változók (faktorok) a kísérlettervnek megfelelően változtathatóak egyidejűleg vagy külön-külön.

A mechanokémiai jelenségek tanulmányozásához és vizsgálatához célszerű a görgőjárat aprítózonájából 5 percnként mintát venni, majd a vett mintákról SEM-felvételt

készíteni. A SEM-felvétel (4. ábra) segítségével jól meghatározható a mechanokémiai jelenség típusa, valamint az aggregáció, illetve agglomeráció jellege és mértéke.

4. Görgőjáratok (kollerek) technológiai szemléletű méretezése – a keverő- és homogenizáló hatás mértékének matematikai meghatározása

4.1. A vizsgálati modell megválasztása

A technológiai szemléletű aprításelméletek lényege, hogy egyaránt figyelembe veszik az aprítandó anyag olyan fiziko-mechanikai tulajdonságait, mint a reológiai anyag-egyenlet, vagy a külső és belső súrlódási együttható, valamint az aprítógép (örlőberendezés) geometriai és műszaki, technológiai paramétereit.

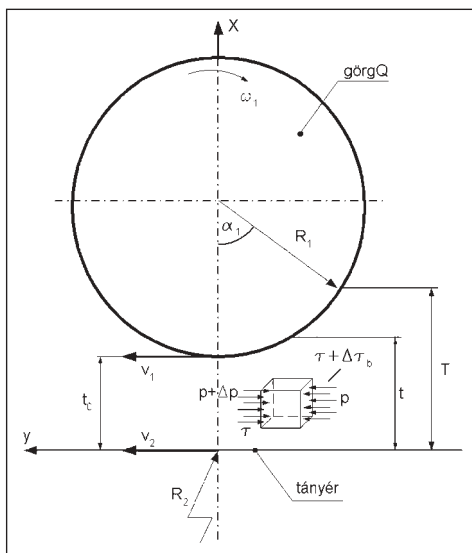
Esetünkben az aprítandó anyag képlékeny viszkorugalmas, bányanedves agyagásvány, amelynek reológiai tulajdonságai jó megközelítéssel leírhatók a Bingham-féle anyagegyenlettel:

$$\tau = \tau_0 + \eta \frac{du}{dx}, [\text{MPa}]. \quad (15)$$

Tekintettel arra, hogy a görgőjáraton az aprítás az R_1 sugarú görgő szemcsén történő átgördülése során megy végbe, a berendezés felfogható olyan „hengerpárként”, ahol a másik „henger” az örlőtányér, amelynek sugara R_2 végtelen nagy, vagyis:

$$R_2 = \infty, [\text{m}]. \quad (16)$$

A görgőjáraton történő aprítás során lejátszódó fizikai, mechanikai és technológiai folyamatok matematikai elemzéséhez – levezetéséhez – célszerű olyan koordiná-



5. ábra. A megválasztott modell görgőjáratok (kollerek) méretezéséhez

ta-rendszert választani, amelynek középpontja a mindenkor görgőközépponthoz képest rögzített, azaz a koordináta-rendszer a királytengely fordulatszámával forog. Ebből a koordináta-rendszerből nézve a görgő csak a tengelye körül végez forgómozgást, míg a tányér egy olyan végtelenül nagy sugarú henger, amelynek „kerületi sebessége” megegyezik a görgő kerületi sebességével (5. ábra), mivel a koordináta-rendszer a görgő kerületi sebességével elhalad a tányérra felett.

Az általunk választott modell fontos eleme, hogy a görgő és a tányér közötti résben aprítandó anyag elemi térfogata mechanikailag (erőtani szempontból) mindenkor egyensúlyi állapotban van. Az egyensúlyi állapotot leíró egyenleteket az általunk használt koordináta-rendszerben felírva, majd megoldva adódik, hogy:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{d\tau}{dx}. \quad (17)$$

4.2. A görgő és a tányér közötti résben található aprózó masszában kialakuló sebességviszonyok

A kollerjáratok méretezésekor a görgő és a tányér közötti résben található bányanedves agyagásványban aprítás közben kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyok meghatározásához célszerű a csúszatófeszültséget leíró (15) kifejezést behelyettesíteni a mechanikai egyensúlyi állapotot leíró (17) összefüggésbe. Ekkor:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{d}{dx} \left(\tau_0 + \eta \frac{du}{dx} \right) [\text{Pa/m}], \quad (18)$$

ahonnan a szemcse résben elfoglalt helyzetétől függő áramlási és deformációs sebességviszonyokra kettős integrálás után kapjuk az:

$$u = \frac{1}{\eta} \left(-\tau_0 x + C_1 x + \frac{dp}{dy} \frac{x^2}{2} + C_2 \right), [\text{m/s}] \quad (19)$$

összefüggést.

A C_1 és C_2 integrálási állandók a görgőjárat műszaki paramétereiből és az alkalmazott modelltől (koordináta-rendszerből) kiindulva (5. ábra) az:

$$u = v, \text{ ha } x = 0 \text{ és } u = v, \text{ ha } x = t \quad (20)$$

peremfeltételekből határozhatók meg.

A (20) peremfeltételek (19) kifejezésbe történő behelyettesítése és a megfelelő rendezések után az integrálási állandókra a következő összefüggések adódnak:

$$C_1 = \tau_0 - \frac{t}{2} \frac{dp}{dy}, \quad (21)$$

$$C_2 = \eta \cdot v = \eta (\omega_1 R_1). \quad (22)$$

A (21) és (22) kifejezéseket a (19) összefüggésbe beírva az összevonások után a görgőjárat (koller) részében aprózó masszában kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokra az alábbi egyenlet adódik:

$$u = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dp}{dy} x^2 - \frac{dp}{dy} t_0 x + 2\eta \omega_1 R_1 \right), [\text{m/s}]. \quad (23)$$

A (23) összefüggésben szereplő dp/dy differenciálhányados a görgőjárat (koller) átbocsátási teljesítményéből lehet meghatározni a következők szerint:

$$V_1 = \int_0^t u \cdot L \cdot dx, [\text{m}^3/\text{s}], \quad (24)$$

ahol:

V_1 – az időegységre jutó megmunkált agyagmassza térfogata a tetszőlegesen megválasztott „ t ” vastagságú résszelvényénél, $[\text{m}^3/\text{s}]$;

L – a görgőpalást szélessége, $[\text{m}]$;

U – az aprítandó massa áramlási sebessége t résszelvényénél, $[\text{m/s}]$.

A (23) kifejezés (24)-be történő behelyettesítése és az integrálás elvégzése után a görgőjárat (koller) időegységre jutó átbocsátási teljesítménye:

$$V_1 = \omega_1 L R_1 t - \frac{L}{12\eta} \frac{dp}{dy} t^3, [\text{m}^3/\text{s}]. \quad (25)$$

Ugyanakkor a t_0 résméretnél (5. ábra) a görgőjárat (koller) időegységre jutó átbocsátási teljesítménye meghatározható a

$$V_2 = L \cdot t_0 \cdot R_1 \cdot \omega_1, [\text{m}^3/\text{s}] \quad (26)$$

összefüggés alapján is.

Mivel a görgőjárat átbocsátási-átgyúrási teljesítménye a rés bármely metszetében azonos, következik, hogy:

$$\omega_1 L R_1 t - \frac{L}{12\eta} \frac{dp}{dy} t^3 = \omega_1 L R_1 t_0, [\text{m}^3/\text{s}], \quad (27)$$

ahonnan:

$$\frac{dp}{dy} = \frac{12\eta \omega_1 R_1}{t^3} (t - t_0), [\text{Pa/m}]. \quad (28)$$

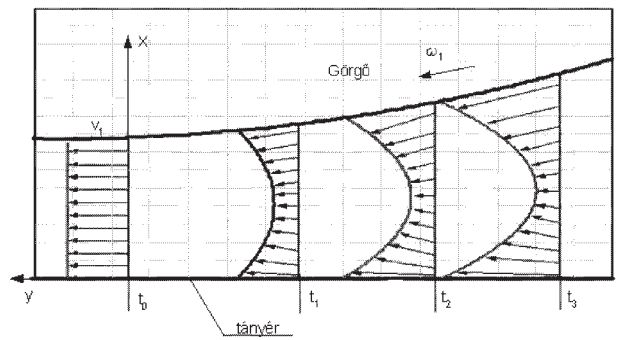
A (28) kifejezést a (23) kifejezésbe visszahelyettesítve, az összevonások után a görgőjárat (koller) részében aprózódó masszában kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokat az alábbi matematikai összefüggéssel írhatjuk le:

$$u = \frac{6\omega_1 R_1}{t^3} (t - t_0) (x^2 - tx) + \omega_1 R_1, [\text{m/s}], \quad (29)$$

ahol t értéke a t_0 névleges résmérettől (az átgyúrási utáni „anyagszalag” vastagságától) a görgőjáratra feladott anyag területi magasságáig, de legfeljebb a külső súrlódási együtthatóból származó behúzási szöghöz tartozó T résméretig változhat. Vagyis:

$$t_0 \leq t \leq T, [\text{m}]. \quad (30)$$

A (29) összefüggés jól szemlélteti, hogy a görgőjáratok (kollerek) görgői alatti résben aprózódó anyagban kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyok függetlenek az aprítandó anyag olyan fizikai és mechanikai tulajdonságaitól, mint például a kristályszerkezet, viszkozitás,

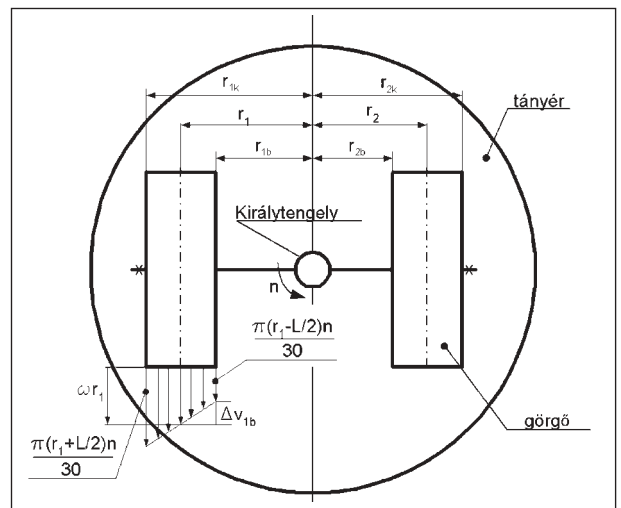


6. ábra. A (29) kifejezés alapján számított áramlási és deformációs sebességviszonyok alakulása az aprítandó anyagban a görgő és a tányér közötti résen történő átgyúrása közben

nyomó- vagy hajlítószilárdság. Ugyanakkor ezek az áramlási és deformációs sebességviszonyok alapvetően függenek a görgők geometriai méretétől (R_1) és technológiai paramétereitől (ω_1 és t_0), valamint az egyszerre feladott anyagok mennyiségétől („ T ” területi magasságától), illetve a résben elfoglalt geometriai helyzetétől.

A 6. ábra azt szemlélteti, milyen áramlási, keveredési viszonyok alakulnak ki a görgőjáratokon (kollereken) aprított anyagokban a görgők alatti résben elfoglalt pillanatnyi helyzetüktől függően. Az ábra jól szemlélteti azt a technológiailag rendkívül fontos és jelentős keverő- és homogenizáló hatást, aminek minden anyag ki van téve a görgőjáratokon történő aprítás során.

A (29) összefüggés alapján készített 6. ábra választ ad arra a kérdésre is, miért lehet ezeket az aprítógepeket az őrlés mellett vagy helyett sok esetben keverőként (például laboratóriumi homokkeverő) vagy homogenizálóberendezésként használni. Könnyű belátni, hogy az a keverő- és homogenizáló hatás még jelentősebb, ha figyelembe vesszük, hogy a (29) kifejezés csupán az n fordulatszámmal forgó királytengelytől (7. ábra) az L_1 szélességű görgőpalást alkotóját r_1 távolságban középen metsző síkra igaz.



7. ábra. A görgők palástfelülete csúszásának értelmezése

Valójában a királytengely körüli forgás következtében az L_1 szélességű görgő palástfelületének belső szélén a kerületi sebesség:

$$v_{1b} = \frac{\pi \cdot n \cdot r_{1b}}{30}, [\text{m/s}], \quad (31)$$

közepén:

$$v_1 = \frac{\pi \cdot n \cdot r_1}{30} = \omega_1 \cdot R_1, [\text{m/s}], \quad (32)$$

külső szélén:

$$v_{1k} = \frac{\pi \cdot n \cdot r_{1k}}{30}, [\text{m/s}]. \quad (33)$$

Ez azt jelenti, hogy az aprítandó szemcséken

$$v_1 = \omega_1 \cdot R_1, [\text{m/s}] \quad (34)$$

kerületi sebességgel átgördülő L_1 szélességű görgő palástfelülete a királytengely felőli oldalon, a királytengely által gerjesztett sebességhez képest:

$$\Delta v_{1b} = v_1 - v_{1b} = \frac{\pi \cdot L_i \cdot n}{60}, [\text{m/s}] \quad (35)$$

sebességgel siet, míg a külső oldalán:

$$\Delta v_{1k} = v_1 - v_{1k} = -\frac{\pi \cdot L_i \cdot n}{60}, [\text{m/s}] \quad (36)$$

sebességgel késik. Ez egyben azt is jelenti, hogy aprítás közben a kollerjáratok görgői a görgőpalástok alkotóját középen metsző siktól távolodva mindkét irányban növekvő mértékben csúsznak az aprítandó anyag felületén, ezzel is elősegítve jelentős csúsztató- (nyíró-) feszültség keletkezését az aprítandó anyagban.

Az L_1 szélességű, R_1 sugarú és ω_1 szögsebességű görgő palástfelülete aprítandó anyagon történő megcsúszásának átlagsebessége a

$$v_{1ac} = \frac{\pi L_1 n}{120}, [\text{m/s}] \quad (37)$$

összefüggés alapján számítható. Amennyiben a görgőjáraton az aprítást N számú azonos átmérőjű, de különböző szélességű görgő végzi, úgy a tetszőlegesen választott i -edik görgő palástfelülete megcsúszásának átlagsebessége:

$$v_{iac} = \frac{\pi L_i n}{120}, [\text{m/s}], \quad (38)$$

ahol: n – a királytengely fordulatszáma, $[\text{min}^{-1}]$.

5. Görgőjáratokon történő aprítás energiaigénye

A technológiailag hasznos energiaigény az alábbi összefüggés szerint határozható meg:

$$W_{\text{tech}} = W_R + W_\tau, [\text{Nm}], \quad (39)$$

ahol:

W_R – az adott rugalmassági modulusú, nyomószilárd-ságú és viszkozitású anyag aprításához szükséges nyomófeszültség előállításához és fenntartásához szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_τ – ugyanezen anyagban a görgő és a tányér közötti résen történő áthaladáskor ébredő, az aprítást elősegítő csúsztatófeszültség előállításához és fenntartásához szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$.

A Bingham-féle anyagok aprítása esetén könnyű belátni – a (15) reomechanikai anyagegyenletből következik –, hogy a W_τ biztosítja a szemcsés anyagok görgőjáratokon történő aprításakor megfigyelhető intenzív keveredést, homogenizálódást is!

A görgőjárat mozgó egységeinek mozgatásához szükséges, az aprítógép konstrukciós kialakításától függő „hasznos” energiaigény pedig:

$$W_{KH} = W_{gm} + W_{gc} + W_{ka} + W_{kt}, [\text{Nm}] \quad (40)$$

összefüggés alapján határozható meg, ahol:

W_{gm} – a görgők mozgatásához (a gördülő-ellenállás leküzdéséhez) szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_{gc} – az aprított anyag és a görgő palástfelülete között ébredő külső súrlódási együttható leküzdéséhez szükséges energiaigény, amikor a görgőpalást az aprítandó anyag felületén v_{iac} átlagsebességgel – (38) kifejezés – csúszik, $[\text{Nm}]$;

W_{ka} – a terelő és az aprítandó anyag felülete között ébredő súrlódóerő leküzdéséhez szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$;

W_{kt} – a terelő és a tányér felülete között ébredő súrlódóerő leküzdéséhez szükséges energiaigény, $[\text{Nm}]$.

Egy adott fizikai, mechanikai és reológiai tulajdonságú anyag aprítására akkor alkalmas egy görgőjárat (koller) mint aprítógép, ha mindenkor fennáll a

$$W_{KH} \geq W_{\text{tech}} \quad (42)$$

összefüggés.

Amennyiben a (42) kifejezés által megkövetelt feltételek nem teljesülnek, akkor szükségessé válik a görgők tömegének vagy a királytengely fordulatszámának – vagy egyidejűleg mindkettőnek – a növelése.

Mind a technológiai energiaigény (W_{tech}), mind a görgőjárat (koller) konstrukciós kialakításától függő hasznos energiaigény (W_{KH}) matematikailag levezethető és meghatározható. Tekintettel arra, hogy a levezetések meglehetősen bonyolultak és sok-sok lépésből állnak, ezért célszerű ezeket az energiaigényeket önálló tanulmányban – tudományos cikkben – közölni.

6. Eredmények összegzése

A fentebb leírtakat összefoglalva megállapítható: az aprítási elméletek a klasszikus mechanikai szemléletű elméletektől

a mechanokémiai és a technológiai szemléletű megközelítésig mind a mai napig fejlődnek; aprított anyag, illetve aprítóberendezés specifikusan továbbfejleszthetők. Napjainkban egy aprítási feladat csak úgy oldható meg hatékonyan, ha egyaránt figyelembe vesszük az aprítódó anyagban aprítás közben lejátszódó fizikai, kémiai, morfológiai, mechanikai és reológiai változásokat, valamint a kiválasztott aprítógép által biztosított technológiai lehetőségeket.

A Kerámia- és Szilikátmérnöki Tanszéken (Miskolci Egyetem) rendelkezésre álló laboratóriumi kollerjáraton a berendezés technológiai adottságainak kihasználásával sikerült mechanokémiai jelenségek tanulmányozására alkalmas finomságú, szemcseméretű mészkölsziet előállítani. Egyben igazoltuk, hogy a mechanokémiai szempontból oly fontos aggregáció és agglomeráció kezdetének meghatározására – az ehhez tartozó anyagspecifikus szemcseméret és őrlésidő megállapítására – az egyébként durvaaprításra szolgáló görgőjáratok is alkalmasak. Sőt, a (13) és (14) kifejezések szerinti komplex vizsgálatok is elvégezhetőek görgőjáratok (kollerek) segítségével.

Az olyan Bingham-féle reológiai anyagegyenletekkel jellemezhető anyagok, mint a bányanedves agyagásványok példáján sikerült matematikailag levezetni – és ezáltal egzakt módon meghatározni – a kollerjáratok görgői alatt a görgő és a tányér közötti résen átgyűrődő, aprózódó anyagban kialakuló áramlási és deformációs sebességviszonyokat leíró (29) egyenletet. A (29) kifejezés jól tükrözi, hogy a görgők alatti résben aprítódó anyagban az egymás mellett elhelyezkedő rétegek sebességkülönbsége miatt milyen intenzív – technológiailag egyébként nagyon hasznos – keveredés és homogenizáció játszódik le.

Hasonlóan teljesen új megközelítésben sikerült megfogalmazni a görgőjáratokon (kollereken) történő aprítás technológiailag szükséges (hasznos) energiaigényét is a (39) összefüggésben. Azonban az adott rugalmassági modulusú, nyomószilárdságú és viszkozitású anyag görgőjáraton történő aprításához szükséges nyomófeszültség és csúszatófeszültség előállításához szükséges W_R és W_T energiaigény matematikai levezetése meglehetősen bonyolult és sok-sok lépésből áll, ezért célszerű azt a későbbiekben önálló publikáció formájában megjelentetni.

Irodalom

- [1] Dr. Verő József: Fémtan. Tankönyvkiadó, 1969. 102–103. old.
- [2] Budnikov P. P. – Balkevics V. L. és mások: Himitseskaya tehnologiya keramiki i ognenporov. Moszkva, 1972. 123–129. old.
- [3] Dr. Palotás László: Általános anyagismeret. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1979. 132–136. old.
- [4] Dr. Antal Boza József – Lorencz Sándor: Szilikátkémia és technológia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979. 26–30. old.
- [5] Dr. Gömze A. László: Portechnológiák. Miskolci Egyetem, Anyag- és Kohómérnöki Kar, anyagmérnök szak, III. évf. 2. és 3. előadás kiadott jegyzete. „APRÍTÁS-ŐRLÉS” (kézirat), Miskolc, 2003.
- [6] Dr. Gömze A. László: Kerámia- és kompozittechnológiák I. Miskolci Egyetem, Anyag- és Kohómérnöki Kar, anyagtechnológiai szakirány, IV. évf. 9. előadás kiadott jegyzete. „KERÁMIÁK ÉS KOMPOZITOK SZINTERELÉSE – SZILÁRD FÁZISÚ REAKCIÓK”. Miskolc, 2002.
- [7] Rittinger, P. Ritter von: Lehrbuch der Aufbereitungskunde, Berlin, Verlag Ernst und Korn, 1867.
- [8] Szapoznyikov M. Ya.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'nyh materialov, izdelij i konsztrukcij. Izdatel'sztvo Vűszsaya Skola, Moszkva, 1971. 16. old.
- [9] F. Kick: Das Gesetz der proportionellen Widerstände und seine Anwendungen. Leipzig, Verlag von Arthur Felix, 1885.
- [10] Bond F. C.: The third theory of comminution. Mining Engineering, 4. p. 484–494. 1952.
- [11] Charles R. J.: Energy – size reduction relationships in comminution. Mining Engineering, 9. p. 80–88. 1957.
- [12] Péter Gyula: Kerámiaipari gépek. Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1982.
- [13] Szilenok Sz. G.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'noj industrii. Sztrojizdat, Moszkva, 1973.
- [14] Baumann V. A. – Kusancev, B. V. – Martüov, V. D.: Mechanicseskoe oborudovanie predpriyatij sztroitel'nyh materialov, izdelij i konsztrukcij. Moszkva, Masinosztroenie, 1981.
- [15] Martüinov, V. D. – Szergeev, V. P.: Sztroitel'nyie masinü. Moszkva, Vűszsaya Skola, 1970.
- [16] Duderov G. N.: Praktikum po tehnologii keramiki i ognenporov. Moszkva, Promsztrojizdat, 1953.
- [17] Pololuboyarinov D. N. – Balkevics V. L. – Popil'szkij R. Ya.: Vűszokoglinozemisztüie keramicseszkie i ognenpornüie materialü. Moszkva, Gosztrojizdat, 1960.
- [18] Nyicsiporenko Sz. P.: Fiziko-himicseszskaya mehanika diszpersznüih sztruktur tehnologii sztroitel'noj keramiki. Kiev, Naukova dumka, 1968.
- [19] Budnikov P. P. – Ginsztling A. M.: Reakciya v szmeszzyah tvjördüh veshesztv. Moszkva, Sztrojizdat, 1971.
- [20] Juhász A. Zoltán: A mechanokémia alapjai. Egyetemi jegyzet. Veszprém, 1982.
- [21] Juhász A. Zoltán – Opczky Ludmilla: Mechanical Activation of Minerals by Grinding, Pulverizing and Morphology of Particles. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1990.
- [22] Juhász A. Zoltán: Mechanokémia és agglomeráció. Előadás, elhangzott MTA olvasótermében, Budapest, 2003. ápr. 16.
- [23] Opczky Ludmilla: Cementőrlés folyamatának tanulmányozása és intenzifikálása. Bp., 1968.
- [24] Opczky Ludmilla: Powder Technology. 17. p. 1–7. 1977.
- [25] Opczky Ludmilla – Mrákovicsné Török Katalin: Együtt és külön-őrlés kérdései a kohósalakcement gyártásánál. Építőanyag. XXXII. évf. 11. sz. 401–406. old. 1980.
- [26] Gömze A. László: Iszledovanie processza tonkogo pomola glinyannüih massz na gladkih val'cah. I. díjas TDK-dolgozat (témavezető Turenko A. V.). Moszkva, 1972.
- [27] László Gömze A.: Osznovüi metodiki raszesota i szoversensztvovanie konsztrukcii valkovüh droblik gladkami val'cami. Diplomaterv (témavezető: Turenko A. V.). Moszkva, 1973.
- [28] Zolotarszkij A. Z.: Optimal'naya mocsnoszt' val'cov tonkogo pomola; Sztortel'nyie materialü. No. 5. 30–32. old. 1972.
- [29] Gömze A. László – Turenko A. V. – Nazarov A.: A képlékeny agyag aprításának matematikai elemzése. Építőanyag. 1974. 9. sz. 348–354. old.
- [30] Gömze A. László: Kerámiaipari simahengerművek törés elleni védelme. GTE-kiadvány. Miskolc, 1978. 165–170. old.
- [31] Gömze A. László: Az anyagfeladás egyenetlenségének hatása kerámiaipari simahengerművek dinamikai igénybevételére. GTE-kiadvány. Miskolc, 1979. 456–458. old.
- [32] Gömze A. László: Kerámiaipari simahengerművek hatékonyságnövelésének matematikai alapjai I., II., III. Építőanyag. 1980. 4., 9. és 10. szám.
- [33] Gömze A. László: Az üveg hengerlésének néhány elméleti kérdése a feldolgozandó üvegvadékek fiziko-mechanikai tulajdonságainak figyelembevételével. Kézirat. Miskolc, NME, 1980. 1–49. old.
- [34] Gömze A. László – Csirszkó A. Sz. – Szilenok Sz. G. – Turenko A. V.: Anyagok reakciója és áramlási viszonyai simahengerekkel végzett aprításkor. Építőanyag. XXXIII. évf. 12. sz. 441–446. old. 1981.
- [35] Gömze A. László: Agyagásványok aprítására használt simahengerek méretezésének néhány specifikus problémája. Építőanyag. XXXII. évf. 11. sz. 428–432. old. 1980.