

SITNJENJE – PRVI STUPANJ U OPLEMENJIVANJU MINERALNIH SIROVINA

Branko SALOPEK, Gordan BEDEKOVIĆ

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska
E-mail: bsalopek@rudar.rgn.hr

Ključne riječi: Sitnjenje, Drobljenje zrna, Energija, Drobilice

Sitnjenje je proces u kojem pod djelovanjem mehaničkih sila mijenjamo disperzno stanje čvrstih tvari. Disperzno stanje jednoznačno je određeno granulometrijskim sastavom. Do sitnjenja dolazi uslijed deformacije zrna, pri čemu deformacija ovisi o načinu nanošenja sile, njezinoj brzini i veličini. Drobljenje pojedinačnog zrna najučinkovitija je metoda sitnjenja, jer su gubici energije uslijed trenja i neproduktivnog naprezanja u trenutku drobljenja izbjegnuti. Najveći gubici energije su u mlinovima s kuglama i to uslijed trenja između novostvorenih zrna i tih zrna s kuglama i oblogom mlina. Nove spoznaje dovele su do boljeg razumijevanja sitnjenja, u realnim uvjetima, te inovacijskih zahvata s kojima je povećana učinkovitost pojedinih uređaja i to kako u pogledu grano-sastava i raščina zrna tako i u pogledu utroška energije. Konstruirano je nekoliko novih drobilica od kojih se u praksi najčešće spominju visokotlačna drobilica s valjcima i inercijske konusne drobilice.

Uvod

Sitnjenje je proces u kojem pod djelovanjem mehaničkih sila mijenjamo disperzno stanje čvrstih tvari. Pri tome od npr. većih komada rude ili stijene nastaju manji komadi odnosno od krupnijih zrna sitnija zrna. Disperzno stanje jednoznačno je određeno granulometrijskim sastavom.

Svrha sitnjenja je postizanje određene veličine i oblika zrna prikladnih za proizvodnju betona i asfalta, povećanje površine zrna i time njegove reaktivnosti (mljevenje klinkera, proizvodnja punila, priprema nekih sirovina za sinteriranje, taljenje, luženje i dr.), oslobađanje odnosno raščin pojedinih komponenti mineralnog zrna kao priprema za neki od postupaka koncentracije, te promjena strukturnih i kemijskih značajki odnosno mehaničko aktiviranje.

Sitnjenje se obično provodi u dvije faze od kojih je prva faza drobljenje, a druga mljevenje. Drobljenje je postupak u kojem se zrno sitni uslijed gnječenja između dviju čvrstih površina ili uslijed udara u neku čvrstu površinu. U prvom slučaju nanošenje sile je relativno sporo, a u drugom brzo. U mljevenju se zrno sitni uslijed abrazije i udara pod djelovanjem drobećih tijela u obliku kugle ili štapa, koja se kreću unutar prostora drobljenja. Kao drobeća tijela mogu se koristiti i krupniji komadi rude (autogeno mljevenje), valutice kvarca, te drugi oblici izrađeni od čelika, stakla i keramike.

Drobljenje je suh proces koji se obično provodi u dva stupnja, rjeđe u tri. Treći stupanj koristi se kad je ruda iznimno čvrsta i žilava ili kad je nepoželjno prekomjerno stvaranje sitnih čestica. Komadi rude veličine i do 1500 mm mogu se u prvom stupnju usitniti na veličinu od 100 do 200 mm, a u drugom na približno od 5 do 20 mm.

Mljevenje je u većini slučajeva mokar proces, no može biti i suhi kao npr. mljevenje cementa, ugljena, nekih punila, pigmenta i dr. To je završna faza sitnjenja, u kojoj se zrna veličine od 5 do 250 mm mogu usitniti na približno od 0,3 do 0,01 mm. Ponekad neku sirovinu možemo jednako uspješno usitniti samo drobljenjem ili samo mljevenjem, no troškovi drobljenja su približno 50% niži od troškova mljevenja.

Key-words: Comminution, Particle breakage, Energy, Crushing machines

Comminution is the process in which by activity of mechanical forces the dispersion state of solid material is being changed. The dispersion state is definitely determined by the granulometric composition particle (size distribution). The comminution is a consequence of the particle deformation, in what this deformation is dependent on the force offering mode, its velocity and size. The breaking of individual particles is the most efficient comminution method because the energy losses owing to friction and unproductive tension in the instant of breakage are avoided. The greatest energy losses occur in ball mills and that because of the friction between the newly-formed particles and of these particles and the balls and the mill lining. New insights have led to a better understanding of comminution in real conditions and to innovative interventions which increased the efficacy of the individual devices, and that with regard to particle size distribution and particle dislocation degree as well as to energy consumption. Some new kinds of crushers have been invented, of whose most mentioned are the high pressure roll crusher and the inertial cone crusher.

Teorija sitnjenja

Sitnjenje je vrlo složen proces, jer zrno tijekom sitnjenja stvara nova, sitnija zrna serijom stohastičkih događaja drobljenja, gdje svako zrno diskontinuirano mijenja stanje disperznog sustava. U principu, događaj drobljenja zrna ne može se prikazati diferencijalnim jednadžbama. Međutim, velik broj zrna u procesu sitnjenja omogućuje primjenu diferencijalnog računa pri promatranju promjena nekih prosječnih vrijednosti tako da se ulazna masa podijeli u klase. Teorijski pristup sitnjenja treba promatrati na različitim razinama, što znači ne samo temeljne postavke već i tehnološke aspekte drobljenja zrna, uključujući pojave kao što su kretanje zrna u prostoru drobljenja i aglomeracija. Prema tome, treba promatrati:

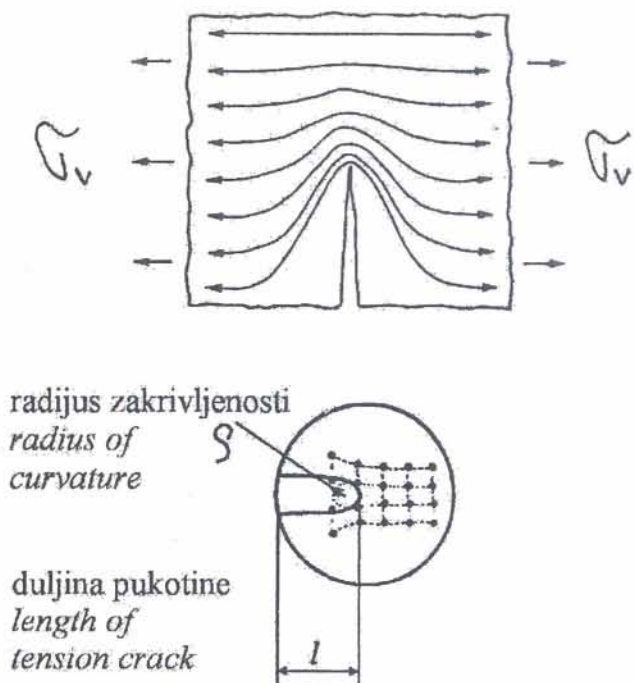
- slom odnosno raspad zrna u terminima fizike čvrstog stanja odnosno fizike loma
- drobljenje zrna kao elementarni proces sitnjenja
- aktivni volumen mlina gdje su zrna u stanju naprezanja i podvrgnuta drobljenju
- transport materijala u aktivni volumen i opet iz njega
- kinetiku i modele sitnjenja
- krivulju vremena zadržavanja materijala u mlinu
- ulogu fluida u sitnjenju
- određivanje performansi mlina i iskorištenja energije.

Na slici 1 prikazano je zrno s pukotinom početne dužine l opterećeno vlačnim naprezanjem σ_v (1). Vrh pukotine izložen je najvećem naprezanju, σ_{max} koje ovisi o obliku pukotine i njezinog radijusa zakrivljenosti ρ (Ocepek, 1976, Stražišar, 1996).

Za eliptične pukotine naprezanje je jednako

$$\sigma_{max} = \sigma_v \left(1 + \sqrt{\frac{2l}{\rho}} \right) \quad (1)$$

kako je l značajno veće od ρ , možemo pisati



Sl. 1. Koncentracija naprezanja oko pukotine
Fig. 1. Stress concentration around the crack

$$\sigma_{\max} = \sigma_v \sqrt{\frac{2l}{\rho}} \quad (2)$$

Naprezanje na vrhu pukotine upravo je proporcionalno s dužinom pukotine, a obrnuto proporcionalno s radijusom zakrivljenosti. Kada je pukotina dovoljno dugačka, a radijus zakrivljenosti dovoljno malen, naprezanje na vrhu pukotine približava se teorijskoj vrijednosti i pukotina se sama širi. Prema Griffithu (1920), deformacije koje nastaju u zrnu uslijed naprezanja povezane su s trošenjem energije koja je proporcionalna naprezanju i nastaloj deformaciji. Pojavom deformacije dolazi do promjena u strukturi kristalne rešetke i javlja se energetski potencijal. Ovaj potencijal osloboda se kao energija elastične deformacije koja se pak u trenutku sloma zrna pretvara u energiju novonastalih površina. Griffith je pretpostavio da se sva energija elastične deformacije utroši na stvaranje novih površina:

$$d \left(-\frac{\pi l^2 \sigma_v^2}{2E} + 2l\gamma_s \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\pi l \sigma_v^2}{2E} = 2\gamma_s \quad (4)$$

gdj je γ_s specifična površinska energija (J/m^2), a E modul elastičnosti (N/m^2)

odnosno da je naprezanje potrebno za širenje pukotine jednako:

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{4\gamma_s E}{\pi l}} \quad (5)$$

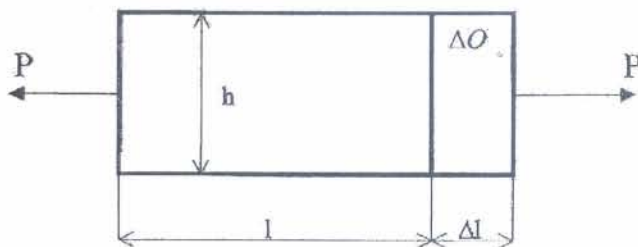
Griffith je promatrao samo specifičnu površinsku energiju, dok Irwin (1984) i Orowan (1949) promatraju i energiju potrošenu zbog neelastičnih deformacija na vrhu pukotine. Uzmemo li u obzir i specifičnu energiju nastalu zbog plastičnih deformacija, koja je često veća od specifične površinske energije, dolazimo do duljine pukotine:

$$l = \frac{4E(\gamma_s - \gamma_p)}{\pi \sigma_v^2} \quad (6)$$

gdje je γ_p specifična energija plastične deformacije.

Ovako definirana duljina pukotine zove se i kritična ili Griffithova duljina pukotine i za krte materijale iznosi 0,01–0,001 mm. Plastična deformacija zapaža se sve više kako se smanjuje veličina zrna tako da u jednom trenutku sitnjenje više nije moguće. Za kalcit je to veličina od približno 0,003–0,005 mm, a za kvarc 0,001 mm.

Fenomenološki pristup teoriji sitnjenja prvi su, svaki na svoj način, razradili Rittinger, Kick i Bond. Prema ovoj teoriji sitnjenje se može svesti na jednostavan model koji prikazuje rastezanje tanke pločice dužine l i visine h , koja se pod djelovanjem vanjske sile izduži za Δl .



Sl. 2. Model drobljenja kao postupak povećanja površine
Fig. 2. Model of crushing as a process of surface increase

Naprezanje koje se pri tom javlja jednako je:

$$\tau = \frac{P}{h} \quad (7)$$

Za povećanje površine pločice O mora se utrošiti rad A koji je jednak:

$$\Delta = P\Delta l = \tau h \Delta l = \tau \Delta O \quad (8)$$

Teorijski je prema tome rad potreban za povećanje površine kao i u sitnjenju proporcionalan naprezanju i novonastaloj površini. Na temelju teorijskih postavki spomenutih istraživača, a koje se međusobno bitno ne razlikuju, može se rad potreban za sitnjenje prikazati općim zakonom koji glasi:

$$A = -C \int_{d_0}^{d_1} \frac{d(d)}{d^n} \quad (9)$$

gdje je d_0 promjer zrna prije drobljenja, d_1 promjer zrna poslije drobljenja, C konstanta, a n eksponent koji ima vrijednost 1, 3/2 ili 2, ovisno o tome da li slijedi teoriju Kicka, Bonda ili Rittingera. Eksponent 1 obuhvaća područje sitnjenja krupnijih zrna (> 1 mm), gdje je potrebna energija praktično neovisna o veličini zrna, dok eksponent vrijednosti 2 pokriva područje u kojem potrebna energija brzo raste, a to je područje najfinijih zrna ($< 0,05$ mm). Između ovih područja nalazi se područje s vrijednošću eksponenta 3/2.

Deformacijski mehanizmi sitnjenja

Do sitnjenja dolazi uslijed deformacije zrna, pri čemu deformacija ovisi o načinu nanošenja sile, njezinoj brzini i veličini. Izbor deformacijskog mehanizma ovisi o krtošti, te čvrstoći odnosno žilavosti materijala, grano-sastavu ulaza, radnim značajkama uređaja za sitnjenje, ali i o tome kakav grano-sastav usitnjenog materijala i oblik zrna želimo. Tablica 1 prikazuje deformacijske mehanizme pojedinih uređaja za sitnjenje.

Tab. 1. Vrste deformacijskih mehanizama uređaja za sitnjenje

Deformacija	Sila	Brzina	Uređaj
deformacije između dvije plohe	- pritisak	5 m/s	- čeljusna drobilica
	- normalno naprezanje		
	- smicanje	10 m/s	- drobilica s valjcima
	- tangencijalno naprezanje		
	- rezanje		- mlin za rezanje
deformacije na jednoj plohi	- udar	50 m/s	- udarna drobilica - drobilica čekićara
deformacija u mediju	- udar - smicanje	200 m/s	- mlinovi na zračni mlaz

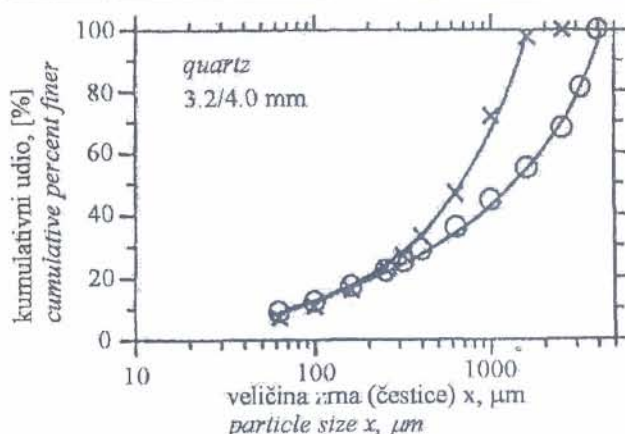
Drobljenje pojedinačnog zrna

Drobljenje pojedinačnog zrna može se postići gnječanjem između dviju ploha ili udaranjem u plohu. Istraživanja su pokazala da je drobljenje pojedinačnog zrna najučinkovitija metoda sitnjenja, jer su gubici energije uslijed trenja i neproduktivnog naprezanja u trenutku drobljenja izbjegnuti. Mjerenjem adsorpcije (adsorbirane) energije, grano-sastava i povećanja površine nastalih fragmenata prema modelu koji je predložio Schönert (1967) može se izračunati idealan proces sitnjenja. Ispitivanjem drobljenja zrna kvarca, kalcita i cementnog klinkera došlo se do zaključka da se sitnjenjem pojedinačnog zrna utroši samo 10–20% energije za postizanje istog stupnja drobljenja kao u mlinu s kuglama. Pored toga došlo se i do slijedećih zaključaka:

- krta zrna deformiraju se djelomično neelastično ako je zrno manje od 1 mm. Taj efekt raste sa smanjenjem veličine zrna
- naprezanje zrna i energija drobljenja rastu sa smanjenjem veličine zrna
- adsorpcija energije glavni je čimbenik koji utječe na drobljenje zrna
- brzina naprezanja i temperatura utječu na drobljenje zrna sklonih plastičnim deformacijama dok na krta zrna ne utječu
- usputna tangencijalna naprezanja ne poboljšavaju drobljenje, međutim zahtijevaju dodatnu energiju. Zbog toga naprezanje zrna djelovanjem sila trenja nije poželjno.

Drobljenje posteljice zrna

Ova istraživanja razvila su se unazad 20 godina (Hoffmann, et al., 1976; Schönert, 1994; Weichert, 1988), što je dovelo do razvoja visokotlačne drobilice s valjcima, a njezinim ispitivanjem došlo se do novih spoznaja o teoriji sitnjenja:



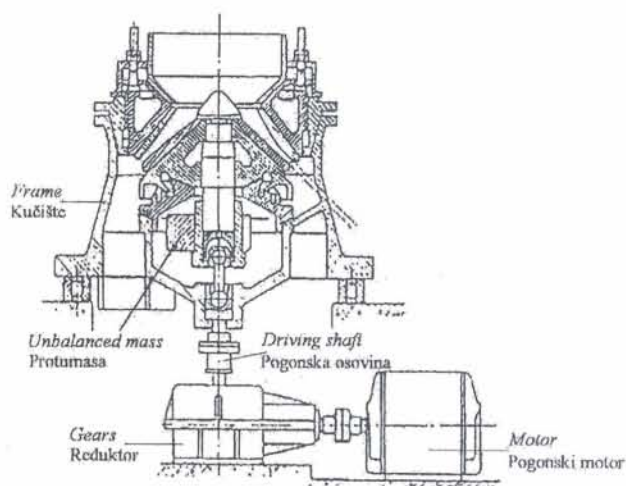
Sl. 3. Grano-sastav pojedinačnog zrna (x) i posteljice (o)

Fig. 3. Grain size distribution of single particle (x) and particle bed (o)

- Zbijenost posteljice ovisi o veličini zrna, grano-sastavu, razmještaju zrna u posteljici i smještaju posteljice u prostoru drobljenja. Drobljenje ovisi o adsorbiranoj energiji.
- Naprezanje pojedinog zrna uvijek je učinkovitije od naprezanja posteljice. Na sl. 2 prikazano je drobljenje pojedinačnih zrna klase 3,2/4 mm i njihove posteljice. Sva pojedinačna zrna su izdrobljena dok je u posteljici ostalo neizdrobljenih zrna oko 20%. U području najfinijeg grano-sastava nema razlike u veličini zrna, dok su u srednjem i gornjem dijelu razlike u veličini zrna značajne. Ovi rezultati također ukazuju da novonastale površine nisu uvijek pravi pokazatelj učinkovitosti drobljenja, jer donji dio grano-krivulje određuje specifičnu površinu. U sitnjenju je međutim važno drobljenje krupnih zrna.
- Sva zrna neće biti izdrobljena čak ni kad je posteljica sabijena pod visokim pritiskom. Razlog je što se zrna koja nisu izdrobljena na početku okružuju sa sve više fragmenata. Čak ako i broj kontakata raste, naprezanje postaje sve jednoličnije i sustav se približava kvazistacionarnoj situaciji.
- Sitnjenje zrna širokog grano-sastava je vrlo složeno. Naime, sitna zrna štite krupnija od drobljenja, dok krupna drobe ona sitnija. Zbog toga energija nije ravnomjerno raspoređena na sva zrna ovisno o njihovoj masi. Sitna zrna prihvaćaju više energije, a krupnija manje.
- Maksimalna se proizvodnja finih zrna postiže kada ulazni materijal ne sadrži sitna zrna.
- Ponovno naprezanje posteljice s istim pritiskom ne dovodi do dodatnog sitnjenja. Posteljica mora biti ponovo formirana prije novog naprezanja.
- Drobljenje posteljice iziskuje dvostruko više energije nego drobljenje pojedinačnog zrna. Gubitak energije posljedica je unutarnjeg trenja.

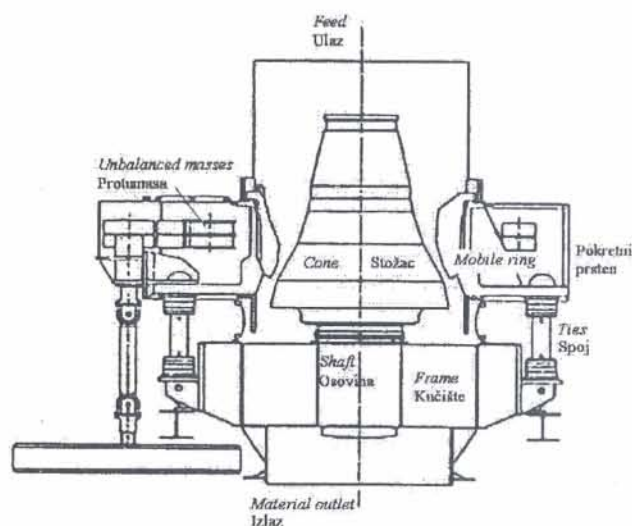
Energetski problemi sitnjenja

Šezdesetih godina razvija se koncept koji sitnjenje pramatra kroz elastične i plastične deformacije na razini kristalne rešetke. Utvrđeno je da je utrošak energije u stvarnom sitnjenju dva i više puta veći od teorijskog za postizanje jednake površine. I to usprkos činjenici da je čvrstoća stvarnog mineralnog zrna dva do tri puta manja. u odnosu na teorijske karakteristike (Revnitsev, 1988). Npr. mljevenjem u mlinu s kuglama imamo sljedeći raspored energije:



Sl. 4. Inercijska konusna drobilica – KID

Fig. 4. Inertia cone Crusher – KID



Sl. 5. Drobilica Rhodax

Fig. 5. Rhodax crusher

- netto energija utrošena na drobljenje..... 0,6%
- gubitak električne energije kao rezultat transformacije u kinetičku energiju kugli (u zupčanicima, ležajevima i dr.)..... 12,3%
- gubitak energije na procese koji prate drobljenje kroz zagrijavanje bubnja, kugli i sirovine..... 84,7%
- ostalo..... 2,4%.

Gubici nastali transformacijom energije posljedica su: elastičnih i plastičnih deformacija, formiranja različitih kristalografskih defekata, mehano-kemijskih reakcija, emisije akustičnih i elektromagnetskih valova, trenja između novonastalih zrna; navedeni procesi prate tvorbu novih površina tijekom drobljenja.

Mala energetska učinkovitost u drobljenju i mljevenju posljedica je načina nanošenja naprezanja: naprezanje se nanosi na ukupni volumen materijala u uređaju. Elastične deformacije u zrnu pod naprezanjem na koncu se gube kao toplina. Velik dio energije troši se na plastične deformacije. Dio te energije akumulira se u novonastalim defektima i to posebno u slojevima blizu površine zrna, dok se dio akumulira ispred vrha pukotine. Formiranje plastične zone ispred pukotine koja se širi čini pukotinu stabilnom odnosno čini zrno otpornim na drobljenje.

Dio energije troši se na pokretanje novonastalih dislokacija i disklinacija pri interakciji s drugim defektima i stvara se sustav inicijalnih mikro i makro pukotina. Najkritičniji gubitak energije je uslijed trenja između novostvorenih zrna međusobno i tih zrna s kuglama i oblogom mlina.

Treba stvoriti uvjete za drobljenje uzduž ploha sraslosti pojedinih minerala (uzduž klivaža). Transkristalno drobljenje treba svesti na minimum, jer ne samo da se tako troši energija nego i dalje imamo srasla zrna i značajno premeljavanje. Prema tome, raščin mora biti geometrijski selektivan.

Kako sad organizirati selektivno drobljenje na principima fizike čvrstog stanja?

– Da bi se smanjila potrošnja energije na elastične deformacije, naprezanje treba biti koncentrirano pretežno u zoni gdje se stvaraju nove površine, tj. na međufaznom kontaktu odnosno plohi sraslosti dvaju minerala. Budući da se gradijent naprezanja naglo smanjuje udaljavanjem od vrha zone sraslosti, ostatak volumena zrna ostaje bez naprezanja tj. deformacije.

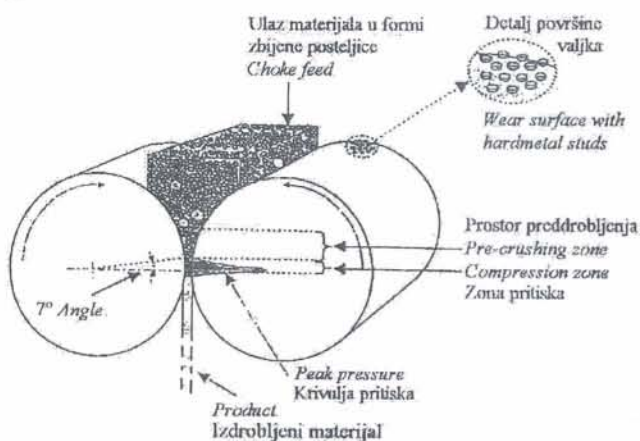
– Krti materijali traže kvazi-statično naprezanje, a oni kojima je deformacijska krivulja djelomično u plastičnom području traže dinamičko naprezanje. Udio plastičnih naprezanja u sitnjenju zrna krtih minerala može biti i do 50%, a kad mramora, vapnenca, apatita i do 8%.

– Plohe sraslosti često su pune defekata i nečistoća i obično sprečavaju nastanak pukotine. Da bi se postigao orijentirani gubitak naprezanja treba proizvesti naprezanje koje, ovisno o značajkama mineralnog zrna, treba biti mehaničko (kvazistatičko ili dinamičko), termičko, magnetsko, električno i sl. Ta naprezanja moraju biti dovoljna za slabljenje veze između zrna no ispod vrijednosti koje dovode do transkristalnog loma zrna. Cikličkim dovođenjem naprezanja postiže se postupno akumuliranje promjena na međufaznoj granici. Dodavanje aditiva dovodi do promjena na površini minerala koje sprečavaju zatvaranje novostvorenih pukotina i aglomeraciju.

– Interakcije zrna koje dovode do neproduktivnog utroška energije treba svesti na minimum, odnosno treba izbjeći kontakte koji ne dovode do drobljenja. Upravo ti neproduktivni kontakti daleko nadmašuju one kod kojih dolazi do drobljenja.

Za učinkovitije sitnjenje treba osigurati tzv. slobodno drobljenje (drobilica s valjcima). Kao prvo, putanja radnog elementa (čeljust, valjak, kugla) treba biti što kraća. Što je volumen drobljenja (prostor drobljenja) manji u odnosu na kapacitet, veći je udio izdrobljenog materijala (novostvorenih površina) po jedinici volumena materijala. Drugim riječima, proces drobljenja zrna treba trajati što kraće. Da bi gubici uslijed trenja bili što manji, proces treba biti sa sporim kretanjem radnih elemenata i materijala, odnosno relativne brzine tijela koja sudjeluju u drobljenju trebaju biti što manje. Pri tome akceleracija može biti po volji visoka kao npr. kod vibracijskog mlina. Dovoljno usitnjena zrna treba odstraniti što je moguće prije.

Predkoncentracijom, korištenjem pliva-tone separacije ili radiometrijskog sortiranja može se odstraniti velik dio jalovine prije drobljenja rude. Tercijarno sitnjenje u mlinu s kuglama nije učinkovito jer se ulazi s prekrupnom rudom. Gubitak energije u mljevenju posljedica je smanjenja veličine zrna i povećanja otpora drobljenju zbog statičkog rasporeda pukotina u zrnu.



Sl. 6. Visokotlačna drobilica s valjcima
Fig. 6. High-pressure roller crusher

Pretpostavlja se da bi se slabljenjem čvrstoće zrna u postupku prednapreznja, kao što se postiže miniranjem prije primarnog drobljenja, moglo doći da boljih rezultata.

Udarno drobljenje pogodno je za neabrazivne materijale. Ima visok stupanj drobljenja, a zrna se drobe pojedinačno čime se utrošak energije uslijed trenja među zrnima svodi na minimum. Udarnim drobljenjem slabije se i intergranularne veze. Čitav spektar valova napreznja prenosi se s radnih elemenata na zrno i širi kroz zrno. Direktni i reflektirani valovi adsorbiraju se na međufaznim kontaktima, gdje dolazi do koncentracije napona i formiranja mikro-pukotina. Glavni problem šire primjene udarnog drobljenja je uglavnom tehničke naravi, kao npr. postizanje većih brzina rotacije radnih elemenata, pronalaženje materijala otpornih na habanje, te načina samozaštite radnih elemenata i prostora drobljenja od habanja.

Novi uređaji za drobljenje

Za drobljenje abrazivnih materijala danas se još uvijek najčešće koriste kružne i konusne drobilice. U njima se materijal drobi gnječenjem između nepokretnog i pokretnog stošca, pri čemu postiže stupanj drobljenja od 1:3 do 1:7, a ponekad i veći. Posljednjih deset godina konstruirano je nekoliko novih tipova drobilica prema novim saznanjima teorije sitnjenja, od kojih treba spomenuti inercijske konusne drobilice KID i RHODAX, te visokotlačnu drobilicu s valjcima (Cordonnier et. al., 1995).

Droblilica KID prikazana je na slici 4. Umjesto ekscentrične osovine ima osovinu na koju je pričvršćena protumasa. Rotacijom tako nebalansirane osovine i na njoj ovješene stošca izbjegava se ograničenje amplitude i omogućava optimalan kontakt s materijalom koji se drobi. Materijal se drobi pod pritiskom koji ovisi o sili koju uzrokuje protumasa. Protumasa se može mijenjati, a time i sila koja djeluje na materijal. Dinamičko opterećenje i frekvencija veći su nego kod klasičnih drobilica. Pokretni stožac kreće se po izlomljenoj kružnoj krivulji s velikim brojem kontakata ovisno o čvrstoći i rasporedu zrna u sloju koji se drobi. Na taj način postiže se samoreguliranje debljine sloja tako da se materijal drobi do trenutka napuštanja prostora drobljenja. Pored drobljenja dolazi i do slabljenja strukture materijala što pogoduje mljevenju. Takvim drobljenjem može se uštedjeti, računajući i mljevenje, oko 20% energije i povećati kapacitet do 30%.

Droblilica RHODAX također koristi protumase, ali smještene u pokretnom prstenu koji čini dio vanjskog stošca (sl.5). Prsten je spojen s postoljem u koje je usadena osovina na koju je ovješene unutarnji stožac. Ovaj stožac slobodno se okreće na osovini, a može se dizati i spuštati čime se regulira veličina izlaznog otvora. Rotacijom protumasa od nekoliko stotina okretaja u minuti sila drobljenja prenosi se preko prstena na materijal. Sila je konstantna i neovisna o čvrstoći materijala tako da se može postići pritisak od 10 do 50 MPa i stupanj drobljenja od 1:4 do 1:30. Materijal na svom putu prema izlazu prolazi kroz 4 do 5 ciklusa gnječenja, pri čemu u svakom ciklusu unutarnji stožac napravi nekoliko desetaka okretaja u minuti. Promjenom veličine izlaznog otvora, statičkog momenta protumasa i brzine njihove rotacije mogu se mijenjati uvjeti drobljenja ovisno o čvrstoći materijala i traženom grano-sastavu. Ulazni materijal maksimalne veličine do 200 mm može se usitniti na – 20 mm s udjelom od 25 do 35% zrna – 4 mm. Udio kubičnih zrna veći je i do 50% u odnosu na klasične konusne drobilice.

Visokotlačna drobilica s valjcima sastoji se od dva valjka koji rotiraju oko osovine smještenih u odgovarajućim ležajevima (sl. 6). Posebnim hidrauličkim sustavom pogonjeni valjak pritišće materijal u prostoru drobljenja pritiskom od 50 do 100 MPa, tako da izdrobljeni materijal izlazi iz drobilice djelomično briketiran. Takvim načinom drobljenja ne dolazi samo do sitnjenja materijala već i do stvaranja mikropukotina unutar pojedinih zrna, što pridonosi manjoj potrošnji energije u slijedećem stupnju sitnjenja. Sitnjenje je dijelom i selektivno, jer se mikropukotine stvaraju uzduž kontaktnih ploha pojedinih mineralnih zrna, čime se pospešuje raščina a time i iskorištenje u procesu koncentracije. Ušteda energije kreće se od 20% pri kombinaciji drobilica-mlin s kuglama, pa do 50% u zatvorenom krugu drobilica-klasifikator. Maksimalna veličina zrna materijala koji se drobi obično nije veća od razmaka između valjaka tako da je odnos promjera maksimalnog zrna i valjaka i do 1:40. Visokotlačna drobilica s valjcima koristi se za mljevenje klinkera, troske iz proizvodnje čelika, sirovina za proizvodnju cementa, kimberlita i dr., a kapacitet joj je i do 1500 t/h.

Zaključak

Teorija sitnjenja posljednjih se dvadesetak godina značajnije oslanja na fiziku čvrstog stanja, posebno teoriju loma, a drobljenje zrna promatra kao mehaničko-energetski problem. Nove spoznaje dovele su do boljeg razumijevanja sitnjenja u realnim uvjetima i razvoja modela koji omogućuju prognoziranje rada uređaja za sitnjenje, nadzor i upravljanje procesima sitnjenja. Došlo je do izvjesnih inovacijskih zahvata kojima je povećana učinkovitost pojedinih uređaja i to kako u pogledu grano-sastava i raščina zrna tako i u pogledu utroška energije. Konstruirano je nekoliko novih drobilica od kojih se u praksi najčešće spominju visokotlačna drobilica s valjcima i inercijske konusne drobilice. I pored postignutih rezultata energetska učinkovitost sitnjenja ostaje i dalje temeljni problem koji će u budućnosti trebati rješavati.

Primljeno: 2000-04-11

Prihvaćeno: 2000-09-21

LITERATURA

- Cordonnier, A., Evrard R., Obry, Ch. (1995): New Compression Grinding Technologies. XIXth Int. Min. Proc. Cong., Vol. 1, 71–77, San Francisco.
- Hoffmann, N., Flügel, F., Schönert, K. (1976): Die Bruchstück-Größenverteilung bei der Zerkleinerung von binären und ternären Mischungen. *Chemie-Ingenieur-Technik*, Vol. 48, 3 29–337.
- Ocepek, D. (1976): Mehanska procesna tehnika. DDU Univerzum, 275 pp, Ljubljana.
- Revnitsev, V. I. (1988): We Really Need Revolution in Comminution. XVIth Int. Min. Proc. Cong., 93–114, Stockholm.
- Salopek, B., Tomašić, .I. (1990): Textural-Structural Characteristics of Dolomites and Their Influence on the Comminution Behaviour of the Rock. 7th European Symp. Comminution, Vol. 1, 283–295, Ljubljana.
- Salopek, B., Iveković, D., Krasić, D., Kapor, R. (1987): Ispitivanje meljivosti vapnenca uz dodatak intenzifikatora mljevenja. 2. jug. kongres za kem. inž. i proc. tech., Vol. II; 152–154, Dubrovnik.
- Schönert, K. (1967): Modellrechnung für Zerkleinerungsprozesse mit Ergebnissen der Einzelkornversuche. 2nd European Symp. Comminution, 241–280, Amsterdam.
- Schönert, K. (1994): The influence of Particle Bed Configurations and Confinement on Particle Breakage. 8th European Symp. Comminution, 7–26, Stockholm.
- Stražičar, J. (1996): Mehanska procesna tehnika I. Univerza v Ljubljani, 138pp, Ljubljana.
- Weichert, R. (1988): Correlation between Probability of Breakage and Fragment Size Distribution of Mineral Particles. *Int. J. Mineral Processing*, Vol. 22, 1–8.

Comminution – the first Step in Mineral Dressing

B. Salopek & G. Bedeković

Comminution is the process in which by activity of mechanical forces the dispersion state of solid material is being changed. In that, e.g. from bigger pieces of ore or rock originate smaller pieces resp. from coarser particles smaller ones. The dispersion state is definitely determined by the particle size distribution.

The purpose of comminution is to obtain particles of definite size and shape suitable for the production of concrete and asphalt, to increase the particle surface and so its reactivity, to liberate resp. dissociate the individual components – as a preparation for one of the concentration procedures or change of structural and chemical characteristics resp. mechanical activation. The comminution is a consequence of the particle deformation, in what this deformation is depends on the force offering mode, its velocity and size. The choice of the deformation mechanism depends on the brittleness and solidity resp. toughness of the material, size distribution of the feed, the working characteristics of the comminution equipment but also on the needed size distribution of the crushed material and its particle shape.

The breaking of individual particles is the most efficient comminution method because the energy losses owing to friction and unproductive tension in the instant of breakage are avoided. The comminution of a particle bed of a broad size distribution – such as in practice are prevailing – is a very complex affair. Smaller particles protected larger ones while the larger are crushing the smaller. Therefore the incoming energy cannot be distributed to the particles proportionally to their mass, so the smaller particles are accepting more energy and the larger

less. The greatest energy losses occur in ball mills and that because of the friction between the newly-formed particles and then of these particles and the balls and the mill lining. The net-energy spent for the particle crushing is not bigger than 1%. To hold the friction losses as low as possible, the comminution process must be running at a slow movement of the working elements, and the material resp. the relative velocities of the bodies taking part in the crushing must be as low as possible. In that, the acceleration may be high at will, as for instance with the vibrating mill. Sufficiently crushed particles must be removed as early as possible.

Using procedures of pre-concentration, by application of dense-medium concentration or radiometric treatment, a big part of waste can be removed before the ore crushing itself.

New insights have led to a better understanding of comminution in real conditions and to the development of models which make it possible to prognosticate the mode of work of the comminution equipment itself, and of control and operation of the comminution processes. There have been some innovative interventions which increased the efficacy of the individual devices, and that with regard to particle size distribution and particle dislocation degree as well as to energy consumption. Some new kinds of crushers have been invented, of whose most mentioned are the high pressure roll crusher and the inertial cone crusher. In spite of the achieved results, the energetic efficacy of comminution remains also farther on as the basic problem which in the future must be solved.