

02008A I

1183020

KINETIKA DROBLJENJA SILIKATNIH IN OKSIDNIH
ŽELEZOVIH RUD V ZVEZI S FIZIKALNO - KEMIČNIMI
LASTNOSTMI



20/1/1981

Ing. Drago Očepek

[Ljubljana 1960.]

I 183056

II 183056

KINETIKA PROBLEMA SILEKTRIN IN OKSIDIRAN
ŠARPOVINE HOD V ZAKRBI S PIZIKALNO-KEMIČNIMI
INDIKATORJI



0 1387/1965

Prof. dr. Jozef Goslar
[Fizikalno-kemijski inštitut]

Smatram za svojo dolžnost, da se zahvalim prof. dr. ing. Karel
Slokanu, ker sem lahko uporabljal pri izdelavi disertacije
laboratorij katedre za oplemenitenje mineralnih surovin.
Prav tako se moram zahvaliti Komisiji za štipendije pri
Univerzi, ki me je s štipendijo gostno podprla.

ug. Drago Gceper

U V O D

Napravljenih je bilo veliko število raziskav, vendar še nimamo teorije, s katero bi lahko razložili posamezne pojave pri drobljenju. Zaradi tega ne moremo pričakovati, da bi n. pr. iz teoretičnih predpostav mogli razjasniti procese mletja v krogličnem mlinu, kjer je veliko število zrn podvrženo udarnemu in abrazivnemu drobljenju. Prav zaradi tega je konstruktivna stran mlinov zasnovana na čisto empiričnih poskusih laboratorijskih naprav. Ker pa moramo misliti na to, da je s odkopavanjem siromašnih rud potrebno vse večje in večje drobljenje, zahteva ta problem posebno pažnje.

Osnovne raziskave skušajo razjasniti tri probleme:

- 1) mehanizem drobilnega procesa samega ;
- 2) porazdelitev posameznih sortimentov po drobljenju ;
- 3) medsebojna odvisnost med porabljeno energijo in nastalimi površinami zdrobljenih rudnin.

Vse snovi, ki jih uporabljamo v industriji, so bodisi homogene, ali pa nehomogene oziroma heterogene. Seveda je homogenost relativen pojem in se nanaša le na kristalno strukturo. Meja med homogenimi in heterogenimi snovmi zaradi tega ni ostra, saj imajo n. pr. homogene snovi z notranjimi napakami v kristalni mreži skoraj vse lastnosti heterogenih snovi, vsaj v pogledu drobljenja. Če pogledamo n. pr. kocko

železove rude, izgleda le-ta homogena. Skoraj pravilo pa je, da bo cementacijski material, ki veže posamezna zrna med seboj, mehkejši. Taka kocka pri drobljenju najprej razpade vzdolž teh naravnih meja, manjše trdnosti. V kolikor nadaljujemo s mletjem, moramo zdrobiti posamezna zrna, kar je neprimerno težje.

Glavni, še nerešen problem drobljenja je v tem, zakaj in kako se snov drobi in zakaj je takšna razlika med dejanske in teoretično potrebne energije pri drobilnih procesih. Študij pa je otežkočen predvsem zaradi tega, ker je izredno težko meriti energijo, ki je porabimo pri drobljenju. Če smatramo površinsko energijo, ki je določena z velikostjo medmolekularnih sil, kot osnovo za potrebno drobilno delo oziroma za povečanje in tvorbo novih površin vidimo, da je dejansko potrebna energija 50 do 100 krat večja.

Posebnost drobljenja je torej v tem, da znaša izkoristek manj kot 1 % ; razsipanje energije je torej zelo veliko. Vzrok temu je, da se le en del energije porabi za premaganje medmolekularnih sil in za tvorbo novih površin, dočim se vsa ostala energija brezkoristno porabi za segrevanje, za zvočne pojave, ki spremljajo drobljenje, za električno nabijanje posameznih delcev in podobno. To veliko razsipanje daje misliti, kajti nobena druga naprava, ki je uporablja moderna tehnika, ne dela s stroji tako majhnih izkoristkov.

Na drugi strani pa spada drobljenje k tistim procesom, kjer je tehnični razvoj precej prehitel teoretična razglabljanja.

Ena najbolj važnih karakteristik mlevnih procesov je zrnatost mlevnega blaga. Teoretično obravnavanje kinetike mletja, torej časovni potek procesov mletja je matematično zelo težko in vezano na modelne predstave. V zadnjih letih je uporaba kemičnih in fizikalnih metod dovedla do prvih uspehov pri sistematičnih raziskavah procesov mletja. Theimer je dokazal, da je mogoče pojme kemične reakcijske kinetike in njene zakone analogno prenesti tudi na procese drobljenja. Pogoji za kemičen raskroj molekule plina so popolnoma isti, kot je statistična verjetnost, da se bo neke zrno v mlinu zdrobilo. Seveda obstojajo poleg tega soglasja tudi formalne razlike. Otežkočena je definicija cilja reakcije, ker obsegajo zdrobljeni produkti različne granulacijske intervale.

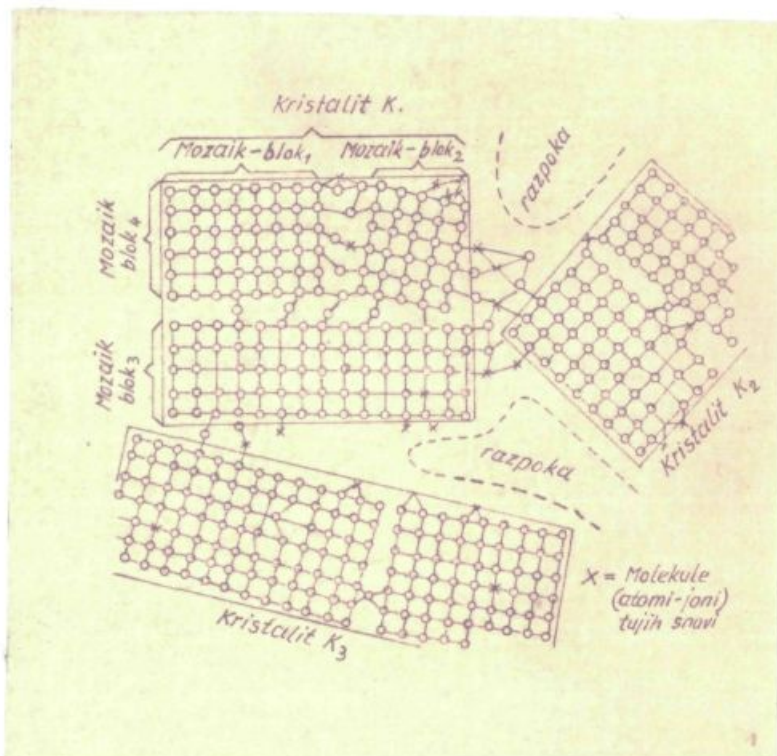
V predloženem delu skušam podati kinetiko drobljenja oksidnih in silikatnih železovih rud štirih jugoslovanskih nahajališč. Ravno pri teh rudah bo igralo drobljenje oziroma mletje zelo važno vlogo, ker je stopnja preraščenosti rudne substance s jalovino zelo velika.

FIZIKALNI PROBLEMI DROBLJENJA

Kot sem že uvedoma omenil, je drobljenje istovetno z nastajanjem novih površin. Tehnično se to izvrši z striženjem, lomljenjem, tlačanjem, udarjanjem in s trenjem - da omenim samo nekatere načine. Pri vseh teh načinih drobljenja moramo snov, ki jo drobimo, elastično obremeniti čez dopustno porušno trdnost. Koristen del tega dela, ki za vse snovi leži med 10^{-10} do 10^{-11} kWh/cm², se uporabi za tvorbo novih površin. Energetski koeficient koristnega učinka je torej zelo majhen in bi bil še manjši, če vse snovi ne bi bile heterogene. Ravno ta lastnost pa izključuje skoraj vsako možnost modelnih in podobnih zakonov. V zvezi s anizotropnostjo trdnih snovi je tudi delo, ki ga porabimo pri drobljenju v različnih drobilnih napravah, različno velike.

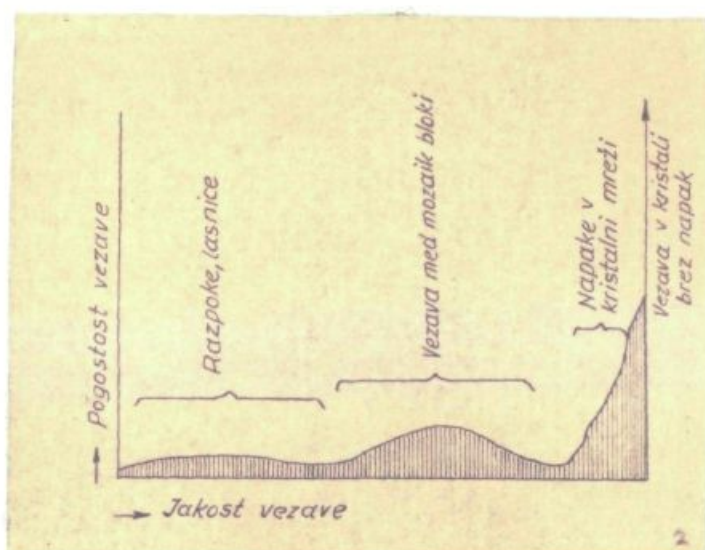
Osnovni pogoj za vsako opisovanje drobilnih procesov je poznavanje pojavov, ki se vrše pri obremenitvi neke snovi, predvsem za enostaven primer krhkih snovi. Obnašanje krhke snovi (sem spadajo tudi rude) je pri drobljenju v prvi vrsti določeno z njeno realno strukturo. Pod tem razumemo vse karakteristične posebnosti kristalne zgradbe trdnega telesa. Osnovna struktura je kristalna mreža, ki je v idealnem primeru brez napak, v naravi pa vedno anizotropna in nehomogena. Pri idealni kristalni mreži so vse vezi med posa-

mezniimi ioni enakovredne in karakterizirane z enako trdnostjo. V realnem kristalu pa ima kristalna mreža napake - oslabitve, ki so posledica praznin, napak v ureditvi, premikov in deformacij, prisotnosti tujih atomov itd. . Posledica tega je, da so ionske vezi v okolici takega mesta oslabiljene. Poleg tega pa so pri vseh snoveh posamezni kristali, katerih dimenzije so okoli 10^{-4} cm, sestavljeni iz posameznih blokov, ki so kristalografsko med seboj nekoliko premaknjeni oziroma nepravilno orientirani drug proti drugemu. Vmesni prostori med temi bloki - mozaiki, so napolnjeni s steklasto amorfno maso z različnimi privlačnimi silami in precej manjšo trdnostjo (slika 1) .



Še manj trdna pa je vezava na stikih posameznih kristalov. Iz tega sledi, da so v realnem kristalu vezi katerih trdnost je enaka onim v idealnem kristalu, da pa imamo tudi slabotnejše vezi zelo različne trdnosti.

Če naneseemo na absciso jakost vezave, na ordinato pa relativno pogostnost nastopanja posameznih vezi, dobimo sliko, ki je imenujemo spekter vezave (slika 2) .



S tem spektrom so zajete predvsem tiste lastnosti snovi, ki so merodajne za procese drobljenja. Z njimi moremo razložiti veliko število pojavov zloma trdnih snovi. Saekal trdi, da je nemogoče razložiti pojave zloma če upoštevamo le zunanjo navidezno homogenost, ampak moramo upoštevati ultrafino strukturo snovi, ki vedno vsebuje oslabljena mesta.

Krhek zlom smatramo kot časovno napredujoč pojav, pri čemer je posebno važno začetno mesto zloma in pa začetna hitrost. Vprašanje je, ali je začetek zloma podan že vnaprej, ali pa je nastanek vezan na obremenitev snovi oziroma

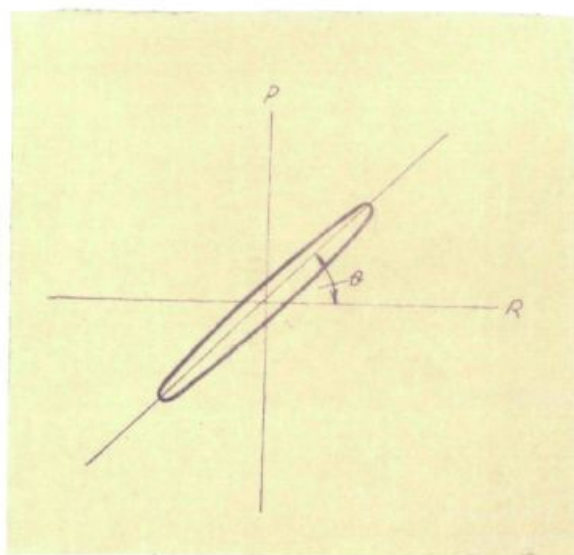
na plastično ponašanje.

Plastično in krhko ponašanje snovi je odvisno od medsebojnih vplivov zgoraj omenjenih homogenih in nehomogenih mest. Zanimivo je, da se vse snovi, tudi tipično krhke, ponašajo plastično, če so le obremenitve dovolj majhne. Smekal je ugotovil, če razimo neko krhko snov tako, da je širina raze še le μ , dobimo razpoke. Kakor hitro pa se raza zmanjša tako, da njena velikost ne presega $1 \mu^2$, dobimo plastično ponašanje snovi. Pri tem nastane plitva raza, ki je na obeh straneh obdana z odrinjeno snovjo. Tlačne sile, ki so bile uporabljene pri tem poskusu, so seveda zelo majhne in odgovarjajo velikosti molekularnih sil ionskih vezi. Razenje, ki nima za posledico tvorbo razpoke in ne privede do zloma, sloni torej na neposrednem premagovanju medmolekularnih sil vezi. Mikroplastičnost je mogoče opazovati tudi pri najbolj krhkih snoveh kot so n. pr. diamanti.

Vprašanje, katere snovi so podvržene krhkemu zlomu, ni istovetno s vprašanjem, pri kakšnih pogojih pride v trdni snovi do krhkega zloma. Krhkost ni samo odvisna od kristalne zgradbe, vezave v mreži, učinkujočih sil med posameznimi kristaliti in njihovimi mozaičnimi bloki, ampak tudi od načina kako so posamezni kristaliti obremenjeni v sami snovi. Poznani so n. pr. nekateri silikoni, ki začne teči zaradi lastne teže na podlago, se pri udarcu elastično ponašajo in se pri nategu z dovolj veliko hitrostjo krhke

slomijo. Iz tega primera vidimo, da ena in ista snov spreminja svoje lastnosti s hitrostjo deformacije.

Pravtako je poznano, da je vrsta zloma odvisna od temperature - pri nizkih temperaturah imamo krhek zlom, pri višjih pa plastičen. Končno je karakter zloma odvisen tudi od vsiljenega napetostnega polja, pod katerim razumemo napetostno stanje v homogenem delcu (kristalitu). Razumljivo je, da je v heterogenih sistemih ta problem zelo kompliciran, če pomislimo le na različne fizikalne lastnosti posameznih faz, ki moreje povečati lokalno napetostno stanje n. pr. pri ohlajevanju zaradi neenakomernega krčenja ali anizotropnosti, ne oziiraje se pri tem na nehomogena mesta v kristalni mreži.



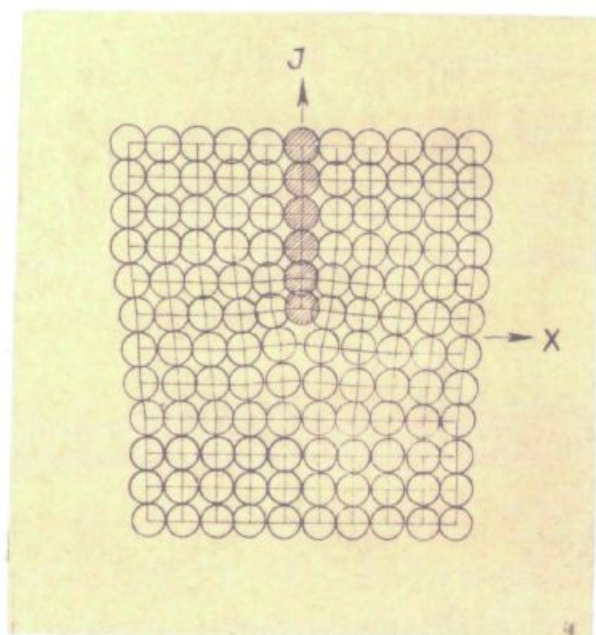
sl. 3.

Izhodiščna točka vseh teoretičnih opazovanj je pogoj ravnotežja, ki ga je postavil Griffith. Dobro je znano, da je trdnost materialov mnogo nižja kot je teoretično izračunamo iz medmolekularnih sil. Griffith je skušal to razlo-

žiti s tem, da obstojajo v trdnih snoveh drobne razpoke ali reže, okoli katerih so napetosti mnogo višje kot so povprečne napetosti v materijalu. Griffith je izpeljal izraze za napetosti okrog robu eliptično oblikovane razpoke v dvoosnem napetostnem polju (slika 3).

Slika kaže takšno razpoke, pri čemer sta P in R glavni napetosti. Dokazano je, da je bila celo takrat ko sta P in R tlačni napetosti, napetost vzdolž roba razpoke natezna. Maksimalna natezna napetost nastopa ob vrhu razpoke, ali pa zelo blizu vrha in Griffith je določil naklonski kot razpoke θ , vzdolž katere nastopi največja natezna napetost. Ko postanejo natezne napetosti večje kot je medmolekularna raztržna trdnost, in če se za to izpolnjeni energetski pogoji je posledica zlom. Pogoji pa je, da mora biti sproščena elastična energija nekega infinitesimalnega razširjanja zloma, enaka ali pa večja kot površinska energija na mejnih ploskvah. Ker je zmanjšanje elastične energije proporcionalno prostornini, to je tretji potenci dolžine razpoke, dobimo končno neko mejno, kritično dolžino razpoke (Griffithovo dolžino), kjer prevladuje zmanjšanje elastične energije in se začne razpoka širiti sama od sebe. To kritično Griffithovo dolžino je mogoče izračunati iz raztržne trdnosti in površinske energije. Kot kažejo računi leži ta dolžina v območju l do l_0 . Tvorba te začetne razpoke predstavlja določeno težavo za nastanek zloma. Njeno izhodišče je v omenjenih napakah kristalne strukture, kjer se koncentrirajo napetosti tako, da postanejo večje od medmolekularnih raztržnih

napetosti. Velikost teh napak pa je pri homogenih snoveh precej manjša kot je za te potrebna kritična Griffithova dolžina. V takih primerih je za tvorbo začetne razpoke potrebna dodatna energija, ki se po Smekalu dovaja iz lastnih napetosti in termičnih energetskih nihanj, po Kochendörferju pa lahko izhaja iz strižnih napetosti. Z ozirom na mehanizem in intenzivnost obremenitve potrebuje začetna razpoka določen čas in s tem določen čas obremenitve. V kolikor pa imamo v kristalni zgradbi dovolj velike napake ali oslABLJENA mesta, odpade ta ovira za tvorbe začetne razpoke, tako da je takej mogoč nenaden, hiter zlom. Moremo torej ločiti dve fazi tvorbe razpoke in s tem zloma krhke snovi. V prvi fazi pride najprej do tvorbe Griffithove razpoke, v drugi fazi pa se ta razpoka širi naprej sama od sebe (nestabilna razpoka) .



sl. 4.

Oglejmo si najprej prvo fazo. Po Kochendörferju leži vzrok tvorbe razpoke v že omenjenih oslabitvah, ki so posledica drsnin in napak kristalne mreže (slika 4). Pravi pomen teh drsnin je v tem, da predstavljajo napake v kristalni mreži, katerih pogoji nastanka in lastnosti se morejo opisati z matematičnimi zakoni. Slika kaže prerez skozi kristal s pozitivno drsnino. Drzna smer je x - os, drzna ravnina (xz) pa je pravokotna na ravnino slike. Premik se razteza v smeri z - osi prenosorazmerne skozi ves kristal tako, da so vsi ostali xy - prerezi identični prikazanemu na sliki, drsnino si torej zamišljamo na ta način, da je vrinjen v kristalno mrežo en sloj atomov. Na ta način dobimo v kristalni mreži lastne napetosti z normalnimi napetostmi σ_{xx} in σ_{yy} v x - in y - smeri, kakor tudi tangencialne napetosti v (xz) ravnini in x - smeri. Na sliki pride to napetostno stanje do izraza na ta način, da se prvotna kvadratična kristalna mreža izobliči, zveznice med posameznimi atomi pa izkrivijo. Merilo za normalne napetosti so prazni prostori med atomi. Normalne napetosti σ_{xx} in σ_{yy} nad središčem premika so tlačne napetosti, pod njimi pa natezne napetosti, ki se navzven hitro zmanjšujejo. V središču so deformacije tako velike, da ne moremo več uporabiti teorije elastičnosti po Hookovem zakonu. Proračun napetosti pa je mogoč po metodi R. Peierlsa .

$$\sigma_{xx} = \frac{-\tilde{\sigma}_{id}}{2(1-\nu)^2} \cdot \frac{1}{y^*/\lambda} \cdot \left[\frac{1}{1 + (x/y^*)^2} \cdot \left(1 + \frac{(1-\eta) + (1+\eta) \cdot (x/y^*)^2}{1 + (x/y^*)^2} \right) \right] \quad 1)$$

$$\tau_{xy} = \frac{\tilde{\tau}_{id}}{(1-\nu)} \cdot \frac{1}{x/\lambda} \cdot \left[\frac{1}{1 + (y^*/x)^2} \cdot \left(1 + \frac{2\eta \cdot (y^*/x)^2}{1 + (y^*/x)^2} \right) \right] \quad 2)$$

$$\tilde{\tau}_{id} = \frac{G}{2\pi} \quad 3a) \quad \tilde{\sigma}_{id} = \frac{E}{2\pi} = 2(1+\nu) \cdot \tilde{\tau}_{id} \quad 3b)$$

$$y^*/\lambda = y/\lambda + \frac{\nu}{2(1-\nu)} \quad 3c) \quad \eta = \frac{y/\lambda - 1/2}{y^*/\lambda} \quad 3d)$$

V gornjih enačbah pomeni G ... strižni modul, E ... modul elastičnosti, λ ... razdalja med atomi v drsni smeri, ν ... Poissonovo število, $\tilde{\sigma}_{id}$, $\tilde{\tau}_{id}$... idealni tangencialni in normalni raztržni trdnosti idealne kristalne mreže. V izrazu y^* in η je upoštevana atomarna struktura drsnine, ki se odraža samo za majhne vrednosti y . Energija drsnine pa je podana s izrazom :

$$U = \frac{G \cdot \lambda^2 \cdot \ell^3}{4\pi(1-\nu)} \cdot \left(1 + \ln \frac{r}{\lambda} \right) \quad 4)$$

Pri tem je pravtako upoštevana atomarna struktura drsnine. Logaritmični člen v oklepaju podaja elastično energijo napetostnega polja, vrednost ℓ pa energijo obeh sosednjih atomarnih ravnin (energijo položaja). V enačbi 4) je "r" polmer

cilindrično privzetega kristala, " l_3 " pa njegova globina v smeri z - osi.

Zaradi svojega napetostnega polja delujeta dve nehomogeni mesti z neko določeno silo drug na drugo. Ta sila pa je enaka:

$$V = \frac{G \cdot \lambda^2 \cdot l_3}{2\pi(1-\nu)} \left(\ln \frac{\kappa}{D} + \sin \beta \right) = \frac{G \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot l_3}{2\pi(1-\nu)} \left(\ln \frac{\kappa}{D} + \sin \beta \right) \quad (5)$$

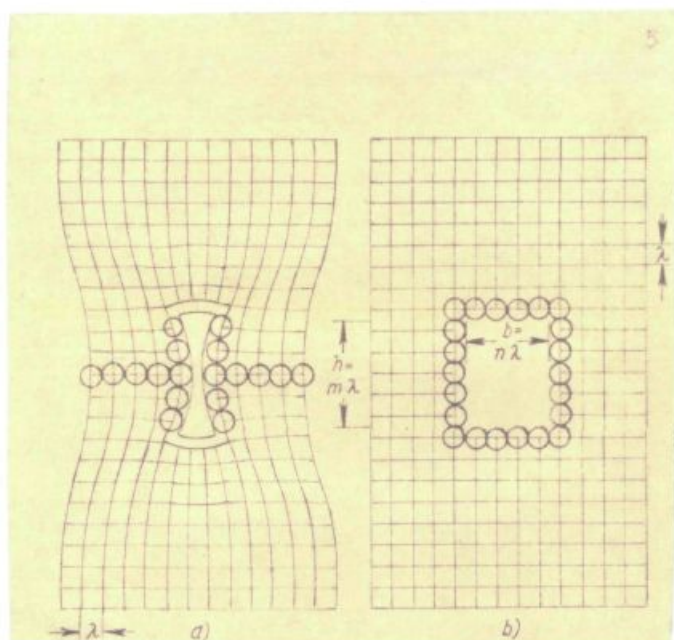
pri čemer je D ... razdalja med obema drsninama, β ... kot njihove zveznice s y - osjo (normala na drsno ravnino) . V enačbi atomarna struktura ni upoštevana in velja le - ta pri razdaljah manjših od par atomarnih razdalj. Dve istoimenski drsnini v isti drsni ravnini se odbijata. Če pa ležita v različnih ravninah, se odbijata samo pri $x > y$ in privlačita pri $x < y$. Raznoimenske drsnine se ponajajo ravno obratno. Celokupna energija drsnine W je enaka vsoti lastne energije $2U$ in energiji medsebojnega učinkovanja V . Na ta način dobimo iz enačb 4) in 5) :

$$W = \frac{G \cdot \lambda^2 \cdot l_3}{2\pi(1-\nu)} \left(2 + \ln \frac{\kappa}{\lambda} \cdot \frac{\kappa}{d} \right) = \frac{G \cdot (2\lambda)^2 \cdot l_3}{4\pi(1-\nu)} \left(1 + \ln \sqrt{\frac{\kappa}{\lambda} \cdot \frac{\kappa}{d}} \right) \quad (6)$$

Če obe drsnini spojimo v eno samo, to je če postavimo $d = \lambda$ potem dobimo iz enačbe 6) sledeč izraz :

$$W_2 = \frac{G \cdot (2\lambda)^2 \cdot l_3}{4\pi(1-\nu)} \cdot \left(1 + \ln \frac{\kappa}{\lambda} \right) \quad (7)$$

Dva premika predstavljata torej enega samega z drsno vrednostje 2λ . Na splošno moremo torej postaviti trditev, da je n paralelnih drsnin ekvivalentno eni sami večkratni drsnini, katere dolžina znaša $n\lambda$. Tako večkratno drsnino si moremo zamisliti na ta način, da vključimo v kristalno mrežo več atomarnih slojev, na primer n - slojev. Na drugi strani pa se dve raznoimenski drsnini v isti ravnini med seboj uničita. Izobličenja kristalne mreže v različnih drsnih ravninah, medsebojne razdalje $h = n\lambda$ kot posledica večkratnih premikov so prikazane na sliki 5a.



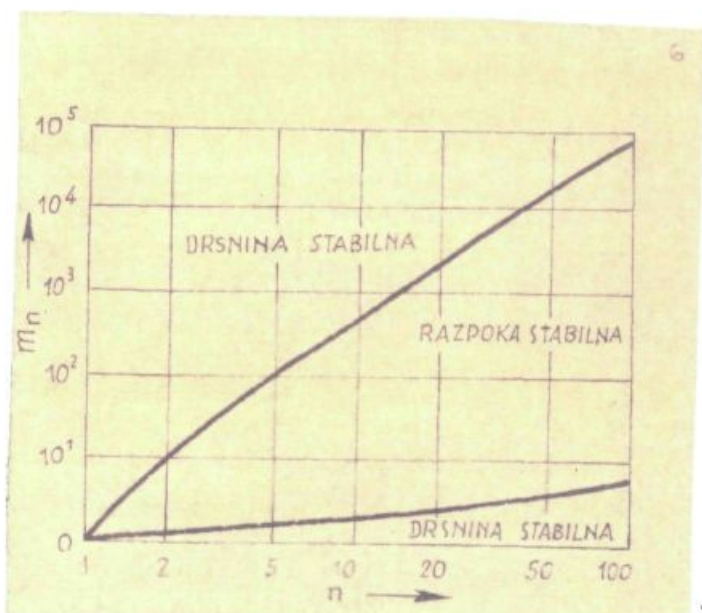
sl. 5.

Takšno stanje dobimo, če postavimo natezno napetost proporcionalno raztešku. V resnici pa pri tako velikih raztezkih Hookov zakon proporcionalnosti ne velja več, ampak pada natezna napetost po prekoračenju maksimalne vrednosti σ_{id} zvezno do vrednosti nič. Zaradi tega napetostno ravnotežje

pri neki določeni širini premika ni več podane ($b = n \cdot \lambda$) in dobimo zaradi tega luknjo - razpoke sledečih dimenzij:

$$b = n \cdot \lambda \quad ; \quad h = n \cdot \lambda \quad . \quad (\text{slika 5b})$$

Obstaja mejna vrednost za m_n kot funkcija n . Za $m > m_n$ je prenik stabilen, za $m < m_n$ pa je stabilna razpoka (slika 6).



sl. 6.

Mejno vrednost je mogoče izračunati s primerjavo obeh energij. Podlaga računu je predpostavka, da je polmer delovanja površinskih sil 5λ , da je površina ravna in da so vogali zaokroženi s polmerom $\lambda / 2$. Kochendörfer je ta preračun izvršil za nekatere kovine (baker, srebro, zlato).

Drsnine oziroma premiki nastanejo največ na mejnih ploskvah mozaičnih blokov, kjer so posamezne kristalne mreže med seboj nekoliko zasukane (glej slike 1). Zaradi strižnih napetosti pride do tvorbe drnin, ki nato potujejo v kristalu, dokler ne naletijo na oviro. Dolžina takšne pota mora biti

$d_1 \approx 10^5 \lambda$. To bi odgovarjalo velikosti 10 do 100μ .

Na mejah posameznih mozaičnih blokov se mora sprostiti več zaporednih drsnin, ki se med seboj odbijajo, kar bi končno v ravnotežnostnem stanju privedlo do tega, da bi se posamezne drsnine razvrstile v medsebojni razdalji $d_{st} \gg \lambda$. Ker pa mora strižna napetost imeti neko določeno minimalno vrednost, da se more sploh začeti drsenje, se posamezne drsnine pospešijo in dosežejo hitrost, ki je enaka skoraj hitrosti zvoka. Zaradi svoje kinetične energije morejo takšne drsnine premagati odbojne sile in se zlitii v večkratne drsnine, ki postanejo stabilne. Minimalno napetost τ_k , ki jo zato potrebujemo je mogoče izračunati. Če je sedaj sunanja napetost τ_a večja kot ta minimalno potrebna, potem je dana možnost nastanka večkratne drsnine in s tem tudi krhkega zloma. Ker pa navadno meje posameznih mozaičnih blokov niso med seboj premaknjene samo za eno debelino atoma, ampak tudi za več, je podana možnost, da raznoimenske drsnine, ki so v medsebojni razdalji $k \leq n \lambda$ pridejo skupaj in tvorijo pri tem stabilno razpoko (slika 6b). V stabilni razpoki ne nastopajo nikakšne napetosti in zato nadaljne drsnine brez težkoč prihajajo do razpoke. S tem pa more stabilna razpoka postati zopet nestabilna, tako da obe vzdolžni ploskvi prideta skupaj. Dolžina take razpoke mora biti ca 300λ . Lahko si je sedaj zamisliti, da prihajajo nove drsnine iz druge smeri in povečujejo nastalo razpoko tako dolgo, da pride do tvorbe razpoke, katera dolžina je $10^5 \lambda$, kar lahko privede

do tvorbe že omenjene kritične dolžine - Griffithove dolžine razpoke.

Če so torej dimenzije kristalov manjše kot potrebne dolžine poti drsnin $d_1 = l_0$ do l_{00} , potem moremo pričakovati, da na teh mestih nimamo nobenih začetnih razpok. S tem je mogoče tudi razložiti važno vprašanje drobljenja, da se žilavost poveča z zmanjšanjem zrnatosti.

Seveda je ta model veljaven samo za enosne natezne obremenitve. Ker pa je težko matematično zajeti večosne obremenitve, je predložen model popolnoma zadovoljiv.

S tem smo obdelali prvo fazo krhkega zloma - tvorbe Griffithove kritične dolžine zareze. Omeniti moram tudi, da opisana teorija ne velja za krhki zlom amorfni snovi, kot je to pokazal Ssekai za stekla.

Primarna razpoka, ki je odvisna od dinamičnega ponašanja in prostorske porazdelitve v kristalu nastane torej zaradi tega, ker atomarni premiki tvorijo nestabilno stanje. Atomarni premiki pa nastanejo na mejnih ploskvah posameznih blokov (Frank - Readovi izvori) in se v kristalu širijo tako dolgo, dokler ne nalete na oviro - nastane razpoka. Ker razpoka nima nobenega učinka na izvore, prihajajo vedno nove atomarne drsnine v nastale razpoke in jo zaradi tega povečujejo. S tem se je atomarna razpoka povečala do mikroskopskih dimenzij.

S tem smo prišli do pojma zarez in zarezne učinka. Zaradi spremenjenih elastičnih lastnosti učinkuje vsaka zarez tako, da se ob njej zaradi zunanjih obremenitev koncentrirajo napetosti. Koncentracija elastične energije preoblikovanja je predpogoj, da se dobi potrebna količina površinske

energije, ki more povzročiti ločenje materije. Iz meritev je mogoče ugotoviti, da je lomni pojav sestavljen iz dveh faz, ki imata drugačen karakter z ozirom na potek hitrosti in mehanizem razširjanja lomne razpoke :

1) V začetni fazi narašča hitrost razširjanja od zelo majhnih vrednosti najprej zelo počasi, nato pa vedno hitreje, pri čemer je ta prirastek hitrosti odvisen predvsem od temperature in od hitrosti povečanja napetosti. Iz tega sledi, da se razširjanje lomne razpoke v tej fazi ne vrši samostojno, ampak samo zaradi termičnih energetskih vrednosti, ki so posledica trajno dovedenih napetosti.

2) Kakor hitro pa je hitrost razširjanja zloma približno dosegla hitrost transverzalnih valov razširjanja zvoka v snovi, doseže nato hitro svojo maksimalno vrednost. S tem se začne samostojno razširjanje lomne razpoke in ni potrebna nobena dodatna termična ali elastična energija. Ta končna hitrost razširjanja lomne razpoke je fizikalna konstanta, ki jo moremo izračunati iz enačbe :

$$\dot{c} = 0,38 \sqrt{\frac{E}{\rho}} \cdot \sqrt{1 - \frac{c_0}{c}} \quad 8)$$

kjer je $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$ hitrost longitudinalnih valov, $2c_0$ kritična (Griffithova) dolžina razpoke in $2c$ dolžine napredujoče razpoke. Maksimalna hitrost razširjanja zloma je torej odvisna samo od hitrosti zvoka. Schardin je delal poskuse z različnimi stekli, ki jih je prestrelil in pri tem izračunal hitrost na 750 do 2200 m/sec v odvisnosti od vrste stekla.

Počasno naraščanje hitrosti na začetku razširjanja zloma je karakteristična lastnost krhkega zloma. Prvo ločenje snovi je posledica maksimalne natezne napetosti, lastnega napetostnega polja in napetostne konice, ki nastane zaradi učinka zareze. Dočim izotropija amorfnih trdnih teles ne daje prednost nobenim makroskopskim lomnim smerem, morejo kristalina telesa imeti ravninske smeri, ki so karakterizirane z minimalno površinsko energijo. Razumljivo je, da se lomne razpoke, nastale na zarezah - nehomogenih mestih, razširjajo predvsem vzdolž takšnih ravnin.

Pri večosni obremenitvi sledi primarni zlom v smeri večje glavne napetosti. V delu Axeltona in Pireta, ki se bavita z drobljenjem posameznih koščkov kremenca s počasnim naraščanjem obremenitve, so prikazani rezultati, ki se skladajo s pravkar opisano teorijo. Tudi moji poskusi z magnetitom slede opisanim pojavom, o njih bom govoril kasneje v praktičnem delu svoje disertacije, predvsem pri baritičnih varškkih rudah.

Splošno moramo torej reči, da so atomske sile vezi in lastnosti kristalne mreže merodajne za hitrost razširjanja lomne razpoke, dočim je začetek zloma posledica zareza z lastnimi napetostnimi polji. Iz tega pa tudi sledi, da moremo vplivati pri drobljenju in mletju na potek zloma snovi teoretično na dva načina. Spremembe v hitrosti razširjanja so mogoče s teksturnimi spremembami (lastnosti mejnih ploskev, velikost zrn in orientacija posameznih zrn). Na začetek

zloma pa moramo vplivati s tem, da delujemo na lastne napetosti pri zarezah, kar je mogoče z mehanično, termično ali pa kemično obdelavo.

Pri tem bi se dotaknil še enega pojava na katerega je prvi opozoril Kramar. On je opazoval, da pride pri drobljenju do emisije elektronov (tok exoelektronov). Nassenstein smatra, da je ta pojav v zvezi z različnimi energetskimi nivoji, ki jih morejo zavzeti elektroni na površini. Pri višjih nivojih je možnost emisije večja in je potrebno dovajati manjše količine termične energije. Obstoja celo možnost, da se s tem zmanjša delo drobljenja, ker emisija ni nič drugega, kot povečanje nehomogenih mest v kristalni mreži.

Uvodom sem že omenil, da pomeni drobljenje povečanje površin oziroma tvorbo novih površin. Pri tem morata biti izpolnjena dva pogoja: a) Površinska energija lomnih ploskev mora nastati iz elastične energije snovi, ki je obremenimo do mejne napetosti zloma. b) Širina lomne razpoke mora biti vsaj dvakrat tako velika kot je širina medsebojnega delovanja medmolekularnih sil snovi, ki bi privedla zopet do zlitja nastale primarne razpoke.

Teoretično bi se moral zlom začeti na tistem mestu, kjer doseže natezna obremenitev velikost molekularne raztržne napetosti ki je enaka :

$$M = \sqrt{\frac{E_G}{k_0}}$$

9)

Zaradi prej opisanih pojavov pa je potrebna razstržna napetost loc do loco krat manjša od molekularne. Učinek zarez je torej za drobljenje izrednega pomena. V snoveh ločimo:

- a) Veliko gostoto zarez, ki je dosežena takrat, kadar se napetostna polja posameznih zarez med seboj križajo,
- b) srednja gostota zarez, kjer so posamezna napetostna polja med seboj ločena, vendar je gostota še precejšna in
- c) posamezne zarez, ki pa so redke.

Gostota zarez je merodajna tudi za površino novo nastalih razkolnih razpek. Kadar je gostota zarez majhna, se razpoka širi precej neovirano skozi snov in na ta način dobimo gladke razkolne ploskve. V snoveh z veliko gostoto zarez je potek lomne razpoke večkrat prekinjen, kar ima za posledico hrapave razkolne ploskve. Na takšnih zarezih more priti tudi do razvejanja razkolne razpoke in govorimo o sekundarnih lomnih pojavih, ki razdeli telo na več delcev. Hrapavost razkolnih razpek daje torej možnost, opisovanja drobilnega procesa in nam pove kakšno velikost zrn moremo pri drobljenju pričakovati. Iz tega pa sledi, da mora biti razlika med pravo in geometrično površino zrn tem manjša, čim bolj se velikost zrn približuje povprečni velikosti homogenih kristalnih blokov med posameznimi zarezami.

Vsa dosedanja izvajanja kažejo, da sta delo drobljenja in novo nastala površina odvisna od vrste obremenitve, od časovnega poteka obremenitve, od maksimalne vrednosti obremenitve, od temperature ter od zunanje in notranje oblike snovi. Matematično izračunavanje teh velikosti je za homogene

snovi z enojnimi zarezi mogoče, če napravimo določene poenostavitve. Pri tem pa ne dobimo nikakih enostavnih zakonov drobljenja. "Zakoni" Rittingerja, Kieka, Bonda in Svenssona so utemeljeni samo pod posebnimi pogoji. Ravno zaradi teh pogojev pa ne moremo govoriti o pravih zakonih, ampak so njihove predpostavke samo mejne vrednosti, ki pa jih moremo s pridom uporabiti v drobilni tehniki.

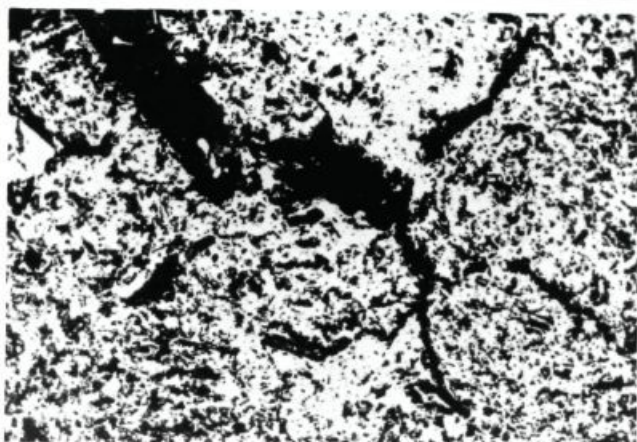
Če določimo snovne konstante, temperature in način obremenitve, potem moremo določiti neko minimalno delo zloma, ki daje najugodnejši energetski učinek. Ker pa lomne razpoke izhajajo stalno iz najbolj učinkovite zarezne, se zarezni učinek zmanjšuje z zmanjšanjem velikosti zrn, to je z napredovanjem drobljenja oziroma mletja. Iz tega pa sledi važna ugotovitev, da se minimalno potrebno delo drobljenja veča z napredovanjem drobljenja - to je s kinetičnim napredovanjem zmanjšanja velikosti zrn, če se vsi ostali faktorji ostali nespremenjeni. Ta "začarani" krog" pa postavlja zaradi tega meje uporabnosti posameznih koristnih substanc, ki jih zaradi izredno velike dispergirčnosti z nekoristnimi ne moremo rentabilno pridobiti oziroma z mletjem razdvojiti.

MIKROSKOPSKE IN KEMIČNE ANALIZE
PREISKANIH VZORCEV

Za svoje raziskave kinetike drobljenja sem si izbral vzorce magnetitne in hematitne rude iz rudišča Damjan (vzhodna Makedonija), vzorce šamozitne rude iz Kičeva (zapadna Makedonija), vzorce sideritne rude iz Vareša ter vzorce oolitne niklonosne železove rude iz Vardišta.

Mikroskopsko so bili preiskani vsi vzorci. Na ta način je mogoče izvesti določene zaključke o kristalnih mejah in drobljivosti. V naslednjih odstavkih dajem pregled za posamezne vzorce.

Magnetit (s. 7)



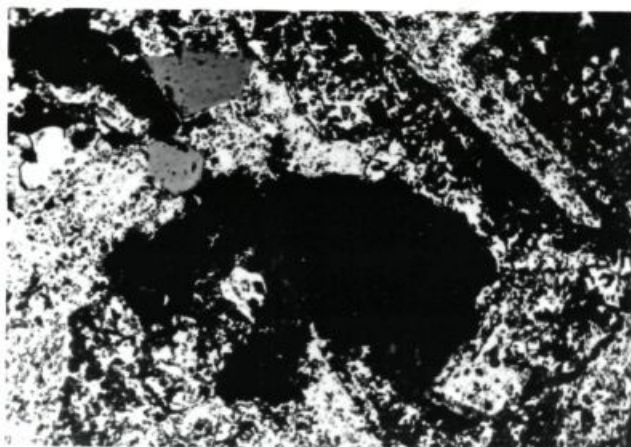
Bogata magnetitna ruda, ki vsebuje posamezna zrna piritita, je sorazmerno luknjičava. Ruda ima nekoliko plastovito teksturo, ki je nastala pri nadomeščanju plasti laporastega apnenca z magnetitom. Velikost zrn magnetita, glavnega rudnega minerala se izpreminja v precej širokih mejah. Premer se namreč menja od 0,02 mm do 0,5 mm ter znaša povprečno 0,1 mm. V nekaterih predelih opazujemo pogoste nadomeščanje magnetita po maghemitu. Poleg magnetita in maghemita nastopa še en rudni mineral v večji količini in to je pirit. Zrna piritita so večja kot zrna magnetita, povprečno 1,0 mm. Glavni mineral jalovine je granat, ki je le redko preraščen z zrnji magnetita. Premer zrn granata je povprečno 0,07 mm. Mineraloški sestav vzorca bi bil: 90 % magnetita, 5 % maghemita, 3,5 % granata in kremenca ter 1,5 % piritita.

Kemična analiza vzorca je sledeča:

Vlaga	0,12 %
Žarolaguba	0,33
SiO ₂	4,27
FeO	17,00
Fe ₂ O ₃	74,60
Al ₂ O ₃	0,12
CaO	1,50
MgO	0,22
MnO	0,88
Mn	0,68
Fe skupno	65,40
Fe kot FeO	13,20
Fe kot Fe ₂ O ₃	52,20

Specifična teža vzorca je znašala merjena na več različnih povprečno 4,37 ... 4,34. Če pogledamo velikost posameznih zrn bi lahko sklepali na precejšnje težave pri drobljenju. Precejšnja poroznost pa kaže na razmeroma lahko delo, vsaj do razdrobljenja posameznih sestavnih elementov rude.

Hematit (sl. 8)



Vzorec je sorazmerno debelezrnat hematit, ki je nastal verjetno iz magnetita. Delno prehaja v rjavi železovec-gütit. Pod mikroskopom vidimo, da so hematitske luske široke do 1,5 mm, povprečno 0,75 mm ter debele do 0,2 mm. Luske nastopajo v osnovi magnetita, epidota, granata, kalcita in kremenca. Skoraj vsi minerali jalovine, kakor tudi magnetit so luknjičavi. Premer zrn jalovine se menja od 0,001 do 0,5 mm. Mineraloški sestav je ca 30 % magnetita, 20 % hematita in magnetita, 15 % epidota, 20 % granata, 10 % kalcita ter 5 % kremenca.

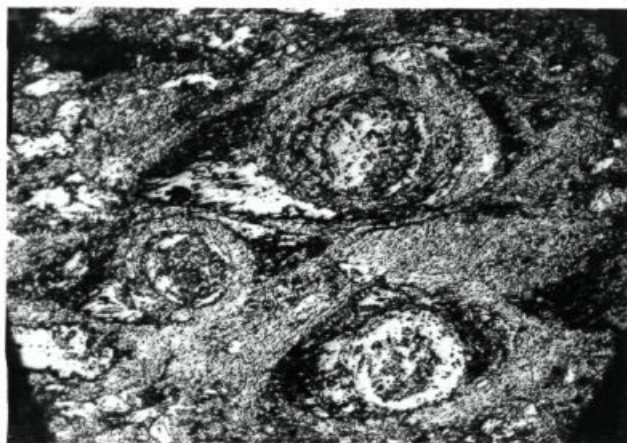
Kemična analiza daje sledeč sestav:

Vlaga	0,33 %
Zaraisguba	4,57
SiO ₂	7,08
FeO	10,72
Fe ₂ O ₃	67,40
Al ₂ O ₃	0,62
CaO	6,60
MgO	0,18
MnO	0,54
Mn	0,34
Fe skupno	55,40
Fe kot FeO	8,33
Fe kot Fe ₂ O ₃	47,07

Specifična teža različka je znašala 3,89 ... 4,01.

Zaradi večje velikosti zrna in luskaste oblike bo mineral dal precejšen odpor drobljenja.

Šamozit (sl.9)



Šamozit je v svežem stanju temne barve in daje viden fine škrilavosti. V mikroskopskem preparatu opazamo šamozit, siderit, kremen, pirit in sledove magnetita, halkopirita ter limonita. V preparatu so zastopane dve strukturi, ki se med seboj razlikujejo po razmerju med šamozitom in sideritom, kakor tudi po načinu nastopenja šamozita.

Zelo redko opazujemo popolnoma okrogle oolite šamozitnega sestava. Večinoma so vsi ooliti zaradi tlačnih sil sploščeni v elipse. Ker so velike osi elips med seboj paralelne, dobi ruda videz škriljavosti. Dolžina oolitov je povprečno 0,35 mm, njih širina pa 0,2 mm. Sredina skoraj svih oolitov je sestavljena iz siderita, okoli katerega so odloženi koncentrični krogi šamozita in kremena. Meje med posameznimi ooliti so neizrazite, tako da daje ruda videz enakomerno drobnozrnate rude. Poleg oolitov nastopa v preparatu tudi zrnata struktura. Zrna siderita in šamozita so precej pomešana, njih velikost je povprečno 0,1 do 0,3 mm.

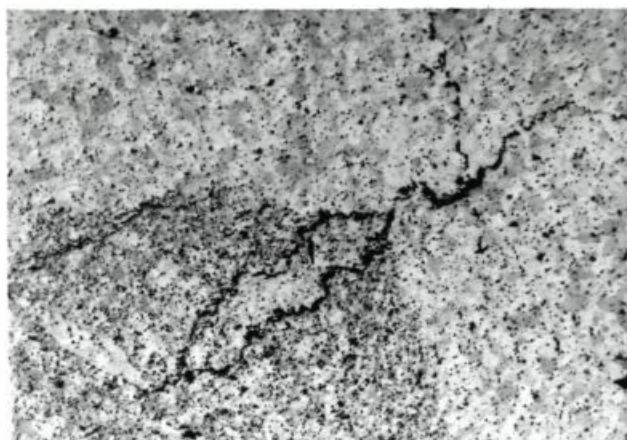
Mineraloški sestav preparata bi bil sledeči:

Šamozit $(Si_{7,1}Al_1)(Mg_{1,6}Fe^{2+}_6Fe^{3+}_7Al_{2,7})(OH)_{16}O_{20}$	55 %
Siderit $FeCO_3$	20 %
Kremen SiO_2	23 %
Pirit FeS_2 in magnetit Fe_3O_4	2 %
limonit-gütit $HFeO_2$ - lepidokrokite $FeO(OH)$	- 0,1 %

Specifična teža, merjena na treh različnih je dala v

vseh treh primerih vrednost 3,32. Zaradi tektonskega delovanja in predvsem zaradi oolitov, ki so heterogeni lahko pričakujemo razmeroma majhen odpor proti drobljenju.

Siderit (sl. 10)



Ruda je enakomerne zrnatosti brez vsake slojevitosti; samo na nekaterih mestih opazamo sledove brečaste strukture. V osnovi debelezrnatega siderita se nahajajo fragmenti primarnega drobnozrnatega siderita. Kot primesi nastopajo pirit in barit. Barit se javlja v zrnih istega premera kot siderit. Premer zrn siderita varira od 0,1 do 0,006 mm s povprečno velikostjo 0,03 mm. Siderit nastopa skupno z baritom tudi v žilicah, ki so debele do 2,0 mm, zrna siderita v njih pa povprečno 0,1 mm. Kot sem že omenil je premer zrn barita enak premeru zrn siderita. Pirit je enakomerno razpršen v sideritni osnovi in so njegova zrna precej manjša,

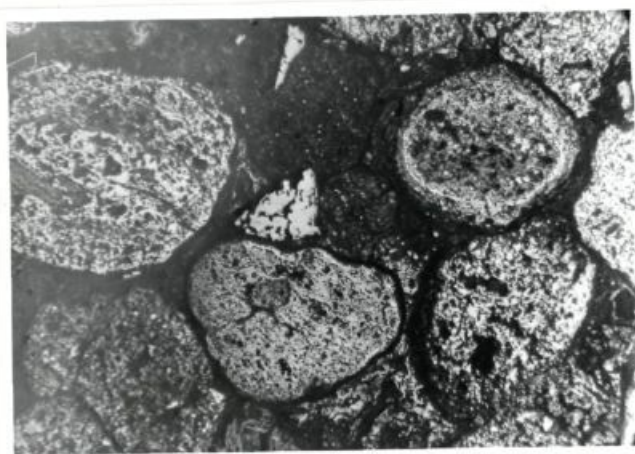
saj znaša njihova povprečna velikost 0,003 mm. Obrusek je vseboval ca 92 % siderita, 3 % barita, 0,1 % pirita, sledove kremenca in ca 5 % por.

Povprečna specifična teža, merjena na več vzorcih znaša za sideritni vzorec, ki sem ga uporabljal pri svojih poskusih 3,70. Kemična analiza vzorca je sledeča:

Žarilna izguba	29,61 %
SiO ₂	3,95
Fe ₂ O ₃	53,85
Fe	37,70
Al ₂ O ₃	2,35
MnO	4,85
CaO	1,14
MgO	3,04

Ker je struktura siderita drobnozrnata, brez vidne slojevitosti in z malo tujih primesi, moremo vsekakor pričakovati precejšno odpornost proti drobljenju. Ker je tudi poroznost minimalna, je vzorec na zunaj kompakten in žilav, tako, da je njegovo mletje zelo težko.

Magnetitno-oksidna ruda (sl.M)



Vzorec predstavlja detritično magnetitno oksidno rudo, v kateri se železo nahaja v obliki magnetita ter v manjši količini v obliki železnih hidroksidov, klorita s prehodi v šamožit. Precejšen del rude nastopa tudi kot kromit s primesmi jalovinskih mineralov piroksenov.

Magnetit nastopa v gobastem agregatu, redkeje pa v kompaktnih zrnih in fragmentih s povprečno velikostje zrna 0,036 mm. V samih zrnih magnetita opažamo vključke kromita. Kromit nastopa v drobnih zrnih s povprečno velikostje 0,04 mm. Od niklonosnih mineralov je zastopan garnierit, ki ga najdemo predvsem v rompskih piroksenih, deloma pa tudi v serpentinu. Povprečna velikost njegovih zrn je pod 0,02 mm. Vzorec vsebuje 55 do 2 % magnetita, sledove do 15 % železovih hidroksidov, 5 do 25 % serpentina in 2 % garnierita; ostali minerali so jalovinski-kalcit, pirokseni, kremen, kalcedon, opal in sledovi olivina.

Ker je magnetitno jedro večinoma obdano z hidroksidnim plaščem popolnoma drugačne trdote, vse skupaj pa je obdano s precej mehkim cementacijskim plaščem, moremo pričakovati v prvi fazi precejšnje drobljivost, ki pa se pozneje precej zmanjša, zaradi precejšnje trdote magnetita.

Kemičen sestav vzorca je sledeči:

Žarilna izguba	9,50 %
SiO ₂	33,60
Fe ₂ O ₃	34,50
Fe	24,18
Al ₂ O ₃	8,20
Cr ₂ O ₃	2,45
MnO	0,35
CaO	1,08
MgO	9,92
Ni	0,73

DOLOČANJE ZRNATOSTI IN SPECIFIČNIH POVRŠIN MLETEGA BLAGA

V svojih raziskavah sem skušal določiti nekaj fizikalnih lastnosti vzorcev, ki so posredno ali neposredno v zvezi z zrnatostjo in s površinami dobljenih z drobljenjem. Če hočemo pravilno vrednotiti delo drobljenja, moramo določiti specifično površino zrn v nezdobljenem in zdobljenem blagu, torej tisti prirastek površin, ki nastane z mletjem.

Teoretično gledano ne moremo določiti dokončne vrednosti specifične površine drobljenega blaga, kajti slednja stalno narašča z zmanjševanjem velikosti zrn in je odsevek $R = 100\%$ šele takrat, kadar je zrnatost $d = 0$. Praktično pa vemo, da je drobljenju postavljena neka meja. Dejansko je najmanjša zrnatost, ki si jo moremo zamisliti, dimenzija molekule.

Na razpolago sem imel več metod za določevanje specifičnih površin, ki slone bodisi na fizikalnih lastnostih zdobljenega blaga, bodisi na statistično izpeljanih in žal fizikalno še neutemeljenih zrnatostih, katerih osnova je Gaussova teorija verjetnosti. Fizikalno utemeljena in najbolj točna je znanokrat metoda adsorpcije argona pri temperaturi tekočega zraka. Monomolekularni sloj enoatomarnega plina, ki se je adsorbiral na površine posameznih zrn, se more natančno določiti iz volumna plina. Iz tega pa je mogoče določiti površino zdobljenega materiala. Zelo znana

je tudi metoda, ki sloni na permeabilnosti nasipanega vzorca. Vkljub temu pa dobimo velike razlike v površinah s različnimi metodami.

Vprašanje je, če je v mojih raziskavah, kjer je važna le razlika specifičnih površin pred in po drobljenju, sploh potrebna takšna natančnost. Praktični poskusi so pokazali, da je razlika med specifičnimi površinami, ki so bile določene s metodo adsorpcije in s statističnimi metodami, skoraj konstantna. Kvocientni med posameznimi specifičnimi površinami so torej v obeh primerih enaki. Ker v svojih raziskavah operiram le s kvocientni, vsaj v pretežni večini primerov, smatram zaradi tega, da so statistične metode popolnoma zadovoljive pri raziskavah kinetičnih problemov drobljenja. Poleg tega pa ima določevanje specifične površine iz RRS - diagramov še eno prednost pred adsorpcijsko metodo. RRS diagrami ne pokažejo same lastnosti kohezije snovi, ampak pride v njih tudi do izraza način mletja, o čemer bo govora kasneje.

Edina slaba stran statističnih metod je bila v tem, da so omogočale določevanje samo v primeru pravilnih granulacijskih porazdelitev, kot jih opažamo predvsem pri premogih. Pri svojih poskusih sem pa večkrat opazil, da vzorci ne slede popolnoma izpeljanemu statističnemu zakonu. Z novejšimi korekturami, katerih se bom nekoliko obširneje dotaknil in s primerno modifikacijo enačb, je tudi ta problem rešen in je mogoče določevati površine tudi pri lomljenih premicah sejalnih analiz.

Vsa proračunna specifičnih površin na podlagi statističnih zakonov so skupni sledeči pogoji:

- 1) Površina se izračuna s predpostavko, da so zrna okrogle oblike. Pod zrnatostjo razumemo potentaken premer krogle.
- 2) Ker realna zrna niso oblike krogle, moramo izvršiti korekture s faktorjem oblike $-f$, ki je neodvisen od premera zrna.
- 3) Nadalje je treba upoštevati specifično težo γ , za katero prav tako predpostavljamo, da je neodvisna od velikosti zrn.

Če označimo idealno površino okroglih zrn z O_k , potem velja za zrna splošne oblike :

$$O = f \cdot O_k \quad (10)$$

Nadalje privzamemo, da je O_{k1} površine pri specifični teži

$\gamma_1 = 1000 \text{ kg/m}^3$ in dobimo na ta način :

$$O_k = \frac{\gamma_1}{\gamma} O_{k1} = \frac{1000}{\gamma} O_{k1} = \frac{O_{k1}}{\gamma} \quad (11)$$

Če vstavimo dobljeno vrednost v enačbo 10), dobimo:

$$O = \frac{f}{\gamma} O_{k1} \quad (12)$$

Za prikazovanje sejalnih analiz sem uporabljal dvojno logaritmični diagram, kateremu je za osnove statistično izpeljan zakon granulacijske razporeditve odsevkov:

$$R = 100 \cdot e^{-(d/d')^n} \quad (13)$$

oziroma presevke:

$$D = 100 \cdot (1 - e^{-(d/d')^n}) \quad (14)$$

Ker je ispeljava RRS - enačbe splošno poznana, se v svojem delu ne bom spuščal v opisovanje posameznih parametrov, niti njih ispeljave.

Če je D presevek v odstotkih za zrna, katerih premer $\equiv d$, potem predstavlja funkcija

$$\gamma = \frac{dD}{d(d)} = f'(d) \quad (15)$$

krivuljo granulacijske porazdelitve. Če se nahajajo v frakciji dD (%) dN zrn okrogle oblike in je granulacijski interval od d do $d + dd$, potem moremo pisati

$$dN = \frac{dD}{100 \cdot \gamma \cdot \pi / 6 d^3} = \frac{0,06 \cdot dD}{\gamma \cdot \pi \cdot d^3} \quad (16)$$

Posamezno okroglo zrno ima površino $\sigma = \pi d^2$, na ta način je celokupna površina v zgornjem primeru:

$$dO_k(d) = \sigma \cdot dN = \frac{0,06}{\gamma} \cdot \frac{dD}{d} = \frac{0,06}{\gamma} \cdot \frac{f'(d)}{d} d(d) \quad (17)$$

Gornje enačbe diferenciramo po d in dobimo :

$$O'_k(d) = \frac{dO_k(d)}{d(d)} = \frac{0,06}{\gamma \cdot d} \cdot \frac{dD}{d(d)} = \frac{0,06}{\gamma} \cdot \frac{f'(d)}{d} \quad (18)$$

Površina l k_p zrn, torej specifična površina je enaka:

$$O_k = \frac{0,06}{\gamma} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{dD}{d} = \frac{0,06}{\gamma} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{f'(d)}{d} d(d) \quad (19)$$

Rešitev enačbe za specifično površino mlevnih produktov je odvisna od spodnje in zgornje integracijske meje.

Eksponencialna enačba sejalnih analiz daje $R = 100\%$ oziroma $D = 0\%$ šele pri $d_{\min} = 0$, oziroma $R = 0$ in $D = 100$ pri $d_{\max} = \infty$. Obe ti vrednosti pa ne moremo vstaviti v integral enačbe, niti praktično ne nastopata pri procesih nletja. Temu problemu je posvečala pozornost cela vrsta avtorjev, ki so računali specifične površine na svoj način. Za svoje raziskave sem hotel najti najbolj prikladen način, ki pa bi obenem imel zadovoljive točnost. V ta namen sem preiskusil enačbe Rosin-Rammlerja in Sperlinga, Kießhalta, Matza, Weidenhammerja, Langemanna in Anselma. Seveda so še razne druge metode, kot n. pr. Kneschkejeva in Stangeja, ki pa ne prinašajo bistvenih novosti.

V enačbi 19) nastopa odvod $D = f(d) = 100(1 - e^{-(d/d')^n})$. Če ta izraz odvajamo dobimo:

$$D = 100 - 100 \cdot e^{-(d/d')^n} = 100 - 100 \cdot e^{-\frac{d^n}{d'^n}} = 100 - 100 \cdot e^{-\frac{1}{\frac{d'^n}{d^n}}}$$

$$\frac{dD}{dd} = \frac{100 \cdot e^{-\frac{d^n}{d'^n}} \cdot \frac{n \cdot d^{n-1}}{d'^n}}{e^{-2 \frac{d^n}{d'^n}}} = \frac{100 \cdot n \cdot d^{n-1}}{d'^n \cdot e^{-\frac{d^n}{d'^n}}}$$

$$y = e^{\frac{d^n}{d'^n}}$$

$$y = e^{\frac{d^n}{d'^n}} \cdot \frac{m \cdot d^{n-1}}{d'^n}$$

20)

Če gornjo enačbo preoblikujemo dobimo:

$$\frac{dD}{dd} = f'(d) = 100 \cdot \frac{n}{d'} \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^{n-1} \cdot e^{-(d/d')^n} \quad 20a)$$

Sedaj moramo dobljene vrednosti vstaviti v enačbo 19) in pri tem dobimo:

$$Q_k = \frac{0,06}{\gamma} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{100 \cdot \frac{n}{d'} \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^{n-1} \cdot e^{-(d/d')^n}}{d} \cdot d(d) = \frac{6}{\gamma} \cdot \frac{n}{(d')^n} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^{n-2} \cdot e^{-(d/d')^n} \cdot d(d)$$

$$Q_k = \frac{6}{\gamma} \cdot \frac{n}{d'} \cdot \frac{1}{(d')^{n-1}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^{-1} \cdot d^{n-1} \cdot e^{-(d/d')^n} \cdot d(d) = \frac{6}{\gamma} \cdot \frac{n}{(d')^n} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} d^{-1} \cdot \left(\frac{d}{d'}\right)^{n-1} \cdot e^{-(d/d')^n} \cdot d(d)$$

Zaradi poenostavitve napravimo substitucije:

$$t = \left(\frac{d}{d'}\right)^n \quad ; \quad \frac{d}{d'} = t^{\frac{1}{n}} \quad ; \quad d(d) = \frac{d'}{n} \cdot t^{\frac{1}{n}-1} \quad 21)$$

in na ta način končno dobimo:

$$Q_k = \frac{6}{\gamma} \cdot \frac{n}{d'} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} d^{-1} \cdot t^{-1/n} \cdot t^{\frac{n-1}{n}} \cdot e^{-t} \cdot \frac{d'}{n} \cdot t^{\frac{1}{n}-1} \cdot dt =$$

$$= \frac{6}{\gamma \cdot d'} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t^{-1/n} \cdot e^{-t} \cdot dt$$

Integral določa spec. površino idealiziranih zrn. Mats ne upošteva 0,1 % disperzoida pri zgornji in spodnji meji integrala. Na ta način je d_{\min} pri $R = 99,9 \%$ in d_{\max} pri $R = 0,1 \%$. Njegov račun upošteva torej 99,8 % vzorca. Integracijske meje za enačbo 19) dobimo iz osnovne enačbe RRS, kot sledi:

$$t = \ln \frac{100}{R} ; \quad t_{\max} = 6,91 ; \quad t_{\min} = 0,0010 \quad (23)$$

Za idealizirano specifično površino dobimo potentakea:

$$Q_k = G \cdot \frac{1}{d'} \int_{0,001}^{6,91} t^{-(1/m)} \cdot e^{-t} \cdot dt$$

osiroma:

$$Q_k = G \frac{1}{d'} \left[\int_0^{6,91} t^{-(1/m)} \cdot e^{-t} \cdot dt - \int_0^{0,001} t^{-(1/m)} \cdot e^{-t} \cdot dt \right] \quad (24)$$

Mats je ta integral s eksponentialno enačbo v potenčno vrsto in nato po posameznih členih integriral. Za dovoljno natančnost je dovolj, če upoštevamo prvih 20 členov.

Vse dosedanje enačbe daje dovolj točne podatke samo pri tistih sejalnih analizah, kjer dobimo v dvojnologaritmičnem diagramu res čisto premico. Tak slučaj nastopi pri rudah zelo pogosto, dočim dobimo pri premogih večkrat lomljene premice. Odstopanja sem upošteval na ta način, da sem enačbo 22) ločeno integriral za posamezne odseke in dobljene vrednosti

sešteval. V ta namen moram enačbo 22) preoblikovati kot sledi:

$$O_k = 6 \left\{ \frac{1}{d'_1} \int_{t_{\min}}^{t_1} e^{-t} \cdot t^{-(1/n)} \cdot dt + \dots + \frac{1}{d'_k} \int_{t_{k-1}}^{t_{\max}} e^{-t} \cdot t^{-(1/n)} \cdot dt \right\} \quad 25)$$

Integracijske meje določimo iz odsevkov na lomljenih mestih krivulje, povprečno zrnatost pa dobim z izrazom:

$$\lg d' = \lg d - \frac{1}{n} \lg \lg \frac{100}{R} + \frac{1}{n} \lg \lg e \quad 26)$$

Proračun delnih integralov je zelo enostaven, če uvedemo nepopolno funkcijo, ki je definirana z izrazom:

$$\Gamma(p+1, t) \equiv \Pi(p, t) \equiv (p, t)! \equiv \int_0^t e^{-t} \cdot t^p \cdot dt \quad 27)$$

Enačba 22) dobi za $n > 1$ sledečo obliko:

$$O_k = 6 \left\{ \frac{1}{d'_1} \left[\Gamma(p_1+1, t_1) - \Gamma(p_1+1, t_{\min}) \right] + \frac{1}{d'_2} \left[\Gamma(p_2+1, t_2) - \Gamma(p_2+1, t_1) \right] + \dots + \frac{1}{d'_k} \left[\Gamma(p_k+1, t_{\max}) - \Gamma(p_k+1, t_{k-1}) \right] \right\} \quad 28)$$

Za $n < 1$ moremo dobiti analogne izraze. Za proračun nepopolne funkcije pa uporabimo odvisnost:

$$\Gamma(p+1, t) \equiv \Gamma(p+1) I(u, p) \quad 29)$$

pri čemer pomeni:

$$I(u, p) \equiv \frac{\int_0^t e^{-t} \cdot t^p \cdot dt}{\int_0^\infty e^{-t} \cdot t^p \cdot dt} \quad u \equiv \frac{t}{\sqrt[p+1]{p+1}} ; t \equiv u \sqrt[p+1]{p+1} \quad 30)$$

Kot sem že omenil, Matz pri svojih proračunih ne upošteva 0,1 % snovi, tako v debelozrnastem, kakor tudi v drobnozrnastem delu. Z uporabo nepopolne - funkcije pa je mogoče integrirati v poljubnih mejah, pri čemer fiksiramo integracijske meje tako z R ali pa z d.

Ker je Lange mann izračunal vrednosti specifičnih površin za različne parametre, sem pri svojih poskusih izračunaval samo vrednosti tistih poskusov, ki so bili važni za nadaljne raziskave. V vseh ostalih primerih pa sem uporabljal tabele in diagrame, ki dajejo rezultate, katerih natančnost je le nekoliko pod natančnostjo popolnoga računa specifičnih površin.

Za določevanje mlevnih lastnosti različnih mineralnih surovin je zelo važno poznavanje specifične površine in zrnatosti, ker je najenostavneje mlevno energijo aplicirati na specifično površino. Vendar nastanejo težave pri metodah določevanja teh površin zrnatosti že pri sejalni analizi. Različni avtorji različno ocenjujejo posamezne metode, ki bazirajo na permeabilnosti.

Sejalna analiza ima za določevanje spec. površin nekoliko manjši pomen, ker je njeno delovno območje omejeno po DIN 1171 in po DIN 4188 na spodnjo mejo zrnatosti 0,06 mm oziroma 0,04 mm. Seveda ni dovolj, da normiramo samo stavek sit, ampak moramo normirati tudi postopek sejanja, to se pravi moramo poznati faktorje, ki vplivajo na efekt sejanja. Mnogoštevilne raziskave v tej smeri so ugotovile, da na kvaliteto vzorčene sejalne analize vplivajo: način jemanja vzor-

cev, količina vzorca, vlažnost zraka, površinska vlaga vzorca, način gibanja sita, izdelava mreže sita, izgube med sejanjem in pa čas sejanja.

Analiza zrn z optičnimi meritvami je edina metoda, ki omogoča, da s pomočjo optičnega mikroskopa in elektronskega mikroskopa ločimo zrna do velikosti 10^{-6} μ . Metoda je neodvisna od specifične teže in je zelo natančna, v kolikor je bilo analiziranih zadostno število zrn in zrna niso ploščata ali iverasta. Ker pri mikroskopiji ni mogoče meriti tridimenzionalno, se smatra to za pomankljivost optične metode. Zrna imajo namreč tendenco, da zavzamejo najbolj stabilno lego, to je da leže na svoji največji ploskvi in so zaradi tega očen vidne samo obe največji dimenziji. Metoda je za tehnične meritve nepraktična, ker zahteva veliko časa, vendar se v znanstvenih raziskavah mnogo uporablja zaradi njene natančnosti. O številu zrn ki jih moramo pri tem izmeriti, dobimo v literaturi precej različne številke od 200 do 3000.

Optične metode nam daje analizo števila zrn, dočim nam daje vse druge metode analizo teže zrn. Obe metodi pa je mogoče z upoštevanjem oblike zrn med seboj primerjati.

Najbolj primerna metoda za določanje zrnatosti pod sejalnim območjem sit je sedimentacijska analiza. Le-ta se mora izvršiti v smislu pravila Delshaye predvsem pri majhnih koncentracijah. Faktorje, ki vplivajo na zakonitost Stokesovega zakona, ki je osnova sedimentacijske analize, so obravnavali predvsem Andreasen, Hahn in Berg. Problematika sedimentacij-

skih analiz je v tem, da velja Stokesov zakon le, če imamo primerno disperzijsko sredstvo in peptizator. Najbolj razširjena je metoda po Andreasenu (pipetna metoda) v treh različnih izvedbah.

Iz eksperimentalne prakse poznamo, da dobimo s sedimentacijsko analizo do 30μ zelo dobre rezultate, do 50μ pa zadovoljive. Pri še večjih zrnatostih pa so rezultati slabi, ker preidemo iz laminarnega v turbulentno območje.

Določevanje specifičnih površin pa je drug problem. Obdelal sem že matematično iz vrednotenje. Ločiti moramo med tkzv. geometrijsko ali zunanjo površino in pa notranjo površino kot rezultanto vseh kapilar. Specifična površina se nanaša na enoto volumna ali pa teže, in nam karakterizira v nasprotju z analizo zrnatosti, finoče neke snovi z enim samim številom.

Obstajajo precejšnje težave za določitev specifične površine, ker imamo različne kriterije določevanja. Vendar niti ena metoda od dosedaj znanih ni eksaktna in si moramo biti vedno na jasnem, da ne dobimo absolutnih vrednosti, ampak le relativne. Relativne vrednosti tudi zadostujejo za večino raziskovalnih problemov posebno kadar se striktno držimo same primerjalnega principa.

Börner je podal izčrpno analizo vseh metod določevanja površin in se zaradi tega ne bi spuščal v ponovno opisovanje.

Pri drobljenju nas ne zanima površina por, ampak samo novo nastala površina kot posledica drobljenja, to je tudi

tista površina, ki se je upirala drobljenju.

Najbolj znani postopki določevanja površin ki temelje na merjenju permeabilnosti so metode Blaine-ja, Lea in Nurse-ja.

Na podlagi Poiseuillevega zakona za laminarno pretakanje v cilindričnih ceveh, je postavil najprej Kozeny odvisnost med permeabilnostjo, poroznostjo in površino, katero je nato Carman še nadalje razvil. Na teh enačbah temelje tudi enačbe Lea in Nurse-ja. Če se kapilarni premer zmanjša na ca srednjo prosto pot plinske molekule ($0,1 \mu$ pri 760 Torr), potem preide Poiseuillevo pretakanje v pretakanje po Kundsenu, ki je enako difuziji. Po podatkih Friedricha je to pri spec. površini $O = 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. Kundsens je pravtako razvil svojo enačbo za območje kapilarne difuzije, katero so Kundt in Warburg prilagodili za porozne snovi skupno s Poiseuillevim zakonom. Arnell in Svensson so na podlagi raziskav z elektronskim mikroskopom določili korekturne vrednosti za Blaine metode, katere je Börner združil v obliki diagrama. Te korekture je v mnogočem ovrgel Wieland, ki trdi, da se napaka s korekturami samo poveča, ne pa zmanjša.

Čeprav slone na popolnoma drugačnih temeljih kot pa permeabilnostne metode, moremo tudi matematične metode s pridom uporabiti za preračunavanje specifičnih površin. Kot smo videli uporabljajo matematične metode zrnatost za osnovo. Za sejalne analize, ki slede RR - zakonu so razni avtorji kot Rammler, Kleshalt - Mats in Weidenhammer napravili ustrezne proračune, pri čemer so njih integracijske meje precej raz-

lične. Anselm je napravil enačbo, ki nima omejitev glede zrnatosti. Börner je primerjal več enačb in je postavil svojo enačbo, ki je pravtako neodvisna od zrnatosti.

V kolikor pa sejalne analize ne dajejo v RRS - diagramu premic, moramo upoštevati metode Weidenhammerja in Lange-manna in njegov diagram, s katerim je lahko določevati površine poljubno lomljenih premic.

Za zrnatosti, ki slede logaritmični normalni porazdelitvi je Gebelein izdelal matematično metodo za določanje specifičnih površin; prav tako pa je Rammler za iregularne granulacijske analize. Poleg tega obstoje še metode Mosebacha, Hatscha, Chodeja, Petersena, Walkeya in Wrighta.

Še nekaj o faktorju oblike: Walther je ugotovil, da je faktor oblike odvisen od zrnatosti, dočim postavlja Andreasen princip konstance faktorja pri procesih drobljenja. Tudi Friedrich je na podlagi elektronske optičnih metod ugotovil, da je faktor neodvisen od zrnatosti in da se med mletjem to-rej ne menja. Zaradi tega so optično določeni faktorji Hey-wooda danes nekako standardni, v okviru katerih se gibljejo ostale vrednosti. Prav zaradi tega smatra Börner, da je bolje da operiramo z idealiziranimi površinami. Börners trdi dobe-sedno: "Danes smo še precej daleč od tega, da bi mogli rešiti uganko prave površine z kakšnim faktorjem oblike. Zaradi te-ga je bolje, da ga ne upoštevamo" .

Zanimiva je raziskava, ki jo je napravil Haese na umet-nih snoveh, kot so polivinilklorid, Thiogut. Primerjal je

specifične površine, določene po treh metodah. Rezultate prikazujem v naslednji razpredelnici :

Specifična površina cm^2/p

	Po Blaine-ju	Po Lea-Nurse	Računsko
Polivinilklorid	11.700	11.790	11.880
Thiogutt	1.720	1.835	1.645

Kot vidimo je matematična metoda, v kolikor je dovolj pažljivo izvedena, popolnoma natančna za primerjalne meritve. Zaradi tega sem tudi v svojem delu uporabljal izključno matematične metode. Tam kjer mi je bilo mogoče z mikroskopom določiti faktor oblike, sem ga upošteval. V vseh dvovaljivih primerih in predvsem pri primerjavih več vzorcev, pa sem dosledno upošteval le idealizirane specifične površine.

DROBLJIVOST VZORCEV

Martensova definicija trdote pravi, da je le-ta upor, s katerim se neka snov upira razenju s drugim tršim telesom. Za določanje trdote obstojajo razne klasične metode, kot so poskus s kroglico (Brinell), poskus s diamantom (Rockwell) itd. . Težave pa nastanejo, če hočemo določiti drobljivost oziroma sposobnost za sletje, ker je ta lastnost odvisna od cele vrste zunanjih faktorjev in lastnosti preiskane snovi. Ker je trdota samo ena izmed komponent, ki določajo drobljivost, je zelo težko najti direktno zvezo med obema vrednostima, kar velja prav posebej še za krhke snovi.

V običajnem tehničnem izrazoslovju govorimo o krhkih snoveh takrat, kadar pri zlomu le malo, ali pa sploh ne opazimo plastičnih deformacij na zlomljenem mestu. Izraz "krhka materija" se nanaša torej izključno na izgled lomne razpoke, dočim o vzrokih ničesar ne pove.

Pri krhkem zlomu, ki je posledica nateznih sil, nastopajo sledeči vplivi, ki so zelo važni :

- 1) napetostno stanje ;
- 2) temperatura med obremenitvijo ;
- 3) menjajoče obremenitve.

Z zunanjimi obremenitvami in iz dimenzij elementa, je mogoče s teorije elastičnosti določiti napetostno stanje poljubne točke v obremenjenem telesu. Napetostno stanje podajamo

s tremi glavnimi normalnimi napetostmi $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ in s njenimi smermi v prostoru. Z Mohrovimi krogi napetosti, je mogoče to stanje pregledno prikazati. Napetosti smatramo kot notranje sile, ki jih mora materija proizvajati in so merilo za obremenitev snovi na določenem mestu.

Obremenitve, ki so večje od zgoraj omenjenih napetosti, povzročajo trajne deformacije - tudi zlom; v kolikor pa so manjše - le elastične deformacije. Upornost nekega telesa je torej enaka zunanji sili deformacije na enoto ploskve, njena smer pa je ravno nasprotna smeri zunanje sile. V nasprotju s tem pa moramo ločiti kalavost oziroma drobljivost snovi, predvsem tam, kjer je snov prepražena s sistemom razpok. Zaradi tega je izredno težko definirati drobljivost, čeprav je le-ta poleg ostalih funkcij tudi funkcija trdote. Če pri tem pomislimo na celo vrsto kombinacij, ki morejo pri drobljivosti nastopiti in na vrsto aparatov, s katerimi ta parameter določamo, potem je razumljivo, od kod toliko težav pri določanju drobljivosti in njeni definiciji z enim samim parametrom. Diskrepanca med trdoto in drobljivostjo neke snovi, je posebno vidna takrat, kadar ima snov zelo visoko trdoto.

Ker sem skušal čim bolj karakterizirati drobljivost preiskanih vzorcev, predvsem zaradi njenega vpliva na kinetiko drobljenja, sem si postavil težko nalogo. Na razpolago sem imel nekaj metod, nekatere pa sem poskušal na novo aplikirati na problem drobljivosti. V ta namen sem raziskal tr-

dote posameznih vzorcev z Brinellove in Rockwellove metode, določeval sem indeks drobljivosti, upornost napram drobljenju in ponašanje posameznih zrn pri stiskanju (free crushing). Na podlagi dobljenih rezultatov sem poskušal najti medsebojno zvezo med temi metodami in možnost aplikacije na kinetiko drobljenja.

Koeficient drobljivosti

Koeficient drobljivosti velja le za določeno drobilno napravo, ne moremo pa govoriti o neki naravni konstanti "drobljivosti". Vendar moremo iz dobljenih rezultatov napraviti zelo dobre zaključke, ki imajo tudi splošno veljavnost, vsaj v nekaterih vprašanjih (n. pr. selektivnost drobljenja, kar sem obdelal v razpravi "Drobljenje kot obogatitveni postopek" RMZ 2, letnik 1958).

Ker so številni poskusi pokazali, da je drobljivost odvisna od zrnatosti, se morajo vsi poskusi izvršiti z vzorci popolnoma enake zrnatosti. Zaradi tega sem delal z vzorci o do 4 mm, katerih sestava odgovarja idealni sejalni analizi v RRS diagramu. Granulacijska sestava takšnega vzorca je sledeča:

Zrnatost mm	Utež.dobitek %	Odsevek %
0 - 0,25	22,2	77,8
0,25 - 0,5	13,3	64,5
0,5 - 1,0	17,5	47,0
0,1 - 2,0	20,0	27,0
2,0 - 3,0	11,0	16,0
3,0 - 4,0	16,0	-

Specifična idealna površina tega vzorca je $770 \text{ cm}^2/\text{g}$, povprečna zrnatost $d^* = 1,415$ in koeficient enskomernosti $n = 0,9$.

Ker je bilo z mnogoštevilnimi, tudi mojimi poskusi ugotovljeno, da drobljeni vzorci tega manj odgovarjajo eksponentalnemu zakonu granulacijskega sestava, čim dalj je trajalo drobljenje, ker se pri tem tvorijo sekundarna zrna - lističi, je poskus omejen na čas ene minute. Tudi koločina igra bistveno vlogo, zaradi tega je znašala teža preisküševanega vzorca 200 g.

Indeks drobljivosti je kvocient, ki ga dobimo s primerjanjem specifične površine pred poskusom drobljenja in po enominutnem mletju v mlinu. Koeficient je torej brezdimenzijsko število, ki nam pove za koliko se je povečala površina vzorca zaradi drobljenja. Z medsebojno primerjavo moremo pri raznih vzorcih zaključiti na njih sposobnost mletja ne samo v eni napravi, ampak z večjim ali manjšim odstopanjem za vse naprave, kar sem s svojimi poskusi tudi dokazal.

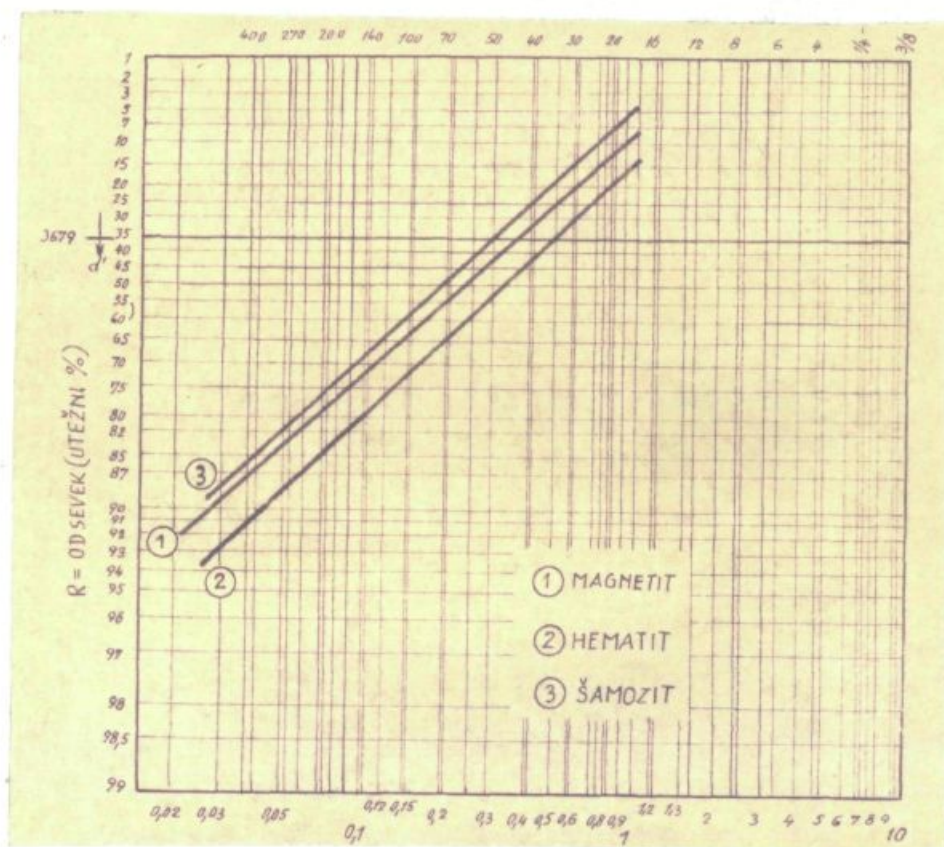
Vsak vzorec sem preiskal petkrat ter z aritmetično sredino dobil objavljene rezultate. Posebno pažnje sem posvetil sejalnim analizam, ker nepravilno sejanje popolnoma pokvari rezultate. Za izračunavanje specifičnih površin in izvrednotenje sejalnih analiz sem uporabljal grafične diagrame, katerih rezultate sem kontroliral in korigiral z matematično analizo. Pri vseh poskusih sem določil samo idealizirano specifično površino, ker faktor oblike tako in tako odpade zaradi definicije indeksa drobljivosti, ki je enak kvocientu spec. površin pred in po drobljenju.

$$D_i = \frac{O_2}{O_1} = \frac{O'_2 \cdot f/8}{O'_1 \cdot f/8} = \frac{O'_2}{O'_1} \quad 31)$$

Ker obstoja možnost, da se faktor oblike med drobljenjem spremeni, sem pri vsakem vzorcu mikroskopsko določeval faktor oblike pred in po poskusu drobljenja. Vsa merjenja so pokazala, da se pri mehkalem drobljenju, katerega sem uporabljal za svoje poskuse, faktor oblike ne spremeni. Ta ugotovitev se sklada tudi z rezultati drugih raziskovalcev. Tudi koeficient enakomernosti "n" se med kratkotrajnim drobljenjem bistveno ni spreminjal, kar so prav tako ugotovili tudi drugi raziskovalci.

Vse poskuse sem izvršil v močnarju za analitsko mletje, sejanje pa z avtomatično sejalno aparaturo in siti nadžarskega porekla po DIN 4188. Vkljub temu, da sejanje pri 40 μ ni običajno, niti predvideno, sem ga izvršil zaradi lažjega

izvrednotenja rezultatov (sl. 12).



sl. 12.

V naslednji raspredelnici podajam rezultate povprečnih sejalnih analiz za vse vzorce. Vse vrednosti so podane v utežnih odstotkih in so rezultat aritmetične sredine petih meritev.

Granulacija	Magnetit	Hematit	Šamozit	Siderit	Oolit.ruda
3 - 4	-	-	-	-	-
2 - 3	-	-	-	-	-
1 - 2	8,0	14,0	5,0	13,5	12,8
0,5 - 1	17,0	20,5	14,5	20,0	21,3
0,25 - 0,5	23,5	22,5	23,5	23,4	22,9
0,0 - 0,25	51,5	43,0	57,5	42,5	43,0

V naslednji razpredelnici pa so prikazane vrednosti specifičnih površin izdrobljenih vzorcev in indeks drobljivosti.

Parameter	Magnetit	Hematit	Šamozit	Siderit	Oolit.ruda
Spec. površina cm^2/p	1700	1200	1950	1250	1300
Indeks drobljenja	2,21	1,56	2,54	1,62	1,69

Razvrstitev raziskanih vzorcev, ki jo moramo napraviti na podlagi dobljenega indeksa drobljivosti, je zelo zanimiva in se more zelo dobro razločiti s kristalno zgradbo posameznih vzorcev in mikroskopske preiskavo. Kot vidimo iz razpredelnice, raste drobljivost vzorcev po sledečem vrstnem redu: hematit, siderit, oolitna ruda, magnetit in šamozit.

Hematit je izomorfen s korundom; kristalizira hexagonalno v romboedrični hemiedriji. Nima izrazite kalavosti, lom je ljuskast do neraven. Fe - in O - atomi so porazdeljeni slično kot Al - in O - atomi v korundu. V preiskanem vzorcu nastopajo luske v osnovi magnetita, epidota, granata, kalcita in kremenca. Večja zrna in luskasta struktura ovirajo drobljenje, vsaj do velikosti posameznih elementov.

Siderit je izomorfen s kalcitom in magnetitom; kristalizira hexagonalno v romboedrični hemiedriji. Lom je ljuskast in iverast. Vedno je del železa zamenjan z manganom, kalcijem

in magnezijem. V mikroskopskem preparatu vidimo, da je debelina zrna siderita zelo majhna, saj znaša povprečno 0,03 mm. Ruda je enakomerne zrnata in ne kaže nobenih sledov slojevitosti. Ponekod opazamo cele sledove brečaste teksture. Fragmenti drobnozrnatega siderita so v osnovi debelezrnatega, ki je nastal z rekristalizacijo iz prvega. Pomanjkanje vsake slojevitosti in izredno fina tekstura seveda otežkočajo drobljenje.

Oksidno-magnetitna, ali kakor jo imenujem celitna ruda, se je po indeksu drobljivosti uvrstila na tretje mesto, čeprav je cementacijske vezive izredno mehke. Drobljenje je zelo lahke do velikosti celita, potem pa se odpor proti drobljenju nenadoma poveča. Celiti so zaradi trdega magnetitnega jedra zelo odporni in se težko drobe. To lastnost rude je mogoče celo koristno izrabiti za selektivno drobljenje.

Magnetit kristalizira teseralno z oktsedričnim habitusom. Fe - in O - atomi so razporejeni tako, da tvorijo elementarne kocke. V kolikor ne bi poznali mikroskopske slike vzorca, bi pravzaprav težko pričakovali relativno visoko drobljivost. Ruda pa je sorazmerno luknjičava in vsebuje posamezna zrna pirita. Dva nekoliko plastovite teksturo s povprečno velikostjo zrn 0,1 mm. Ostale primesi - pirit, granat in maghemit imajo večja zrna. Le-ta, skupno z luknjičavostjo zelo oslabe odpornost vzorca, ki se zaradi tega relativno lahke drobi.

Šamezit, kot najlažje drobljiv vzorec, spada v skupino

mineralov kleritske skupine, katerih fizikalna svojstva se včasih približujejo siljudam. Kristalizirajo monoklinske s romboedričnim ali hexagonalnim habitusom. V mikroskopskem preparatu opazimo sploščene eliptične colite, ki dajejo videz škrilavosti. Zaradi tektonskega delovanja je njihova struktura zelo oslABLJENA, kar ima za posledico intenzivno drobljenje.

Zanimivo je primerjati dobljene vrednosti indeksa drobljivosti s trdoto, ki se je na preparatih določil po Brinellu in Rockwellu. Ker so vsi vzorci tudi po poliranju precej luknjičevi, sem napravil na isti ploskvi več meritev. V naslednji razpredelnici podajam minimalne in maksimalne vrednosti, dobljene na podlagi poskusa po Brinellu in Rockwellu.

Mineral	Rockwell kp / mm ²	Brinell kp / mm ²
Heavit	90,5 - 135,5	—
Siderit	82,5 - 110,2	—
Colitna ruda ¹⁾	75,5 - 95,0	25,0 - 32,6
Magnetit	76,0 - 88,5	—
Šamosit	—	38,0 - 49,0

Pri colitni rudi so večje vrednosti merjene na posameznih colitih, nižje pa na vezivu.

Kot vidimo iz razpredelnice, je analognost s indeksom drobljivosti presenetljiva, čeprav principijelno ni direktne

zveze med trdoto in drobljivostjo. Takšno presenetljivo zvezo dobim tudi pri kasnejših poskusih, o katerih bo še govora. Smatram da pri visoki trdoti ni medsebojne zveze med trdoto in drobljivostjo; da pa pri mineralih z nižjo trdoto ta zveza nedvoumno obstoja. Seveda ne smemo pri tem izolirati posamezne kristale in njihovo kristalografsko trdoto primerjati z drobljivostjo, ampak moramo rudo smatrati kot celoto in upoštevati trdoto kristalnega agregata. V tem primeru pa vsekakor obstoja medsebojna zveza med trdoto in drobljivostjo.

Prosto drobljenje

Precej podatkov o ponašanju posameznih mineralov moremo dobiti tudi pri procesih tkzv. "prostega drobljenja". Pri drobljenju večjih količin pride vedno do tega, da se določeni pojavi zabrišejo, ker se sile drobljenja ne prenašajo neposredno na vsako posamezno zrno vzorca, ampak le na neposredno prizadeta zrna. Tak primer je najbolj pogost pri poskusih mletja v krogljčnih mlinih, s katerimi so predvsem študirali kinetiko mletja.

Pri prostem drobljenju proizvajamo sile na posamezna mineralna zrna tako dolgo, dokler se le-ta ne porušijo in zdrobe. S tem dobimo naravno zrnatost brez vsake ovire okolice. Ta zrnatost pa je karakteristična za vsako snov posebej in nam mora obenem precej povedati o kinetiki drobljenja v zvezi s fizikalnimi lastnostmi snovi, ki jo preiskujemo. S temi poskusi je mogoče tudi indirektno dokazati

veljavnost Graffithovih hipotez, obenem pa ovreži Rittin-gerjeve teorije o drobljenju. Žal pa je nemogoče dobljene rezultate aplicirati na industrijsko drobljenje, čeprav so skoraj vsi drobilni mehanizmi slični prostemu drobljenju (s izjemo valjčnih mlinov in udarnih mlinov z veliko hitrostjo). Industrijske drobilne naprave namreč porabijo 20 do 30 krat več energije, kot to zahteva prosto drobljenje in največji del tega prebitka se porabi na drobilnih površinah stroja.

V svojih poskusih sem uporabljal umetno izoblikovana zrna pravilnih geometričnih oblik vseh preiskanih vzorcev, katere sem nato stiskal v hidravlični stiskalnici, ki dopušča tlake do 50 ton. V mnogih primerih se je pokazalo, da je s modelnimi zakoni mogoče ugotoviti, v kakšni meri se spremeni iskana lastnost, če se spremenijo prostorske dimenzijske razmere. Ta problem je posebno važen pri laboratorijskih modelih, ki jih hočemo kasneje aplicirati na industrijske dimenzije.

Pri modelnih zakonih največkrat operiramo s sledečimi dimenzijami: dolžinsko merilo $\lambda = l/l_m$, časovno merilo $\tau = t/t_m$ in merilo za silo $K = k/k_m$. Pri vseh poskusih drobljenja težimo edinele za zlomom mineralnih zrn, iz česar sledi, da je potreben tlak za - to enak:

$$K = \sigma_B / l^2 \quad (22)$$

pri čemer pomeni σ_B ... tlačno napetost, l^2 ... pa površino vzorca. Prav tako moremo potrebno deformacijsko delo (to je

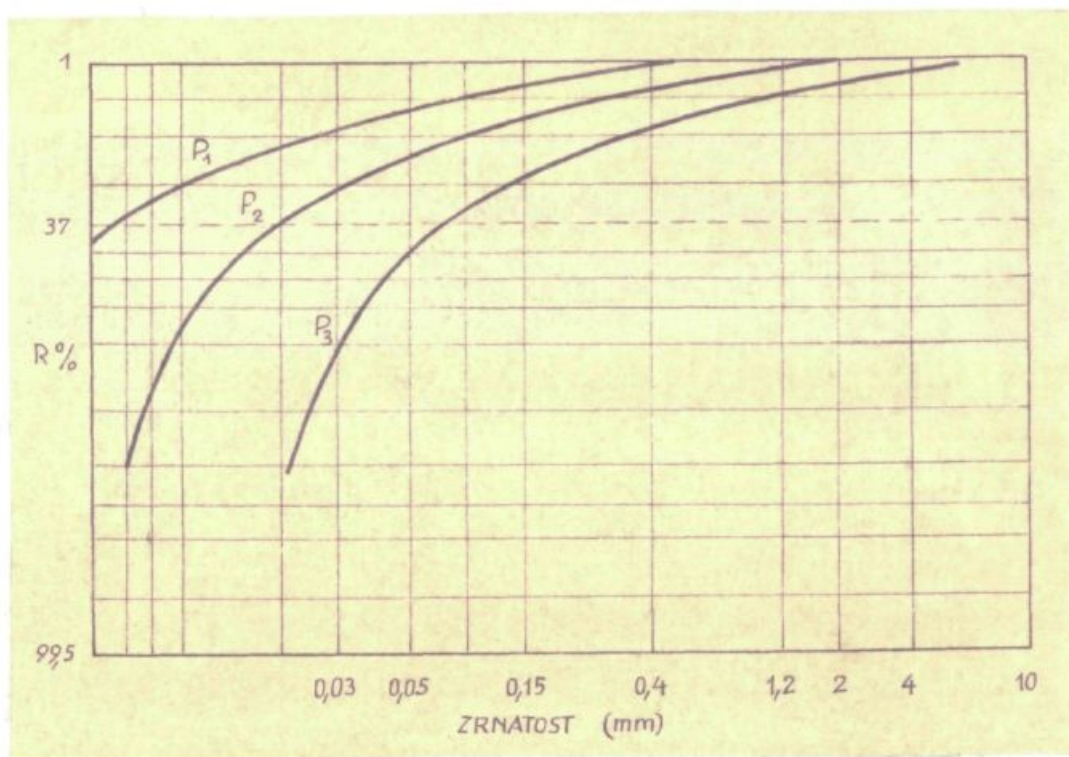
delo, ki je potrebno, da se 1 kg snovi začne drobiti) izraziti kot sledi:

$$A = K \cdot l / V \cdot \gamma = \sigma_B \cdot l^2 \cdot l / l^3 \gamma = \sigma_B \cdot \gamma \quad 33)$$

kjer pomeni V ... volumen delca, ki ga obremenimo, γ ... njegovo specifično težo. Iz gornje enačbe pa moramo napraviti nekoliko važnih zaključkov. Poskusi številnih avtorjev so namreč pokazali, da je granulacijska krivulja s tlakom zdrobljenih vzorcev, več ali manj premica. Če torej v stiskalnici stiskamo oziroma boljše rečeno tlačimo dva zrna, ki sta si v medsebojnem geometrijskem razmerju $l_1/l_2 = \lambda$, potem moremo pričakovati, da se tudi zrnatosti po drobljenju v medsebojnem razmerju λ . Iz tega pa zopet sledi, da so specifične površine v razmerju $1/\lambda$ (zaradi tega, ker je specifična površina enaka $D/V = l^2/l^3 = 1/l$).

Iz enačbe za deformacijsko delo pa vidimo, da je delo drobljenja neodvisno od λ . Kadar imamo namreč enako snov je $\sigma_B = \sigma_{Bm}$ in $\gamma = \gamma_m$, potem je seveda $A/A_m = \sigma_B \gamma_m / \sigma_{Bm} \gamma = 1$. Zgoraj sem omenil, da so specifične površine v medsebojnem razmerju $1/\lambda$. Ker pa mora biti delo drobljenja enako v obeh primerih (namreč delo, ki je potrebno, da se površina v 1 kg snovi poveča za 1 m²), pomeni, da so specifična dela drobljenja v razmerju začetnih zrnatosti. To je pa v nasprotju z zakonom Rittingerja, ki pravi, da je povečanje površine proporcionalno vloženi delu. Da temu ni tako, moremo prav tako dokazati z majhne hipoteze in praktičnim poskusom.

Če privzamemo teoretično drobljenje - kalanje, potem dobimo iz kockice stranice 1 cm najprej 8 delcev s stranico 0,5 cm, nato 64 delcev s stranico 0,25 itd. . Stranica kockic se zmanjšuje vedno za polovico, površina se pri tem veča dvakratno, število zrna pa raste s 3. potenco. Sejalni diagram takšnega unišljenega poskusa je prikazan na sl. 13, (premica p_1) za 2o drobilnih stopenj.



Sedaj pa si zamislimo praktičen potek takšnega drobljenja. Imamo n. pr. vzorec z 2o kockicami, katerih stranice so pravtako 1 cm. Pri prvem drobljenju pa se ne zdrobe vse kockice po zgoraj zmišljeni shemi, ampak ostane prva kockica cela, druga se zdrobi na 8 delov, tretja na 64 delov itd..

Na ta način dobimo granulacijsko porazdelitev, ki jo prikazuje krivulja p_2 ; kot vidimo iz slike, je razlika med obema krivuljama, in seveda tudi med obema površinama, precejšna. Razumljivo je, da potekajo praktični poskusi drobljenja še bolj neugodno, kot to prikazuje krivulja p_3 , ki je rezultat drobljenja 20 zrn siderita iz Vareša, katerih začetna velikost je bila 1 cm (ekvivalentna velikost odprtine sita). Razdalja obeh krivulj je direktno merilo za nepopolnost tehničnih procesov drobljenja napram idealno zamišljenim procesom. Vidimo torej, da se surovina pri drobljenju z udarci ali trenjem drugače obnašajo in slede drugim zakonom, kot pa teoretično drobljenje, na podlagi katerega so postavili svoje hipoteze Rittinger, Kick in delno tudi Bond.

Ne bi hotel na tem mestu podrobneje razpravljati o teh hipotezah, o katerih je bilo napisanega že preveč in vkljub temu še vedno ne vemo, ali sploh katera drži. Vkljub obilici laboratorijskih podatkov še vedno ne moremo dati dokončen odgovor, kako se bo neka snov obnašala pri drobljenju.

Večina obstoječih zvez med energijo in pomanjšanjem zrnatosti krhkega materiala izhaja iz enega samega izhodišča, ki ga moramo matematično definirati kot sledi:

$$dE = - C dx/x^m \quad (34)$$

kjer je dE .. infinitezimalna sprememba energije, x .. zrnatost in C .. konstanta, dx .. infinitezimalna sprememba velikosti zrn in n .. konstanta.

Gornja enačba pove, da je energija, ki je potrebna, da povzroči majhno spremembo zrnatosti, proporcionalna spremembi zrnatosti in obratno proporcionalna zrnatosti blaga, ki ga drobimo na nek eksponent.

Leta 1867 je Rittinger predpostavil, da je za zmanjšanje zrnatosti potrebna energija, ki je proporcionalna novonastali površini, čeprav za to ni imel fizikalne osnove. Rittingerjevo hipotezo moremo matematično izraziti kot sledi:

$$E_R = K(O_2 - O_1) = K' \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad (36)$$

kjer pomeni E_R . porabljena energija za enoto prostornine, K .. konstanta in O_1 ter O_2 sta začetni in končni površini (specifični), x_2 in x_1 ... končna in začetna zrnatost. Gornje enačbe moremo tudi dobiti z integracijo enačbe (34), če damo eksponentu "n" vrednost 2.

$$\int_0^{E_R} dE = -C \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^2} \quad ; \quad E_R = K' \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right) \quad K' = C \quad (37)$$

Leta 1885 je Kick predložil svoje teorije ki pravi, da povzročajo ekvivalentne količine energije ekvivalentne geometrijske spremembe zrnatosti. Njegovo hipotezo moremo matematično izraziti tako, da integriramo enačbo 34 in damo eksponentu n vrednost 1

$$\int_0^{E_K} dE = -C \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x} \quad ; \quad E_K = -C \ln(x_1/x_2) = K'' \lg(x_1/x_2) \quad K'' = 2,3 \cdot C \quad (37)$$

Gross, Zimmerley in Piret so dokazali, da je Rittingerjeva enačba uporabna za bolj debela zrna; Walker in Shaw pa dokazujeta, da sledi tvorba zelo drobnih zrn ($< 1\mu$) pri obdelavi kovin in mletju Kickovemu zakonu. Pri praktičnem drobljenju pa še nobene od obeh hipotez nima splošne veljave. Prav zaradi tega je Bond predlagal svojo definicijo, ki jo dobimo, če enačbo 34) integriramo in damo eksponentu "n" vrednost 1,5

$$\int_0^{E_B} dE = -C \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^{1,5}} \quad E_B = K''' \left(\frac{1}{\sqrt{x_2}} - \frac{1}{\sqrt{x_1}} \right)$$

$K''' = 2C. \quad 38)$

Po Rittingerju bi morali torej dobiti v diagramu "specifična površina: delo drobljenja" premico. Dejansko pa dobim pri svojih poskusih vedno proti abscisi upognjeno krivuljo. Teoretično potrebno delo za drobljenje je, kot sem že uvidel omenil, določil Smekal na 10^{-4} do 10^{-3} kgcm/cm², (1) to je 1 kg cm dela ustvari 1000 do 10.000 cm² površine v časovni enoti. Edser je izračunal za kremen potrebno delo na 1070 cm² za 1 kg cm. Pri poskusih Zimmerley-a in Grossa s kroglo (drop wight method) pa je bila dobljena vrednost 17,56 cm² na 1 kgcm. Pri mojih poskusih sem dobil n. pr. za hematit Danjan (glej naslednje poglavje) 5 cm² površine za 1 kgcm dela, kar pomeni, da se samo 0,5 % vložnega dela direktno porabi za povečanje površin. S tem pa je dovolj jasno

(1) Zaradi primerjave podajam vrednosti c - g - s sistemu.

dokazano, da je teoretična baza Rittingerjevega, Kickovega, pa tudi Bondovega zakona nepravilna.

Nevzdržnost teh hipotez pokazujejo tudi praktični poskusi, ki so bili napravljeni na podlagi razmišljanja s modelno teorije, opisane na začetku poglavja.

Za drobljenje potrebne tlačne sile je namreč mogoče določiti s poskusom. Za poskuse sem uporabljal kockice napravljene iz vzorcev magnetita Damjan, hematita Damjan, oolitne rude Vardište, siderita Vareš in šamosita Kičevo. Kockice so bile napravljene v dveh velikostih s sledečimi dimenzijami: $l_1 = 14,8 - 14,9$ mm in $l_2 = 4,7 - 4,9$ mm ; to je s geometrično proporcionalnostjo $\lambda \approx 3,09$. Za poskuse je bilo napravljenih po 10 kockic, katere sem nato obremenjeval v hidravlični stiskalnici do porušitve. Pri teh poskusih je ugotovljeno, da so produkti drobljenja med seboj geometrijsko podobni, v kolikor ne upoštevamo nastalih praškov. Za porušitev so bile pri posameznih vzorcih potrebne sledeče obremenitve (povprečna srednja vrednost iz 10 merjenj) :

	I. $a_1 = 14,90$ mm	II. $a_2 = 4,9$ mm
hematit	4050 kp	1330 kp
siderit	3860 kp	1260 kp
oolitna ruda	3520 kp	1150 kp
magnetit	3150 kp	1020 kp
šamosit	2960 kp	970 kp

Is gornje tabele vidimo, da so obremenitve posameznih

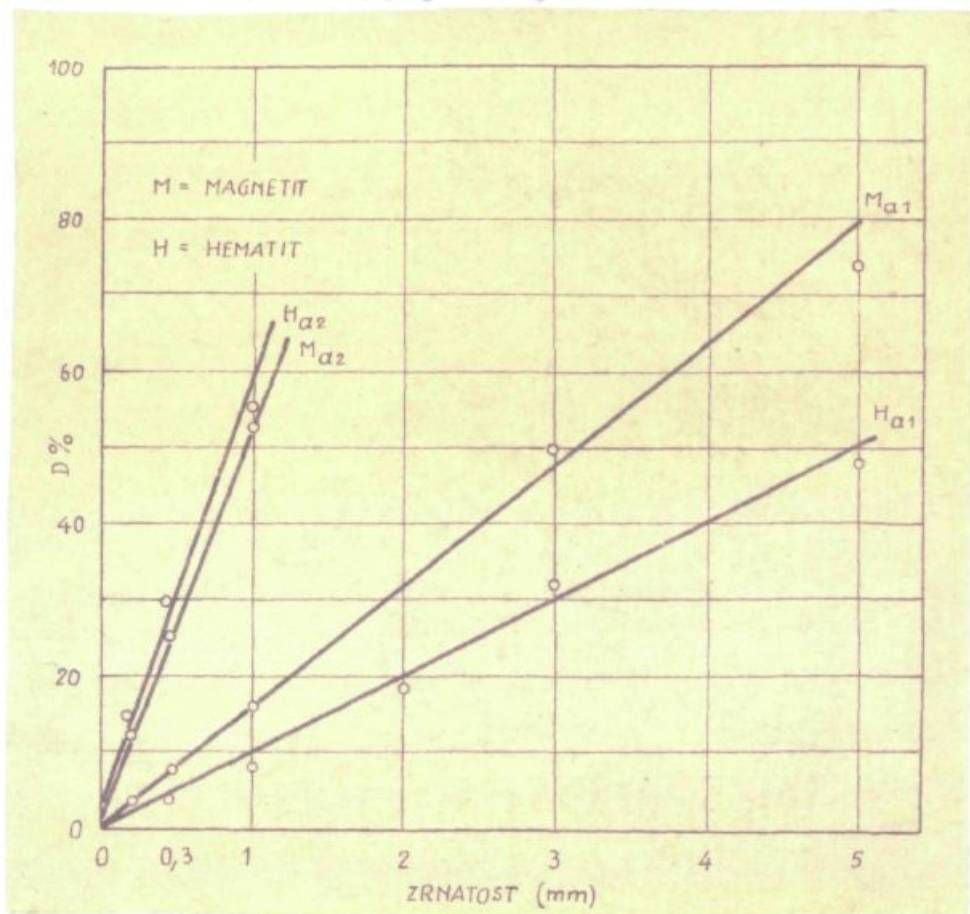
kockic v istem medsebojnem razmerju, kot je razmerje njihovih stranic to je $\lambda = 3,09$. Zanimiva je tudi ugotovitev, da si sile ki so potrebne za zlom kockic, slede v istem vrstnem redu, kot ga imamo pri dosedanjih raziskavah indeksa drobljivosti in trdote po Brinellu oziroma Rockwellu.

Uvodoma sem postavil trditve, ki izvirajo iz modelnih zakonov, da si morajo biti zdrobljeni delci v medsebojnem razmerju λ , oziroma njihove površine v razmerju $1/\lambda$. Zaradi tega sem zdrobljeni material vseh kockic združil v en sam vzorec in napravil sejnalno analizo na standardnih sitih po DIN - normah. Ker je natančnost sejanja bistven element pri raziskavi, sem vsako sejnalno analizo napravil trikrat in aritmetično sredino smatral kot pravi rezultat. V naslednji razporednici podajam dobljene vrednosti za presevek v odstotkih.

Zrna- test mm	Presevek v odstotkih									
	magnetit		siderit		hematit		oolit		šamozit	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
5,0	74,0	-	53,2	-	48,0	-	62,5	-	83,2	-
3,0	50,5	-	44,8	-	32,5	-	46,2	-	66,3	-
1,0	16,8	53,7	23,6	70,8	18,2	56,5	24,3	75,5	38,6	-
0,5	8,2	25,0	14,5	45,0	9,3	30,9	15,5	46,2	19,5	62,0
0,2	4,1	12,3	9,3	30,4	4,5	14,6	8,7	26,3	4,2	13,5
0,06	1,2	3,6	2,2	7,1	0,3	1,7	3,5	10,2	1,3	3,8

Vrednosti, ki jih dobimo iz gornje tabele in nanesimo

v diagram sejalne analize, daje približno prenice, ki gredo skozi koordinatno izhodišče (sl.14).



sl. 14.

To pa pomeni, da so zdrobljeni delci, ki jih dobimo z drobljenjem večje kocke, geometrično podobni delcem izdrobljene manjše kocke. Razmerje med abscisnima vrednostima, ki pripadajo istim ordinatom, je približno konstantno in znaša zopet $\lambda \approx 3,09$. To pa negira Rittingerjev zakon, ker le-ta ne upošteva, da se arno, ki doseže določeno maksimalno napetost poruši. Zanimivo je tudi, da si presevky na sitih slede po istem vrstnem redu, kot ga dobimo pri dosedanjih raziskavah; vzorec s največjim indeksom drobljivosti, ima največji odstotek presevky in obratno.

V kolikor drži naša modelna teorija, si morajo biti novo nastale površine v medsebojnem razmerju $1/\lambda$. Grafično dobljene površine vseh vzorcev so to predpostavko prav tako potrdile; edina razlika je nastala pri šamozitu, kjer so si površine sicer v razmerju $1/\lambda$, vendar so nekoliko manjše kot pa površine magnetita. Naslednja razpredelnica prikazuje vrednosti novo nastalih idealiziranih površin majhnih in velikih kockic po stiskanju v hidravlični stiskalnici.

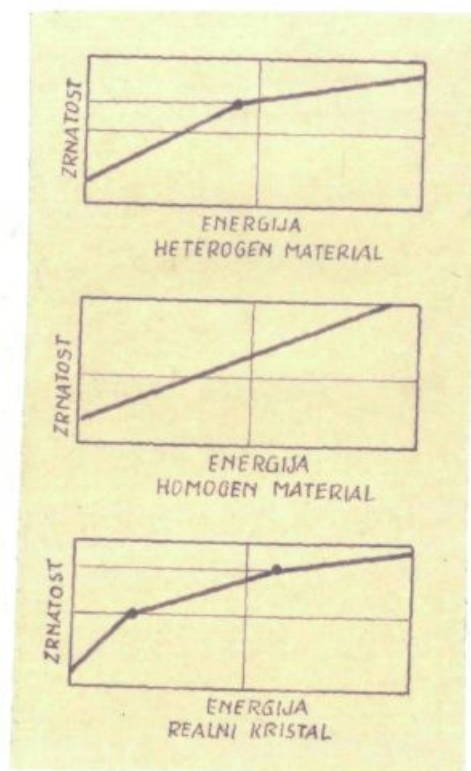
Vrsta kock	Specifične površine cm^2/p				
	Hematit	Siderit	Oolit.ruda	Magnetit	Šamozit
velike	170	810	720	1720	1300
male	48	260	200	480	400

Odpornost proti drobljenju

Morebiti gornji izraz ni najboljši in je privzet iz analogije z elektrotehniko, vendar zelo dobro karakterizira lastnost materije, ki jo hočemo zdrobiti in ki se tej spremembi svoje oblike upira. Za točnejšo razlago tega pojava, moram ponovno poseči v strukturo krhkih snovi.

Kot je znano, so vse krhke snovi bodisi homogene ali pa heterogene. Pri tem pa moramo razlikovati dve vrsti stanja n. pr. čisti magnetit je homogen s stališča uniforantosti kristalne zgradbe, toda heterogen, če opazujemo mehanske last-

nosti posameznih kristalov. Seveda se računine, torej tudi moji vzorci, heterogeni tako s stališča kristalne zgradbe, kakor tudi s stališča mehanskih lastnosti. Karakterističen primer takšnega stanja so vzorci magnetitno oolitnih rud. Razmeroma trd oolit je cementiran v precej mehkejšo osnovo; pri drobljenju bomo torej najprej opazovali zlom vzdolž površin posameznih oolitov, šele kasneje bo prišlo do zdrobljenja oolitov samih. Vse to se mora odraziti na zrnatosti in vložnem delu, ki je v začetku majhno, nato pa zelo hitro raste. Če torej napravimo diagram, kjer nanesemo odvisnost vložnega dela od zrnatosti oziroma površine moremo prav lepe odčitati strukturo snovi, skupno s njeno odpornostjo proti drobljenju. Pri tem so možni teoretično trije slučajji: (Sl.15).



a) Pri popolnoma homogenem materialu bo specifična površina naraščala proporcionalno z vloženo energije drobljenja, karbse v diagramu odraža s premico. Naklonski kot premice je obena merilo za odpornost proti drobljenju. Čim bolj strma je premica, to je čim hitreje narašča površina ob počasnem prirastku vložene energije, tem manjša je odpornost snovi proti drobljenju. Obratno pomeni majhen naklon premice počasno naraščanje površine oziroma velike odpornosti proti drobljenju.

b) Ker so snovi heterogene, sestavljene iz kristala različne odpornosti, imamo večinoma primer diagrama, kot ga prikazuje slika 15b. V začetku imamo hitro drobljenje, ker se poruši le vez med posameznimi kristali ali pa zrna in osnove (glej primer oolitov). Površina hitro narašča ob sorazmerno majhni vloženi energiji. Ko pa pride do drobljenja posameznih zrn, se poveča odpornost in prirastek površine se zmanjša. To se manifestira z zmanjšanjem naklona premice.

c) V uvodnem poglavju sem govoril o kristalnih, mozaičnih blokih in drsninah med kristaliti. Če si zamislimo drobljenje primera pod b) še naprej do velikosti kristalitov, bi morali slej ko prej opazovati stanje, kot ga prikazuje slika 15 c. Ves material je zdrobljen na velikost kristalitov, ki so več ali manj idealni v smislu mehanske odpornosti. Rezultativno je, da bo za drobljenje le-teh potrebna še večja energija, prirastek površine pa bo manjši. Na diagramu se to opazi še z manjšim naklonom premice.

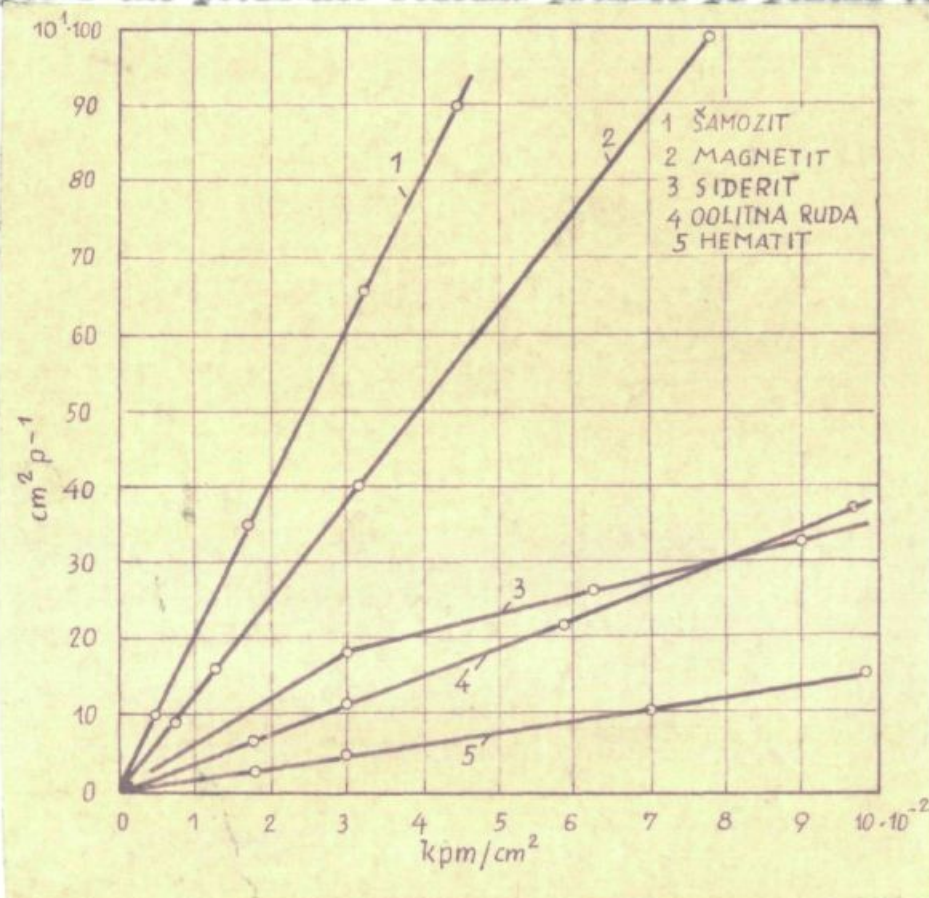
Iz tega vidimo, da je mogoče s tangensom naklonskega kota premice karakterizirati mehansko odpornost snovi proti drobljenju. Odpornost proti drobljenju bi bila torej definirana s $k_p \text{ m/cm}^2$, če na ordinato diagrama nanašamo prirastek specifične površine v $\text{cm}^2 \text{ p}^{-1}$, na absciso pa vloženo delo v kpa p^{-1} . Iz dobljenih vrednosti bi mogli napraviti precej važnih zaključkov o kinetiki drobljenja, o selektivnosti drobljenja in o makrostrukturi snovi. Zaradi tega sem vse vzorce preiskusil v hidravlični stiskalnici, določal vloženo delo in prirastek specifične površine. Pri teh poskusih sem se ravnal po principih prostega drobljenja, to je, da se v začetku posamezna zrna ne ovirajo med seboj in imamo že opisano prosto drobljenje. Pri posameznih poskusih sem polagoma povečal silo, da bi na ta način dobil več točk za diagram odpornosti proti drobljenju.

V naslednji razpredelnici podajam dobljene rezultate, ki so dobljeni iz aritmetične sredine šestih meritev. Razumljivo je, da bi bila natančnost precej večja, če bi lahko napravil še več meritev. Žal je samo za en sam podatek potrebno dolgotrajno in zamudno laboratorijsko delo. Smatram, da so dobljene vrednosti realne, posebej še zato, ker se popolnoma skladajo s ostalimi rezultati. Pri stiskanju zrn pod bato hidravlične stiskalnice bi teoretično morali upoštevati tudi deformacije bata. Kratek proračun pa mi je pokazal, da so te vrednosti zanemarljive, ker so manjše od sistematske napake same meritve.

Mineral	Specifična površina $\text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	Delo drobljenja kp m p^{-1}
Siderit	70	88
	104	146
	212	294
	382	485
Hematit	25	87
	48	150
	102	347
	153	491
Colitna ruda	25	13,6
	180	147
	250	314
	330	450
Magnetit	92	38
	164	60
	394	160
	192	345
Šamozit	100	25
	352	82
	665	162
	903	230

Če hočemo izraziti odpornost proti drobljenju, moramo drobljene rezultate nanesti v diagram, ki ga prikazujem na sliki 16.

Čim bolj je strma naklon premice oziroma krivulje tem lažje se drobi vzorec, saj z relativno malim delom dosežemo velike specifične površine. Položna premica pa pomeni velik



sl. 16.

odpor proti drobljenju. Posebno zanimiva je krivulja za oolitno rudo. Le-ta je najprej strma, ker heterogenost oolitov, ki so vloženi v mehkejšo snov, omogoča hitro in lahke drobljenje. Ko so posamezni ooliti osvobojeni, postane nadaljnje drobljenje vse težje, ker se odraža v spremembi naklona krivulje, ki postane položnejša. Iz tega vidimo, da je z opisano metodo mogoče koristno raziskovati trdoto mineralnih agregatov, predvsem iz separacijsko-tehničnega vidika.

Iz naklonov premic oziroma krivulj moremo izračunati odpornost proti drobljenju (kp m/cm^2), ki nam pove koliko

kp m dela potrebujemo, da se specifična površina poveča za 1 cm^2 . Vzorci katere raziskujem v svojem delu imajo sledečo odpornost.

Hematit	$3,192 \cdot 10^{-2}$ kp m/cm ²
Siderit	$1,265 \cdot 10^{-2}$ "
Oolitna ruda	$1,255 \cdot 10^{-2}$ "
Magnetit	$0,280 \cdot 10^{-2}$ "
Šamosit	$2,255 \cdot 10^{-2}$ "

Zelo zanimiva je primerjava med rezultati, ki sem jih dobil na podlagi drugih metod. Primerjalna rasporednica nam da o tem najboljši odgovor.

Vzorec	Indeks drobljivosti	Odpornost drobljenja	Trdota po Brinellu oziroma Rockwellu
Hematit	1,56	$3,192 \cdot 10^{-2}$	90,5 - 135,5
Siderit	1,62	$1,265 \cdot 10^{-2}$	82,5 - 110,2
Oolitna ruda	1,69	$1,255 \cdot 10^{-2}$	75,5 - 95,0
Magnetit	2,21	$0,380 \cdot 10^{-2}$	76,0 - 88,5
Šamosit	2,54	$0,255 \cdot 10^{-2}$	38,0 - 49,0

Večji odpornosti drobljenja odgovarja večja trdota po Brinellu oziroma Rockwellu in manjši indeks drobljivosti. Vsi rezultati, dobljeni po treh različnih metodah se skladata in daje popolnoma enakovredne rezultate. Če upoštevamo še drobljenje posameznih kockic, smo tamkaj pravtako ugotovili isto zaporedje in isto zakonitost. Skratram za potrebno naglasiti

da je s temi metodami mogoče vnaprej laboratorijsko določiti obnašanje snovi pri drobljenju, predvsem pa možnosti selektivnega drobljenja. Z upoštevanjem Bondovih diagramov pa je mogoče precej natančno dimenzioniranje drobilnih naprav.

Ker je drobljivost oziroma njena recipročna vrednost, odpornost proti drobljenju glavno merilo za nastanek novih površin, moremo na podlagi teh podatkov napraviti zaključke tudi o kinetiki drobljenja. Časovna odvisnost nastanka novih površin bo vsekakor v vzročni zvezi z zgoraj omenjenimi parametri. Kakšna pa je njihova medsebojna odvisnost in kako vplivajo na časovne funkcije kinetike mlina, pa bom prikazal v naslednjem poglavju.

Za zaključek tega poglavja pa je potrebno še nekaj razlage o linearni odvisnosti med povečanjem površine in dovajano energijo. Iz te preproste odvisnosti bi lahko sklepali, da se mogoče za drobljenje dovajana energija spremeni v površinsko energijo potem enostavnega procesa. Premica lahko tudi naznačuje, da celotni proces sloni na relativno enostavnih postopkih. Toda če pomislimo samo na mnoge paralelne razpoke, ki dejansko nastopajo kadar drobimo plast komprimiranih delcev na enostaven način v stiskalnici, moremo ugotoviti, da sile, ki pri tem nastopajo niso niti enostavne, niti enakomerne porazdeljene, ampak so koncentrirane na nekaterih štrlečih točkah. Večina energije se spremeni v toploto in le del v površinsko energijo. Nato se delci stisnejo in proces se ponovi. Vedno moramo imeti pred očmi, da je energija, ki je potrebna za nastanek 1 cm^2 površine

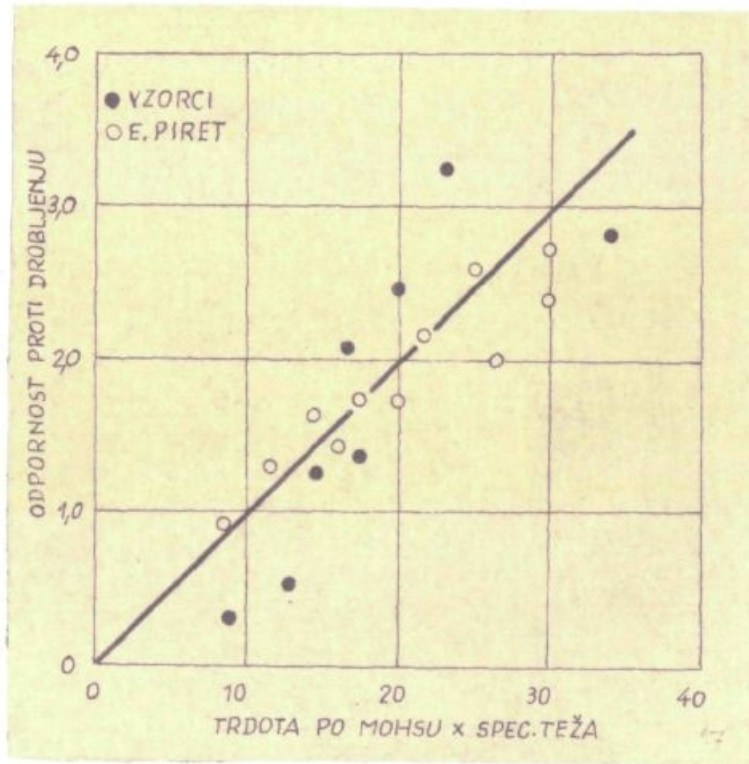
v taki plasti 50 do 1000 krat večja, kakor je teoretično potrebno, ki je izračunano iz energije vezave. Kljub dejstvu, da se samo 0,1 do 1,5 % celotne dovajane energije spremeni v površinsko energijo in da moramo pričakovati čisto slučajno in verjetno zelo zapleteno zvezo med energijo in površino, je eksperimentalno dokazano, da novo nastala površina dejansko narašča z dovajano energijo enostavno in praktično linearno. Tudi pri krogljčnem mlinu, kjer imamo opravka z zamotanimi procesi trka, stiskanje, striga in obraba, je novo nastala površina še vedno v precej širokem območju proporcionalna dovedeni energiji. Če stiskamo posamezne kockice obdelanih vzorcev, se bodo le-ti pri počasnem stiskanju nenadoma razleteli. Velikost nastalih delcev je odvisna od količine dovedene energije. Čim večji je pritisk pri drobljenju, tem drobnejši so nastali delci. Začetni pritisk, pri katerem se drobljenje začne, pa se spreminja od primera do primera, ter je predvsem odvisen od strukturnih slabosti preiskanega vzorca. Začetno periodo razširjenja razpor v vzorcu lahko primerjamo z verižnimi kemičnimi reakcijami. Kakor je pokazal Irwin in njegovi sodelavci se razpoke začnejo širiti počasi, dokler ne postane količina energije, ki doteka v razpoko iz napetostnega polja večja, kakor je delo, potrebno za tvorbo nove površine. S tem trenutkom postane razpoka nestabilna in se spontano razširja, dokler se hitrost razširjenja ne približa hitrosti zvoka, kar ima za posledico razvejanje razpoke in s tem nastanek nove površine.

Osnovna raziskovanja drobljenja imajo precej skupnega z raziskavami trdnosti materialov, s teorije kinetike in celo z nuklearnimi procesi. Popolnoma mogoče je, da nam te osnovne študije zloma dajo ključno ideje o procesih drobljenja. Na prvi pogled izgleda ta trditev precej presenetljiva, ker dosedaj nismo smatrali procese drobljenja zavisne od časa. Vendar je čas, kot bom to skušal dokazati v naslednjem poglavju, zelo važna spremenljivka. Eksperimentalno je dognano, da je pri nateznih poskusih krhkih materialov, odpornost proti poružitvi, funkcija časa. Vendar pa je treba preštudirati zelo široka časovna območja, da n. pr. lahko podvojimo ali celo potrojimo natezno trdnost.

Hitrost obremenitve je zelo važen faktor pri drobljenju. Poskusi udarjalnega drobljenja nam kažejo, da je energija, ki jo potrebujemo za nastanek loce ca^2 nove površine približno trikrat večja, kakor energija, ki jo potrebujemo za nastanek iste površine pri počasnem stiskanju.

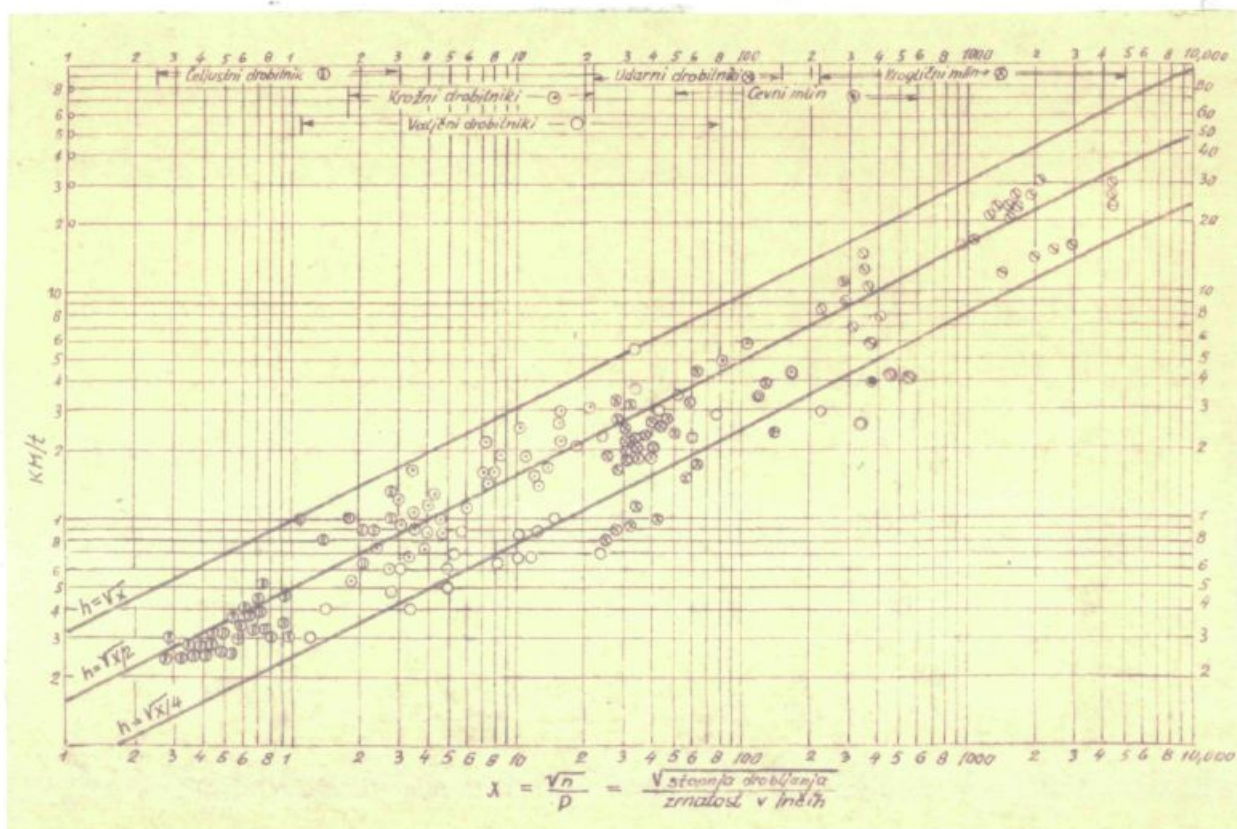
Končno bi želel na tem mestu prikazati še en presenetljiv rezultat mojih poskusov, ki potrjuje rezultate, katere je pred šestimi leti dobil E. Piret.

Razumljivo je, da je trdota materiala izražena z Mohsovim številom komajda osnovna lastnost, s katero bi želel dokazati odvisnost med odporom drobljenja in materialom, ki ga drobimo. Vendar v precej širokih obsevih ta odvisnost obstoja. Iz slike 17 vidimo, da je odvisnost verjetno cele linearne, torej da je odpornost drobljenja, izražena z dovedeno energije na enoto novo nastale površine in Mohsovo trdoto linearne.



sl. 17.

Slika kaže, da se za homogene, krhke materijale odpornost proti drobljenju ne spreminja več kakor štirikratno preko celega preiskanega območja, ki je segalo od kalcita s trdoto 3 do topaza s trdoto 8. To razmerje 4 : 1 se sklada s študijami, ki sta jih potegnili Bond in Wang na osnovi praktičnih izkušenj pri industrijskih drobilnih procesih (slika 18) Diagram prikazuje energijo, ki je potrebna za drobljenje in mletje različnih materijalov v različnih drobilnih napravah. Spodnja poševna črta je za mehke materijale, srednja za rude normalne trdote, a zgornja za zelo trde rude.



sl. 18.

Relacija, ki jo uporabljata omenjena avtorja je:

$$KM/t = K \sqrt{\frac{m^{1/2}}{P}} \quad 39)$$

kjer je redukcijski količnik "n" definiran kot velikost odprtine sita, skozi katerega gre 80 % mlevnega blaga, deljeno z velikostjo odprtine sita, skozi katerega gre 80 % zdroblje-

nega produkta. Velikost odprtine sita skozi katero gre 80 % zdrobljenega produkta (v inčih), je izražena s črko P. Vrednost "k", ki je enaka za mehek material 0,25 za srednje trd 0,5 in 1,0 za zelo trde materiale (razmerje 4 : 1), se sklada z meritvami potrebne energije v laboratorijskem drobilniku z utežjo. Vsekakor zanimiva in upoštevanja vredna analogija, ki je dobimo na podlagi teoretičnih raziskav in iz praktičnih industrijskih poskusov.

Kroglični mlin

Vse svoje poskuse, s katerimi sem poskušal določiti kinetiko procesov mletja, sem izvršil v laboratorijskem krogličnem mlinu. Smatram za nepotrebno, da bi se na tem mestu spuščal v teorijo krogličnega mlina, ki je obdelana že v tolikih knjigah in na različne načine. Morebiti bi bila potrebna samo obrobna pripomba, da večina raziskovalcev ni upoštevala drsenje in nihanje celotne mase v krogličnem mlinu.

Na tem mestu bi hotel samo na kratko ponoviti vse faktorje, ki vplivajo na mletje v krogličnem mlinu in ki jih moremo razdeliti v sledeče skupine.

I. Vplivi konstrukcijske narave:

- a) število vrtljajev krogličnega mlina
- b) delovni prerez mlina
- c) delovna dolžina mlina
- d) naklon osi mlina od vstopne do izstopne točke.

III. Vplivi, katere je mogoče spreminjati:

- a) prazen prostor med kroglicami
- b) mešanje krogel raznih velikosti
- c) teža polnitve mlina (krogel)
- d) volumen polnitve mlina
- e) profil in hrapavost notranjega plašča krogličnega mlina.

III. Vplivi, ki se stalno spreminjajo:

- a) granulacijski sestav mlevnega blaga
- b) granulacijski sestav povratnega blaga

- c) Razmerje med povratnim mlevnim in vstopnim blagom
- d) gostota povratnega in vstopnega blaga
- e) gostota iztoka iz mlina (razmerje med vodo in blagom).

Ker nas zanima predvsem potrebna sila mlina za mletje in časovni zakoni, moremo postaviti brezdimenzijske enačbe, ki karakterizirajo delovanja krogljčnega mlina. Na tem področju je največ delal H. B. Rose, katerega izvajanja citiram v naslednjem.

Potrebno silo krogljčnega mlina moremo namreč izraziti simbolično :

$$P = \phi(L, D, d, g, \gamma, N, \rho, f, e, b, E, V, \nu, \sigma, U, h, m) \quad 40)$$

V gornji enačbi imajo posamezni členi sledeč pomen:

- b premer zrna, d premer krogle,
- D notranji premer mlina, e baza naravnega logaritma,
- E energija potrebna za povečanje spec. površine za enoto, f koeficient trenja,
- g zemeljski pospešek, H relativna trdota (razmerje med trdoto krogle in trdote delcev, ki jih jemljamo),
- h trdota materiala, J polnitev mlina s krogliami v % prostornine mlina, J dolžina mlina,
- n število žetvic v mlinu, N število vrtljajev mlina (N_c kritično število) σ gostota mlevnih krogel,
- ρ gostota mlevnega blaga,
- V polnitev mlina z materialom v % medprostora med krogliami, ν kinetična viskoznost, ^{ma}
- U konsistenca kali v mlinu.

Z poznanimi principi brezdimenzijske analize, moremo enačbo 40) prevesti v posamezne brezdimenzijske skupine, ki so v medsebojni odvisnosti:

$$\left(\frac{P}{D^5 N^3 g}\right) = \phi \left\{ \left(\frac{h}{D}\right), \left(\frac{L}{D}\right), \left(\frac{dk}{D}\right), \left(\frac{g}{DN^2}\right), \left(\frac{b}{D}\right), \left(\frac{E}{D^3 N^2 g}\right), \left(\frac{\nu}{D^2 N}\right), \left(\frac{\sigma}{S}\right), \right. \\ \left. (\gamma), (f), (e), (V), (U), (u) \right\} \quad (41)$$

Teoretično moremo brezdimenzijske skupine kombinirati med seboj in je naloga funkcijske analize za eksperimentiranje, da lahko ugotovimo medsebojno odvisnost. Če posamezne brezdimenzijske skupine množimo med seboj, dobimo sledečo enačbo:

$$\left(\frac{P}{D^5 N^3 g}\right) = \phi_1 \left(\frac{g}{DN^2}\right) \cdot \phi_2 \left(\frac{L}{D}\right) \cdot \phi_3 \left(\frac{dk}{D}\right) \cdot \phi_4 (\gamma) \cdot \phi_5 (u) \cdot \phi_6 \left(\frac{h}{D}\right) \cdot \\ \cdot \phi_7 (f) \cdot \phi_8 (e) \cdot \phi_9 \left(\frac{b}{D}\right) \cdot \phi_{10} \left(\frac{\sigma}{S}\right) \cdot \phi_{11} (V) \cdot \phi_{12} \left(\frac{E}{D^3 N^2 g}\right) \cdot \\ \cdot \phi_{13} (U) \cdot \phi_{14} \left(\frac{\nu}{D^2 N}\right) \quad (42)$$

Ker v svojih raziskavah dosledno operiram le s suhim mletjem, lahko zadnja dva člena eliminiram. Naloga bi bila sedaj, raziskati posamezne funkcije in določiti njihovo medsebojno odvisnost. Ker pa v svojem delu obravnavam le kinetiko mletja, se bom omejil samo na časovne odvisnosti posameznih parametrov. Enačba 42) je zaradi tega mogoče v dokončni obliki nekoliko spremeniti, kar je nakezano v naslednjem poglavju.

Kinetika drobljenja in mletja

Kvanzitativen opis drobilnih procesov v mlinih, je predvsem težaven zaradi velikega števila faktorjev, ki vplivajo na potek teh procesov. Sicer je danes že mogoče grobo oceniti vpliv števila in mase krogel na potek mletja, toda podatki so bolj praktično dobljeni, kot pa teoretično utemeljeni. Teorija mletja se mora baviti s številnimi posameznimi problemi, kajti mletje v krogličnem mlinu ni omejeno samo na padajoče, ali kotaleče se krogle, ampak je posledica tudi obriba pri gibanju mlevnega blaga v mlinu. Vsi ti delni procesi so odvisni od trenutnega sestava drobilnega blaga in se odvijajo istočasno, pri čemer tudi vplivajo drug na drugega.

Popolna teorija mletja bi morala podati medsebojno odvisnost granulacijskega sestava po in pred mletjem od časa mletja in od delovnih pogojev mlina. To pa žel še ni rešen problem. Mogoče pa je proces mletja postaviti kot enačbo s številnimi neznankami in nato s upoštevanjem empiričnih zakonov ugotoviti čim več teh neznank. Veliko važnost časovnih zakonov mletja - kinetike mlina je mogoče najbolje ugotovil H.E. Rose, ki je za "izkoristek" mlina postavil sledečo enačbo:

$$7 \quad = \frac{E \cdot \text{novo nastala površina/enota časa}}{\text{potrebna energija mlina}}$$

V tej enačbi predpostavljamo, da je teoretično potrebno delo za povečanje spec. površine na enoto mlevnega blaga konstantno. V prid tej trditvi govore tudi poskusi o upornosti materiala proti drobljenju, kjer dobimo več ali manj konstantne vrednosti za določeno snov.

Precejšnje število raziskovalcev smatra, da je učinek nekega mlina temeljno podana vrednost. Iz zgornje enačbe pa je razvidno, da ta trditev ne drži, ker je učinek mlina odvisen od hitrosti nastanka novih površin, kakor tudi od potrebne energije mlina. Prav zaradi tega moramo ločiti problem hitrosti mletja to je problem kinetike mletja od problema sil in energije mlina.

Naloga in cilj kinetike drobljenja je torej na eni strani ugotoviti časovne zakone tehničnih procesov drobljenja in optimalne pogoje mletja, na drugi strani pa ugotoviti vpliv fizikalnih lastnosti mlevnega blaga, mlevnega medija in ostalih faktorjev na hitrost mletja in mehanizem drobljenja. Kot eksperimentalno določljive vrednosti uporabljamo v prvi vrsti hitrost mletja in granulacijsko razvrstitev nastalih zdrobljenih produktov. Če smatramo snovno enako mlevno blago in enake zrnatosti kot reakcijske partnerje, potem je kinetika drobljenja analogna kemični kinetiki, enaka časovni spremembi koncentracije posameznih granulacijskih intervalov. Ker pa hitrost drobljenja nekega granulacijskega intervala in hitrost nastajanja novih granulacijskih intervalov ne moremo med seboj povezati v eni enačbi

moramo zaradi tega procese drobljenja obravnavati kot paralelne reakcije s različnimi reakcijskimi cilji. Zaradi tega je boljše, če zelo kompleksen problem kinetike drobljenja obravnavamo le na posameznih granulacijskih intervalih in ga smatramo kot od ostalih granulacij neodvisno statistično verjetnost, pri kateri bo nek delec opazovanega intervala zajet od procesov drobljenja.

V svojem delu se ne bi spuščal v teorijo delovanja krogličnega mlina; samo kratek pregled sem podal na začetku tega poglavja. Na tem mestu bi poskušal obravnavati samo tiste faktorje, ki so časovno odvisni, oziroma ki vplivajo na kinetiko mletja.

Rose je s svojimi sodelavci, ko je postavljaj uvodoma definirano enačbo iskoristka mlina, raziskal potrebno silo mlina in pri tem postavil končno sledečo matematično odvisnost:

$$P = K \cdot D^4 \cdot N^3 \cdot L \cdot \varphi(1 + \sigma_4 \sigma / \varrho) \cdot \phi_1(N/N_c) \cdot \phi_3(\gamma) \cdot \phi_4(D/d) \cdot \phi_5(u) \cdot \phi_6\left(\frac{h}{D}\right) \cdot \phi_9(D/b) \quad (43)$$

V tej enačbi je $K \dots$ konstanta, ostali parametri pa so bili že razloženi. Rose je pravtako ugotovil, da se more iz spremenljivk, ki določajo hitrost prirastka površin, napraviti brezdimenzijske enačbe, katere funkcionalne odvisnosti sta na primeru kremenca, preverila Coghill in Dewaney. Ta enačba ima sledečo obliko:

$$S/t = K_1 \cdot \frac{D^{1/2}}{E} \cdot \varphi \cdot \varphi_2(D/d) \cdot \varphi_3(D/b) \cdot \varphi_4(N/N_c) \cdot \varphi_6(\sigma/\varrho) \cdot \varphi_7(\gamma) \cdot \varphi_8(u) \cdot \varphi_9(V) \cdot \varphi_{10}(Z) \quad (44)$$

V tej enačbi imajo posamezni simboli sledeč pomen:

S ... specifična površina mlevnega blaga, t ... čas mletja,

ψ ... funkcija in Z ... razmerje med blagom v mlinu in celokupnim blagom v krogotoku klasifikatorja in mlina.

Ker prednje omenjeni raziskovalci ne upoštevajo lastnosti blaga, sem si zadal nalogo ugotoviti posamezne funkcije kinetike mlina in njihove odvisnosti od fizikalno-kemičnih lastnosti mlevnega blaga. Preden pa preidem na praktične, eksperimentalne rezultate in iz vrednotenje posameznih funkcij brezdimenzijske enačbe po Rose-u, moram obdelati osnovne principe kinetike mletja.

Osnovna kemična enačba, če jo smemo tako imenovati, pri vseh procesih mletja je

prah \rightleftharpoons sinterna snov.

Če čitamo enačbo od leve proti desni, predstavlja le-ta metalurški proces sintranja, v obratni smeri pa procese drobljenja oziroma mletja. Sintranje je eksotermni postopek. Minimum proste energije leži v območju idealnega monokristala, tako da predstavlja le-ta izven mlina termodinamični končni cilj in obenem ravnotežno stanje. Mletje pa je endotermni proces, ki dobiva svojo energijo iz rotirajočega mlina. Mletje je tem bolj intenzivno, čim večji je energetski potencial mlina.

Pri vsakem procesu mletja imamo v istih časovnih intervalih opravka istočasno z dvema procesoma:

1) mlevna tendenca mlina, ki skuša zdrobiti material,

2) tendenca sintranja delcev v mlina v tkzv. sekundarne strukture. Pri tem nastopa tudi rekristalizacija do velikosti monokristalov.

Po določenem času mletja prideta verjetno oba procesa do ravnotežja, ki ostane konstantno tudi pri nadaljnem mletju. Seveda moremo te pojave opazovati le takrat, kadar delajo mlini z najmanjšimi tresljaji, ker vse vibracije negativno vplivajo na rast kristalov. Drobljenje bo tembolj prevladovalo nad rekristalizacijo, čim bolj krhek je material. Zele krhek material ne bo tvoril sekundarnih struktur vse do zrn velikosti par mikronov. Ta pojav se začne šele takrat, ko pridemo v Smekalovo območje, to je do velikosti, ko dobe vse snovi plastične lastnosti.

Vse to je dovedlo G. F. Hüttiga na idejo, da bi za procese mletja postavil podobne zakone kot veljajo za termodinamiko in plinsko kinetiko, kjer tudi opazujemo rezultat medsebojnih vplivov inverznih procesov. Pri tem je uporabil predvsem zakonitosti granulacijske razvrstitve zaletega materiala, od katerih je najbolj znana že večkrat omenjena RRS - enačba. Le-ta pravzaprav še ni dokončno potrjena in predvsem matematično popolnoma utemeljena. Trdnostne lastnosti realnih kristalov vodijo namreč do zaključka, da se le-ti ponašajo napram tlaku in udarcu tako, kot da bi bili sestavljeni iz mnogoštevilnih majhnih idealnih kristalnih blokov - mozaikov, ki so med seboj svezani le s relativno slabimi silami in aglomerirani. Realni kristal se⁶ ekstremno rečeno obnaša kot opečni zid ali pa peščenjak. To je mogoče

razložiti s tem, da ima drobljenje s tlakom ali udarcem svoj začetek predvsem na napetostnih konicah v okolici napak v kristalni mreži. Mozaični bloki pa se bodisi tako najhni, da nimajo nobene napake v svoji kristalni mreži, bodisi da je teh napak tako malo, da mehanično drobljenje nima nobenega prijemališča. Ta kritična dimenzija se nahaja v območju 1μ , kar ima za posledico, da se zrnca te velikosti ne drobe več naprej, ampak se zaradi kohezijskih sil kvečjemu zopet zlepijo med seboj.

Kar se tiče običajnih mlevnih procesov, je mogoče uporabiti razmeroma enostaven model mlevnega blaga. Zrna so torej aglomerati številnih primarnih blokov različne velikosti in oblike, katerih srednji premer varira okoli srednje vrednosti $10^{-6} \dots 10^{-4}$ cm. Pravtako so tudi kohezijske sile, s katerimi so ti primarni bloki med seboj povezani, različno velike in varirajo v območju, ki je $1/10 \dots 1/1000$ tiste vrednosti, ki jo imajo kemične glavne valence. Notranja struktura primarnih blokov pa je za diskusijo mlevnih procesov nezanimiva, čeprav je izvor aglomeracijskih sil med primarnimi bloki.

Če se ponovno vrnemo na težišče problema mletja, so zrnatost in njene časovne spremembe najbolj karakteristične za potek mletja. Neposreden potek mletja moremo opisati z različnimi funkcijami in vsaka funkcija podaja določeno karakteristiko mlevnega blaga oziroma mlina. Dosedanje raziskave O. Theimerja in F. Hüttiga so ugotovile šest funkcij:

karakteristika presevka D , pogostost nastopanja H , mlevni tok M , premik granulacijske porazdelitve V , karakteristika mlevnosti Z in karakteristika nastanka novih zrnatosti B . Morebiti so gornji izrazi umetno skovani, toda žal v slovenskem jeziku nisem imel predhodnika za vodilo.

a) Karakteristika presevka - D

Če označimo z " x " zrnatost (premer zrn) in z D utežne odstotke blaga, katerega zrna so $\leq x$, potem imenujemo funkcijo $D = f(x)$ karakteristiko presevka. Dobimo jo neposredno s sejalno analizo nekega vzorca, pri čemer pomeni D utežni odstotek presevka, ki se preseje skozi sito z odprtina mi premera x . Mogoče je rudi prikazati funkcijo v obliki odsevka, samo da moramo v tem primeru postaviti vrednost $(100 - D) = R$ kot funkcijo odvisno od x .

b) Pogostost nastopanja - H

V nekem zrnastem kolektivu imamo vrsto zrn, katerih premer je zelo različen in se s časom mletja menja. Nekatere zrnatosti prevladujejo, dočim so nekatere zastopane le s nekaj odstotki. To pogostost nastopanja nam definira funkcija

$$H = \frac{\delta D}{\delta x} = f'(x)$$

45)

Če to funkcijo naneseemo v obliki diagrama, nam je dolžina ordinat nad poljubno vrednostjo x merilo za pogostost nastopanja zrn velikosti x v mlevnem blagu.

c) Mlevni tok - M

Mlevni tok nam pove, katere zrnatosti pri mletju po določenem času izginevajo in katere se povečujejo. Definiran je z sledečo enačbo :

$$M = \frac{\delta D}{\delta t} , \quad (x \dots \text{const.}) \quad 46)$$

pri čemer δ pomeni t čas mletja. Izraz nam torej pove, kolike odstotkov blaga z zrnatost $> x$ se po času t prevede v srna velikosti $< x$. Če postane v katerenkoli območju M negativen, pomeni to, da nimamo več drobljenja, ampak aglomeriranje manjših zrn v večja.

d) Premik granulacijske porazdelitve - V

Matematična definicija gornjega izraza bi bila sledeča:

$$V = \frac{\delta H}{\delta t} , \quad (x \dots \text{const.}) \quad 47)$$

Izraz podaja spremembo mlevnega blaga z določeno zrnatostjo x po določenem času t . Razumljivo je, da količina blaga v območju večjih zrn pojema, dočim se v območju drobnih zrn analogno povečuje. Ker pomeni zmanjšanje velikosti zrn pozitivno storitev mlina, je izraz definiran z negativnim diferencialnim kvocientom. Za določeno konstantno vrednost x je granulacijski premik sestavljen iz dveh algebrično seštetih izrazov kot sledi:

$$V = - \frac{\delta H}{\delta t} = \frac{\delta H_1}{\delta t} - \frac{\delta H_2}{\delta t} , \quad 48)$$

pri tem pomeni prvi člen tisto količino mlevnega blaga z zrnatostjo x , ki je dala po času δt zrna z velikostjo $< x$; drugi člen pa je tista količina zrn velikosti x , ki je nastala iz zrn $> x$ po času mletja δt . Oba člena sta posebno važna za študij kinetike, ker naj bi dala odgovor na vprašanje "v katerem območju melje mlin (Z)" in "kakšna velikost zrn se pri tem tvori (B)".

e) Karakteristika mlevnosti - Z

Matematična definicija funkcije Z je podana že v enačbi 48) in nam pove v katerem območju velikosti zrn mlin najbolj učinkuje s tem, da zmanjšuje njihovo velikost.

$$Z = \frac{\delta H_1}{\delta t} \sim \frac{1}{2} (M+V) \quad 49)$$

Saiselno sledi iz predhodnih definicij, da mora biti Z manjši od M. Gornja predpostavka, da je Z enaka aritmetični sredini M in V je saiselna samo tam, kjer sta obe vrednosti blizu skupaj, to je v območju večjih zrn.

f) Karakteristika nastanka novih zrn - B

Pri vseh procesih mletja nas najbolj zanima končna zrnatost, ki je dobimo, ko blago zapusti mlin. Karakteristika velikosti novo nastalih zrn je zrcalo dejavnosti mlina - njegove uspešnosti. Že iz poti premika krivulje presevka D proti levi v smeri manjših zrnatosti, moremo posredno sklepati na napredek mletja. Matematična definicija te funkcije

je podana s drugim členom definicije premika granulacijske porazdelitve:

$$B = - \frac{\delta H_2}{\delta t} \quad ; \quad B = V - Z \quad \text{so)}$$

Že kvalitativna opazovanja so pokazala, da se različni materijali različno ponašajo pri mletju. Iz krivulj za mlevni tok H pred začetkom mletja in po različnih zaporednih časih mletja, moremo ugotoviti s kakšnim načinom mletja imamo opraviti. Pri tem ločimo principiuelno tri načine:

1) Razdrobljenje: vsako zrno je bilo v mlinu razdrobljeno v manjše delce. Tvorba zrn, katerih dimenzije so samo nekoliko manjše od prvotnih velikosti, ne pride v poštev. Zaradi tega opazujemo do določenega x samo zmanjšanje, nikakor pa ne povečanje količine. Že pred mletjem ima mlevno blago svoj maksimum, ki se med mletjem kontinuirano premika v smeri manjših zrn. Na splošno opazujemo ta način pri vseh krhkih snoveh; maksimum se lahko veča ali pa manjša. Sejalna analiza da skoraj vedno popolne RRS premice.

2) Obrib: vsako zrno se pri tem načinu mletja zaradi trenja obdrgne v zelo drobne delce. Matična zrna postajajo kontinuirano manjša in njih utežni odstotek se zmanjšuje. Zrna, katerih dimenzije so nekoliko večje, kot dimenzije zrn nastalih z obribom, so zelo redka. Območje, kjer bi imeli samo odtok zrn v smeri manjših dimenzij, ne pa tudi pritoka iz sosednjih, granulacijsko večjih območij, ne opazujemo.

3) Razpršitev: srna razpadejo zaradi delovanja mlina v zelo majhne delce. Proces je podoben razpršitvi vodnih kapljic od udarcu na trdno podlago. Praktično v mlevni tehniki takšne procese zelo redko opazujemo.

Če si vzamemo za osnovo kemične procese, moremo kot že rečeno, postaviti določene analogije z mletjem; vendar obstoja tudi precej razlik. Pogoji, oziroma statistična verjetnost, da bo srno zdrobljeno v mlinu, so popolnoma analogni pogojem popolne reakcije in razpada molekule. Da bo medsebojni sunek (pri mletju) med kroglo in zrnom uspešen, morata imeti obe telesi neko kritično minimalno energijo. Drug pogoj pa je, da se morata obe telesi stikati na njih najbolj občutljivih mestih. Če zopet posežemo v kinetiko plinskih reakcij, ločimo takoj po Bodensteinu normalne reakcije, kjer je reakcijska hitrost enostavna funkcija vsakokratne prisotne količine ali koncentracije snovi, ki sodelujejo pri reakciji in končno komplicirane verižne reakcije. Drobilni procesi spadajo v prvi fazi med enostavne procese in imamo opraviti s kemično reakcijo I. reda po analogiji s kinetiko plinov. Zaradi tega lahko pišemo

$$-\frac{\partial H}{\partial t} = kH \quad ; \quad \ln H = -k \cdot t + \ln H_0 \quad 51)$$

v gornji kinetični enačbi pomenijo t ... čas mletja v sec. H_0 je pogostnost nastopanja pri $t = 0$, H ... pogostnost nastopanja po času t , dočim je k ... hitrostni koeficient mlina. Drugo fazo pa bom obravnaval kasneje in je, kot bomo videli, precej bolj komplicirana.

Kot vidimo iz dosedanjih izvajanj, moremo rezultat vsakega mlevnega procesa predočiti s tremi mlevnimi funkcijami in sicer s R = odsevek, D = presevek in H = pogostost nastopanja. $R = 100 - D_x$ nam pove tisti odstotek celokupnega vzorca, katerega premer je večji od x , došča reprezentira H_x tisti odstotek mlevnega blaga, ki nastopa v granulacijskem intervalu Δ med zrnatostjo $(x + \Delta)$ in x . H_x je seveda odvisen od poljubno izbranega intervala Δ in je temu intervalu proporcionalen s oziroma na približno veljavno odvisnost $H_x = (dR_x/dx) \cdot \Delta$; za poljubno velike intervale pa je uporabna samo natančna odvisnost $H_x = R_{x-1} - R_x$. Rekli smo, da moremo R_x v večini primerov izraziti s RRS - enačbo, ki je postala eden glavnih instrumentov za opisovanje tehničnih procesov drobljenja. Iz nje je mogoče napraviti tudi določene zaključke o kinetiki, posebno ker drobljenje monokristalov daje RR - razporeditev tudi takrat, kadar je to drobljenje podrejeno samo zakonom slučajnosti. Upeljava funkcij $M = dD/dt = - dR/dt$, $V = dH/dt$ in $Z = - 1/2 \cdot (dR/dt + dH/dt)$, o katerih smo obširno govorili že uvodoma je samo olajšala študij kinetike. S temi funkcijami je mogoče odgovoriti na bistvena vprašanja mlevnih procesov - kje in kam melje mlin? Koeficient hitrosti mletja omogoča povezavo statistične kinetike mletja s teorijo elementarnih procesov zloma.

Procese ki se odvijajo v nekem krogljčnem mlinu, moremo smatrati kot simultani potek številnih reakcij razpadanja in mogoče tudi aglomeriranja. Reakcije spadajo v tiste sku-

pino, kjer se eno ali več zrn velikosti x prevede v zrna velikosti x' , pri čemer mora seveda veljati, da je $x' < x$. Če imamo na raspolago skupno H_x pondov zrn velikosti x , potem je mogoče prikazati količino snovi, ki v časovni enoti preide iz zrn velikosti x v zrna velikosti x' , s sledečo enačbo:

$$H_{xx'} = H_x \cdot h_{xx'} \quad (52)$$

Enačbo moramo smatrati kot definicijsko enačbo za koeficiente hitrosti $h_{xx'}$. Ti koeficienti so specifične to je na enoto mase nanašajoče se vrednosti, ki karakterizirajo verjetnost prehoda zrn ene velikosti v druge in odredjajo odstotek izhodne substance z zrnatostjo x , ki v časovni enoti preide v zrna velikosti x' .

S pomočjo koeficienta $h_{xx'}$ moremo stopnjo reakcije procesov mletja definirati kot sledi:

Procesi mletja nulte stopnje: $h_{xx'} = \text{const}/H_x$ oz. $H_{xx'} = \text{const}$

Procesi mletja prve stopnje: $h_{xx'} = \text{const}$ in neodvisen od H_x oziroma granulacijske razdelitve.

Procesi mletja druge stopnje:

$$h_{xx'} = \sum_y h_{xx'}^y, H_y \quad (53)$$

Procesi mletja tretje stopnje:

$$h_{xx'} = \sum_{yy'} h_{xx'}^{yy'}, H_y H_{y'} \quad (54)$$

Procesi mletja mešane stopnje :

$$h_{xx'} = h_{xx'}^0 + \sum_y h_{xx'}^y H_y + \sum_{yy'} h_{xx'}^{yy'} H_y H_{y'} + \dots \quad (55)$$

Ker se H_x pri procesih mletja spreminja, so koeficienti $h_{xx'}$ pri procesih višje stopnje odvisni od časa.

Procesi mletja nultega reda imajo vse karakteristike "isparevanja". Neodvisno od sestave mlevnega blaga se v časovni enoti zdrobi konstantna količina zrn iz določenega granulacijskega intervala. Granulacijska razvrstitev zdrobljenega blaga je neodvisna od granulacijske razvrstitve blaga, ki se drobi.

Procese I. reda moremo smatrati kot "radioaktiven razpad". Za vsako zrno mlevnega blaga obstoja samo od njegove velikosti določena verjetnost drobljenja, ki je časovno konstantna in odvisna od granulacijske razvrstitve mlevnega blaga. Celokupno število zrn, ki se zdrobe v časovni enoti in imajo velikost x , je proporcionalno H_x . Granulacijska razvrstitev zdrobljenih produktov je odvisna samo od velikosti x zdrobljenega zrna.

Pri procesih II. reda igra važno vlogo sestav mlevnega blaga. Število zrn velikosti x , ki bodo zdrobljena, ne zavisi samo od celokupne količine $H(x)$ teh zrn, ampak tudi od granulacijskega sestava ostalih zrn, torej od okolice, v kateri se nahajajo zrna velikosti x . Upoštevati moramo tudi obrtib, ki nastane zaradi notranjega trenja med zrnmi mlevnega blaga.

Kot vidimo iz dosedaj povedanega, predpostavlja O. Theimer, da je funkcija porazdelitve nezvezna, kar popolnoma drži, saj ne moremo pri realnem mlevnem blagu pričakovati, da bodo zastopane vse granulacije x v zveznem zaporedju. Zaradi daljnje razlage pa je boljše, da se privzamemo zvezna ali pa vsaj delno zvezna funkcija $H(x)$ kot pa poljubna razdelitev mlevnega blaga v neko končno število zrnatosti. S tem se poenostavi sama razlage, vendar se enačbe v toliko spremenijo, ker imamo sedaj integralno obliko.

Effekt drobljenja je torej v tem, da se od količine $H(x) \cdot dx$ delcev velikosti x , neka določena količina zaradi zloma ali pa zaradi obraba spreminja v drobnejša zrna velikosti x' . Če označimo s $d^2H(x, x')$ tisto količino mlevnega blaga, ki prehaja v določenem stadiju mletja v časovni enoti iz zrna velikosti x do $x + dx$ v zrna velikosti x' do $x' + dx'$, potem moramo dobljeno količino postaviti v odvisnost od pogostosti:

$$d^2H(x, x') = h_{xx'} H(x, t) \cdot dx \cdot dx' \quad (56)$$

Pri mlevnih procesih I. reda, kjer je odsevek $R(x, t) = \sum_x H_x(t)$ odvisen od časa, moremo pisati:

$$R_x(t) = R_x(0) \exp(a_x t) \quad (57)$$

$R_x(0)$ je granulacijska razvrstitev vzorca pred mletjem, a_x pa je konstanta, ki karakterizira neko zrnatost. Za čisto eksponencialno časovno odvisne mlevne produkte I. reda velja, da je:

$$h_{xx'} = a_{x'-1} - a_{x'} \quad (58)$$

pri čemer so z in x mišljeni dve zaporedni zrnatosti. Če gornji pogoj ni izpolnjen, potem imamo opraviti s nelinearnimi procesi višjega reda.

$h(z,x)$ je v smislu doseđenjih izvajanj verjetnost zato, da se v časovni enoti enota teže zrna velikostnega reda od z do $z + dz$ zdrobi v zrna velikostnega reda od x do $x + dx$. $H(z,x)$ je enake nič, če je $z \leq x$ in ne predstavlja ničesar drugega kot pogostost nastopenja zrna velikosti z . $H(z,x)$ je verjetnost zato, da se pri drobljenju poljubna količina zrna velikosti z pretvori samo v zrna velikosti od x do $x + dx$. Zaradi tega je :

$$w(z) = \int_0^z h(z,x) dx \quad (59)$$

celokupna verjetnost, da se n. pr. lp zrna velikosti z v naslednji sekundi zdrobi na bilo kateri način. Količina zrna, ki je zastopana v granulacijskem intervalu z do $z + dz$ ob bilo katerem času pa je enaka $H(z,t) dz$. V naslednjem časovnem intervalu se zaradi drobljenja v alinu zdrobi v manjša zrna $w(z) H(z,t) dz dt$ pondov, dočim ostane nezdrobljenih še $[1-w(z) dt] H(z,t) dz$ pondov. Odsevek pri zrnatosti z znaša potemtakem:

$$R(x,t) = \int_0^{\infty} H(z,t) dz \quad (60)$$

in se med časom dt spremeni tako, da se zrna, ki so večja od x zdrobe tako, da se materialni tok pretaka iz območja $\geq x$ v območje $\leq x$. Ugotoviti moramo torej koliko zrna iz območja x se v času dt zdrobi in kolikšen delež le-teh od-

pade na območje $< x$. To najdemo iz odvisnosti:

$$\partial R(x,t) = -\partial t \int_x^\infty H(z,t) \left[\int_0^x h(z,y) dy \right] dz \quad (61)$$

Integral v oglatem oklepaju ne predstavlja nič drugega kot tisto količino zrn z velikostjo $< x$, ki nastane pri lp zrn velikosti z . To količino označimo s $r(z,x)$ in lahko pišemo:

$$\frac{\partial R(x,t)}{\partial t} = \int_x^\infty \frac{\partial R(z,t)}{\partial z} r(z,x) dz, \quad (62)$$

ker je $H(x,t) = -\partial R(x,t) \partial x$. Gornja enačba je osnovna enačba, ki opisuje potek mlevnih procesov I. reda. Če integriramo desno stran diferencialne enačbe parcialno, potem dobimo:

$$\int_x^\infty \frac{\partial R(z,t)}{\partial z} r(z,x) dz = \left[R(z,t) r(z,x) \right]_x^\infty - \int_x^\infty R(z,t) \frac{\partial r(z,x)}{\partial z} dz \quad (63)$$

za $R(\infty,t) \equiv 0$ in $r(x,x) = w(x)$ dobimo:

$$\frac{\partial R(x,t)}{\partial t} + w(x) R(x,t) = - \int_x^\infty R(z,t) \frac{\partial r(z,x)}{\partial z} dz, \quad (64)$$

kar je splošna odvisnost za odsevek pri procesih mletja I. reda.

Realne procese mletja pa ni mogoče dovolj natančno dojeti s strukturo mletja I. reda. V mlevnih procesih II. reda je namreč prehod materiala zrnatosti x do zrnatosti x' odvisen od celokupnega sestava mlevnega blaga $H(x,t)$, tako

da moramo upoštevati efekt obriba in pa vpliv obdajajočih zrn ostalih granulacijskih intervalov.

Odvisnost drobilnega efekta od sestave mlevnega blaga je določena s sledečo enačbo :

$$h(x, x', t) = \int_0^{\infty} \bar{h}(x, \bar{x}, u) H(u, t) du. \quad (65)$$

Če vstavimo v enačbo 61) $h(z, x)$ analogno enačbi 64), potem dobimo splošno enačbo procesov mletja II. reda.

$$\frac{\partial R(x, t)}{\partial t} = - \int_x^{\infty} dz \frac{\partial R(z, t)}{\partial z} \int_0^x dy \int_0^{\infty} \bar{h}(z, y, u) \frac{\partial R(u, t)}{\partial u} du. \quad (66)$$

Pri granulacijskih analizah mlevnih produktov, ki jih dobimo v krogličnih mlinih, vidimo, da se granulacijska razvrstitev sklada s precejšno natančnostjo z osnovno enačbo odsevka po osnovni enačbi Rosin - Ramalerja:

$$R(x) = G \cdot e^{-bx^n} \quad (67)$$

pri čemer pomeni G ... celokupno količino mlevnega blaga, b in n pa sta konstanti. Danes pišemo gornjo enačbo v nekoliko spremenjeni obliki, tako da je $G = 100 \% + b = + 1/d'$ in $x = d$; vendar je to popolnoma isto, samo računске operacije so nekoliko enostavnejše.

Če sedaj blago, ki sledi osnovnemu granulacijskemu zakonu enačbe 67), meljemo v krogličnem mlinu, ostane oblika zakona ohranjena; spremenita se samo oba parametra, predvsem pa b , katerega povečanje podaja stopnjo finoče

blaga z nadaljnim mletjem. Zaradi tega imenujemo takšne mlevne procese Rosin - Rammlerjevi mlevni procesi. Najenostavnejši je tak proces, kadar ima že vložek v mlin eksponentialno granulacijsko porazdelitev. Pri tem so seveda možni mlevni procesi I. ali pa II. reda.

Blago ki ga hočemo mleti v kroglinem mlinu, ima v času $t = 0$ sledeč sestav:

$$R(x,0) = G \cdot e^{-b_0 \cdot x^m} \quad (68)$$

Po določenem času mletja t in pri procesih I. reda imamo sledeče odvisnosti :

$$h(u,x) = u \cdot b_1 \cdot x^{m-1} \quad \text{in} \quad w(x) = b_1 \cdot x^m \quad (68a)$$

iz česar sledi, da ima Rosin - Rammlerjev proces I. reda sledečo obliko:

$$R(x,t) = G \cdot e^{-(b_0 + b_1 \cdot t) \cdot x^m} \quad (69)$$

RR - mlevni procesi II. reda so precej bolj komplicirani, ker parameter finoče b ni več linearno časovno odvisen, ampak je komplicirana funkcija časa mletja. Ker finoča narašča s časom mletja, je vedno $db/dt = db_1/dt > 0$ in splošna oblika mlevnih procesov II. reda je sledeča:

$$R(x,t) = G \cdot e^{-[b_0 + b_1(t)] \cdot x^m} \quad (70)$$

Ker smatramo, da se tako pri RR procesih I. reda, kakor tudi II. reda menja samo parameter b , ne pa parameter disperznosti n , je b splošna karakteristika vseh RR mlevnih procesov s čistim učinkom drobljenja. Če se namreč pri drobljenju zrna samo drobje in ne nastopijo pojavi sintranja,

potem se morajo odsevky pri poljubni granulaciji stalno zmanjševati, ne pa povečavati; to pa pomeni da je :

$$R(x, t_2) \leq R(x, t_1) \quad \text{pri } t_2 > t_1 \text{ za vse } x.$$

Parameter n smatramo neodvisen od časa mletja, vendar praktični poskusi kažejo, da se precej spreminja. To pa ni toliko posledica procesov sintranja, kot pa od tega, da RR - eksponencialni zakon ne velja za vsako granulacije popolnoma.

S tem bi zaključil teorijo kinetike mlevnih procesov. Ker sem prvtako že obdelal fizikalno - kemične lastnosti, ki bi mogle vplivati na kinetiko mletja, prehajam na zadnje poglavje svojega dela - eksperimentalno delo. Najprej bom poskušal razrešiti posamezne funkcije v enačbi 44) in to s eksperimenti na snoveh zelo različnih drobilnih karakteristik in končno podati splošno kinetično enačbo drobljenja in stopnjo za preiskane vzorce.

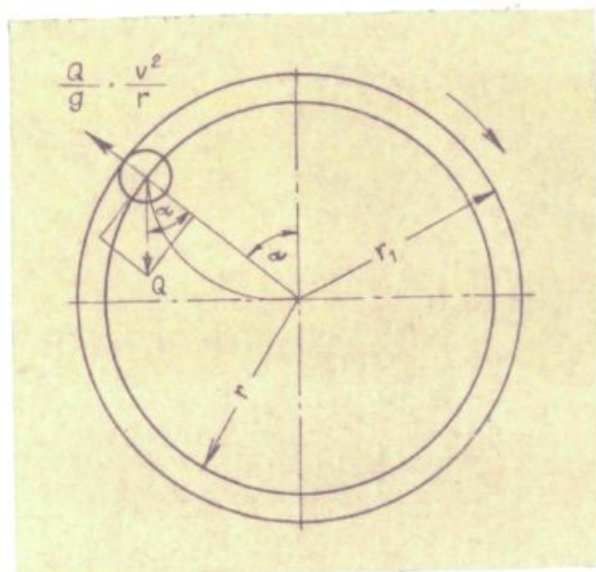
Izrednotenje rezultatov mletja

V enačbi 44), ki jo je postavil Rose s sodelavci, nastopajo posamezni brezdimenzijski koeficienti, katerih izrednotenje je mogoče samo eksperimentalno. Rose se ni bavil s tem, kako drobljivost posameznih snovi vpliva na splošno enačbo kinetike krogljčnega mlina. To sem poskušal ugotoviti za preiskane vzorce, čeprav je bilo za to potrebne velike število poskusov in predvsem dolgotrajne sejalne analize. Ker so rezultati odvisni predvsem od natančnosti pri sejanju, sem vsak poskus ponovil 3 do 6 krat, vzorce sejal na laboratorijskih sitih po DIN 4711 v skladu s navodili.

Za vse poskuse sem uporabljal laboratorijski krogljčni mlin sledečih dimenzij : $D = 0,224$ m in $L = 0,194$ m . Pogon mlina se vrši s pomočjo kolektorskega elektromotorja s predležjem na izmenični tok. Podatki motorja so sledeči: $U = 220$ V, $I = 1,13$ A, $P = 130$ W, $N = 4500$ ob/min.

Ker je teorija krogljčnega mlina danes že precej poznana, ne bi želel ponavljati znanih stvari. Znano je, da se drobljenje vrši s udarjanjem padajočih krogel na material. Pri vrtenju mlina se namreč krogle pod vplivom centrifugalne sile dvignejo do točke, v kateri postane težnostna sila večja od centrifugalne. To ima za posledico, da krogle padajo

pod določenim kotom k horizontali (slika 19).



sl. 19.

Če označimo s Q ... teža krogel, g ... zemeljski pospešek, v hitrost težišča krogle, n ... število vrtijajev krogličnega mlina, r_1 ... polmer mlina, r ... polmer poljubnega kroga, ki gre skozi težišče krogle, α ... kot padanja krogle napram horizontali ;

potem moremo iz oblike ugotoviti, da se krogla loči od stene valja, oziroma drugih krogel v trenutku ko je radialna komponenta njene teže večja od centrifugalne sile:

$$\frac{Q \cdot v^2}{g \cdot r} \leq Q \cos \alpha$$

$$\cos \alpha \geq \frac{v^2}{g \cdot r} \geq \frac{\pi^2 \cdot r \cdot n^2}{30 \cdot g} \geq \frac{m^2 \cdot r}{900}$$

V slučaju, da je centrifugalna sila večja, ali enaka radialni komponenti teže krogle, se bo le-ta pritiskala ob steno, oziroma se je dotikala in se s njo vred vrtela. V tem primeru je padni kot $\alpha = 0$ in $\cos \alpha = 1$. Hitrost alina, pri kateri je $\alpha = 0$ imenujemo kritično hitrost. Če pišemo $r = r_1$ in $\cos \alpha = 1$, dobimo :

$$n_{Kk} = \frac{30}{\sqrt{D}} \div \frac{42,4}{\sqrt{D}} \quad 72)$$

S poskusi je ugotovljeno, da je delovanje alina najboljše takrat, kadar je padni kot $\alpha = 54^{\circ} 40'$. V tem primeru dobimo za optimalno število vrtljajev :

$$n_{opt} = \frac{32}{\sqrt{D}} \div \frac{37,2}{\sqrt{D}}$$

to je 75.5 % do 89.5 % kritičnega števila vrtljajev. Te teoretične vrednosti se skladajo tudi s onimi, ki jih dobimo na podlagi filmskih posnetkov poti krogljčnega alina. Teoretične poti so le nekoliko strmejše od praktičnih, ker ni upoštevano trenje med krogli in materialom.

Krivulja poti kroglj je izražena s splošno enačbo:

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \alpha - \frac{x^2 \cdot g}{2 v^2 \cos^2 \alpha} \quad 73)$$

Pri vseh poskusih v krogljčnem alinu sem moral seveda postopati na ta način, da so bili vsi parametri, razen tistega, ki sem ga preiskoval, konstantni. Le na ta način je mogoče iz vrednotiti posamezne rezultate, ki bi se drugače v množici ostalih sabrisali. Pri posameznih poskusih in

sejalnih analizah podajam kasneje samo statistično določeno povprečno zrnatost, koeficient enakomernosti in končno specifično površino (idealizirano). Posamezne sejalne analize sem, razen v začetku svojih izvajanj, popolnoma izpuštil, ker bi le-te zavzele preveč prostora. Vsako sejalno analizo je mogoče z danimi podatki popolnoma reproducirati v RRS - diagramu ter zaradi tega teh podatkov nisem navedel v svojem delu.

a) Vpliv premera krogel na kinetiko mletja

Pri poskusih sem uporabljal krogle iz jekla sledečih premerov:

$$d_1 = 15 \text{ mm}, \quad d_2 = 25 \text{ mm}, \quad d_3 = 40 \text{ mm} \quad \text{in} \quad d_4 = 60 \text{ mm}.$$

Vsi poskusi so bili napravljeni pri $n_{opt} = 67 \text{ o/min}$, 50 % polnitvi voluana malina s kroglasti in 100 % polnitvi vmesnega prostora med kroglasti s vzorci zrnatosti 3 - 5 mm ($O_1 = 1 \text{ cm}^2 \text{p}^{-1}$).

Specifične površine so izračunane grafično, kjer je bila potrebna korektura, pa sem računal po Langesmannu. Sejalna analiza je bila napravljena tako, da je kontrolni ostanek na situ vedno manjši od 0,5 %. Posamezne sejalne analize za dva vzorca so prikazane v naslednjih razporednicah; podatki veljajo za 30 minut mletja v alinu pri danih pogojih.

Zrnatost mm	Utežni dobitek v % pri b =				
	15 mm	25 mm	40 mm	60 mm	
+ 1	45,0	17,5	36,8	39,6	
0,3 - 1,0	81,0	60,0	74,2	76,8	Hema-
0,1 - 0,3	93,3	82,3	90,0	89,7	tit
- 0,1	100,0	100,0	100,0	100,0	
+ 1	1,2	-	-	14,7	
0,3 - 1,0	31,2	17,0	26,2	52,0	Šamo-
0,1 - 0,3	68,9	60,8	62,1	77,2	zit
- 0,1	100,0	100,0	100,0	100,0	

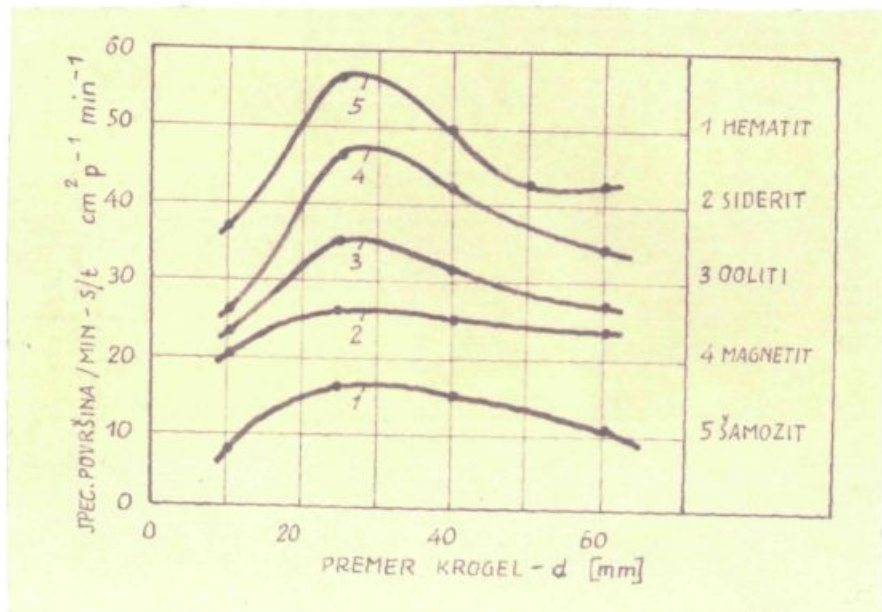
Analogne vrednosti dobimo tudi za ostale vzorce, vendar jih kot že omenjeno, zaradi obsežnosti ne navajam. V naslednji raspredelnici pa so zbrani potrebni podatki za grafično interpretacijo sejalnih analiz vseh vzorcev in njihove idealizirane specifične površine.

Premer krogel	Parameter	Hematit	Siderit	Čelit.ruda	Magnetit	Šamozit
	$d^* \mu$	1250	620	330	500	270
15 mm	n	1,10	1,01	1,20	1,02	1,11
	$0,6n^2 p^{-1}$	240	600	690	780	1120

Premer krogel	Parameter	Hematit	Siderit	Oolit.ruda	Magnetit	Šamozit
25 mm	$d' \mu$	600	370	230	400	180
	n	1,01	1,11	1,20	0,92	1,20
	$0 \cdot \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	480	780	1050	1410	1710
40 mm	$d' \mu$	800	320	600	250	200
	n	1,02	1,21	0,92	1,13	1,10
	$0 \cdot \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	450	750	960	1260	1500
60 mm	$d' \mu$	1100	380	350	400	490
	n	1,00	1,10	1,01	1,01	0,92
	$0 \cdot \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	330	720	810	1050	1290

Če gornje podatke preračunamo na specifični prirastek površine ($\text{cm}^2 \text{p}^{-1} \text{min}^{-1}$) v odvisnosti od premera mlevnih krogel d , moremo s grafičnim prikazom (slika 20) dobljenih vrednosti ugotoviti sledeče:

1) Prirastek specifičnih površin v časovni enoti, to je kinetika mletja, je odvisen od drobljivosti vzorcev. Čim večja je drobljivost, tem večji je prirastek površin. Odvisnost sicer ni linearna, saj drobljivosti naraščajo od 1,0 (za hematit) do 1,63 za šamozit, specifične površine pa mnogo hitreje. Vkljub temu pa je zaporedje, ki ga dobimo pri teh poskusih popolnoma enako zaporedju, ki smo ga dobili pri določevanju drobljivosti osiroma odpornosti proti drobljenju.



sl. 20.

2) Stopnja drobljenja se veča z zmanjšanjem premera krogel ; ta je izrazitejša pri mehkejših materialih, kot pa pri trših. Ugotovitev je razumljiva, če poznamo mehanizem drobilnega procesa. Drobljenje materiala se v mlinu izvrši z udarci krogel, ki padajo na material, pa tudi s trenjem med krogami. Čim več udarcev krogel v enoti časa dobi material, tem hitreje se drobi; to pa zahteva pri isti polnitvi manjše krogle. Seveda je na drugi strani potrebna neka minimalna sila - teža krogel. Čim večja je zrnatost in trdota drobečega blaga, tem večje naj bodo krogle. Obstojeajo zato empirične enačbe za optimalni premer , kot n. pr..

$$D = i\sqrt{d} ,$$

kjer je i ... faktor odvisen od trdote rude (13 i 32.5)

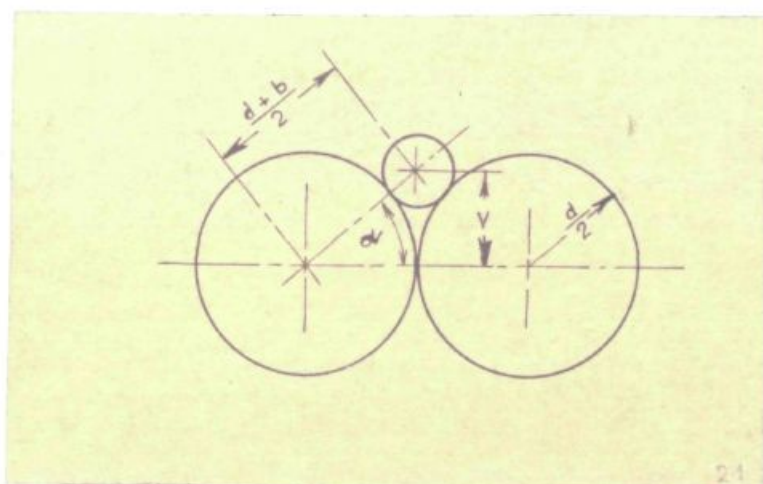
d ... premer zrna pred drobljenjem

D ... premer krogel .

Če vzamem premer preiskanih vzorcev, kjer sem dobil optimalno velikost krogel $D = 25$ mm, potem mora biti n. pr. faktor "i" za hematit 12.5 in za šamožit pravtako - torej neodvisen od trdote materiala, vsaj v raziskani zrnatosti.

3) Stopnja drobljenja je pravtako funkcija količine drobečega blaga v prostoru med krogelami in funkcija doseže svoj maksimum, kadar je ta prostor približno poln.

4) Vsi procesi mletja v kroglinem mlinu so funkcija verjetnosti, da bo delec blaga prišel v cono delovanja krogel, oziroma v mlevno cono med dvema krogelama.



sl. 21.

Is slike 21 vidimo, da je delovno področje mletja med dvema krogelama v mlinu krožna ploskev s polmerom y , ki je podan s enačbo:

$$y^2 + \left(\frac{d}{2}\right)^2 = \left(\frac{d+b}{2}\right)^2 = \frac{d^2}{4} + \frac{db}{2} + \frac{b^2}{4}$$

osiroma

$$\gamma = \sqrt{db/2}$$

75)

V enačbi 44) smo postavili funkcionalno odvisnost kinetike mlina od γ_2 (d/D). Da bi ugotovil to odvisnost sem napravil nove poskuse z vsemi vzorci s povprečno zrnatostjo 3 μ m in kroglasti sledečih premerov $d_1 = 15$ μ m, $d_2 = 25$ μ m, $d_3 = 40$ μ m in $d_4 = 60$ μ m. Ker je dolžina mlina in premer mlina konstantna vrednost, dobim za brezdimenzijski kvocient (d/D) sledeče vrednosti: $d_1/D = 0,07$, $d_2/D = 0,11$, $d_3/D = 0,18$, $d_4/D = 0,27$. Poskusi drobljenja so dali na podlagi grafičnega iz vrednotenja sejalnih analiz sledeče parametre:

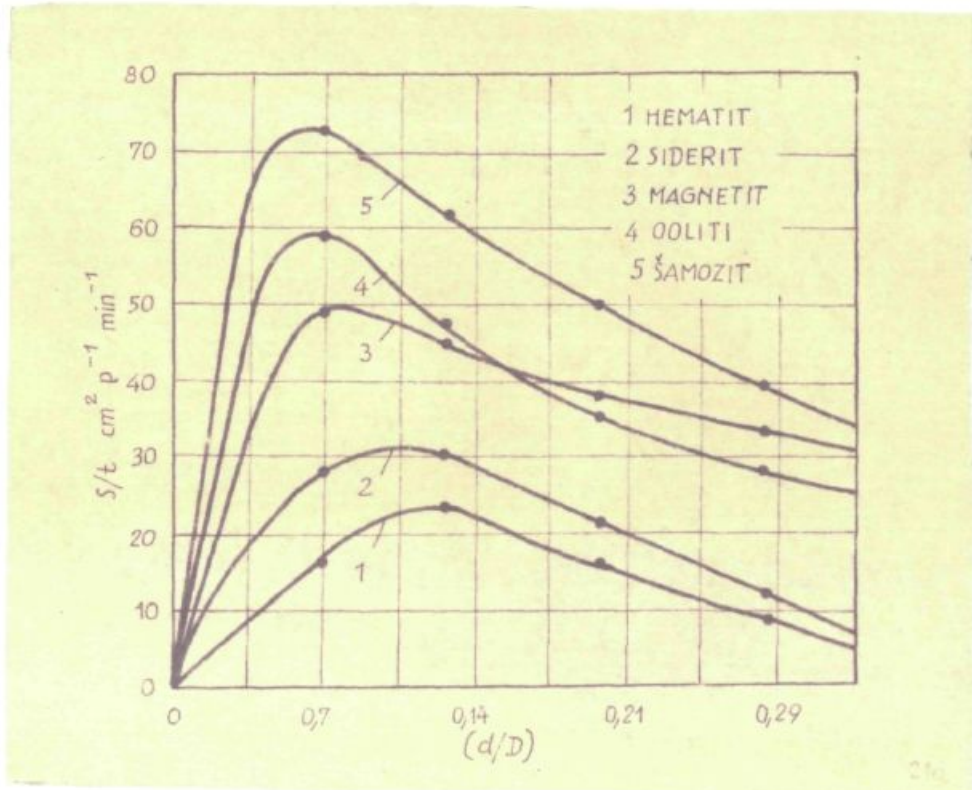
Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za d/D			
		0,07	0,11	0,18	0,27
Hematit	$d^* \mu$	1000	600	1000	1300
	n	1,00	0,98	0,99	1,04
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	480	690	480	275
Siderit	$d^* \mu$	800	400	700	900
	n	0,87	1,01	0,97	1,05
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	840	900	630	360
Magnetit	$d^* \mu$	200	220	300	500
	n	1,11	1,09	1,06	0,94
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	1470	1350	1140	990
Ooliti	$d^* \mu$	190	190	300	600
	n	1,06	1,12	1,09	0,94
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	1770	1440	1050	830

Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za d/D			
		0,07	0,11	0,18	0,27
	$d^* \mu$	300	400	500	600
Šamozit	n	0,83	1,05	0,86	0,87
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	2890	1840	1500	1200

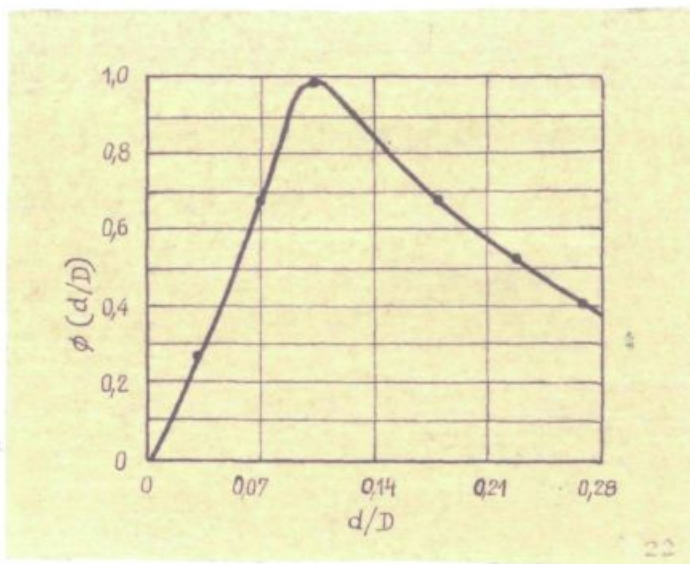
Vsak vzorec je bil v mlinu 30 minut, ki je delal pri $n_{\text{opt}} = 67$ o/min in 100 % polnitvi vmesnega prostora. Če dobljene rezultate preračunam na specifični prirastek površine, dobim krivulje, ki jih prikazuje slika 21. Ker me zanima φ (d/D), moram seveda dobljene rezultate preračunati. Na sliki 22) prikazuje samo primer (d/D) za vzorec hematita. Kot vidimo iz obeh slik, ima parameter d/D odločilen vpliv na storitev mlina oziroma na kinetiko mletja. Krivulja, ki podaja funkcijo d/D ima precej enostavno obliko z izrazitim maksimumom za hematit pri d/D = 0,11. Le-ta se za mehkejše materiale, kot so šamozitna ruda, colitna ruda in magnetitna ruda premakne v območje d/D = 0,07. Splošno moremo iz dobljenih rezultatov zaključiti sledeče:

1) Pri dani zrnatosti blaga in danem premeru mlina, toda s zelo majhnimi krogli, je stopnja drobljenja majhna, ker je kinetična energija krogel nezadostna za proizvajanje večjih površin.

2) Nastanek novih površin je proporcionalen odpornosti drobljenja posameznih mineralov, ki vpliva na funkcionalno



sl. 21a



sl. 22.

odvisnost φ (d/D) v tem smislu, da se maksimum krivulje premika proti manjšim vrednostim premera krogel v mlinu.

3) Stopnja mletja se poveča z večjim premerom krogel, ker bo večja energija imela za posledico večje površino na en trk krogle. Seveda se na drugi strani zmanjšuje število krogel in s tem udarcev - trkov. Teoretično postane stopnja mletja oziroma kinetika mlina konstantna, ko krogle dosežejo tisto velikost, ko je dovolj kinetične energije na raspolago za zaletje vsakega delca, ki se nahaja v mlinu. Energija udarca ene krogle je proporcionalna d^3 , medtem ko se število udarcev na enoto časa spreminja s številom krogel, to je v razmerju $1/d^3$. Prevelik premer krogel ima za posledico manjše stopnje drobljenja, ki se manifestira v padajočem delu krivulje.

b) Vpliv zrnatosti mlevnega blaga na kinetiko mletja

Naslednji člen v enačbi 44) je $\varphi_3(b/D)$, ki podaja odvisnost kinetike krogličnega mlina s konstantnim premerom, od vstopne zrnatosti blaga v mlinu. V ta namen sem napravil veliko število poskusov s vsemi vzorci različnih drobljivosti, pri čemer sem uporabljal vzorce sledečih srednjih zrnatosti

$b_1 = 1 \text{ mm}$, $b_2 = 2 \text{ mm}$, $b_3 = 3 \text{ mm}$, $b_4 = 5 \text{ mm}$, $b_5 = 8 \text{ mm}$,
 $b_6 = 10 \text{ mm}$.

Zaradi konstantnega premera mlina D , so posamezni kvocienti



za različne zrnatosti sledeči:

0,004, 0,008, 0,013, 0,02, 0,03, 0,04 ;

Zaradi maksimalne zrnatosti lo za sea moral pri vseh poskusih uporabljati krogle premera 25 mm. Ostali pogoji so bili enaki kot pri vseh dosedanjih poskusih. V naslednji rasporednici so zbrani posamezni parametri, dobljeni na podlagi sejalnih analiz zaletih produktov v alinu.

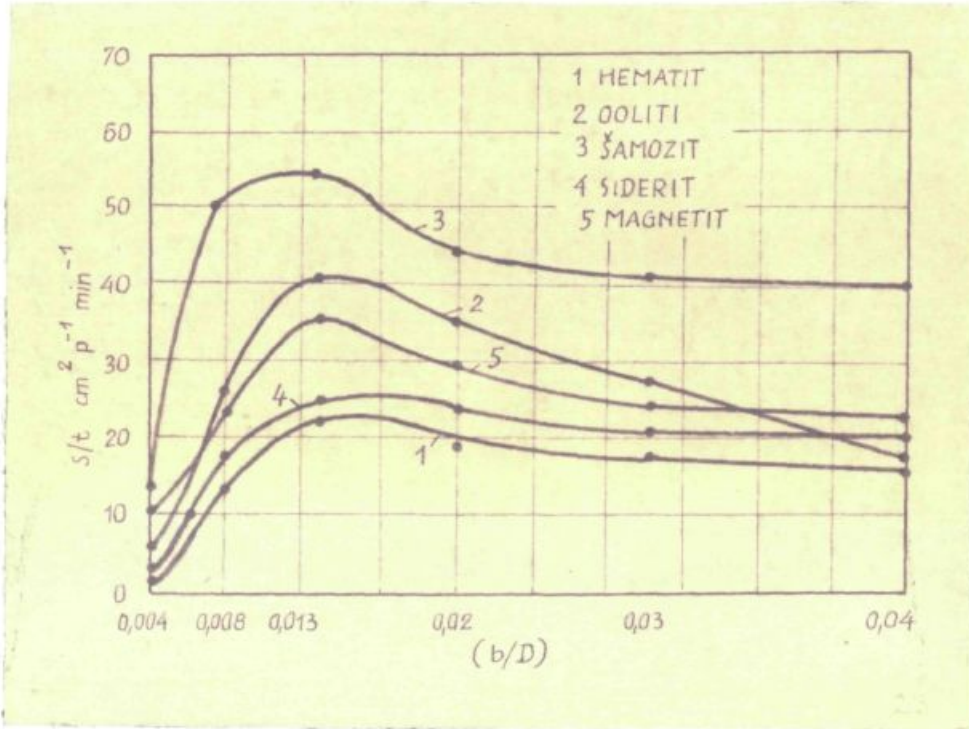
Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za b/D					
		0,004	0,008	0,013	0,02	0,03	0,04
Hematit	$d^* \mu$	6000	800	610	590	700	800
	n	1,02	1,04	0,97	0,01	1,00	1,00
	$O^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	60	420	665	600	540	480
Siderit	$d^* \mu$	5000	560	510	390	880	660
	n	0,95	1,11	0,99	1,04	1,08	1,04
	$O^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	90	540	780	720	345	540
Magnetit	$d^* \mu$	4000	500	380	400	490	520
	n	1,00	1,03	1,02	1,02	1,00	1,07
	$O^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	360	720	1080	900	735	690
Ooliti	$d^* \mu$	1620	520	300	350	400	750
	n	1,08	0,98	1,00	1,02	1,06	0,98
	$O^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	210	815	1230	1080	840	530
Šmozit	$d^* \mu$	1150	300	220	300	430	500
	n	0,97	0,91	1,05	0,99	0,91	0,89
	$O^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	420	1530	1620	1350	1265	1230

Pri teh poskusih moram vsekakor poudariti dejstvo, da se noben faktor toliko ne spreminja z velikostjo mlina, kot ravno zrnatost blaga. Zaradi tega dobljeni rezultati veljajo vsekakor le za laboratorijski kroglični mlin. Ta razlika med laboratorijskim mlinom in industrijskim mlinom pa je itak izražena že z dimenzijskim koeficientom b/D . Zopet moram poudariti nujnost modelnih zakonov, ob katerih se bom obširneje ustavil pri funkcionalni odvisnosti $\varphi (b/D)$

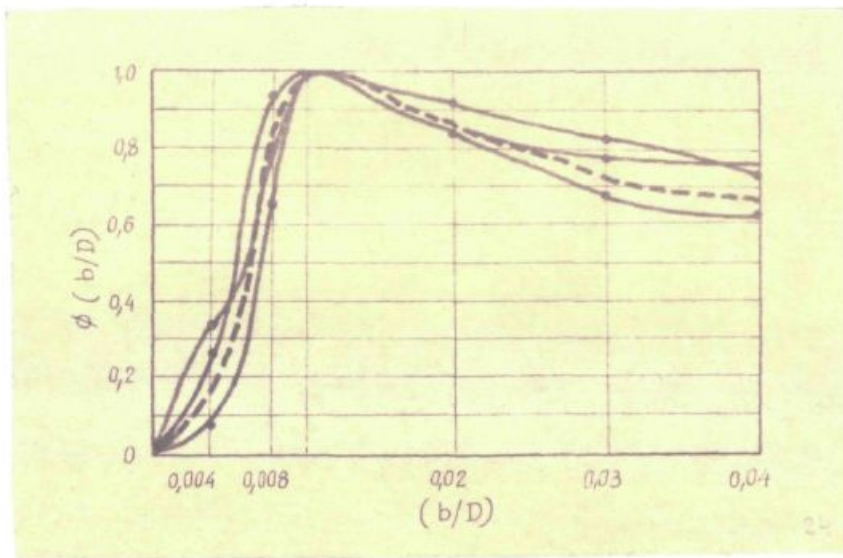
Grafična interpretacija rezultatov in razpredelnice, nam da snop krivulj za materiale različne drobljivosti, prikazane na sliki 23 in 24. Kot vidimo so si vse krivulje geometrično podobne in je med njimi izvršen le majhen premik v ordinatni smeri, kar je posledica različne drobljivosti. Na sliki 24 je prikazana funkcija $\varphi (b/D)$. Tokrat sem vnesel rezultate za primer hematita, magnetita in šamosita. Mogoče je napraviti eno samo krivuljo, ki dobro podaja funkcionalno odvisnost $\varphi (b/D)$.

Na podlagi dobljenih rezultatov moremo napraviti sledeče zaključke :

1) Če primerjamo funkcije $\varphi (b/D)$ in $\varphi (d/D)$, vidimo, da je pri konstantnem razmerju (d/D) kvocient (b/D) direktno proporcionalen kvocientu (b/d) . Na podlagi tega pa moremo v zvezi s enačbo 75) $[\gamma = \sqrt{ab/2}]$ postaviti trditev, da je število delcev, ki se bodo zdrobili med dvema kroglama v mlinu proporcionalno \sqrt{b} , če je premer zrn najhen napram premeru krogel.



sl. 23.



sl. 24.

2) Kinetika mlina v odvisnosti od zrnatosti in premera mlina - iz krivulj sledi, da specifična površina najprej hitro raste, dokler ne doseže svoj maksimum pri najbolj ugodnem razmerju b/D , nato pa polagoma zopet počema. Seveda je prirastek bolj izrazit pri drobnejših, kot pa pri trših snoveh.

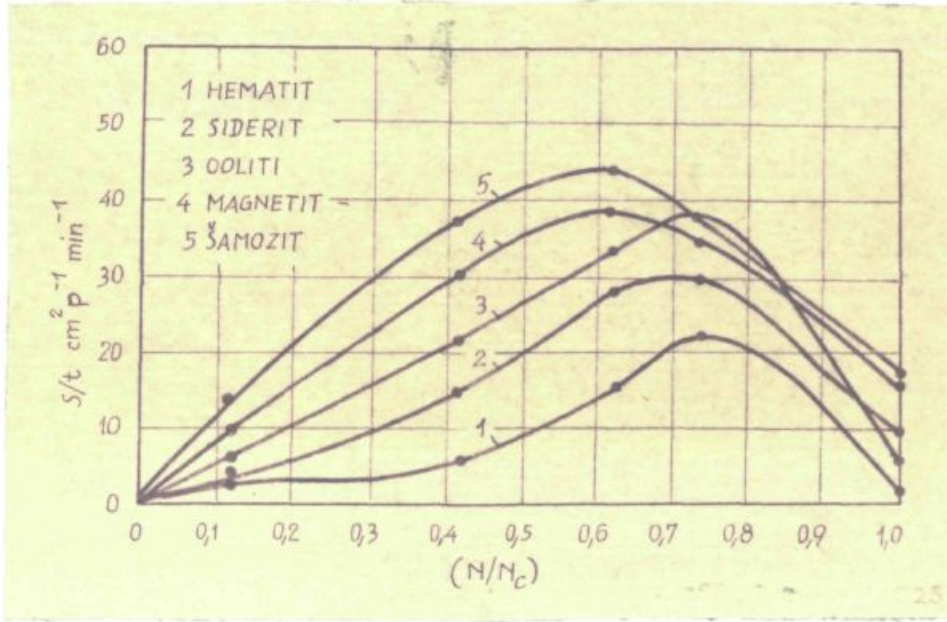
3) V začetnem delu krivulje se kinetika mletja spominja s kvadratnim korenom premera zrn. Če pogledamo sliko 2c (stran 107..) vidimo da se kot α veča s naraščanjem premera zrn, dokler pri določeni kritični velikosti deleca le-ta postane tako velik, da se sile trenja premajhne, da bi obdržale delec med kroglica. To ima za posledico, da se zrno izmika iz cone mletja. Teoretično se s tem kinetika mletja zmanjša na vrednost nič. Praktično imajo delci nepravilne oblike in s tem zelo različne premere. Tudi krogle v mlinu niso gladke in s tem delno paralizirajo učinek prevelikega kota α . Vkljub temu pa se to jasno manifestira v stalnem pomanjševanju krivulje, ki izraža kinetiko mlina v odvisnosti od velikosti zrn.

c) Kinetika mletja v odvisnosti od števila vrtljajev mlina

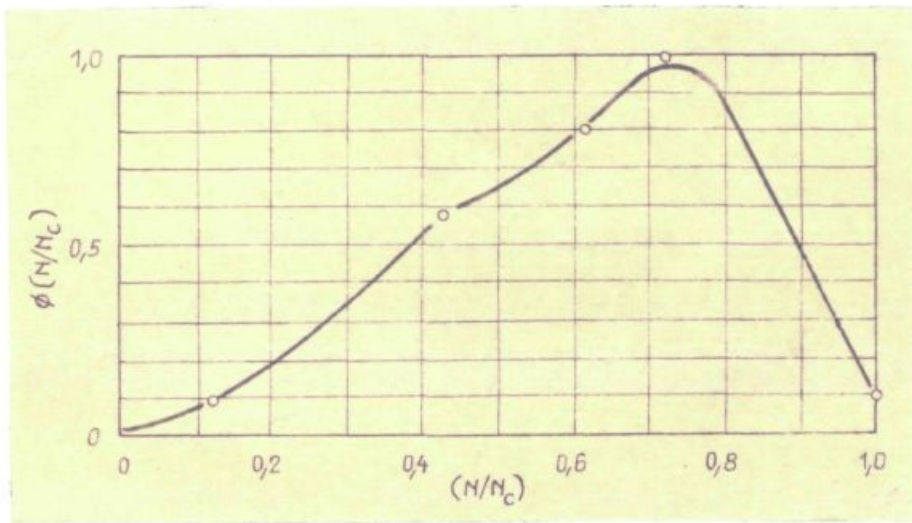
Prvi raziskovalci so največ pozornosti iskavali razmerju (N/N_c), za katerega so smatrali, da je edino nerodajno za efekt mletja. Danes moramo določene predpostavke korigirati, predvsem kritično hitrost mlina, saj je n. pr. Hukki

poročal o uspešnih poskusih mletja tudi pri nadkritični hitrosti. Kljub temu pa je kinetika mletja mlina zelo odvisna od φ (N/N_c), kar je razvidno tudi iz njegovih poskusov. V naslednji razpredelnici podajam odgovarjajoče parametre posameznih poskusov.

Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za N/N_c				
		0,11	0,44	0,64	0,72	1,00
Hematit	$d' \mu$	6000	1720	700	700	4010
	n	1,00	0,92	1,07	0,97	1,17
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	60	355	450	660	60
Siderit	$d' \mu$	3450	1000	600	430	1000
	n	1,12	0,98	0,95	1,02	1,10
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	120	420	840	860	270
Ooliti	$d' \mu$	980	800	500	310	1000
	n	1,04	0,93	0,92	1,03	1,02
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	180	645	1040	1150	180
Magnetit	$d' \mu$	1350	800	400	680	800
	n	1,00	0,87	0,96	0,90	1,03
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	300	400	1140	1040	450
Šaršait	$d' \mu$	1000	310	260	400	750
	n	0,97	1,02	1,07	0,98	1,00
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	420	1140	1350	1150	510



sl. 25.



sl. 26.

Grafična interpretacija dobljenih rezultatov je prikazana na sliki 25, funkcionalna odvisnost γ (N/N_c) pa na sliki 26. Razumljivo je, da je delovna hitrost krogličnega mlina odvisna od konstrukcijskih elementov mlina. Teoretična odvisnost kinetične energije krogel od števila vrtljajev mlina pa služi kot podlaga za določevanje hitrosti vrtenja. Le-ta pa se spreminja tudi od stopnje polnitve mlina. Ker je nemogoče varirati več faktorjev naenkrat, se moramo zadovoljiti s konstantnostjo vseh ostalih delovnih pogojev mlina in s spremembo razmerja N/N_c . Poudarjam tudi, da veljajo rezultati samo za zaprti mlin brez stalnega odvajanja zdrobljenega materiala.

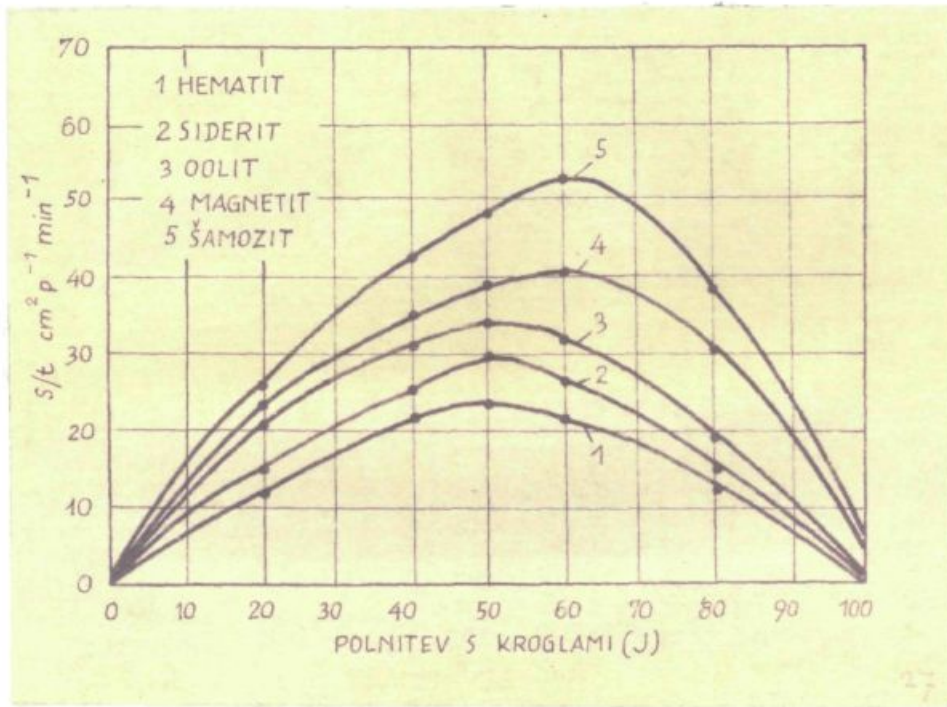
Teoretično bi morala krivulja na sliki 26 zavzeti vrednosti nič pri $N/N_c = 1,0$, ker v tem območju ne bi smelo biti drobljenja zaradi prevelikih centrifugalnih sil. Ker pa moramo v praksi upoštevati "slip" efekt v mlinu in pa drobljenje zaradi obraba, dobimo tudi pri $N/N_c = 1,0$ določeno kinetiko mletja. Na splošno pa se rezultati ujemajo s matematično izpeljavo optimalne hitrosti mlina. Kot vidimo iz slik 25 in 26, kinetika mlina to je specifična površina najprej postopno raste s porastom koeficienta N/N_c ; s njegovim nadaljnjim povečanjem pa se zelo hitro zmanjšuje.

d) Kinetika mlina v odvisnosti od stopnje polnitve

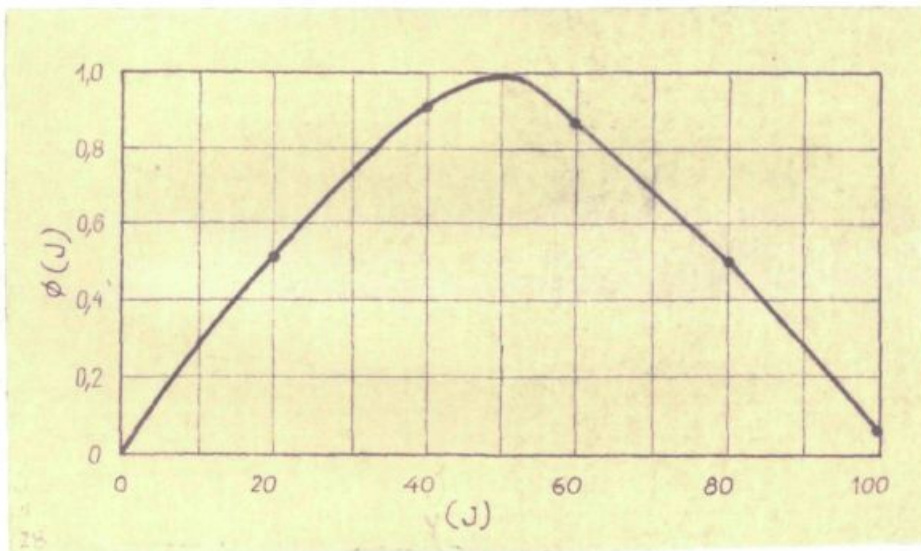
Krogla v mlinu more trčiti samo s neposredno sosednjo kroglo in zaradi tega verjetnost trkov na enoto časa ni

istovetna s verjetnostjo trka dane krogle s katerokoli kroglo v alinu. Posledica tega so različni prirastki spec. površin, kar se najbolje vidi iz rezultatov poskusa z vzorci različne odpornosti proti drobljenju, ki pa se vkljub različnim fizikalno-kemičnim lastnostim obnašajo podobno v krogličnem alinu.

Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za J				
		20	40	50	60	80
Hematit	$d' \mu$	1000	700	510	600	980
	n	1,02	0,96	1,01	0,99	1,02
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	360	660	720	630	360
Siderit	$d' \mu$	910	500	460	700	800
	n	0,97	1,00	0,98	0,94	1,01
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	450	750	900	770	450
Ooliti	$d' \mu$	500	430	370	500	870
	n	1,08	0,98	1,03	0,95	0,93
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	630	930	1020	960	570
Magnetit	$d' \mu$	480	320	300	280	400
	n	1,09	1,07	1,01	1,01	1,02
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	720	1050	1170	1200	910
Šamosit	$d' \mu$	700	300	270	260	300
	n	0,92	1,01	1,02	1,00	1,08
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	780	1320	1440	1590	1140



sl. 27.



sl. 28.

Prirastek specifične površine v enoti časa in v odvisnosti od polnitve krogljčnega alina s kroglači je prikazan na sliki 27, ustrezna funkcija $\varphi(\gamma)$ pa na sliki 28.

Razumljivo je, da krivulja kaže v koordinatnem izhodišču, ker v alinu brez krogel ne moremo pričakovati alevnih efektov. Prav tako je specifična površina enaka nič pri loo % polnitvi alina ($J = loo \%$), ker v tem primeru ne more biti nikakega gibanja krogel in s tem tudi ne drobljenja. Med tema dvema ekstremoma mora doseči stopnja drobljenja svoj maksimum. Pri drobnih kroglah raste specifična površina proporcionalno s povečano stopnjo polnitve.

Is poskusov pa moremo prav tako ugotoviti, da imamo pri majhnih polnitvah precej drsenja krogel v alinu in je zaradi tega pri dani storitvi potrebna večja hitrost vrtenja alina. Končni rezultat tega pa je večja poraba energije pri sicer nizkem efektu mletja. V mejah med minimalno in maksimalno možno polnitvijo alina pa se menja poraba energije in storitev proporcionalno s spremembo polnitev krogljčnega alina. Z majhnimi kroglači in večjimi hitrostmi moremo doseči isto storitev in isto porabo energije, kot pri nizkih hitrostih toda večjih kroglah in večji polnitvi.

c) Kinetika alina v odvisnosti od polnitve s materialom (V)

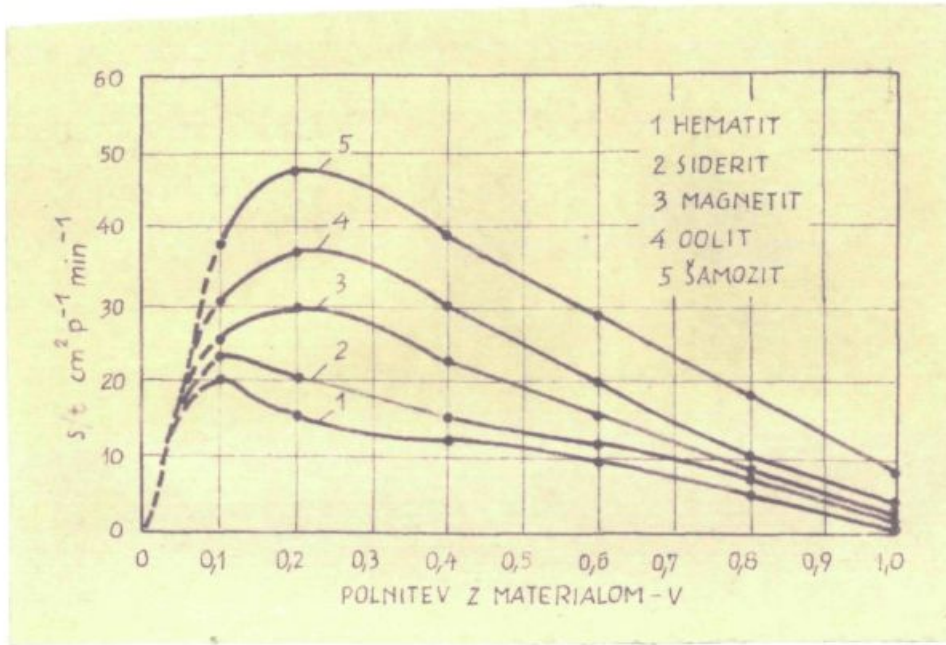
Prazen prostor med kroglači je namenjen materialu, ki ga hočemo zdrobiti. Seveda ni vseeno, ali je ta vnesni prostor popolnoma napolnjen s materialom, ali pa le deloma.

Vsekakor pa mora polnitev vplivati na prirastek specifične površine, φ (V) ki pa mora biti tudi odvisen od drobljivosti materiala.

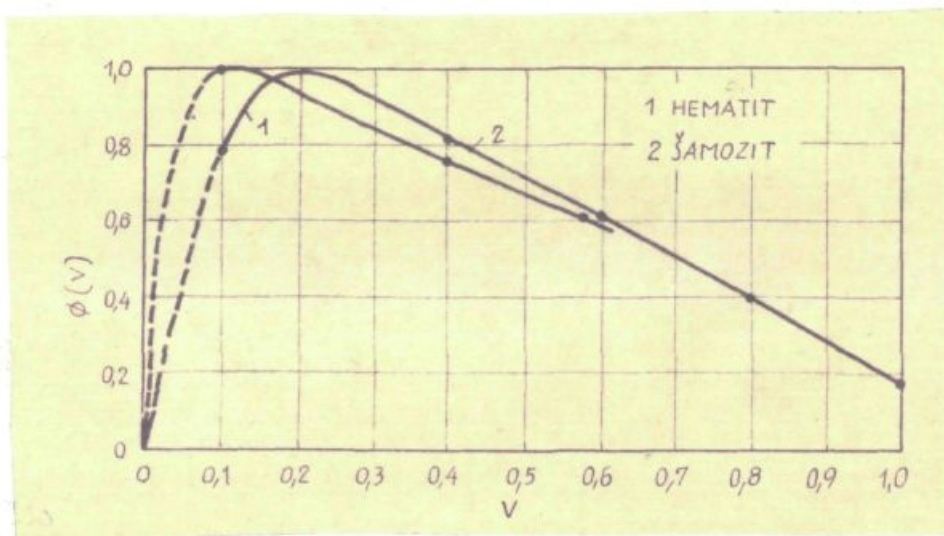
Teoretično imamo možnost polnitve vmesnega prostora od vrednosti nič, pa do sto. Razumljivo, da pri $V = 0$, mlin ne proizvaja nobenih površin. Vrednost $V = 100\%$ pa je nekoliko problematična, saj moremo pričakovati efekt drobljenja le bolj zaradi trenja in manj zaradi trkov krogel.

Rezultati praktičnih poskusov, ki so zbrani v razpredelnici so prikazani tudi grafično na slikah 29 in 30.

Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za (V)				
		0,1	0,2	0,4	0,6	1,0
Hematit	$d' \mu$	940	900	1350	2000	2350
	n	0,90	0,98	0,93	0,94	1,15
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	600	450	360	240	108
Siderit	$d' \mu$	600	620	1000	1000	4800
	n	0,97	1,00	0,98	1,01	1,21
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	720	610	450	350	60
Magnetit	$d' \mu$	600	420	610	1000	2800
	n	0,97	1,01	0,98	0,93	1,12
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	750	900	690	480	90
Ooliti	$d' \mu$	760	420	420	900	2700
	n	0,87	0,96	1,00	0,91	1,09
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	910	1110	900	600	125
Šamosit	$d' \mu$	300	270	410	600	870
	n	1,01	1,00	0,98	0,93	1,18
	$0' \text{ cm}^2 \text{ p}^{-1}$	1130	1420	1160	860	260

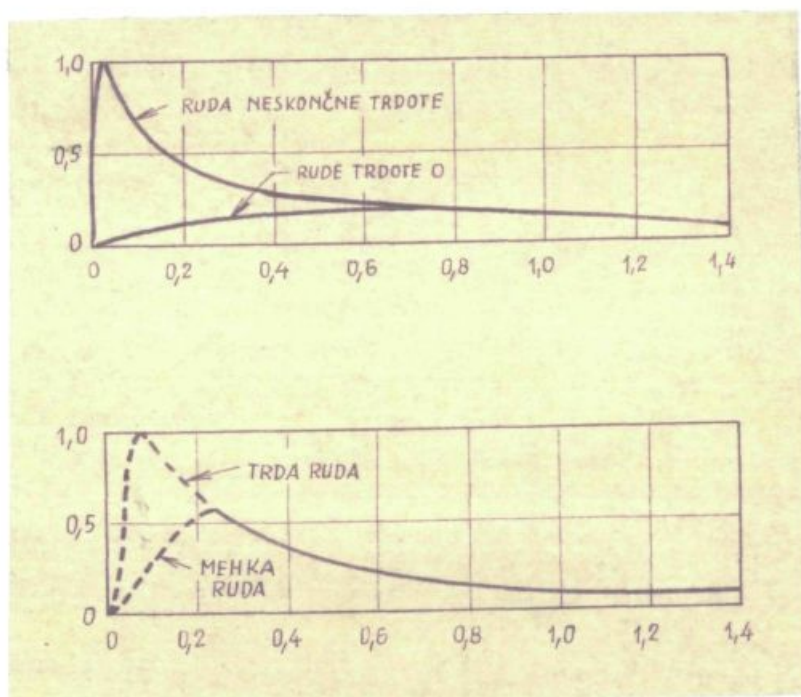


sl. 29



sl. 30

Kot vidimo iz slike 29 so minerali razvrščeni po njihovi odpornosti drobljenja. Če rezultate poskusov izrazimo v funkcijski odvisnosti $\varphi(V)$ (slika 30) vidimo, da sta n.pr. krivulji za šamozit, kot najbolj drobljiv vzorec in za hematit, kot najmanj drobljiv vzorec samo paralelno premaknjeni tako, da je krivulja za manj odporen material nad krivuljo za hematit. Rezultati se tudi skladajo s teoretičnimi razglabljanji Sulivana, ki je izračunal teoretičen potek funkcije $\varphi(V)$ za material z najhno in visoko trdoto sl.31.



sl. 31.

c) Kinetika mlinca v odvisnosti od vrste krogel

Funkcionalna odvisnost $\varphi(S)$ ima v kinetiki mlevnih procesov krogličnega mlinca najmanjši pomen, ker žal nimamo prevelike izbire materialov, ki bi bili primerni za izdelavo krogel. Prav zaradi tega tudi nisem mogel preiskati funk-

cionalno odvisnost na vseh vzorcih, ampak samo na žarnozitu in colitni rudi. Preden pa preideva na same poskuse, bi želel na podlagi modelnih zakonov razmotriti problem krogel in prenosa laboratorijskih poskusov nletja v industrijsko nerilo.

Če hočemo, da se bo neko telo zdrobilo, moremo to telo obremeniti in zato potrebna tlačna napetost je enaka:

$$G_b = K/l^2 \quad 76)$$

kjer je K sila, ki prijema na ploskvi l^2 . Če si zamislimo, da s nekia kladivom iz stalne višine udarjamo po zrnih, potem se bo kinetična energija kladiva spremenila v tlačno silo sledeče velikosti:

$$K = \frac{1}{2} m v^2 / \Delta l \quad 77)$$

če je m ... masa kladiva, v ... njegova hitrost in Δl ... pot pri elastični deformaciji kladiva in zrna. Če nadomestimo v gornji enačbi Δl s enačbo za elastično deformacijo

$$\Delta l \approx \sigma l / E \quad 78)$$

in uporabimo modelne zakone, potem dobimo sledečo odvisnost med modelom in normalno izvedbo :

$$m \cdot v^2 E / l^2 \sigma^2 = m_m \cdot v_m^2 \cdot E_m / l_m^3 \cdot \sigma_m^2 \quad 79)$$

Ker imamo opravka s primerjalnimi količinami, moremo po modelnih zakonih pisati:

$$\lambda / \tau = \sigma / \sigma_m \sqrt{\rho_m E_m / \rho E} \quad 80)$$

kjer pomenijo $\lambda / \tau = v / v_m$... merilo hitrosti in $\rho = m / l^3$ spec. teže kladiva. Za kroglične aline,

osiroma krogle v njih pa enačbe 80), katero moremo za enake σ in ρ pisati:

$$\lambda/\tau = v/v_m = 1 \quad 81)$$

ne moremo uporabiti, ker bi zahteva $v/v_m = 1$ zahtevala enake višine h , to je enake premere alina pri modelu in industrijski izvedbi. Vemo pa, da so premeri v razmerju λ . Iz znane enačbe $v = \sqrt{2gh}$, sledi za kroglične aline:

$$v/v_m = \sqrt{h/h_m} = \sqrt{\lambda} \quad 82)$$

Zaradi $v/v_m = \lambda/\tau$ dobimo modelni zakon po R.E. Froudu:

$$\tau = \sqrt{\lambda} \quad 83)$$

Iz enačbe 80) in 83) moremo torej za kroglične aline postaviti sledečo odvisnost:

$$\lambda = \rho_m \cdot E_m \cdot \sigma^2 / \rho \cdot E \cdot \sigma_m^2 \quad 84)$$

To pa pomeni pri enakem blagu za zletje (E in σ enaka):

$$\lambda = \rho_m / \rho = \gamma_m / \gamma \quad 85)$$

Enačbo 85) moremo z besedami izraziti kot sledi:

Specifične mase ρ in tudi teže krogel γ morajo biti v obratnem sorazmerju kot so premeri alina. Ker pa nimamo velike izbire v materialu za krogle, delajo vsi kroglični alini najhujših premerov neekonomično.

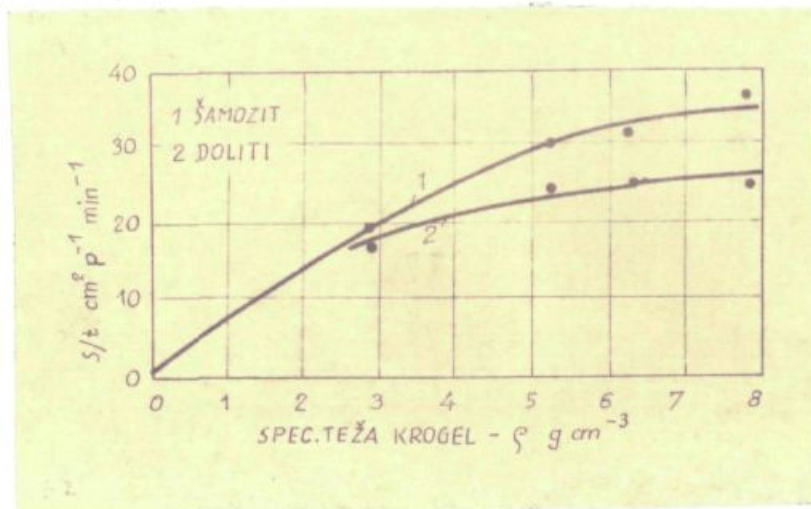
Zaradi težav v materialu sem nogel pri svojih poskusih uporabiti samo štiri vrste krogel in sicer:

- a) odlomke hematitne rude = $4,52 \text{ gm}^{-3}$
- b) porcelanske krogle = $2,45 \text{ gm}^{-3}$
- c) svinčene krogle = $6,32 \text{ gm}^{-3}$
- d) železne krogle = $7,87 \text{ gm}^{-3}$

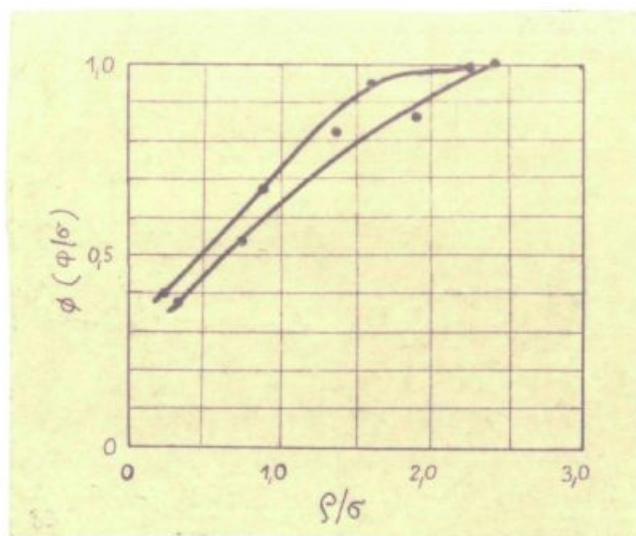
Ker se uporabljaj kot mlevna telesa tudi hematitno rudo, se lahko mlet samo vzorca s najbolj izraženo drobljivostjo; šamosit in colitno rudo. V naslednji raspredelnici so prikazani rezultati poskusov :

Mineral	Parameter	Vrednosti parametrov za			
		2,45	4,52	6,32	7,87
Coliti	$d^* \mu$	800	410	750	740
	n	1,02	1,08	0,92	0,93
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	510	720	750	760
Šamosit	$d^* \mu$	800	460	390	400
	n	0,95	0,98	1,01	0,98
	$0^* \text{cm}^2 \text{p}^{-1}$	600	900	960	1110

Sliki 32) in 33) prikazujeta dobljene rezultate. Kot vidimo, je kinetika mletja precej odvisna od specifične teže mlevnih teles, saj imamo konstantno naraščanje krivulje. Žal pa tega dejstva ne moremo s pridom uporabiti, ker smo omejeni v izbiri materiala za izdelavo krogel. Stopnja mletja je seveda odvisna tudi o drobljivosti vzorcev, saj dobimo za šamosit precej višje vrednosti prirastka specifične površine na enoto časa in v odvisnosti od materiala drobilnih teles.



sl. 32.



sl. 33.

S tem sem obdelal vse parametre iz enačbe 44), ki vplivajo na kinetiko krogljčnega mlina. V kolikor bi isel opraviti s mokrim mletjem, bi moral upoštevati še nekaj dodatnih členov, kot so viskoznost krali, razmerje trdne snovi in vode.

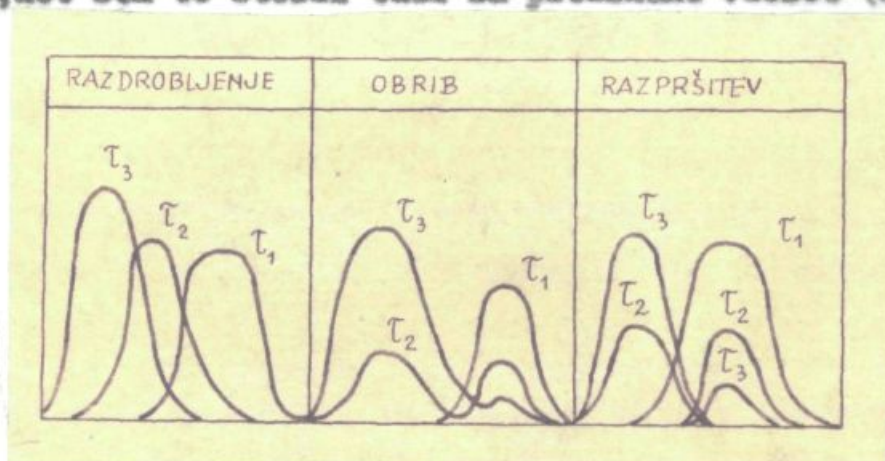
Smatram, da sem dovolj razjasnil kinetiko krogljčnega mlina, predvsem v odvisnosti od glavnih parametrov, ki vplivajo na delovanje mlina in od stopnje drobljivosti rude. Kot vidimo, je s metodami ki sem jih obdelal v prvem delu svoje disertacije, mogoče vnaprej nakazati obnašanje mineralne snovi v mlinu. S pomočjo funkcije kinetike mlina, oziroma njenih posameznih členov, pa je deloma mogoče celo izbrati optimalne pogoje delovanja krogljčnega mlina za dano mineralno snov. Pri tem pa ne smemo prezreti zelo važnih zakonov modelne teorije in brez odgovarjajočih korektur, ki nam jih nalaga modelna teorija, prenašati laboratorijske rezultate v industrijska merila.

S tem, da sem ugotovil kinetiko krogljčnega mlina za dane mineralne surovine, pa le-te še niso popolnoma karakterizirane. Zaradi tega moram določiti kinetiko mletja za vsak preiskan vzorec in postaviti osnovno kinetično enačbo, oziroma določiti njene posamezne člene. Šele s tem bodo posamezni vzorci natančno definirani.

KINETIKA MLETJA

Že v uvodnih poglavjih sem poudaril, da so zrnatost in njene časovne spremembe najbolj karakteristične za potek mletja. Neposreden potek mletja moremo opisati s različnimi funkcijami in vsaka funkcija podaja določeno karakteristiko mlevnega blaga. Ker so vsi ti poskusi vezani na kroglični mlin, je bilo nujno najprej raziskati delovanje mlina, kar sem obdelal v predhodnem poglavju.

Teorija mlevnih funkcij pa je obdelana in matematično definirana s enačbami 45) do 50). Prav tako sem obdelal tri principiелne možnosti mletja to je razdrobljenje, obrib in raspršitev. Na tem mestu hočem prikazati samo grafično sliko teh treh načinov in sicer s krivuljami pogostosti nastopanja H , kot sem to storil tudi za preiskane vzorce (sl. 34).



sl. 34.

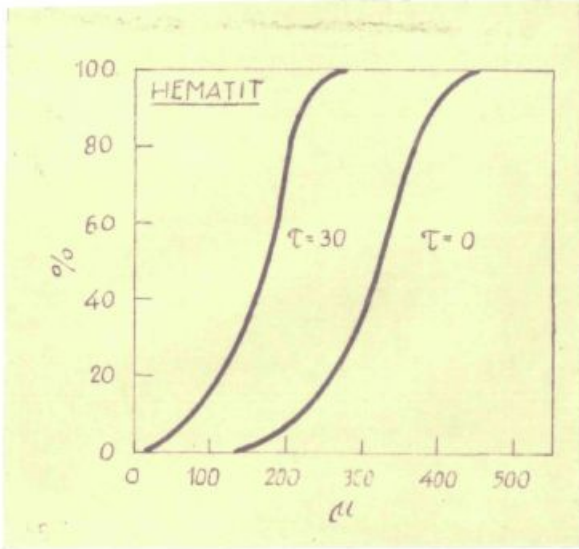
Na sliki so prikazani vsi trije karakteristični načini mletja ob štirih različnih časovnih intervalih ($\tau_0 = 0$). Pri razdrobljenju raspade vsako zrno v manjša zrna, kar se

odraža v stalnem premiku maksimuma zrnatosti iz območja debelejših zrn, v območje drobnejših zrn. Pri obrību se pri vsakem zrnú postopno obríba droben prah. Osnovna zrna postajajo konstantno manjša, kar se manifestira v stalnem zmanjševanju enega maksimuma in večanja drugega na račun prvega. Pri razpršitvi pa opazujemo popoln razpad določenih zrnatosti v drobnejša zrna, kar ima za posledico tvorbo popolnoma novega maksimuma v območju drobnih zrn.

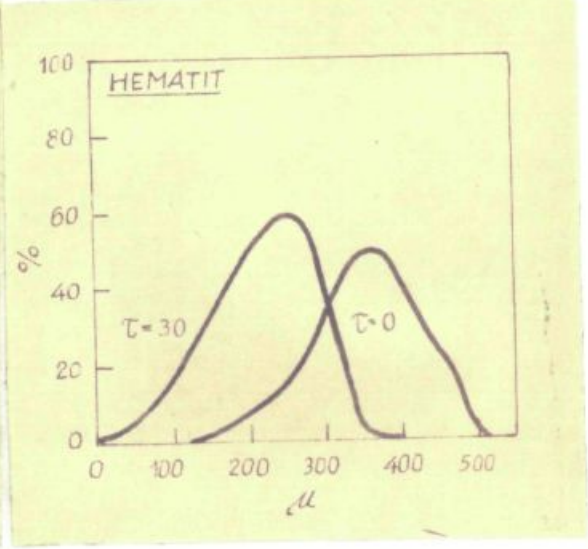
S tem je torej dana možnost ugotoviti mehanizem drobljenja in predvsem časovne spremembe. Prav zaradi tega sem vse vzorce preiskusil tudi v tej smeri in s grafičnim izvedenjem vseh karakterističnih funkcij ugotovil kinetiko mletja materialov. Za poskuse sem uporabljal vzorce zrnatosti 200 - 500 mikronov in že opisani kroglični alin. Pogoji delovanja so bili izbrani v skladu s predhodnimi raziskavami kinetike krogličnega alina. Vsak vzorec je mlet 30 minut, kar sem smatral za dovolj dolg časovni interval. V naslednjih izvajanjih želim podati rezultate posameznih poskusov s izbranimi vzorci hematita, siderita, oolitne rude, magnetita in šamozita.

Hematit

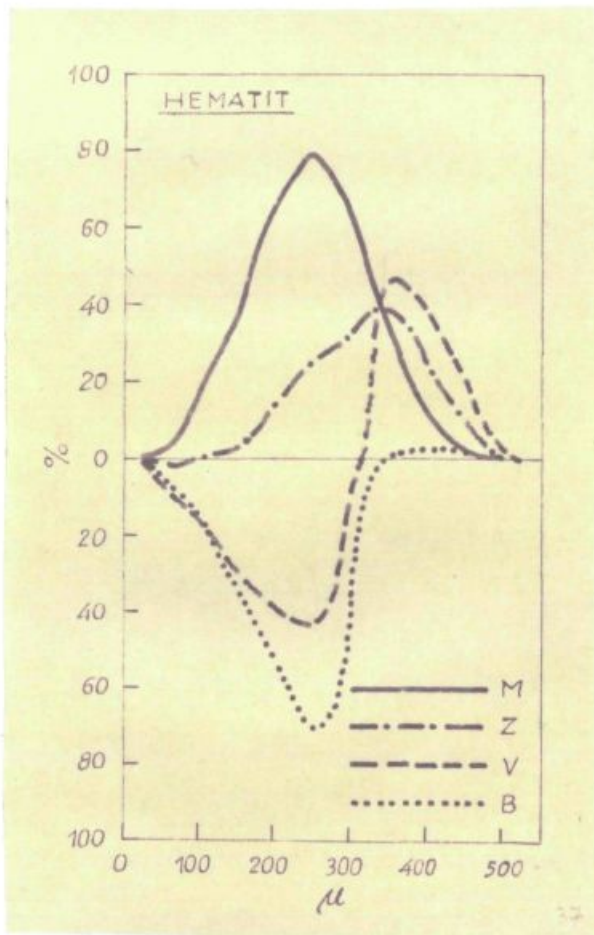
Granulacijski sestav vzorca pred poskusom to je ob času $\tau = 0$ in po 30 min mletja ($\tau = 30$) je prikazan v naslednji raspredelnici:



sl. 35



sl. 36.



sl. 37.

Zrnatost μ	$\tau = 0$		$\tau = 30$	
	%	Σ %	%	Σ %
400 - 500	32,2	100,0	0	-
300 - 400	49,8	67,8	2,4	100,0
200 - 300	16,5	18,0	59,4	97,6
100 - 200	2,5	2,5	33,1	38,2
0 - 100	-	-	5,1	5,1

Slike 35, 36 in 37 prikazuje uporabo definiranih mlevnih funkcij, karakteriziranih z enačbami 45) do 50) . Na sliki 35 je nanešena funkcija $D = f(x)$ za čas $\tau = 0$ in $\tau = 30$ min. Iz poteka krivulje vidimo enakomeren premik granulacijskega sestava v območje drobnejših zrn. Še bolj karakteristična je naslednja slika (slika 36), kjer je nanešena funkcija $H = f(x)$. Kot vemo je dolžina ordinat nad poljubno vrednostjo x merilo za pogostost nastopenja zrn velikosti "x" v mlevnem blagu. Vidimo, da je v izhodnem materialu najbolj pogosta zrnatost 300 - 400 μ . Moram pa ponovno poudariti, da se ti podatki nanašajo na utežni dobitek v odstotkih, ne pa na število zrn. Če sedaj pogledamo funkcije H po času $\tau = 30$ minut, vidimo, da se je maksimum premaknil v območje 200 do 300 μ in da so vsa zrna večja od 400 μ zdrobljena. Skupno z njimi so praktično izginila tudi zrna 300 - 400 μ . Takšen kontinuirani premik funkcije in zaostritek maksimuma kaže na nekomplcirane procese mletja in na mehanizem razdrobljenja. Obruba praktično ni, še manj seveda razpršitve. Iz teh

dveh funkcij moremo sedaj izpeljati še funkcije za mlevni tok (M), prenik granulacijske porazdelitve (V), karakteristika mlevnosti (Z) in karakteristika nastanka novih zrn B (sl.37).

Konstruktivno dobimo krivulje za mlevni tok iz difference ordinatnih dolžin krivulje $D(\tau = 30) - D(\tau = 0)$. Iz krivulje moremo odčitati, kolike utežnih odstotkov zrn, ki so večja od "x" se razdrobi v zrno s premerom manjšim od "x". Pri razdrobilnem mehanizmu ima krivulja oster maksimum, ki se med mletjem polagoma premika proti levi in zmanjšuje.

V isti diagram so nanešene tudi ostale funkcije. Konstruktivno dobimo krivulje granulacijskega prenika V, iz difference ordinatnih dolžin $H(\tau = 30) - H(\tau = 0)$. Zaradi primerjave s M-krivuljo damo funkciji negativen predznak. V območju kjer imata krivulji M in V približno identičen potek, imamo samo mletje, ne pa tvorbo novih zrn zaradi drobljenja debelejših. V našem primeru je to območje v granulacijskem intervalu $300 - 500 \mu$. Karakteristika mlevnosti Z predstavlja konstruktivno srednjo vrednost med M in V - krivuljo. Smiselna je pa samo tam, kjer ležita krivulji mlevnega toka in granulacijskega prenika blizu skupaj. To je v primeru hematita območje nad 300μ . Ordinate krivulje Z nam povedo kolik utežni del zrn velikosti "x" se razdrobi v opazovanem časovnem intervalu mletja. Prav tako moramo iz njene oblike zaključiti, da pri hematitu ne nastanejo med mletjem nobena zrna nad 450μ in le malo zrn nad 400μ , ki pa se ob koncu mletja razdrobe v še bolj drobna zrna. Karakteristi-

ka nastanka srn B je geometrično raslika krivulj V - Z in zaradi tega manj natančna v tistem območju, kjer je manj točen tudi potek krivulje Z. Ordinate te krivulje nam povedo, koliko srn velikosti "x" se tvori med drobljenjem vzorca.

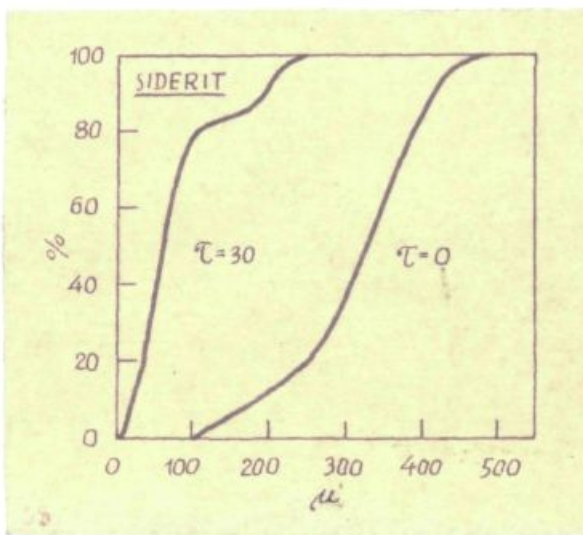
Če sedaj suviram rezultate poskusa za hematit, vidimo da je mlevni mehanizem pri tem vzorcu enostaven, nova srna nastajajo samo zaradi razdrobljenja. Kroglični mlin deluje predvsem na srna 300 - 500 μ , kar ima za posledico mlevni tok iz tega intervala v drobnejša srna. Velika odpornost proti drobljenju preprečuje obrab in preveliko tvorbo prahu.

S i d e r i t

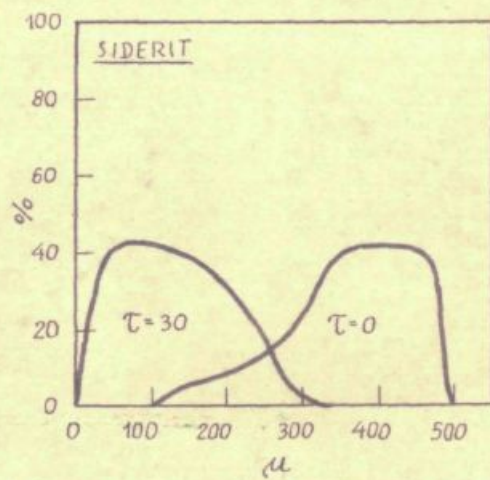
Granulacijski sestav vzorca pred poskusom, to je ob času $\tau = 0$ in po 30 minutah mletja je prikazan v naslednji razporednici :

Zrnatost μ	$\tau = 0$		$\tau = 30$	
	%	Σ %	%	Σ %
400 - 500	40,0	100,0	-	-
300 - 400	41,4	60,0	-	-
200 - 300	13,6	18,6	17,0	100,0
100 - 200	5,0	5,0	39,4	83,0
0 - 100	-	-	43,6	43,6

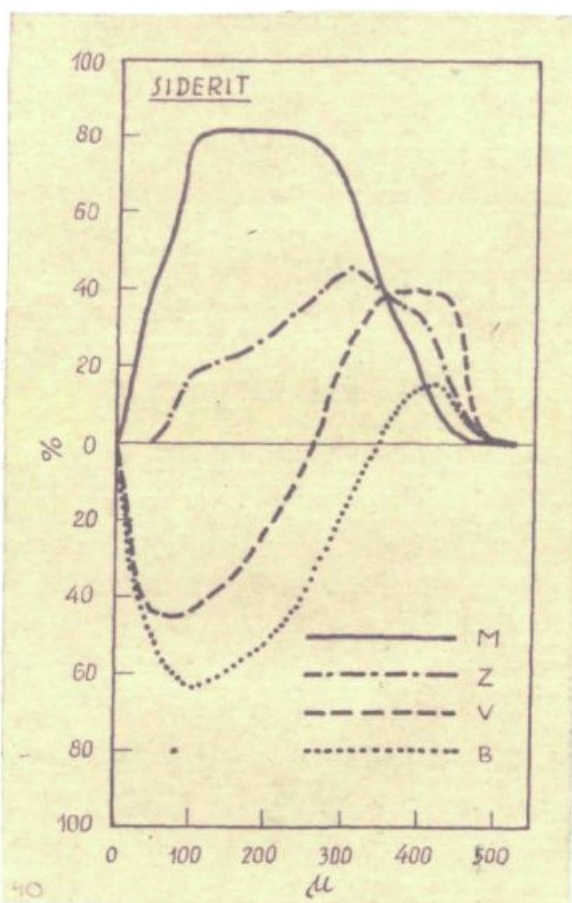
Grafično izvrednotenje mlevnega poskusa je pokazano na slikah 38), 39, in 40). Krivulja $D = f(x)$ kaže precej neena-



sl. 38.



sl. 39.



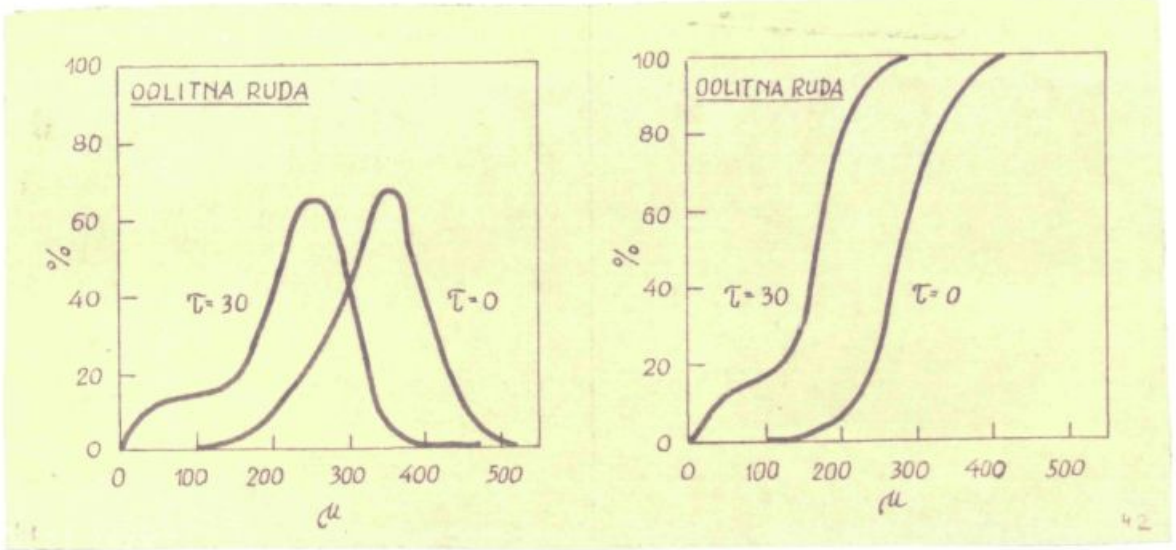
sl. 40.

komerno mletje, dočim vidimo iz poteka krivulj za pogostost nastopanja kombinacije razdrobljenja oziroma najhnejša obraba. Dočim je pred mletjem maksimum precej neizrazit, se po 30 minutah mletja premakne v skrajni levi del diagrama. Vpliv obraba se še bolj vidi iz poteka funkcije mlevnega toka, kjer je tisti del krivulje paralelen s abscisno osjo karakterističen za procese obraba. Krivulja za tvorbo novih zrn ima izraziti maksimum v intervalu do 100μ , kar je razumljivo zaradi superponiranja procesov razdrobljenja in obraba. Vzorec ima precejšno odpornost proti drobljenju, predvsem pa žilavost zaradi svoje teksture. Tako se zrna najprej zdrobe vzdolž meja kristalitov in nehomogenih mest, nato pa se v mlinu še tarejo med seboj. Drobilni mehanizem ni enostaven, ampak zaradi superpozicije dveh načinov mletja precej zapleten.

Colitna ruda

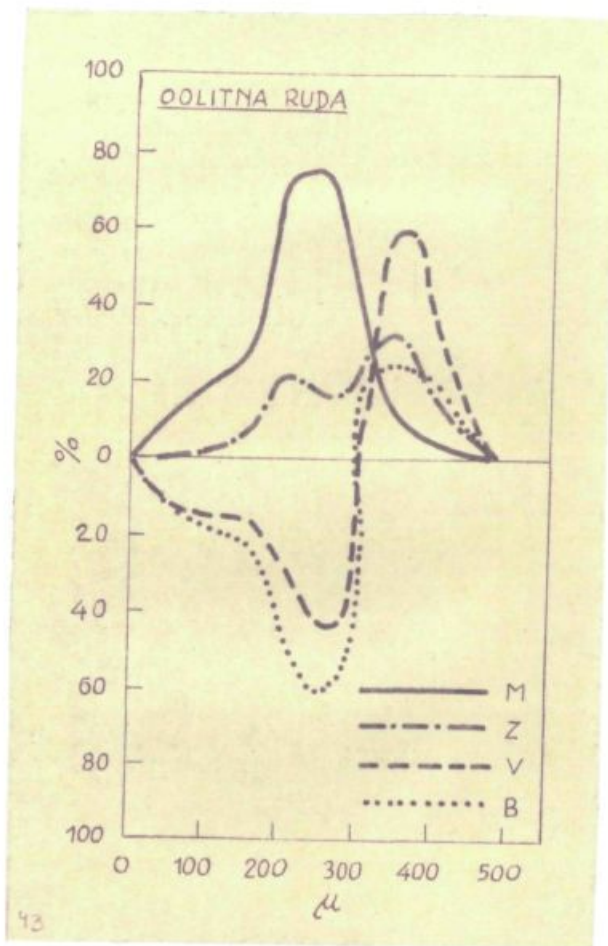
Granulacijski sestav vzorca pred in po poskusu je prikazan v naslednji razpredelnici :

Zrnatost μ	$\tau=0$		$\tau=30$	
	%	Σ %	%	Σ %
400 - 500	10,9	100,0	-	-
300 - 400	67,1	89,1	4,7	100,0
200 - 300	20,2	22,0	65,8	95,3
100 - 200	1,8	1,8	17,5	29,5
0 - 100	-	-	12,0	12,0



sl. 41.

sl. 42.



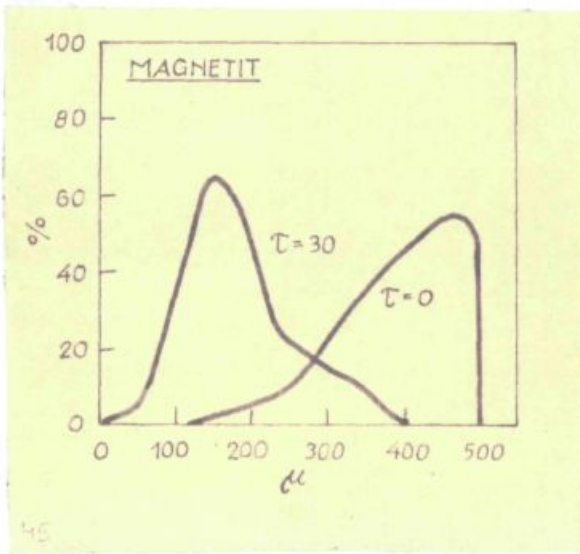
sl. 43.

Odgovarjajoče funkcije so prikazane na slikah 41, 42 in 43. Krivulja zrnatosti $D = f(x)$ je normalna s poudarjenim odklonom v območju do 100μ po 30 min mletja. Ta pojav je še bolj izrazit pri krivuljah funkcije $M = f'(x)$, in to pri krivulji za $\tau = 30$ minut. Oblika krivulje je v osnovi karakteristična za mehanizem razdrobljenja, vendar opažamo v območju pod 100μ razmeroma redek pojav razpršilnega mehanizma, ki je predvsem znan iz mletja raznih stisnjenih briketov oziroma tablet. Če pa gledamo pojav iz aspekta sestave rude - trdi coliti v mehki cementni osnovi, je razumljiv. Mlin najprej deluje na kontaktne ploskve, pri tem nastanejo razmeroma velika colitna zrna (območje $200 - 300 \mu$) in pa zelo droben prah cementa (območje $< 100 \mu$). To se tudi vidi iz dvojnega maksimuma krivulje Z (karakteristika mlevnosti). Ker pa krivulji za funkcije M in V niata identičnega poteka, je na splošno krivulja Z nesigurna. Rezultati se skladajo s ugotovljeno precejšnje odpornostjo vzorca do momenta razklopa colitev in osnove.

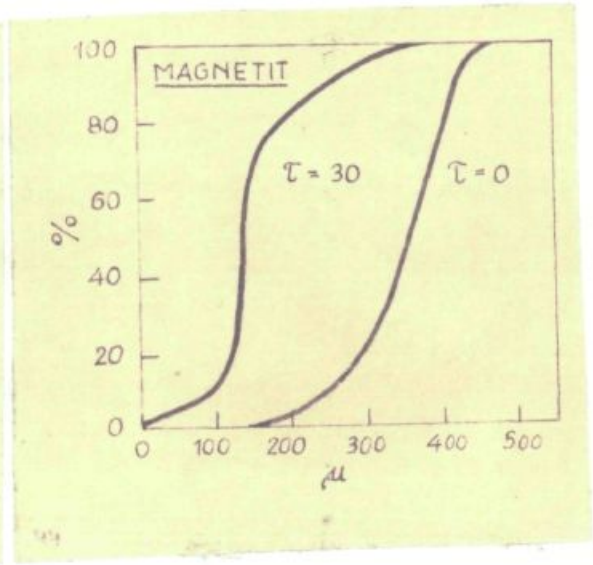
M a g n e t i t

Granulacijski sestav, ki je potreben za določitev vseh mlevnih funkcij, je prikazan v naslednji razporednici:

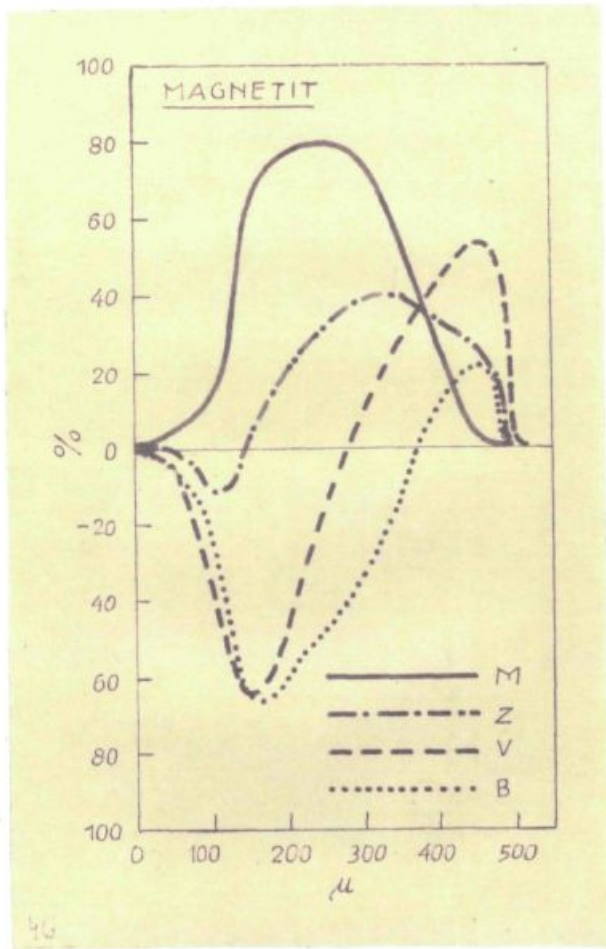
Zrnatost μ	$\tau = 0$		$\tau = 30$	
	%	Σ %	%	Σ %
400 - 500	54,2	100,0	-	-
300 - 400	36,8	45,8	9,9	100,0
200 - 300	8,0	9,0	21,1	90,1
100 - 200	1,0	1,0	65,5	69,0
0 - 100	-	-	4,5	4,5



sl. 45



sl. 44.



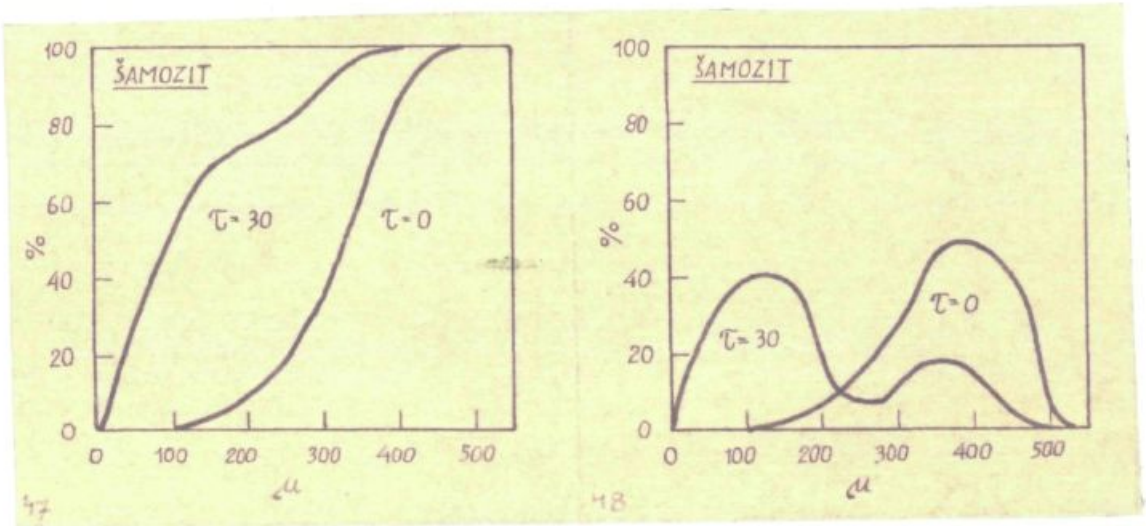
sl. 46.

Na podlagi izvršene sejalne analize, prikazane v prednji raspredelnici, moremo orisati posamezne mlevne funkcije, prikazane na slikah 44, 45 in 46. Funkcija $D = f(x)$ ne kaže nobenih anomalij večjega obsega, razen rahlo nakazanega prehoda pri $200 - 300 \mu$. Pojasnilo te anomalije je v poteku krivulje za mlevni tok M, ki je v območju 250μ paralelna z abscisno osjo, kar kaže na superpozicije obriba nad razdrobljenjem. To pomeni, da se pri tej zrnatosti zrna niti ne drobe, niti ne prihajajo nova zrna iz višjega granulacijskega območja. Iz uvodnih raziskav o odpornosti proti drobljenju sem ugotovil, da spada magnetit med precej lahko drobljive snovi, vendar samo do določenega granulacijskega intervala. Ko se magnetit razdrobi do lističev, (luskasta struktura) je nadaljne drobljenje zelo težko. Zaradi tega se tvori tudi zelo malo prahu. Potek krivulje za posamezna funkcije govori o pretežno enostavnem drobilnem mehanizmu -razdrobljenju večjih zrn v manjša od istočasne mejnem obribu.

Š a n o z i t

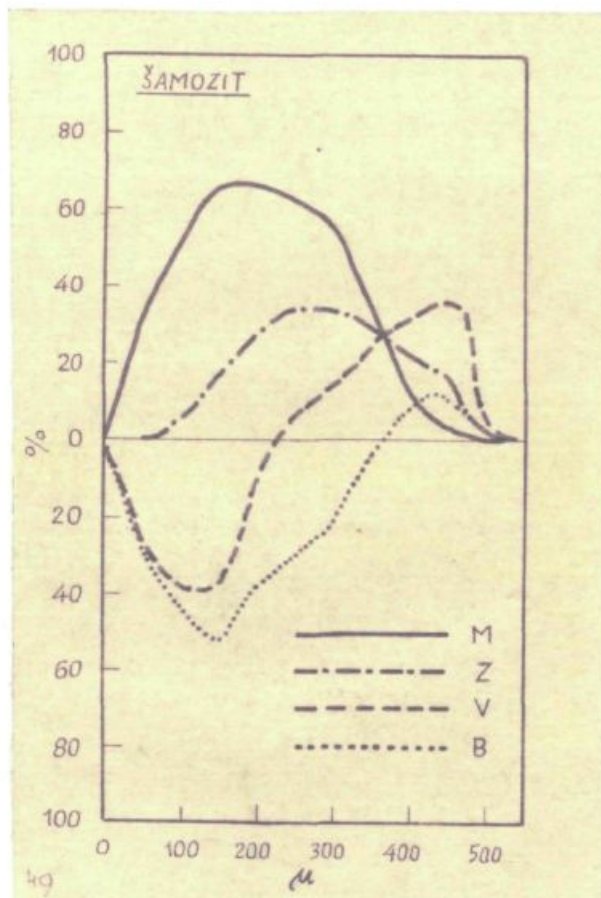
Utežni dobiček posameznih granulacij on začetku poskusa in po 30 minut mletja, je prikazan v naslednji raspredelnici :

Zrnatost μ	$\tau = 0$		$\tau = 30$	
	%	Σ %	%	Σ %
400 - 500	40,3	100,0	3,0	100,0
300 - 400	45,2	59,7	18,0	97,0
200 - 300	12,3	14,5	7,5	79,0
100 - 200	2,5	2,5	40,3	71,5
0 - 100	-	-	31,2	31,2



sl. 47.

sl. 48



sl. 49.

Vzorec šamozita je tipičen za primer zelo drobljive rude, kjer prevladuje obrib nađ mehanizmom razdrobljenja. Odgovarjajoče funkcije so prikazane na slikah 47, 48 in 49. Potek krivulj pogostosti nastopanja zrnatosti H je karakterističen za obribni mehanizem, kombiniran z drobljenjem najdebelejših zrn. Zrna srednjih velikosti pa se predvsem drobe zaradi trenja, oziroma obriba. Ker se zaradi obriba tvori zelo fin prah, obda le-ta posamezna debela zrna, ki se na ta način odtegnajo drobljenju. Zaradi tega je vzorec, vkljub majhni odpornosti proti drobljenju malo primeren za fino drobljenje. Proces obriba se namreč superponirajo nađ procesi razdrobljenja, ki zato ne morejo priti dovolj do izraza. Iz krivulje tvorbe zrn B vidimo, da se pravzaprav v vseh intervalih, razen v 400 - 500 μ tvorijo tudi nova zrna, poleg odvajanja v nižje granulacijske intervale.

Če kratko rezimiram posamezne mlevne funkcije in njihovo odvisnost od odpornosti proti drobljenju morem ugotoviti sledeče :

1) Mehanizem drobljenja je v precejšni meri odvisen od odpornosti proti drobljenju. Pri visokih vrednostih prevladuje čisto razdrobljenje, pri nizkih pa pretežno obrib.

2) Kjer imamo opravka z heterogeno in dvovrstno snovjo (oolitna ruda), kar se odraža v začetni majhni odpornosti proti drobljenju, ki kasneje močno naraste, morem pričakovati celo mehanizem razpršitve skupno z mehanizmom razdrobljenja.

3) Mehanizem drobljenja in mlevna funkcija se torej odraza odpornosti drobljenja, tako da je mogoče z poznavanjem indeksa drobljivosti napovedati približno mehanizem drobilnega procesa, stopnjo finoče in tiste zrnatosti, ki bodo najbolj izpostavljene mletju.

Mlevne funkcije je mogoče, kot smo videli iz poskusov določevati v precej širokem granulacijskem intervalu. Vendar sem že tam omenil, da je funkcija karakteristike mlevnosti Z točno definirana samo tam, kjer je potek krivulj Z in M in za premik granulacijske porazdelitve V identičen. To pa je samo v ozkem granulacijskem intervalu. Še bolj pa pride to do izraza takrat, kadar hočemo določiti matematično enačbo kinetike mletja. V takem primeru moramo delati poskuse s zelo ozkim granulacijskim intervalom, drugače se posamezne zrnatosti prekrivajo in otežkočajo matematično izvrednotenje. Zaradi tega sem vse poskuse za določitev enačbe kinetike mletja delal s vzorci granulacije $150 - 200 \mu$. Količina vsakega vzorca je bila 250 g , polnitev krogljčnega mlina pa samo 5% , primerno majhni količini vzorcev. Vsak poskus sem ponovil petkrat in upošteval kot končni rezultat aritmetično sredino vseh pet meritev. Rezultate sejalnih analiz sem zaokrožil na cela števila, ker je nemogoče na diagram nanašati vrednosti, ki so manjše od $0,5 \%$.

Seveda bi bilo zaželeno, da bi mogli določiti matematično odvisnost med hitrostjo tvorbe in razpada pri mletju. Tudi definicija cilja reakcije je otežkočena, ker obse-

gaje zdrobljeni produkti različne granulacijske intervale. V sortimentih, kjer imamo prirastek zaradi mlevnih procesov, je rezultat podoben nepregledni verižni reakciji. Vse to seveda otežkoča temeljne raziskave. Zaradi tega se moramo omejiti na ozek granulacijski interval, kjer lahko opazujemo kinetiko mletja .

W. Sima je raziskal drobilno kinetiko kremenca in ugotovil, da poteka reakcija po reakciji, ki ima eksponent v obliki ulomka in sicer je funkcija $2/3$ do $4/3$ reda. Za poskuse je prav tako jemal ozek granulacijski interval. Pri poskusih moramo upoštevati, da je proces mletja odvisen od delovnih pogojev, ki so :

- 1) Vrsta mlina in število vrtljajev,
- 2) volumen bobna,
- 3) geometrična oblika bobna,
- 4) množina krogel,
- 5) srnatost blaga,
- 6) premer krogel in
- 7) količina mlevnega blaga.

Pri tem moramo prav tako upoštevati, da se s zmanjšanjem srnatosti proces mletja zavre. V začetku poskusa mlin močneje deluje na material, to dejstvo pa s zmanjšanjem srnatosti počasi izgine. V začetku poskusa so v mlinu drugačni pogoji, poraba energije je manjša kot pa kasneje. To praktično izkoriščamo v industriji, saj vedno v krogotok vključimo klasifikator, ki sproti odvoja zdrobljen material.

H. Sales in W. Sima sta proces zletja razdelila v dve fazi, ki sta jih določila na krivulji funkcije $D = f(x)$. Prvi odsek sta definirala kot "funkcije zloma", kjer imamo opravka prvenstveno z drobljenjem sekundarnih kristalnih struktur, ki imajo slabše kohezijske vezi. Za to dejstvo govori tudi zgoraj omenjeni pojav, da se z manjše povprečne zrnatostje "funkcija zloma" zmanjšuje in teži z vrednosti nič. Seveda moramo pri dalj časa trajajočem zletju upoštevati zaviralno delo drobnih zrn. Drugo daljše vejo krivulje sta zgoraj omenjena avtorja imenovala "funkcije zletja". Odprto pa sta pustila vprašanje o vplivu drobljivosti na omenjeni funkciji.

Pri svojih poskusih sem predvsem poskušal ugotoviti sledeče:

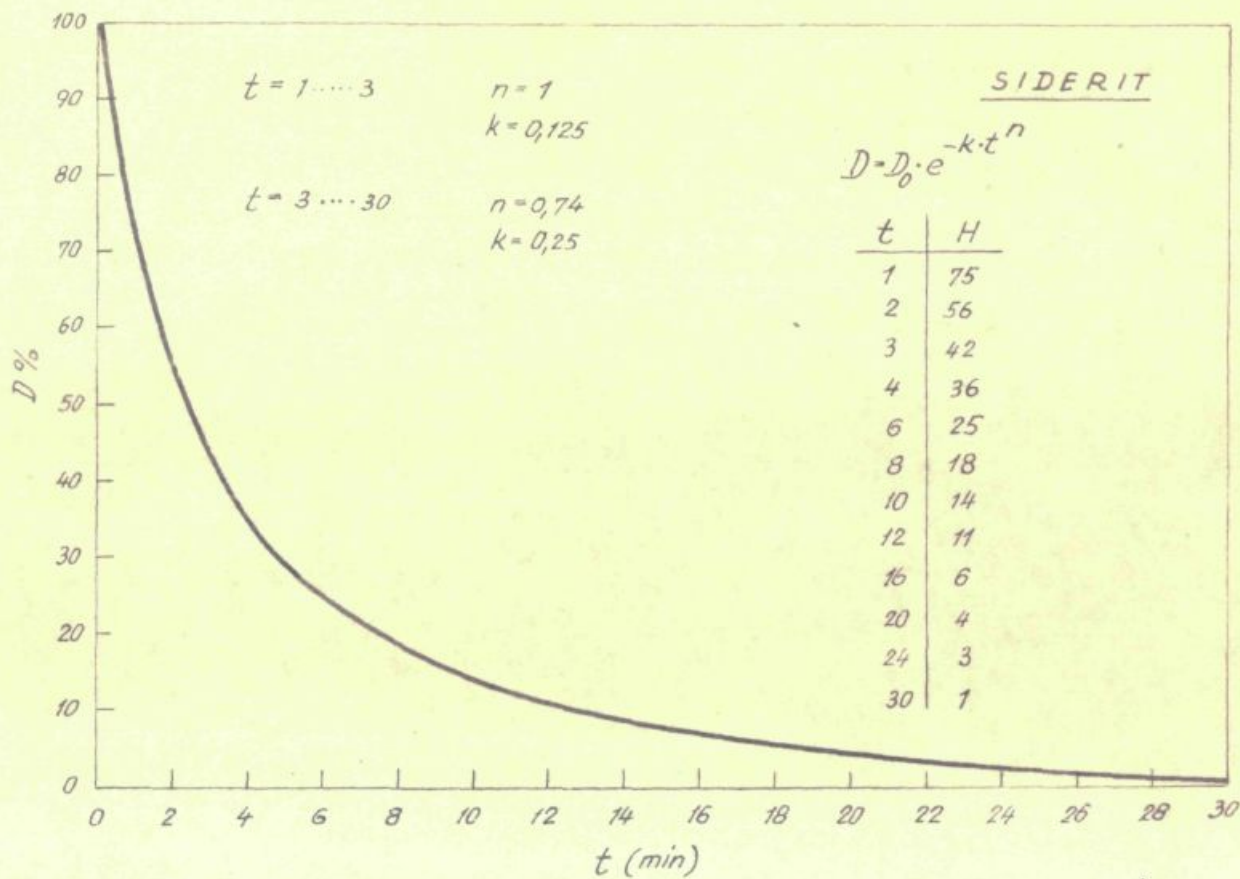
- a) Obstoj obeh funkcij po H. Salesu in W. Simau
- b) Kinetično enačbe obeh funkcij
- c) Medsebojno odvisnost med odpornostjo proti drobljenju in kinetično enačbo obeh funkcij.

V naslednji razpredelnici so podane povprečne vrednosti sejalnih analiz vseh vzorcev ob določenih časovnih intervalih zletja. Vrednosti so podane v odstotkih in zokrežene na cela števila. Sita so predhodno kalibrirana z mikroskopom.

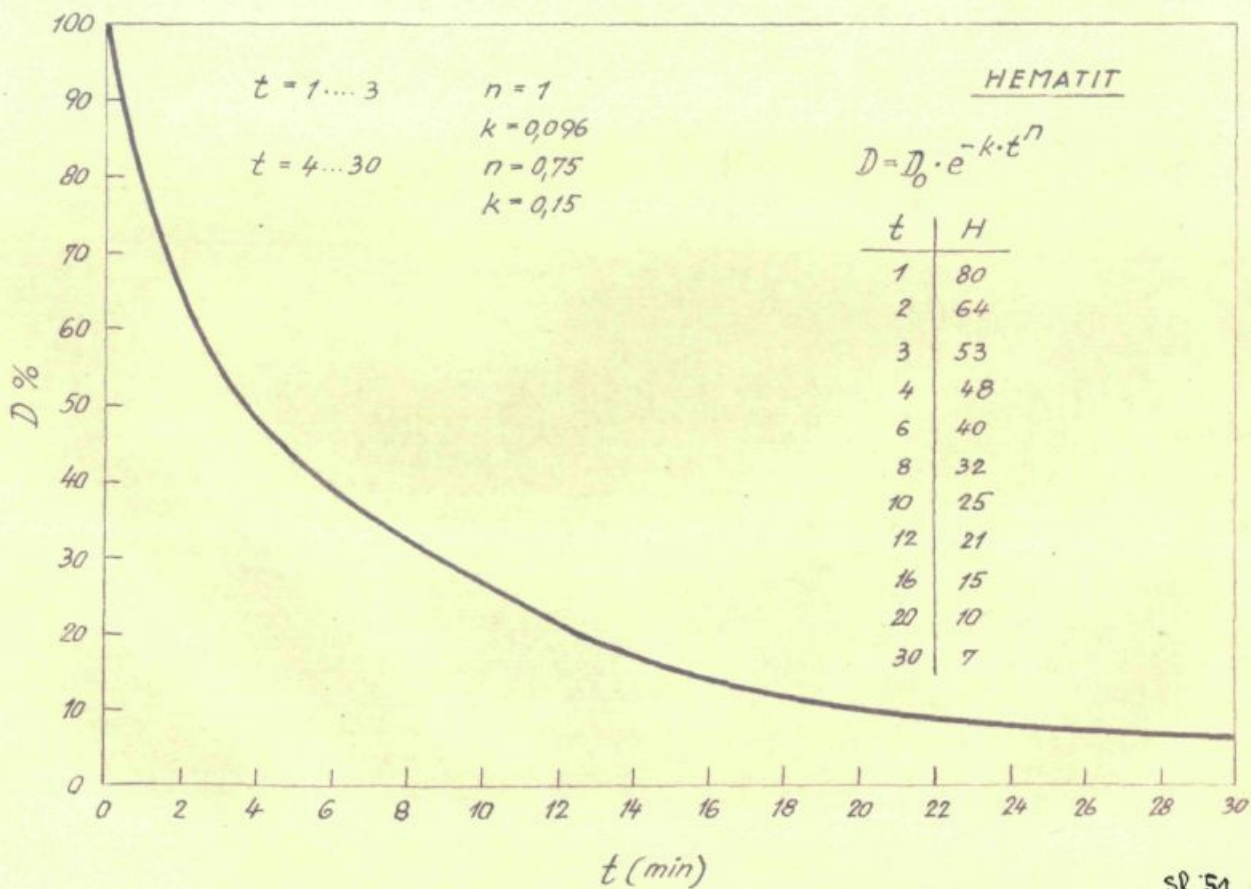
Čas mletja min	D v % za posamezne vzorce				
	Hematit	Siderit	Oolitna ruda	Magnetit	Šamosit
0,5	-	-	-	-	80
1	80	75	70	68	60
2	64	56	49	46	42
3	53	42	-	-	27
4	48	36	30	25	18
6	40	25	17	15	8
8	32	18	12	10	3
10	25	14	8	6	1
12	21	11	6	3	-
14	-	-	-	-	-
16	15	6	-	-	-
18	-	-	-	-	-
20	10	4	2	1	-

Grafično iz vrednotenja za vsak posamezen vzorec je prikazano na slikah 50, 51, 52, 53, 54 in 55. Pri tem sem prišel do presenetljivih rezultatov, ki se delno skladajo s rezultati ostalih raziskovalcev, poleg tega pa jih v mnogočesa dopolnjujejo.

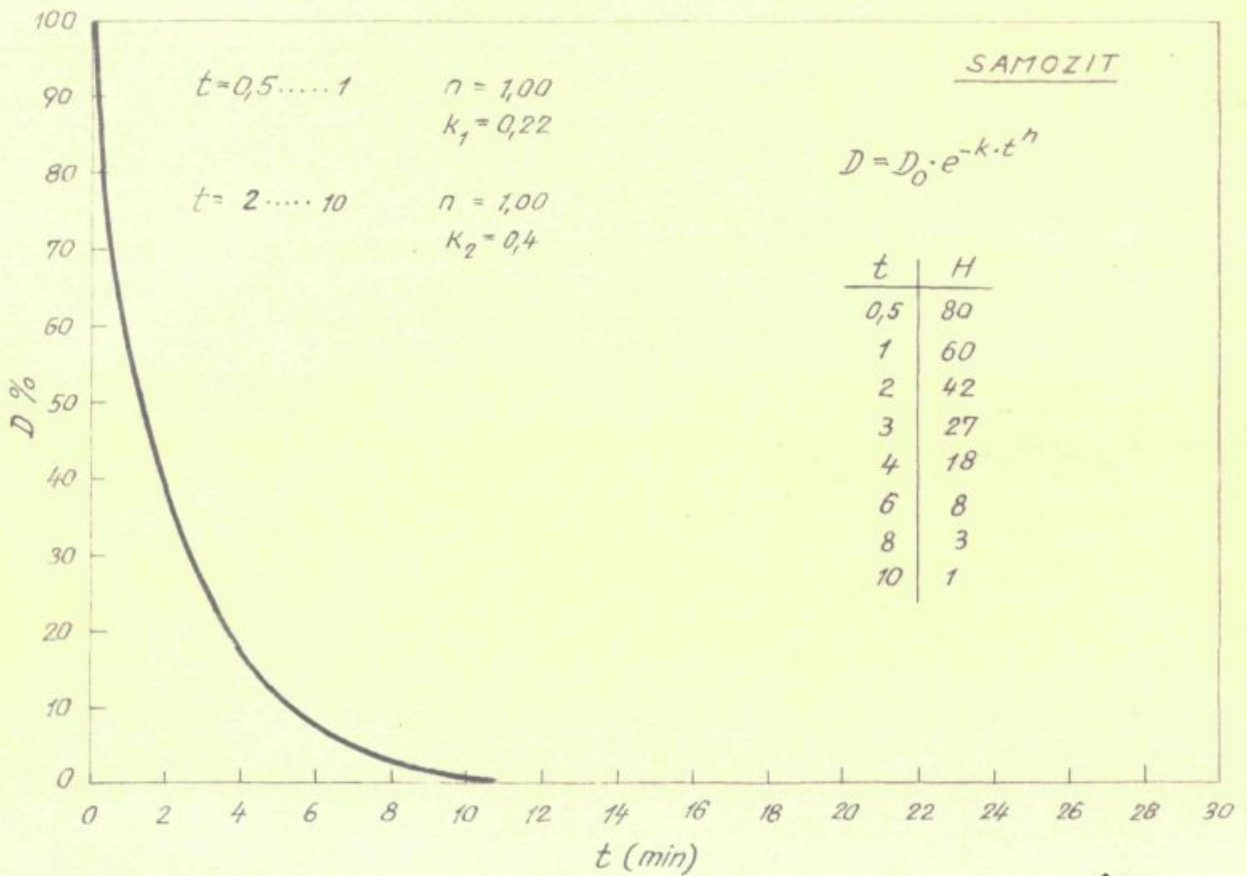
Najvažnejša in ključna ugotovitev tega dela je ta, da moremo kinetiko mletja za vse vzorce izraziti za vsako fazo s eno samo enačbo. Ne samo to, enačba ima splošno ve-



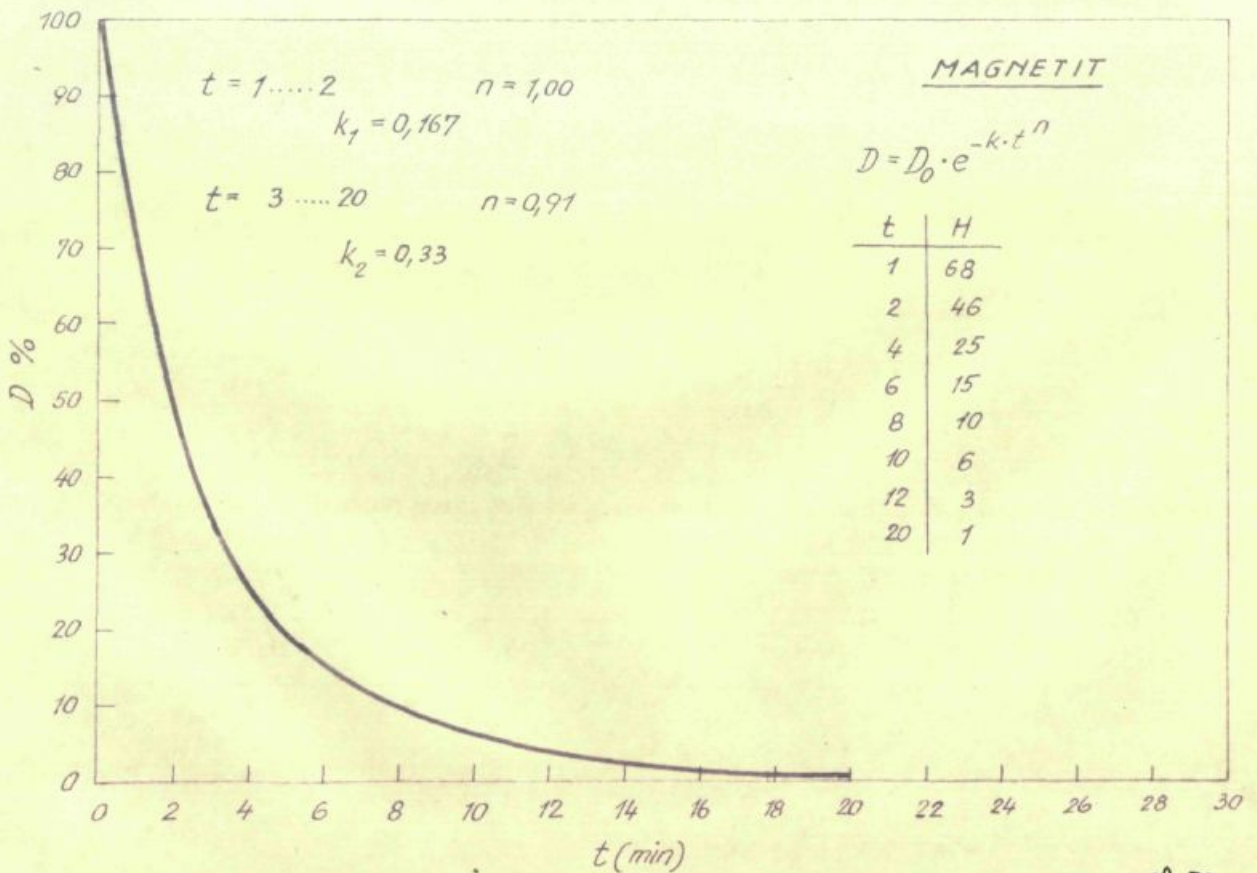
sl. 50.



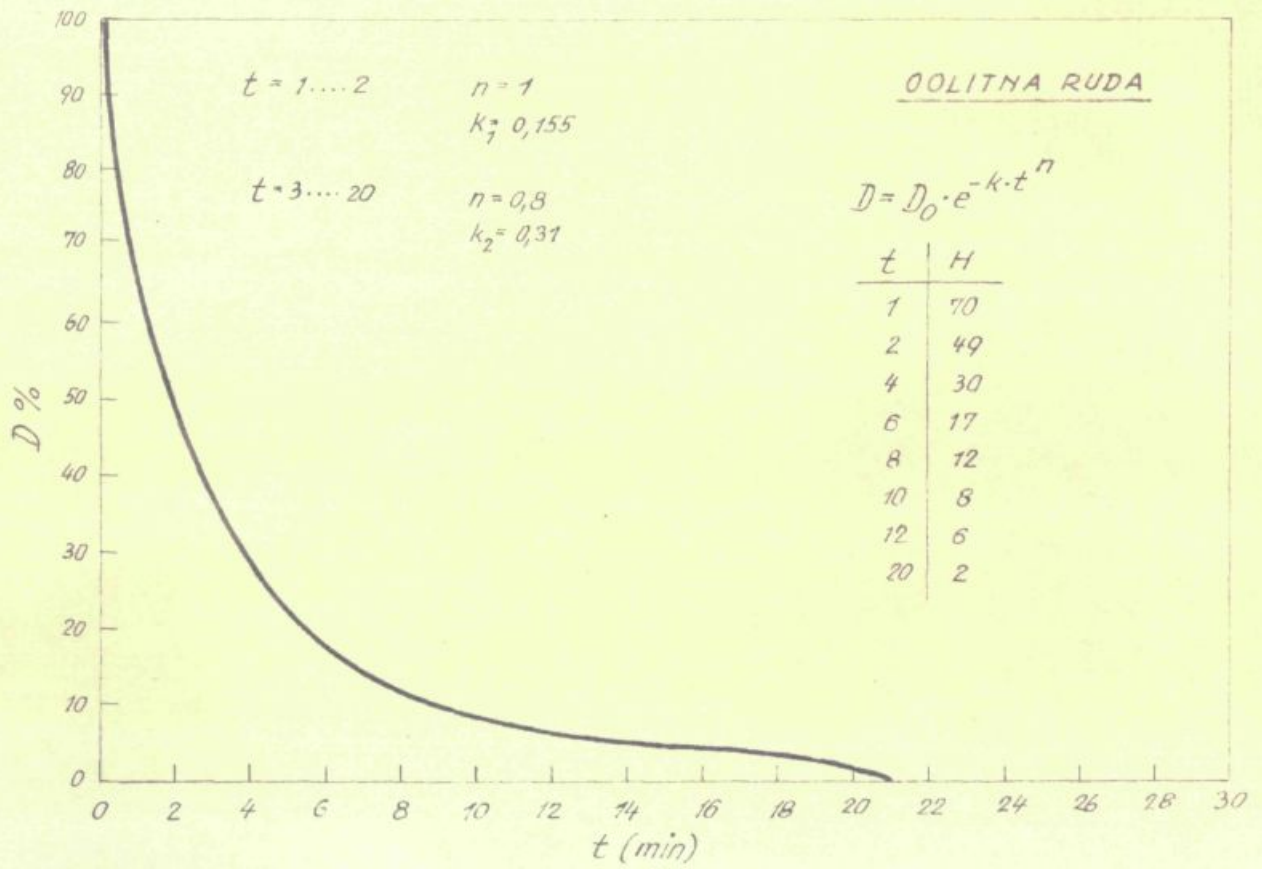
sl. 51.



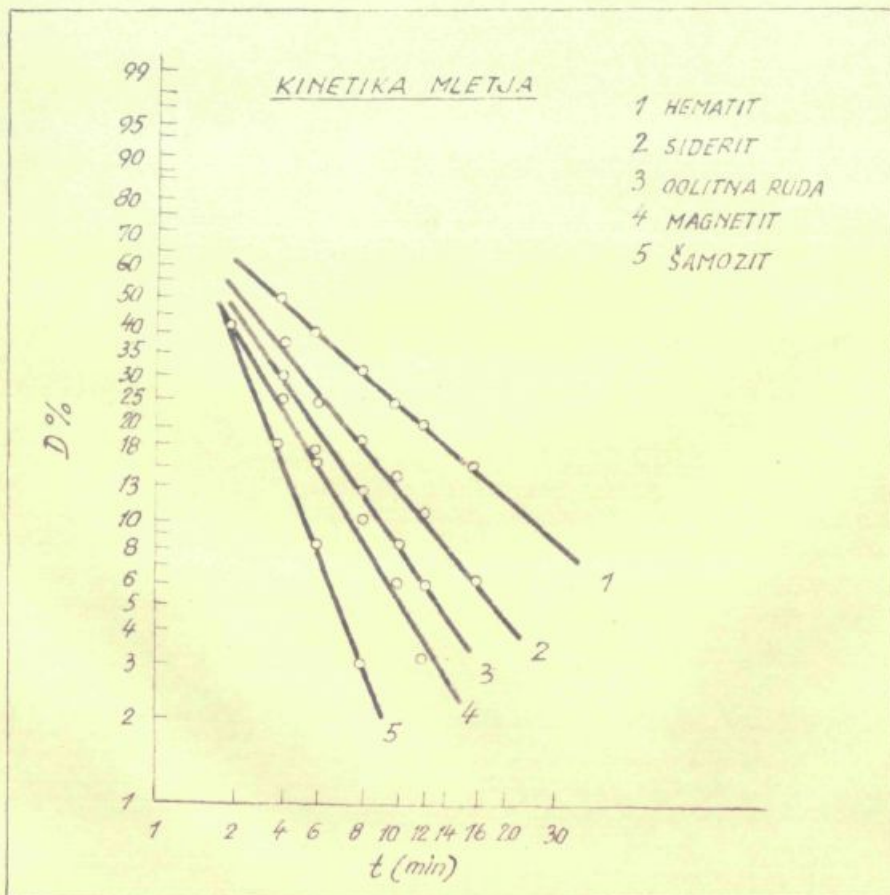
sl. 52.



sl. 53.



9.54.



9.55

ljavo tako za prvo fazo mletja, kakor tudi za drugo in je torej funkcija zloma in funkcija mletja.

Z dolgotrajnih in srazudnih matematičnih delom sem ugotovil, da ima enačba sledečo splošno obliko :

$$D = D_0 \cdot e^{-k \cdot t^n} \quad (86)$$

kjer pomeni D ... odstotek pri določenem času mletja, izražen v odstotkih prvotnega vzorca D_0 , k ... je relativni koeficient hitrosti mletja, t ... čas mletja in n ... eksponent kinetične enačbe mletja. Gornja enačba v svetu sicer ni nepoznana, saj se jo v nekoliko spremenjeni obliki postavili n. pr. tudi ruski raziskovalci (V. Aljovdin), vendar niso spoznali, da ima enačba veljavnost tako za "funkcijo zloma" kot za "funkcijo mletja". Tudi W. Siam je smatral, da je enačba veljavna samo za drugi del, to je za funkcijo mletja.

Pri vseh vzorcih sem ugotovil, da funkcija zloma dejanske obstoja in kinetika mletja sledi enačbi (86), če postavimo eksponent $n = 1$. Relativni koeficient hitrosti mletja pa se spreminja v odvisnosti od odpornosti proti drobljenju. Drugi del, to je funkcija mletja pa prav tako sledi enačbi (86) in to velja za vseh pet preiskanih vzorcev. Presenetljiva pa je ugotovitev, da je v tem delu koeficient hitrosti mletja $k_2 = 2k_1$, če označim s k_1 ... koeficient

hitrosti v prvi fazi, to je v "funkciji zloma" . Eksponent n pa se spreminja v mejah, ki sta jih postavila W. Sims in H. Sales, to je med $2/3$ in $4/3$.

Če pogledamo posamezne vzorce, sem dobil sledeče vrednosti:

Parameter	Henatit	Siderit	Oolit.ruda	Magnetit	Šanosit
k_1	0,096	0,125	0,155	0,167	0,222
k_2	0,150	0,250	0,31	0,33	0,43
n	0,75	0,74	0,80	0,91	1,00

Želel bi biti vsekakor previden, čeprav je rezultat izredno zanimiv in podkrepjen na več paralelnih poskusih in pri vseh vzorcih. Koeficient relativne hitrosti mletja je v drugi fazi, to je za funkcije mletja dvakrat večji od koeficienta za prvo fazo to je za funkcije zloma. Vsekakor bo potrebno še mnogo raziskovalnega dela, da se ugotovi splošna veljavnost pri različnih pogojih mletja in pri različnih vzorcih.

Niž nanj zanimiva je ugotovitev, da so indeksi drobljivosti presorazmerni relativnim koeficientom hitrosti mletja. Čim višji je indeks drobljivosti, tem višji je tudi relativni koeficient hitrosti mletja. To velja za vse vzorce, tudi za oolitno rudo, čeprav na prvi pogled izgleda, da je pri tem vzorcu nastala anomalija. Ne smemo pa pozabiti, da izamo v granulaciji, ki sem uporabil za poskus, opravka pred-

vsem s čistimi celiti, katerih odpornost proti drobljenju je precej visoka. Prav zaradi tega je celitna ruda v zaporedju kinetične enačbe mletja za magnetitom, to je melje se nekoliko bolj počasi kot slednji. Poleg skladnosti koeficienta hitrosti mletja s indeksom drobljivosti, opažamo prav tako skladnost funkcije zloma s tem indeksom. Čim večja je drobljivost, tem krajši je čas trajanja prve faze drobljenja. Tako traja n. pr. ta proces pri šamositu samo 1 1/2 minute, pri hematitu in sideritu 3 minute, pri celitnih rudah in magnetitu pa dve minuti. Pojav je popolnoma razumljiv, če ga gledamo s stališča strukture preiskanih vzorcev, od katere pa zopet zavisi drobljivost.

Če kontroliramo dobljene krivulje in premice na prikazanih slikah, moramo ugotoviti, da se zelo dobro ujemajo s dano enačbo (86), kar je sadosten dokaz o pravilnosti mojih trditvev. Seveda bi bilo zaželjeno ugotoviti še ostale vplive, ki sem jih nanizal na začetku tega poglavja. Vendar je bila moja naloga le, ugotoviti kinetiko drobljenja v svezi s fizikalno kemičnimi lastnostmi vzorcev. Nalogo sem, kot upam, uspešno rešil in ugotovil medsebojno odvisnost drobljivosti vzorcev in njih kinetiko mletja, ki omogoča različne napovedi o ponašanju vzorcev v krogljčnem mlinu. Ker je kinetika mletja vezana na krogljčni mlin, sem dodatno raziskal tudi funkcije mlina samega in njegove odvisnost od drobljivosti vzorcev. S tem je podana zakrožena celota medsebojnih odnosov materiala na eni strani in krogljčnega mlina na drugi strani. Želim, da bi bilo moje delo skromen doprinos k poznavanju procesov mletja, ki so najdražja postavka v tehniki bogatenja, toda zaradi vedno slabših rudnin, vedno bolj in bolj pomembni.

ZAKLJUČEK

1/Za določevanje mlevnih lastnosti različnih mineralnih surovin je zelo važno poznavanje specifične površine in zrnatosti. Vkljub temu, da razni avtorji različno ocenjujejo metode določevanja specifičnih površin, so pokazali poskusi, da je kot primerjalna metoda popolnoma zadovoljiva statistična metoda po Rosin-Ramalerju, s korekturami po Langemannu.

2/Zelo težko je definirati drobljivost rudnin, čeprav je le-ta poleg ostalih funkcij tudi funkcija trdote. Poskusi na vseh preiskavnih vzorcih so pokazali, da je najbolj primerna metoda določevanja drobljivosti tista, ki temelji na prostem drobljenju mineralnih zrn. Pri visoki trdoti ni medsebojne zveze s drobljivostjo, toda pri rudninah s manjšo trdoto ta zveza nedvoumno obstoja in je verjetno celo linearna.

3/Z metodo prostega drobljenja, s katero določamo koeficient odpornosti proti drobljenju, moremo preiskati odpornost mineralnih agregatov proti drobljenju in sklepati celo na selektivnost pri teh pripravljalnih operacijah. Večji odpornosti drobljenja odgovarja večja trdota po Brinellu oziroma Rockwellu in manjši indeks drobljivosti. Vsi rezultati, dobljeni po treh različnih metodah se skladajo in daje popolnoma enakovredne rezultate. Iz tega sledi, da je mogoče vnaprej laboratorijsko določiti obnašanje rudnin pri drobljenju, izbirati na podlagi tega vrsto drobilnika in napovedati možnosti selektivnega drobljenja. Napake v makro- in mikrostrukturi rudnine vplivajo linearno na drobljivost.

4/Popolna teorija mletja bi morala podati medsebojno odvisnost granulacijskega sestava pred in po mletju od časa mletja in delovnih pogojev mlina. Ker pa hitrost drobljenja nekega granulacijskega intervala in hitrost nastajanja novih granulacij ne moremo povezati med seboj v eno enačbo, moramo procese drobljenja obravnavati kot paralelne reakcije z različnimi reakcijskimi cilji.

5/Raziskave posameznih delovnih pogojev krogličnega mlina in različnih zrnatosti ter drobljivosti rudnin, so pokazale, da je kinetika krogličnega mlina linearno odvisna od drobljivosti rudnin. Specifični prirastek površine raste z manjšo odpornostjo materiala proti drobljenju. Prav tako je ugotovljeno, da so delovni pogoji krogličnega mlina neodvisni od drobljivosti vzorcev.

6/Kinetiko mletja oziroma drobljenja moremo za vse preiskane vzorce izraziti tako za fazo zloma kot za fazo mletja z eno samo enačbo. Enačba ima eksponentijalno obliko, pri kateri se eksponent spreminja v mejah od $2/3$ do $4/3$; relativni koeficient hitrosti mletja pa se spreminja v odvisnosti od odpornosti proti drobljenju. Koeficient hitrosti mletja je v drugi fazi približno dvakrat večji kot v fazi zloma. Čim višji je indeks drobljivosti, tem višji je relativni koeficient hitrosti mletja. V tem pogledu je doseženo popolno soglasje pri vseh preiskanih vzorcih. Poleg skladnosti koeficienta hitrosti z indeksom drobljivosti, opazamo tudi skladnost trajanja faze zloma z indeksom drobljivosti.

Literatura

- Andressen M.: Die Zerkleinerungsmaschinen im Licht des Ähnlichkeitsprinzips, VDI, 33/54.
- Anselm W.: Zerkleinerungstechnik und Staub, VDI - Sonderheft
- Axelton J.W.: Basic Laboratory Studies in the Unit operation of Crushing, Mining Engng. 12/51.
- Bond F.C.: Work Indexes Tabulated, Mining Engng. 5/53.
- Bond, F.C.: Mathematics of Crushing and Grinding, Rec. Dev. in Mineral Dressing - London, 1953.
- Bond, F.C.: A new Theory of Comminution, Mining Engng. 8/50.
- Brenner R.: Zur Kinetik der Mahlprozesse, Kolloid Zeitsch. 3/55.
- Carey W.F.: A Method of Assessing the Grinding Efficiency of Industrial Equipment, Rec. Dev. in Mineral Dressing, 1953.
- Charles R.J.: Energy Size Reduction Relationship in Comminution, Mining Engng. 1/57.
- Charles R.J.: Energy Transfer by Impact, Mining Engng. 1/56.
- Duhovnik J.: Poročila o mikroskopski preiskavi vzorcev rud iz Kičeva, Damjana, Vareša, Vardišta (rokopis).
- Glökner E.: Kennzeichnung der Härte der Braunkohle in Hinblick auf ihre Auswirkung bei der Brikettierung, FF - Hefte A 25
- Götte A.: Versuche zur Herabsetzung der Zerkleinerungswiderstandes fester Stoffe durch gasförmige und dampförmige Zusatzmittel, VDI, 9/56.
- Götte A.: Fragen der Hartzerkleinerung, Zement-Kalk-Gips 12/52.
- Gründer W.: Bestimmung der Mahlbarkeit von Stoffen, VDI-Beiheft 1/38
- Gaudin M.: Comminution as a chemical reaction, Mining Engng. 1/56.

- Hukki.: Correlation between principal parameters offering mechanical ball wear.
- Hüttig F.: Wissenschaftliche Probleme des Zerkleinerns von Kalk Zement-Kalk-Gips 4/54.
- Hüttig F.: Über eine sinnvolle Beschreibung und Beurteilung von Zermahlvorgängen und Mahlanordnung Radex Rundschau 9/10 - 1953.
- Hüttig O.F.: Zur Kinetik und Thermodynamik der Zermahlvorgänge Monatshefte für Chemie 5/54.
- Hayashi: Sieben und mehrstellige Tafeln der Kreis - und Hyperbelfunktionen und deren Produkte sowie der Γ - Funktion.
- Jonson O.: Method of charging rods and balls into grinding mills.
- Kenneth A.: Schellinger, O, colorimetric method for studying grinding in a tumbling medium.
- Kochendörfer A.: Bedingungen für die Auslösung und das Auftreten des Spröd - und Verformungsbruches auf Grund der Eigenschaften der Versetzungen Archiv f. Eisenhüttenwesen 7-8/54.
- Kochendörfer A.: Bildung und Ausbreitung von Rissen bis zum Bruch unter dem Einfluss von Temperatur, Beanspruchungsgeschwindigkeit und Spannungszustand. Archiv f. das Eisenhüttenwesen 7-8/54.
- Klein R.: Die Zerkleinerungskinetik von praktisch homöodispersen Sand Kolloid Zeitschr. 3/57 (151).

- Kiesshalt S.: Bewertungsfragen der Feinzerkleinerung,
Chemie-Ingenieur - Technik 1/54.
- Langemann H.: Zur Berechnung der spezifischen Oberfläche von
Dispersoiden Chemie-Ingenieur-Technik 1/58.
- Mitschell Will.: Analysis of variables in rod milling
- Mittag C.: Beobachtung und Untersuchung von Zerkleinerungs-
vorgängen in der Praxis, VDI - Beiheft 1/37.
- Novotny H.: Einige Überlegungen zur Atomistik der Bruchvor-
gänge Radex Rundschau 4/5 - 1953.
- D. E. Norqui et, J. E. Mochler.: Relative wear of various diame-
ter grinding balls in production
mills.
- Olevskij A. A.: Konstrukcij, rasčeti i ekspluatacija drobilok,
Metalurgizdat 1958.
- Piret E.: Fundamental Aspects of Grinding Chem. Eng. Pro-
gress 2/1953.
- Puffe E.: Graphische Darstellung und Auswertung von Sieb-
analysen auf Grund der Rosin-Rammler Gleichung
Erzmetall 1948 (97 - 105)
- Roberts: The probability theory of wet ball milling and
its applications.
- Rammler E.: Gesetzmässigkeiten in der Kornverteilung zer-
kleinerter Stoffe VDI -Beiheft 5/1937.
- Rammler E.: Bemerkungen zu den Feinheits - und Gleichmässig-
keitskennziffern des Mahlgutes nach Kneschke
Bergakademie 6/55.

- Rammler E.: Zur Auswertung von Körnungsanalysen in Körnungsnetzen Freiburger Forschungshefte A 4 (1952).
- Rammler E.: Zur Entwicklung der Oberflächenberechnung von RRS -Verteilungen, Freiburger Forschungshefts A50.
- Rose H. E.: Gegenwärtiger Stand der Erkenntnisse über Mühlen und Mahlverfahren Tonind. Ztg. 13-14/57.
- Rose H. E.: Der Gegenwärtige Stand der Erkenntnisse über Mühlen und den Mahlvorgang in Bezug auf Kugel - Rohr und Stabmühlen.
- Rose H. E.: Ball, Tube and Rod Mills Constable, 1957.
- Ruspf .: Mechanische Zerkleinerung Fortschritte der Verfahrenstechnik 1952/53, 1954/55, 1956/57.
- Schelling.: Approximations of the energy efficiencies of commercial ball mill by the energy ballance method.
- Strahl J.: Effects of rod mill flett size reduction.
- Smekal A.: Physikalisches und technisches Arbeitsgesetz der Zerkleinerung, VDI -Beiheft 5/1937.
- Smekal A.: Zerkleinerungsphysik VDI -Beiheft 2/1936.
- Smekal A.: Zur Physik des spröden Stoffverhaltens, Radex Rundschau 4/5 - 1953.
- Smekal A.: Thermische Rückbildung mikroplastischer Fließvorgänge bei Flexaglas, Chemie-Ingenieur-Technik 2/1955.
- Späth W.: Physik und Technik der Härte und Weiche, 1940 Springer-Verlag.
- Slattenschek A.: Grundsätzliches zur Theorie des Sprödebruchs Radex Rundschau 4/5 - 1953.

- Svenson J.: An Empirical Relationship between Work Input and Particle Size Distribution Before and After Grinding. Int.Min.Dressing Congress 1957
- Smekal A.: Theoretische Grundlagen der Hartzerkleinerung, VDI -Beiheft 1/1937.
- Theimer O.: Über die Auswertung von Zermahlungsexperimenten mit Hilfe von Zermahlungsfunktionen Kolloid Zeitschrift 2/1952 (128).
- Theimer O.: Über die "statistische Mechanik" von Zermahlungsvorgängen. Kolloid Zeitschr. 1/1952 (128).
- Theimer O.: Über die Kinetik von Zermahlungsvorgängen, Kolloid Zeitschr. 2/3/1953 (132) .
- Tertsch H.: Festigkeitserscheinungen der Kristalle, 1949, Springer-Verlag.
- Weitzel W.: Lehrbuch der theoretischen Physik, 1950 Springer-Verlag.
- White J.: Grinding Tests.
- Walton W. H.: Mechanical Properties of Nonmetallic Brittle Materials. 1958.



Svensson J.: An Empirical Relationship between Work Input
and Particle Size Distribution Before and After

Grinding. Int. Min. Dressing Congress 1957

Smekal A.: Theoretische Grundlagen der Hartzerkleinerung,

VDI-Beheft 1/1957.

Thömer O.: Über die Auswertung von Zermahlungsexperimenten

mit Hilfe von Zermahlungsfunktionen Kolloid Zeit-

schrift 2/1952 (128).

Thömer O.: Über die "statistische Mechanik" von Zermahlungs-

vorgängen. Kolloid Zeitschr. 1/1952 (128).

Thömer O.: Über die Kinetik von Zermahlungsvorgängen,

Kolloid Zeitschr. 2/1952 (132).

Textsch H.: Festigkeitsrechnungen der Kristalle, 1949,

Springerverlag.

Weitzel W.: Lehrbuch der theoretischen Physik, 1950 Springer-Verlag.

White J.: Grinding Tests.

Walton W. H.: Mechanical Properties of Nonmetallic Brittle

Materials. 1958.



C08155 3042108

NARODNA IN UNIVERZITETNA
KNJIŽNICA



00000437915