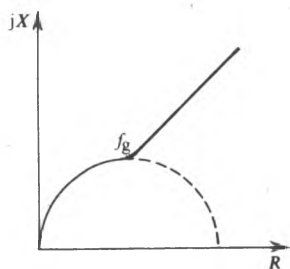


vrtložne struje u limovima jezgre, koje uzrokuju potiskavanje magnetskog toka. Zbog toga se na području visokih frekvencija ne mogu jalovi i djelatni gubici u jezgri nadomjestiti gubicima u nekom određenom induktivitetu L_0 i njemu paralelno spojenom otporu R_0 , kao u nadomjesnoj shemi transformatora (sl. 1). Vektorski dijagram impedancije paralelne kombinacije R_0 i L_0 kružnog je oblika i podudara se s dijagramom impedancije svitka sa željeznom jezgrom samo do neke određene frekvencije, tzv. granične frekvencije f_g . Nakon te frekvencije raste impedancija svitka sa željeznom jezgrom, tako da je pri tom realna komponenta uvijek jednaka imaginarnoj (sl. 26). Granična frekvencija normalnih željeznih limova obrnuto je razmjerna s kvadratom debljine lima i iznosi kod limova za ovu svrhu 1...20 kHz. Na višim frekvencijama sve su važniji kapaciteti između namota te kapaciteti između slojeva i zavoja.

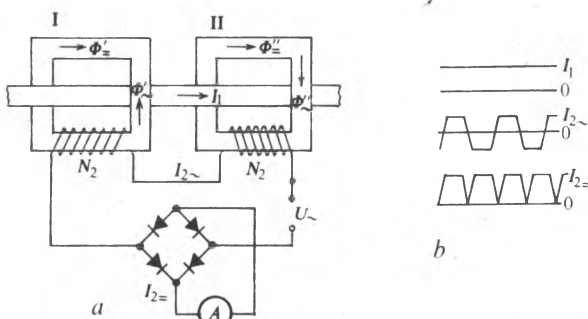


Sl. 26. Vektorski dijagram impedancije svitka sa željeznom jezgrom u ovisnosti o frekvenciji

Ako se o svemu tome vodi računa, mogu se izvesti strujni transformatori koji zadovoljavaju sve do frekvencija od nekoliko megaherca.

Strujni transformatori za istosmjernu struju. Za mjerenje velikih istosmjernih struja upotrebljavaju se transformatori koji mnogo podsjećaju na strujne transformatore za izmjeničnu struju.

Uobičajeni način mjerenja istosmjerne struje pomoću instrumenata sa zakretnim svitkom i paralelnog otpornika (šanta) nije pogodan za mjerenje vrlo velikih istosmjernih struja, jer tada nastaju veliki gubici u šantu (shuntu). Tako, npr., pri mjerenju struje od 10000 A i uobičajenog napona na šantu od 60 mV, nastaju gubici od 600 W koji uzrokuju poteškoće pri konstrukciji šanta. Zbog toga se jake struje obično mjere drugim metodama, od kojih se neke zasnivaju na principu magnetskih transdukatora. Vod kojim teče mjerena istosmjerna struja (sl. 27a) prolazi kroz dvije jezgre od dobrog magnetskog materijala s praktički pravokutnom krivuljom magnetiziranja.



Sl. 27. Strujni transformator istosmjerne struje. a shematski prikaz, b primarna struja I_1 , izmjenična sekundarna struja $I_2 \sim$ i istosmjerna sekundarna struja $I_2 =$

Oko tih jezgri namotan je sekundarni namot koji je spojen u seriju s ampermetrom i priključen na izmjenični napon konstantne vrijednosti. Namoti prve i druge jezgre spojeni su u seriju, pazeći pri tom da eventualne nagle promjene istosmjerne struje induciraju u sekundarnim namotima napone koji se međusobno poništavaju. Zbog toga će se tokom jedne poluperiode u jednoj jezgri podudarati smjerovi istosmjernog i izmjeničnog toka, dok će u drugoj jezgri njihovi smjerovi biti suprotni.

U jezgri gdje se izmjenični tok podudara s istosmjernim ne može doći do povećanja njezine indukcije jer je jezgra veoma

zasićena istosmjernim tokom. Za vrijeme te poluperiode bit će, dakle, izmjenični tok u toj jezgri jednak nuli. U drugoj jezgri može se stvoriti pripadni izmjenični tok, ali samo onda ako kroz sekundarni namot poteče takva struja da jezgra više ne bude zasićena. To je moguće samo onda ako sekundarni amperzavoji budu gotovo jednaki primarnim, tj. ako se budu razlikovali samo toliko koliko je potrebno za održavanje određenog toka u jezgri. Uz upotrebu dobrih magnetskih materijala ta razlika je malena, pa vrijedi: $I_1 N_1 = I_2 N_2$. Kako je redovno $N_1 = 1$, jer kroz jezgre prolazi samo jedan primarni vodič slijedi: $I_1 = I_2 N_2$. Ovdje su, dakle, kao i kod strujnih transformatora za izmjenične struje, primarni amperzavoji jednaki sekundarnima, ako se u jednom i drugom slučaju zanemari struja magnetiziranja.

Zbog gotovo pravokutne karakteristike upotrijebljenog magnetskog materijala dobiva se gotovo pravokutan oblik sekundarne struje I_2 (sl. 27b), koju je najprikladnije mjeriti instrumentom sa zakretnim svitkom i ispravljačima u Graetsovom spoju. Granice pogrešaka koje se postižu takvim mjerenjem iznose 0,2...1%. Visina izmjeničnog napona ne utječe primjetno, pa nisu potrebni posebni stabilizatori izmjeničnog napona.

Ta metoda se primjenjuje za mjerenje istosmjernih struja jakosti nekoliko stotina ampera do nekoliko stotina tisuća ampera. Sekundarno opterećenje može iznositi i do 100 W.

Ispitivanje mjernih transformatora. Prijenosne i fazne pogreške mjernih transformatora mjere se najčešće pomoću etalonskih mjernih transformatora jednakog ili podjednagog omjera prijenosa i prikladnih diferencijalnih ili kompenzacijskih metoda. Upotrebljavaju se i mjerni uređaji koji omogućuju izravno očitavanje njihovih pogrešaka ili, pri većim serijama, automatizirani uređaji koji crtaju ili tiskaju mjerne rezultate i sami ugadaju potrebne vrijednosti ispitnog kruga prema zadanom programu. Njihova izolacijska svojstva provjeravaju se ispitivanjem stranim naponom industrijske frekvencije, ispitivanjem induciranim naponom i ispitivanjem udarnim naponom, slično kao i kod transformatora snage (v. *Transformatori*). Provode se i različita druga ispitivanja koja pomažu da se ocijene dielektrična svojstva izolacije i njezin vijek trajanja. Među takvima je i mjerenje parcijalnih izbijanja u izolaciji.

LIT.: J. Goldstein, Die Messwandler. Verlag Birkhäuser, Basel 1952. — R. Bauer, Die Messwandler. Springer Verlag, Berlin 1953. — J. Kopeček, M. Dvořák, Pstrojove transformatory. Academia, Praha 1966. — A. Wright, Current transformers, their transient and steady-state performance. Chapman and Hall, London 1968. — W. Brendler, Messwandler. VEB Verlag Technik, Berlin 1976. — V. Bego, Mjerni transformatori. Školska knjiga, Zagreb 1977.

V. Bego

MLJEVENJE, tehnološki proces sitnjenja čvrstih materijala. Kao operacija povećavanja površine obrađivanog materijala mljevenje obično slijedi nakon drobljenja (v. *Drobljenje*, TE 3, str. 395) sa svrhom da se poboljša ili promijeni neko od fizikalnih svojstava materijala (npr. cementa), da se oslobode mineralne komponente u sraslim zrnima (npr. u oplemenjivanju mineralnih sirovina), ili da se promijene kemijska svojstva (npr. mehaničko-kemijsko aktiviranje u procesu izluživanja). Mljevenjem se dobiva proizvod u granulacijskom rasponu od 0,005...25 mm, pa se prema dobivenom granulatu razlikuje koloidno, fino, srednje i grubo mljevenje. Energija potrebna za mljevenje ovisi o postignutoj finoći samljevenog materijala (sl. 1).

Teorija mljevenja. Svako mehaničko opterećenje prouzrokuje u čvrstoj tvari deformaciju i unutrašnja naprezanja, već prema svojstvima materijala. Mnoga su ta svojstva uvjetovana kristalnom strukturom tvari i njenim defektima (točkastim, linearnim, dislokacijskim). Prema fizikalnoj teoriji sitnjenja (A. A. Griffith, 1920) drobljenje minerala odvija se u dvije faze: nastanak pukotine i njeno širenje. Polazeći od strukture idealne kristalne rešetke može se izračunati potrebno naprezanje kidanja prema relaciji

$$\sigma_{ideal} \approx \frac{E}{10}, \quad (1)$$

gdje je E modul elastičnosti. U prirodnim materijalima nema idealne čvrstoće kidanja zbog spomenutih strukturnih defekata, tako da je stvarna čvrstoća za $10^2 \dots 10^3$ puta manja od idealne. Proces sitnjenja počinje na tim oslabljenim mjestima ako je nastala mikropukotina nestabilna.

To se postiže, prema Griffithu, kad je oslobođena energija elastične deformacije W_d jednaka ili veća od energije W_p na graničnim površinama novostvorene pukotine koja ima duljinu l i na koju djeluje naprezanje σ . Te su energije

$$W_d = \frac{\pi \sigma^2 l^2}{4E} \quad \text{i} \quad W_p = 2l\gamma, \quad (2)$$

gdje je γ specifična energija graničnih površina. Kriterij za nestabilno širenje pukotine, odnosno za sitnjenje, određen je izrazom

$$\frac{\partial W_d}{\partial l} = \frac{\partial W_p}{\partial l}, \quad (3)$$

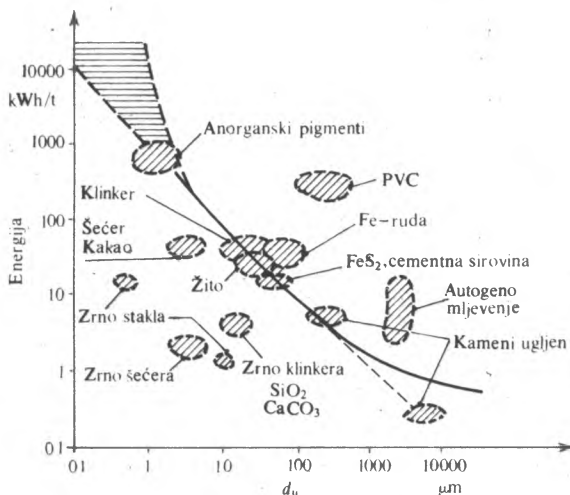
iz kojeg se dobiva najmanje naprezanje potrebno za širenje pukotine koje iznosi

$$\sigma = \frac{4E}{\pi l}, \quad (4)$$

odnosno kritična duljina (Griffithova duljina) nestabilne pukotine

$$l_{\text{Griff}} = \frac{4E\gamma}{\pi\sigma^2}. \quad (5)$$

Kritična duljina pukotine za krte materijale iznosi $1 \dots 10 \mu\text{m}$. Pukotina se tokom mljevenja širi kroz materijal jer su na njenu vrhu koncentrirana naprezanja. Tako se postiže velika brzina širenja pukotine uz relativno visoke lokalne temperature.



Sl. 1. Utrošak energije pri mljevenju različitih materijala

Pri deformaciji materijala djeluje energija vanjskog naprezanja, energija unutrašnjeg naprezanja i energija termičkih naprezanja. Te energije utrošit će se na slobodnu energiju graničnih površina, na energiju plastičnih deformacija, te na električnu, toplinsku i kemijsku energiju. Za mljevenje je korisna samo energija graničnih površina, pa zbog toga procesi sitnjenja spadaju među energetske procese s veoma niskim stupnjem iskorištenja ($\sim 1\%$).

Za objašnjenje razlike između fizikalnog i tehničkog rada sitnjenja predloženo je mnogo hipoteza, od kojih su najpoznatije Rittingerova, Kickova i Bondova. P. Rittinger (1867) pretpostavlja da je rad (kWh/t) potreban za sitnjenje jedinice mase materijala proporcionalan novostvorenoj površini prema izrazu

$$A = C(F_1 - F_0), \quad (6)$$

gdje je C empirijska konstanta (kWh/t^2), F_1 specifična površina čestica materijala poslije, a F_0 specifična površina prije sitnjenja. F. Kick (1885) pretpostavio je konformnost procesa sitnjenja i definirao je osnovni rad A_0 potreban za sitnjenje kocke s duljinom brida d_0 na kocke s duljinom brida $d_0/10$. Ako mljevenjem nastaju kocke s bridom $d_1 = d_0/10^n$, potrebni rad (kWh/t) za mljevenje iznosi

$$A = nA_0, \quad (7)$$

gdje je n određen izrazom

$$n = \lg \frac{d_0}{d_1}, \quad (8)$$

pa je potrebni rad

$$A = A_0 \lg \frac{d_0}{d_1}, \quad (9)$$

F. C. Bond (1952) polazi od strukturnih defekata, pa smatra da je rad sitnjenja obrnuto proporcionalan duljini pukotine koja je definirana izrazom $1/\sqrt{d}$, gdje je d promjer zrna. Rad za sitnjenje (kWh/t) izračunava se iz izraza

$$A = W_i \left(\frac{10}{\sqrt{d_1}} - \frac{10}{\sqrt{d_0}} \right), \quad (10)$$

gdje je W_i rad potreban za sitnjenje materijala koji ima 80% zrna s promjerom manjim od $100 \mu\text{m}$, a d_1 i d_0 klase zrna poslije i prije mljevenja, od kojih 80% prolazi kroz otvore sita s dimenzijama otvora koje odgovaraju promjerima d_1 i d_0 . Za određivanje rada W_i razvijene su eksperimentalne metode, jer njegovo poznavanje omogućuje dimenzioniranje mlina, određivanje snage motora, veličine tijela za mljevenje, te habanje kućišta i obloge mlina.

* Sve tri hipoteze mogu se, prema D. R. Walkeru (1954), izraziti relacijom

$$A = -C \int_{d_0}^{d_1} \frac{dd}{d^n}, \quad (11)$$

gdje je C konstanta, a eksponent n ima vrijednost 2 za Rittingerovu, vrijednost 1 za Kickovu, a $3/2$ za Bondovu hipotezu. Iz relacije (11) slijedi da je rad potreban za sitnjenje obrnuto proporcionalan veličini zrna. Tako se za primarno drobljenje (od $\sim 1000 \text{ mm}$ na $\sim 25 \text{ mm}$) troši $3 \dots 4 \text{ kWh/t}$, $5 \dots 6 \text{ kWh/t}$ za granuliranje (od $\sim 25 \text{ mm}$ na $\sim 5 \text{ mm}$), a $100 \dots 1000 \text{ kWh/t}$ za koloidno mljevenje (od $\sim 0,1 \text{ mm}$ na $\sim 0,001 \text{ mm}$).

Rezultati sitnjenja ocjenjuju se različito. Specifični rad sitnjenja na jedinicu mase određen je relacijom

$$A_m = \frac{A}{m}, \quad (12)$$

gdje je m masa mljevenog materijala, dok je specifični rad na jedinicu površine određen izrazom

$$A_F = \frac{A}{\Delta F}, \quad (13)$$

gdje je ΔF povećanje površine čestica pri sitnjenju.

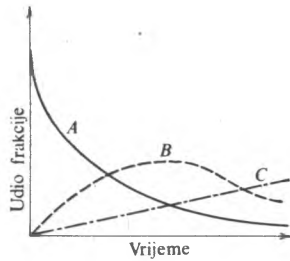
Pomoću izraza (13) može se odrediti energetski stupanj sitnjenja koji iznosi

$$\eta = \frac{\gamma \Delta F}{A}, \quad (14)$$

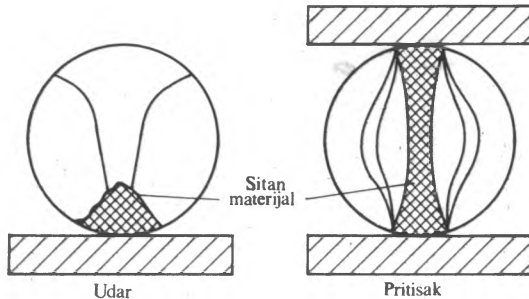
dok se stupanj sitnjenja određuje pomoću izraza

$$\eta_0 = \frac{d_0}{d'_0}, \quad (15)$$

gdje su d_0 i d'_0 maksimalne dimenzije zrna prije i poslije sitnjenja.



Sl. 2. Formiranje pojedinih granulacija u mlinu u funkciji vremena mljevenja



Sl. 3. Deformacijski mehanizmi sitnjenja

Za definiranje sitnjenja najviše se upotrebljava promjena granulometrijskog sastava, i to kao funkcija vremena i položaja u uređaju za mljevenje. Promatrajući zrna različite veličine u uređaju za sitnjenje, može se utvrditi da se udio zrna krupnih dimenzija (krivulja *A* na sl. 2) prema vremenu zadržavanja u zoni deformacije stalno smanjuje, da se udio zrna

srednjih dimenzija (krivulja *B*) najprije povećava, zbog mljevenja krupnih zrna, da bi se zatim smanjivao i da se udio zrna sitnih dimenzija (krivulja *C*) stalno povećava.

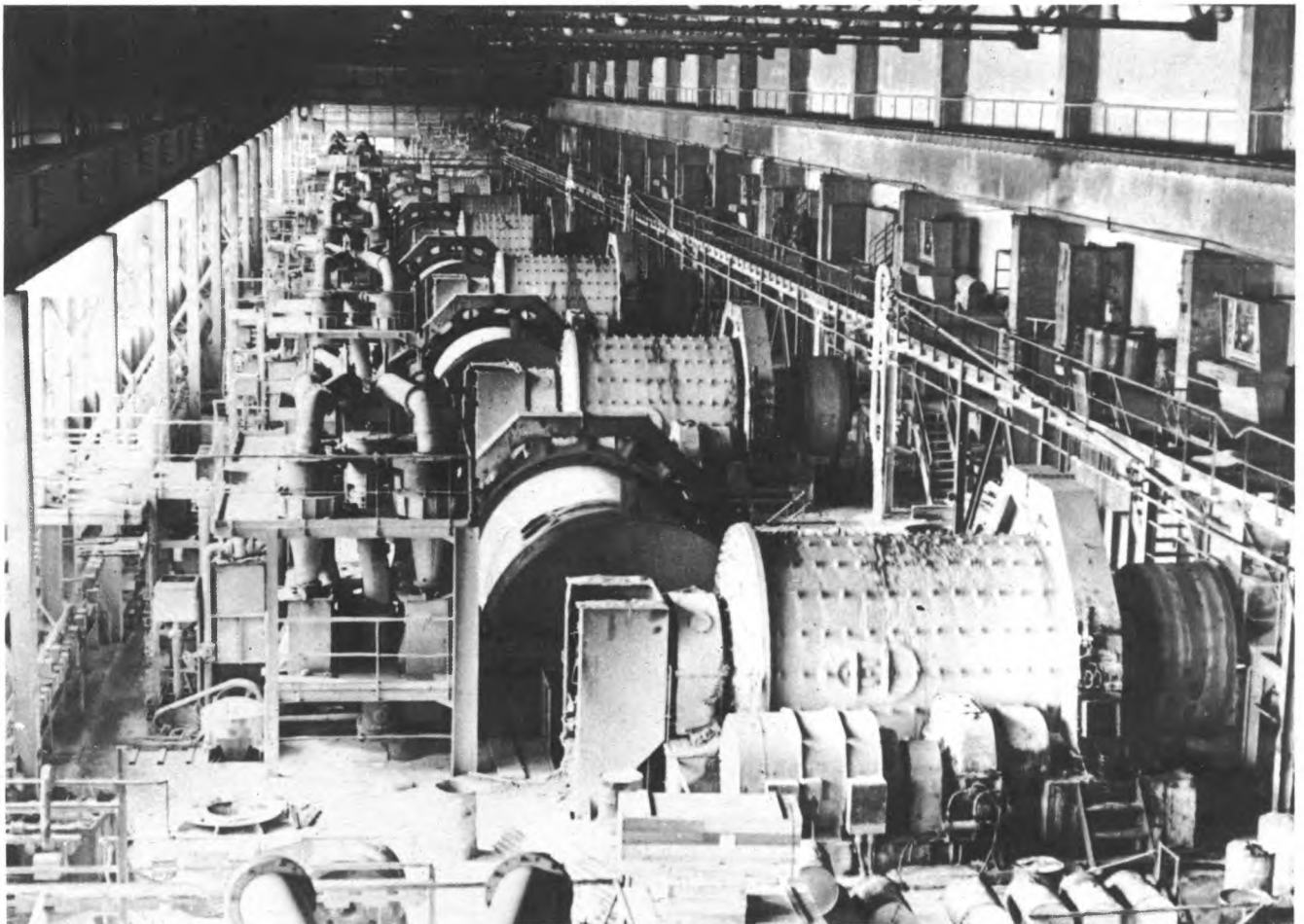
Zbog lakšeg razumijevanja složenosti sitnjenja, ono može biti definirano dvjema funkcijama: funkcijom odabiranja $S(x)$, koja predstavlja dio mase zrna veličine x do $x + dx$, što je u jedinici vremena podvrgnut sitnjenju, i funkcijom drobljenja $B(y, x)$, koja predstavlja dio mase zrna veličine y nastalog sitnjenjem iz mase veličine x do $x + dx$ u jedinici vremena. Diskontinuirani proces sitnjenja može se prikazati relacijom

$$D(y, t) = D(y, 0) + \int_0^t \int_{x=y}^{x_0} \frac{D(x, t)}{x} \cdot S(x) \cdot B(y, x) dx dt, \quad (16)$$

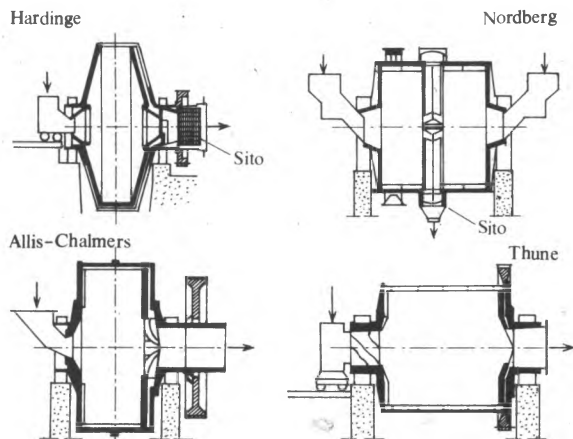
u kojoj je $D(y, t)$ masa zrna veličine manje od y u trenutku t , $D(y, 0)$ masa zrna veličine manje od y u ulaznom materijalu ($t = 0$), a integral je masa zrna veličine manje od y nastale sitnjenjem zrna veličine $x > y$ u vremenu od 0 do t . Da bi se izračunao $D(y, t)$, moraju se poznavati $S(x)$ i $B(y, x)$, koje se određuju eksperimentalno praćenjem procesa sitnjenja i određivanjem formiranja frakcija.

Pritisak i udar (sl. 3) dva su glavna mehanizma deformacija u većini uređaja za drobljenje. Pritiskom se dobiva ravnomjerno zdrobljen materijal s krupnijim česticama, a udarom se dobiva dio veoma sitnih zrna, dok je ostatak relativno krupnozrnat. Osim tih dvaju mehanizama, pojavljuje se i deformacija kao rezultat smicanja u fluidu, što se primjenjuje u mlinovima sa zračnim mlazom.

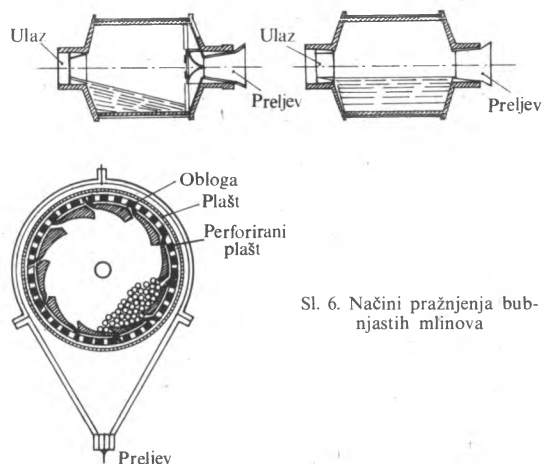
Uređaji za mljevenje mogu se svrstati, kako je već spomenuto, prema postignutoj finoći proizvoda, ali granične veličine zrna nisu točno definirane. Zato je bolje uređaje za mljevenje svrstati prema karakteristikama uređaja. Najviše su rasprostranjeni bubnjasti ili cijevni mlinovi namijenjeni mlje-



Sl. 4. Bubnjasti mlinovi u flotaciji rude bakra u Majdanpeku



Sl. 5. Tipovi autogenih mlinova



Sl. 6. Načini pražnjenja bubnjastih mlinova

venju praktično svih mineralnih sirovina te ostalih proizvoda. U cementnoj se industriji pored cijevnih mlinova upotrebljavaju i mlinovi posebnih konstrukcija, mlinovi Loesche i Pfeiffer, dok se za mljevenje ugljena, npr. u termoelektranama, upotrebljavaju najčešće mlinovi čekićari i dezintegratori. U kemijskoj industriji, u proizvodnji boja i u preradbi prehrambenih proizvoda nalaze svoju primjenu jet-mlinovi, koloidni mlinovi, perl-mlinovi te mlinovi za plastične i temperaturno osjetljive tvari. To su samo glavni tipovi mlinova, dok se danas proizvodi oko 100 različitih konstrukcija mlinova.

Bubnjasti mlinovi najviše se upotrebljavaju za sitnjenje mineralnih sirovina. Sastoje se od horizontalnog cilindričnog (sl. 4) ili cilindrično-konusnog bubnja, pri čemu je bubanj ujedno i prostor za sitnjenje. U bubnju se nalaze tijela za mljevenje, pa prema vrsti tih tijela mogu biti mlinovi s kuglama, mlinovi sa šipkama i tzv. autogeni mlinovi s krupnijim komadima materijala koji sām sebe melje. Omjer između duljine bubnja L i promjera D iznosi od 0,7:1 do 2:1 za mlinove s kuglama, dok je u mlinova sa šipkama taj omjer 1,3:1 pa do 3:1. U industriji cementa upotrebljavaju se cijevni mlinovi s omjerom $L:D=4(8):1$. U posljednje se vrijeme sve više uvode i mlinovi s velikim promjerom (i do 15 m) i relativno kratkim bubnjem. Takvi (autogeni) mlinovi (sl. 5) ujediniuju drobljenje i mljevenje u jednom uređaju, jer se kao tijelo za mljevenje upotrebljavaju komadi sirovine do veličine od 300 mm. Svi bubnjasti mlinovi mogu raditi suho ili mokro, a prema načinu pražnjenja (sl. 6) razlikuju se mlinovi sa središnjim i perifernim pražnjenjem te pražnjenjem kroz rešetku-dijafragmu.

Rad bubnjastih mlinova zasniva se na kretanju tijela za mljevenje, kugli ili šipki zajedno s kućištem mlina (sl. 7). Pri tom se razlikuju četiri oblika kretanja: *kotrljanje* gornjeg sloja kugala po kuglama koje se kreću naviše (cascading, kaskadno kretanje), *slobodno padanje kugli* (ataracting, kataraktično

kretanje), *centrifugiranje* punjenja (tijela za mljevenje i materijal koji se melje) i *oscilacija* punjenja oko težišta sustava u pokretu. Svako od tih kretanja ima svoj utjecaj na mljevenje, a zavisi od brzine vrtnje bubnja. Brzina vrtnje pri kojoj nastaje centrifugiranje punjenja naziva se *kritičnom brzinom vrtnje* n_c . Tada nema korisnog rada jer je cijela šarža prilijepljena za unutrašnju oblogu bubnja. Kritična brzina vrtnje određuje se iz uvjeta za ravnotežu sila u mlinu (sl. 8). Uvjet ravnoteže određen je relacijom

$$m\omega_c^2 \frac{D-d}{2} = mg, \quad (17)$$

gdje je ω_c kritična kutna brzina, D promjer bubnja, a d promjer tijela za mljevenje (kugle ili šipke). Iz relacije (17) dobiva se kritična kutna brzina

$$\omega_c = \left(\frac{2g}{D-d} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

Taj se izraz može napisati i u obliku

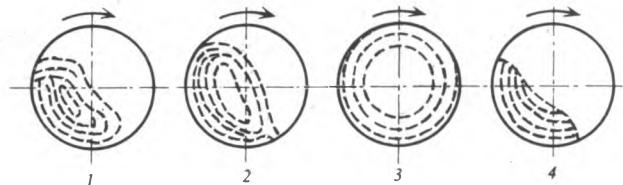
$$\omega_c = \left(\frac{2g}{D} \right)^{\frac{1}{2}} \left[1 + \frac{1}{2} \frac{d}{D} + \frac{3}{8} \left(\frac{d}{D} \right)^2 + \dots \right]. \quad (19)$$

Izraz u uglatim zgradama može se zanemariti ako je omjer d/D manji od 1/20, što je obično zadovoljeno. Tada se kritična brzina vrtnje (min^{-1}) dobiva iz izraza

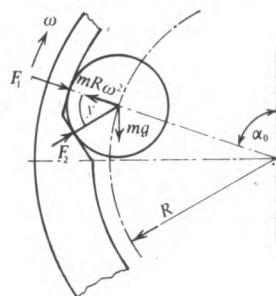
$$n_c = 42,3/\sqrt{D}, \quad (20)$$

jer je $\omega_c = \pi n_c/30$. Brzina vrtnje bubnjastog mlina obično iznosi $(0,6 \dots 0,8)n_c$. Maksimalna visina slobodnog padanja kugli, a time i maksimalna energija sitnjenja, postiže se kad brzina vrtnje bubnja iznosi 75% kritične brzine vrtnje.

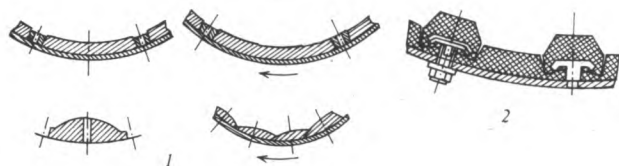
Način kretanja tijela za mljevenje uglavnom zavisi od obloge mlina, tj. od materijala i oblika ploča kojima je oblo-



Sl. 7. Kretanje tijela za mljevenje u mlinu prema brzini vrtnje. 1 kotrljanje (cascading), 2 slobodno padanje (ataracting), 3 centrifugiranje (kritična brzina vrtnje), 4 njihanje (brzina vrtnje veća od kritične)



Sl. 8. Sile koje djeluju na tijelo za mljevenje pri kritičnoj brzini vrtnje



Sl. 9. Tipovi unutrašnjih obloga za bubnjaste mlinove. 1 čelična obloga, 2 gumena obloga

žena unutrašnjost mlina. Upotrebljavaju se martenzitni čelici (Cr-Ni-Mn-Mo-V), posebni Ni-Hard tvrdi čelik, ali i gumene obloge koje sve više zamjenjuju čelik zbog lakše zamjene i manje abrazivnosti. Obloge najčešće nisu glatke (sl. 9) da bi se spriječilo klizanje punjenja u mlinu. Tijela za mljevenje habaju se u procesu mljevenja, pa je potrebno dodavanje novih kugli. Dosada su se dodavale kugle promjera 80...100mm, dok se u posljednje vrijeme sve više prelazi na kugle manjeg promjera (40...60mm). Time se dobiva veća površina tijela za mljevenje i bolji efekt mljevenja. Ukupno punjenje iznosi oko 50% obujma bubnja, od toga 35...45% otpada na tijela za mljevenje. Ako je ρ prosječna gustoća kugala, potrebna je masa kugala (kg) u mlinu

$$M_k = \rho \varphi \pi D^2 L, \quad (21)$$

gdje je φ stupanj punjenja mlina kuglama, a D i L su promjer i duljina mlina. Ulazna veličina zrna ne treba da bude veća od 10 mm za mlinove s kuglama, odnosno veća od 25 mm za mlinove sa šipkama.

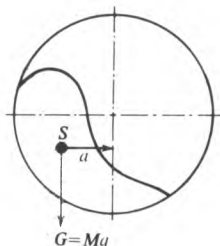
Kapacitet bubnjastih mlinova određuje se različitim metodama. Za orijentacijsko određivanje kapaciteta mlinova s kuglama (t/h) obično se uzima izraz

$$Q \approx L^{0,85 \dots 1} \times D^{2,5 \dots 2,6} \quad (22)$$

Iz izraza (22) vidi se da kapacitet mlina najviše zavisi od promjera mlina, a od toga zavisi i kinetička energija tijela za mljevenje. Zato se u posljednjim godinama zapaža tendencija da se grade mlinovi velikih promjera, i do 6,5 m.

U mlinovima sa šipkama kugle su zamijenjene čeličnim šipkama koje su za 20...30mm kraće od unutrašnje duljine bubnja. Bubanj ima iznutra šipke koje zauzimaju samo 20...25% njegova volumena, pa je zbog toga i brzina vrtnje nešto manja nego u mlinova s kuglama. Ona iznosi 0,5...0,75 od kritične brzine vrtnje.

Za uspješno mljevenje na potrebnu finoću potrebno je dovesti dovoljno energije da bi se punjenje moglo okretati zajedno s bubnjem. Kako se težište punjenja u mirovanju ne poklapa s osi bubnja (sl. 10), pojavljuje se zakretni moment



Sl. 10. Težište punjenja mlina u mirovanju

što ga mora svladati pogonski motor. Izjednačenjem tih djelovanja dobiva se empirijska jednadžba E. C. Blanca i H. Eckarda za potrebnu pogonsku snagu (kW)

$$N = c M_k \sqrt{D}, \quad (23)$$

gdje je c empirijska konstanta koja ovisi o stupnju punjenja i vrsti tijela za mljevenje, M_k masa punjenja mlina (t), a D promjer bubnja mlina (m). H. E. Rose istraživao je rad mlinova s kuglama, pa je dimenzijskom analizom dobio izraz

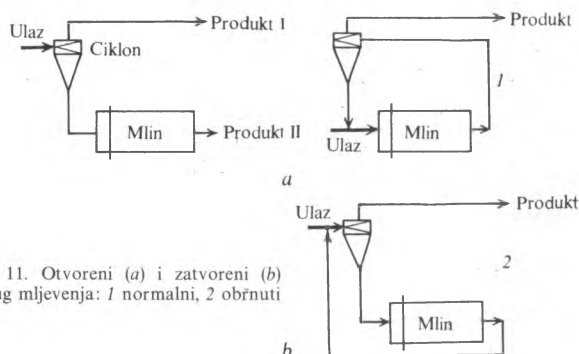
$$\frac{A}{D^5 n^3 \rho_k} = \lambda \left(1 + 0,4 \frac{\rho}{\rho_k} \right) \left(\frac{1}{\psi} \right)^2 \frac{L}{D} f(\varphi), \quad (24)$$

gdje je A energija potrebna za mljevenje, D i L su promjer i duljina bubnja, n je brzina vrtnje, λ konstanta koja ovisi o vrsti obloge ($\lambda = 3,66$ za glatku, a $\lambda = 3,13$ za rebrastu oblogu), ρ i ρ_k su gustoća materijala i gustoća kugli, ψ je omjer između brzine vrtnje mlina i kritične brzine vrtnje, a $f(\varphi)$ funkcija kojoj vrijednost ovisi o punjenju mlina tijelima za mljevenje.

Za mlinove sa šipkama potrebna snaga (kW) izračunava se iz izraza

$$N = 48 L D^{2,5} (0,1652 \psi^{1,9} + 0,0737). \quad (25)$$

Otvoreni i zatvoreni sustavi mljevenja (sl. 11). Protočni mlinovi daju granulometrijski sastav usitnjenog materijala koji varira s vremena na vrijeme. Većinom je granulometrijski sastav veoma važna karakteristika, pa se zbog toga traži ujednačena finoća samljevenog proizvoda. Da bi se to osiguralo,



Sl. 11. Otvoreni (a) i zatvoreni (b) krug mljevenja: 1 normalni, 2 obrnuti

s mlinom se spajaju klasifikatori (mehanički klasifikator, hidrociklon ili sl.) (v. *Klasiranje* TE 7, str. 130), koji iz samljevenog proizvoda izdvajaju traženi granulnat, a prekrupne čestice kao povratni materijal vraćaju na sitnjenje, tj. u mlin. To je zatvoreni sustav mljevenja s kružnom šaržom koja veoma utječe na kapacitet mlina i na kvalitetu proizvoda. Efikasnost rada $E(\%)$ klasifikatora određuje se prema jednadžbi:

$$E = \frac{C(A - B)}{A(C - B)} \cdot 100, \quad (26)$$

gdje je A udio gotovog proizvoda u ulaznom materijalu, B udio gotovog proizvoda u povratnom materijalu, a C udio gotovog proizvoda u samljevenom proizvodu. Kružna šarža određuje se pomoću istih podataka prema izrazu

$$L = \frac{C - A}{A - B}, \quad (27)$$

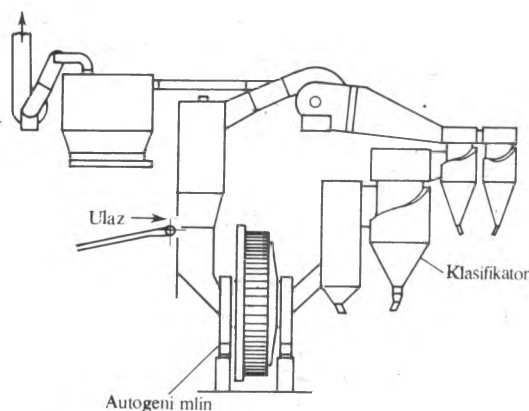
pa količina povratnog materijala G (t/h) iz klasifikatora iznosi

$$G = LD, \quad (28)$$

gdje je D količina gotovog proizvoda (t/h), dok količina materijala koja ulazi u klasifikator iznosi

$$F = (L + 1)D. \quad (29)$$

Poznavanjem granulometrijskog sastava svih triju proizvoda (A , B i C) i samo jedne od količina mogu se, dakle, odrediti sve ostale vrijednosti. To je za kontrolu procesa veoma važno,

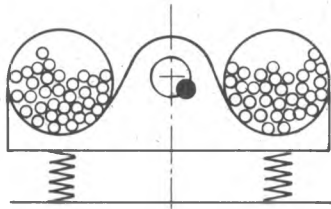


Sl. 12. Shema postrojenja s autogenim mlinom

osobito, npr., u proizvodnji cementa gdje je finoća proizvoda njegova glavna kvalitetna karakteristika.

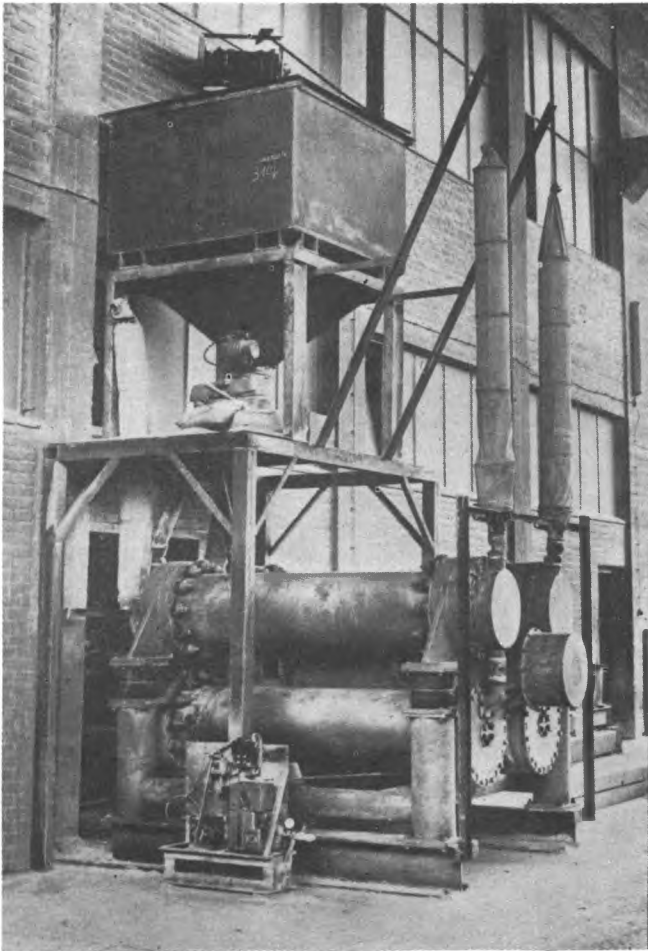
Autogeni i poluautogeni mlinovi (sl. 12). Zamjenom kugli odlomcima materijala koji se melje dobivaju se autogeni mlinovi. Time se izbjegavaju troškovi za tijela za mljevenje i smanjuje se onečišćenje materijala (važno npr. pri mljevenju kremenog pijeska za staklarsku industriju). U posljednje vrijeme primjenjuju se mlinovi velikih promjera (i do 15 m), s duljinom do 3 m, s pogonskim motorima snage do 5000 kW. U njima su tijela za mljevenje komadi materijala do veličine od 300 mm. Punjenje iznosi 20...35% obujma mlina, a u ulaznom materijalu treba da bude najmanje 50% krupnih zrna. Tu se u jednom uređaju sjedinjuju drobljenje i mljevenje, čime se smanjuje broj potrebnih strojeva i olakšava automatizacija. Ponekad se u mlin dodaje i 5...10% kugala (poluautogeno mljevenje).

Njihajni mlinovi (sl. 13) danas se najviše upotrebljavaju u anorganskoj kemijskoj industriji za mljevenje keramičkih materijala, abraziva, specijalnih cementa, boja i pigmenta.



Sl. 13. Shema njihajnog mlina

U kombinaciji s dubokim hlađenjem u tekućem dušiku takvi se mlinovi naveliko uvode za mljevenje temperaturno osjetljivih materijala kao što su začini i termoplastični materijali (krio-



Sl. 14. Njihajni mlin sa četiri radna cilindra

genski postupak). Njihajni su mlinovi zatvorene cilindrične ili koritaste posude duljine i do 4,5 m i promjera do 0,7 m, elastično zavješene za čelične opruge, s tijelima za mljevenje u obliku malih čeličnih kugala, čeličnih palica malog promjera ili *cylpebsa* (ravno odsječenih odlomaka čeličnih šipki) koja ispunjavaju i više od 80% obujma mlina. Posuda oscilira u kružnim ili eliptičnim putanjama u okomitoj ravnini, ali se pri tom sama ne okreće (sl. 14). Broj rotacijskih oscilacija iznosi 1000...3000 min^{-1} s amplitudama od 3...12 mm. Danas se najviše upotrebljavaju njihajni mlinovi sa dva do četiri međusobno paralelno postavljena horizontalna bubnja, odnosno cilindra.

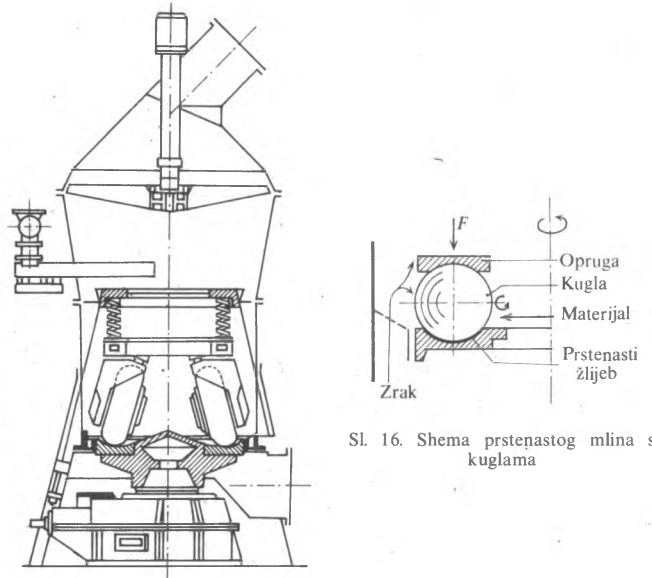
Prema nekim istraživanjima (D. Bachmann, 1940) njihajni mlinovi rade najbolje kada se postigne *statička rezonancija*, tj. kad kugle nakon završetka rotacijskog njihaja udare na isto mjesto odakle su se odlijepile, odnosno kad je vrijeme njihaja mlina jednako vremenu leta kugle. Donekle se takva rezonancija može postići podešavanjem frekvencije njihanja.

Njihajni mlinovi ne troše mnogo energije, ali im je i kapacitet malen. Potrebna snaga može se odrediti formulom

$$N = 0,6 M A^2 \omega^2, \quad (30)$$

gdje je M punjenje mlina, A amplituda njihaja, ω kutna brzina. S kuglama promjera do 10 mm može se postići finoća mliva $< 10 \mu\text{m}$ i kapacitet do 40t/h.

Mlinovi s kotrljajućim elementima bili su poznati već u antičko doba, ali su se zadržali i do naših dana, osobito u industriji cementa, te kao mlinovi za mljevenje ugljena za ložišta s ugljenim prahom. U principu se razlikuju mlinovi



Sl. 16. Shema prstenastog mlina s kuglama

Sl. 15. Centrifugalni mlin tipa Pfeiffer

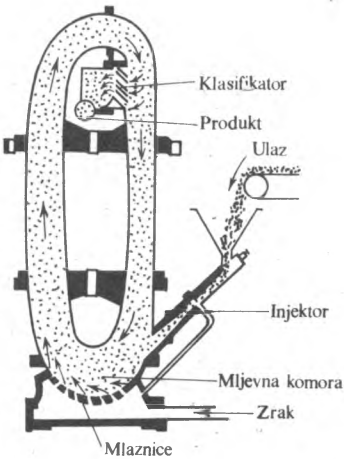
s centrifugalno pokretanim valjcima (žrvnjevi, sl. 15) i mlinovi s valjcima ili kuglama pod dodatnim pritiskom (sl. 16). Valjci ili kugle kotrljaju se po nekoj podlozi na kojoj se nalazi materijal za mljevenje. Uglavnom ti mlinovi rade sa zračnim klasiranjem u zatvorenom krugu. Kad se u mlin dovodi vrući zrak, u njemu se još i dodatno suši materijal. Kapacitet iznosi i do 400 t/h pri obodnim brzinama tijela za mljevenje od 2...3 m/s; u centrifugalnim mlinovima obodne brzine iznose 7,5...7,7 m/s.

Koloidni mlinovi i mlinovi na zračni mlaz (jet-mlinovi, sl. 17) uređaji su za sitnjenje na tehnički najmanje moguće dimenzije čestica. U njima se iskorišćuje kinetička energija međusobnih sudara zrna što ih nosi zračna struja ili vodena para. Velika je prednost tih mlinova što se deformacija zrna postiže relativno velikim energetske istorištenjem pri transformaciji jednog oblika energije u drugi, a nedostatak im je relativno veliko habanje dijelova, pa se zbog toga ne primjenjuju za materijale s tvrdoćom većom od 7 (prema Mohsu).

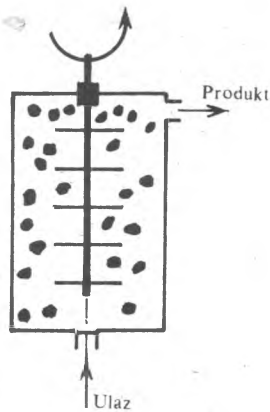
Kinetička energija koja se transformira u druge oblike energije, u sudaru čestica s oblogom i pločom ili u međusobnom sudaru čestica funkcija je mase čestice m_0 , njena promjera d_0 i relativne brzine v_r , pa iznosi

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m_0 v_r^2 = \frac{1}{2} k_1 \rho d_0^3 v_r^2, \quad (31)$$

gdje faktor k_1 zavisi od oblika čestice ($k_1 = \pi/6$ za kuglicu, $k_1 = 1$ za kockicu). Čestice se ubrzavaju ili sudarom s pločom koloidnog mlina koja rotira ili djelovanjem zraka odnosno vodene pare koji struje iz mlaznica u prostor za mljevenje brzinom do 600 m/s.



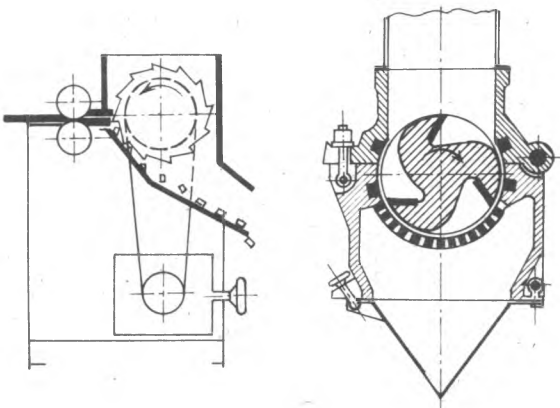
Sl. 17. Mikronizer tipa Wheeler



Sl. 18. Shema pješčanog ili perl-mlina

Mlinovi te vrste najviše se upotrebljavaju u anorganskoj kemijskoj tehnologiji. Najpoznatiji su od jet-mlinova spiralni mikronizeri, s tlakom zračnog mlaza od $(5 \dots 15) \cdot 10^{15}$ Pa i kapacitetom od nekoliko t/h. Perl-mlinovi (sl. 18) mokri su koloidni mlinovi koji se najviše upotrebljavaju u proizvodnji boja i pigmenta. Princip je rada u međusobnom trenju tijela za mljevenje (perle od kremenog pijeska ili čelične kuglice) i zrna materijala koji se u obliku pulpe dodaju na dnu mlina. Šarža se intenzivno miješa rotacijskim diskovima pričvršćenim za okomitu osovinu. Za optimalno se mljevenje traži da kuglice za mljevenje imaju 7...8 puta veći promjer od promjera ulaznih zrna. Promjer kuglica (perli) najčešće nije veći od 1 mm.

Rezni mlinovi (sl. 19) namijenjeni su za rezanje elastičnih materijala ili različitih sekundarnih sirovina, npr. metalnih folija ili kabela. Kinetika rezanja zavisi od relativnog kretanja noža i materijala, pri čemu nož opisuje cikloidu. Veoma je važan kut nagiba noža, njegova oštrina te obodna brzina.

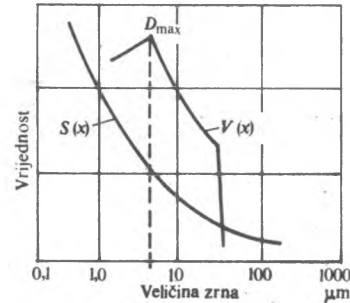


Sl. 19. Shema reznih mlinova za elastične materijale

Optimiranje mljevenja. Mljevenje treba tako projektirati i voditi da se postigne maksimalna korist koja je određena razlikom između vrijednosti proizvoda mljevenja i troškova za mljevenje. Vrijednost samljevenog proizvoda V ovisi o glavnom disperznom svojstvu x (finoća mliva, površina čestica), o kojemu ovisi i proizvodni troškovi S (troškovi kapitala, troškovi za energiju, za rezervne dijelove i održavanje postrojenja, osobni dohoci radnika), pa se korist D dobiva iz izraza

$$D = V(x) - S(x). \quad (32)$$

Troškovi se smanjuju sa smanjenjem finoće zrna (sl. 20) jer se tada smanjuje i utrošak energije. Krivulja vrijednosti $V(x)$



Sl. 20. Ovisnost troškova i vrijednosti proizvoda pri mljevenju cementa o krupnoći zrna

samljevenog proizvoda ima oblik koji ovisi o proizvodu i o njegovoj namjeni (sl. 20). Na tom principu moguće je za različite materijale i za različite procese mljevenja odrediti optimalni režim procesa, pogotovo ako je vrijednost samljevenog proizvoda funkcija finoće ili specifične površine proizvoda.

LIT.: B. Beke, Principles of comminution. Akadémiai Kiadó, Budapest 1964. — H. Schubert, Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. VEB Deutscher Verlag für Grundstofftechnik, Leipzig 1975. — D. Ocepek, Mehanska procesna tehnika. DDU Univerzum, Ljubljana 1976. — K. Schönert, Zerkleinern. Technische Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1976.

D. Ocepek

MOLEKULA, u tradicionalnom smislu najmanja čestica koja još posjeduje karakteristična svojstva čiste tvari (elementarni sastav, relativnu molekularnu masu itd.). U strukturnom smislu to je skupina atoma koji su međusobno povezani dovoljno jakim vezama da se mogu smatrati jedinkom.

Definicija pokazuje da pojam molekule sadrži određenu proizvoljnost s obzirom na uvjete pod kojima se promatra integritet neke skupine atoma, odnosno procjenjuje da li je prikladno takvu skupinu smatrati molekulom ili ne. Unatoč tome, atomi i molekule nedvojbeno su najvažniji misaoni pojmovi u kemiji.

Predodžba o molekulama pojavila se tek u prošlom stoljeću. Talijanski znanstvenik A. Avogadro (1776—1856) prvi je pretpostavio (1811) da su najmanje čestice nekog plina molekule, a ne atomi. To je podržavala svega nekoliko njegovih suvremenika, npr. A. M. Ampère, a većina je to ili pobijala, npr. J. Dalton, ili ignorirala, npr. J. J. Berzelius. Avogadrova pretpostavka ostala je zanemarena sve dok je nije njegov zemljak S. Cannizzaro (1826—1910) ponovno objelodanio, najprije u članku objavljenom u časopisu Nuovo cimento (1858), a zatim na Prvom međunarodnom kemijskom kongresu (1860) održanom u Karlsruheu u prisutnosti najpoznatijih kemičara toga doba. Pred tim skupom Cannizzaro je objasnio potrebu razlikovanja atoma i molekula, a sudionicima skupa podijelio je i poseban otisak svoga predavanja. Do kraja kongresa uspio je uvjeriti većinu prisutnih znanstvenika o valjanosti Avogadrova rada, a među njima L. Meyera i D. I. Mendeljejeva.

Četrnaest godina kasnije (1874), neovisno jedan od drugoga, nizozemski kemičar J. H. van't Hoff (1852—1911) i francuski kemičar A. Le Bel (1847—1930) zamislili su tetraedarski model ugljikova atoma, prema kojemu četiri valencije ugljika nisu usmjerene u četiri kuta kvadrata, kao što je bio pretpostavio škotski kemičar A. S. Couper (1831—1892), već u četiri ugla tetraedra.