

## SPECTRUL ENERGIEI DE IMPACT IN CAZUL MORILOR BASCULANTE

Conf.dr.ing. PAVEL Cristian

Conf.dr.ing. LEGENDI Amelitta

Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti

Facultatea de Utilaj Tehnologic

Calea Plevnei 59, 010223, Sector 1, Bucuresti ROMÂNIA

Tel. 315.82.00

E-mail: [cr.pavel@pcnet.ro](mailto:cr.pavel@pcnet.ro)

[legendi@xnet.ro](mailto:legendi@xnet.ro)

**Cuvinte cheie:** moara vibratoare, moara planetara, energie de impact

### Abstract

From the category of tumbling mills using balls as grinding media with a view to produce fine powders, there are mentioned both planetary mills and vibratory mills. Obvious, the fineness of powders produced in this type of mills depends both on the processed powders strength characteristics and on the collision intensity of grinding media.

In order to determine the collision frequency and the collision intensity of balls used as grinding media, a numerical simulation tool has been developed, simulation that is using the discrete element method. The impact energy spectra of these mills can be modified using suitable choices of operating conditions.

### 1. INTRODUCERE

Distributia dimensionala a materialului de macinat aflat în incinta morilor planetare este în functie de caracteristicile de duritate ale materialului de macinat si de energia necesara macinarii. Aceasta energie este repartizata particulelor de material sub forma a numeroase coliziuni de intensitati si frecvente diferite.

Moara analizata poate fi privita ca un dispozitiv generator de energie de impact, intensitatea acesteia fiind dependenta de conditiile de proiectare si de operare.

În mod cert, nu toate evenimentele de impact dintre corpurile de macinare, peretii incintei morii si materialul de macinat conduc la spargerea materialului. O parte din aceasta energie este pierduta în procesul de frecare dintre particule.

În mod elocvent, studiul spectrului energiei de impact în cazul unei mori oarecare analizate, conduce în final la o selectie a conditiilor optime de functionare în vederea obtinerii gradului de finete dorit pentru produsul finit.

În industrie s-a manifestat o cerinta tot mai larga privind obtinerea unor pulberi ultrafine de o anumita dimensiune si o forma impusa a dispersiei, pornind de la minerale si ajungând la materiale ultramoderne. Exemplificam cu productia pigmentilor aflatii în componenta vopselurilor, proces în care dimensiunea particulei de pigment trebuie sa fie mai mica decât 300 nm.

În mod evident, exista o limita a finetii materialului obtinut în urma macinarii gravitationale. Utilizarea morilor vibratoare îmbunatateste în mod vizibil performantele procesului de macinare. Pentru incinte ale corpurilor de macinare cu valori cuprinse între  $f_{25}$

și  $f \approx 100$  cm, funcționând la un grad ridicat de umplere ( $j = 60\text{...}70\%$ ) și utilizând bile de diametre mici ( $6 \div 12$  mm), vom obține o eficiență energetică ridicată.

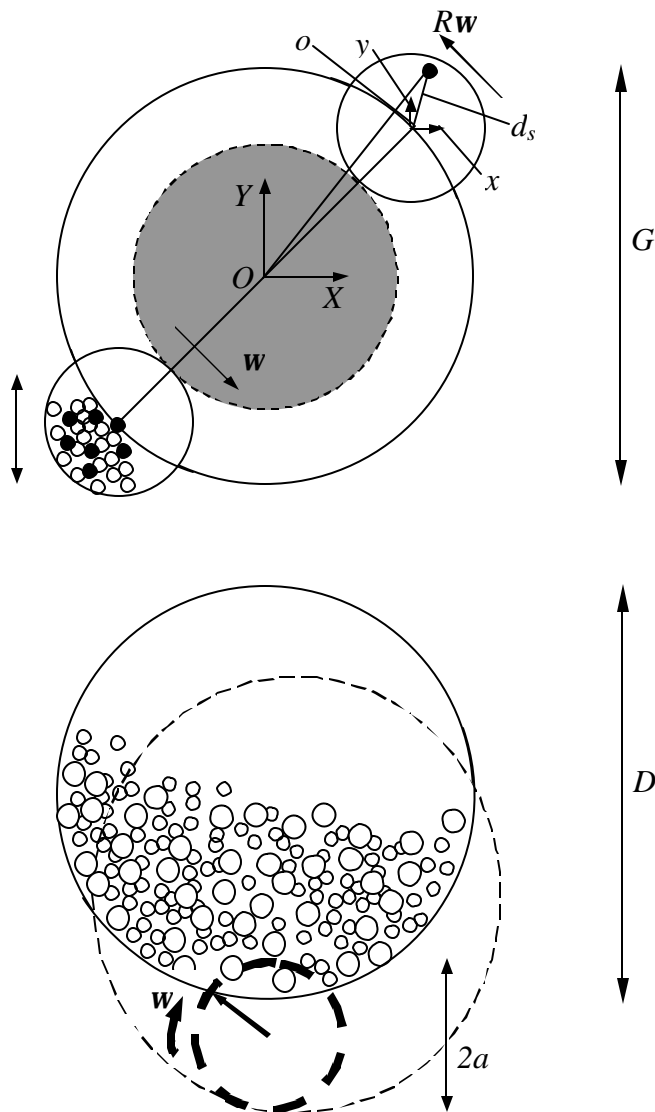


Figura 1. Reprezentarea schematică a unei mori planetare (sus) și vibratoare (jos)

Există și unele situații, de exemplu în urma unor macinări prelungite, când particulele de dimensiuni mici acumulează o anumită doză de energie de încărcare la suprafață, se aglomerează și limitează astfel capacitatea de macinare a particulelor.

În tabelul 1 este prezentat un studiu comparativ între morile planetare și cele vibratoare în funcție de elementele operationale ale morilor analizate. Elementele cinematice principale componente ale unor astfel de mori sunt prezentate în figura 1.

**Tabelul 1.** Elemente privind proiectarea morilor planetare si vibratoare

CARACTERISTICI	MOARA PLANETARA	MOARA VIBRATOARE
Intervalul de macinare	1 – 10 $\mu\text{m}$	10 – 100 $\mu\text{m}$
Modul de functionare	miscare girationala	rotatie + vibratie
Diametrul morii	0,10 – 0,25 m	0,25 – 0,91 m
Diametrul bilei	3 – 12 mm	6 – 12 mm
Energia necesara	1 – 8 kW	3 – 15 kW

Scopul acestei lucrari este acela de a demonstra ca spectrul de distributie al energiei de impact poate fi calculat.

Utilizând metoda elementului finit, miscarea încarcatului (material de macinat – corpuri de macinat) este abordata fara utilizarea nici unei ipoteze simplificatoare. Ca urmare, metoda elementului finit caracterizeaza miscarea în masa a bilelor (corpurile de macinare utilizate) în interiorul morii. Aceasta utilizare permite cuantificarea energiei implicate în coliziunile individuale dintre corpurile de macinat si materialele de macinat, astfel ca este posibila conturarea spectrului energiei de impact.

## 2. APLICAREA METODEI ELEMENTULUI FINIT

Toate variantele constructive de mori basculante se preteaza unei analize detaliate prin intermediul metodei elementului finit. Principalul proces care are loc în incinta morilor basculante este interactiunea dintre corpurile de macinare (bile sau bare cilindrice scurte), materialul de macinat si peretii morii.

În oricare varianta constructiva analizata, bilele sunt modelate ca elemente rigide având contacte deformabile. Detaliile algoritmului numeric sunt descrise în lucrarea [2].

Ecuatiile miscarii fiecarui corp de macinare (fiecarei bile) se poate scrie sub forma:

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = p \quad (1)$$

unde  $M$ ,  $C$  si  $K$  sunt matricele de inertie, de amortizare si, respectiv, de rigiditate, iar  $p$  – forta aplicata si  $x$  – vectorul de pozitie al bilei analizate.

Mai multe ecuatii de tip (1) descriu miscarea unui sistem de corpuri de macinare, la care fortele restauratoare corespund unei perechi de resoarte elastice actionând la contact atât pe directia normala cât si pe cea tangentiala. Coeficientul de frecare joaca un rol important în zona de contact, întrucât valoarea absoluta a fortei pe directia tangentiala (fora de frecare) nu este lasata sa creasca peste valoarea limita data de produsul dintre reactiunea normala si coeficientul respectiv.

Miscarea bilelor este caracterizata de urmatoarea ecuatie obtinuta din (1) prin integrare:

$$\frac{dx}{dt} \left( t + \frac{1}{2} \right) = a_1 x \left( t - \frac{1}{2} \right) + a_2 M^{-1} [p(t+1) - k_x(t)] \quad (2)$$

$$\Delta x(t+1) = \Delta t \frac{dx}{dt} \left( t + \frac{1}{2} \right) \quad (3)$$

în care  $\Delta t$  este timpul de integrare, iar

$$a_1 = \frac{2 - a \Delta t}{2 + a \Delta t} \text{ si } a_2 = \frac{2 \Delta t}{2 + a \Delta t} \quad (4)$$

În ecuațiile anterioare,  $a$  este constanta de amortizare proportională a masei  
 $C = a M$  (5)

Limita intervalului de timp pentru integrare se stabilește cu relația

$$\Delta t \leq \frac{2}{w_{\max}} \quad (6)$$

unde  $w_{\max}$  este frecvența naturală cea mai înaltă a sistemului oscilant, stabilită în cazul bilei cu masă cea mai mică, corespunzătoare celei mai mari rigidități din zona de contact.

Analiza elementului finit demarează cu o reprezentare matematică a fiecărei entități ce alcatuiește sistemul fizic analizat (ansamblul moară – bile – material de macinat). Cunoșcând informații precise legate de zonele de contact dintre corpurile ce participă la impact, se pot determina forțele ce acționează cu această ocazie (se utilizează așa zisa ecuație de contact și deformare). Ulterior, aceste forțe sunt încorporate în ecuații ce descriu mișcarea de rotație și de translație a corpurilor de macinare.

Pentru fiecare interval de timp, metoda are în vedere îndeplinirea următoarelor obiective:

- însumarea forțelor ce acționează pe bila analizată;
- actualizarea poziției acesteia;
- adăugarea/stergerea contactului dintre bile;
- calcularea forțelor ce apar la contact.

### 3. REZULTATE OBTINUTE

Prima simulare a fost efectuată pentru a descrie funcționarea unei mori vibratoare cu diametrul de 91 cm. Moara a fost încărcată cu bile de diametru 2 cm, astfel ca pentru un grad de umplere uzual de  $j = 65\%$  a corespuns un număr de 1068 bile. Amplitudinea vibrației a fost menționată la o valoare de 10 mm, fiind utilizate trei frecvențe de vibrație (1000, 1500 și 2000 rot/min).

Animatia computerizată a profilului încărcăturii de bile în morile vibratoare arată că, în planul radial al morii, bilele circulă în contrasens față de oscilația carcusei morii. Circulația încărcăturii de bile este accelerată odată cu creșterea frecvenței vibrației și are un rol deosebit de important în transportul particulelor de material macinat de la capatul morii spre zona de macinare.

Procesul de macinare fină care are loc în morile vibratoare este favorizat de creșterea substanțială a numărului de coliziuni produse pe unitatea de volum a incintei morii. Figura 2 descrie distribuția energiei de impact în interiorul morii. Conform acesteia se observă că impacturile cu energie de la 10 până la 15 mJ sunt în număr de zeci de milioane într-o secundă, în timp ce coliziunile cu energie de peste 100 mJ sunt de ordinul  $10^3$  într-o secundă.

Totodată, s-a constatat că în situația creșterii gradului de umplere  $j$ , odată cu creșterea numărului de bile, se mărește în mod evident frecvența coliziunilor bilelor, dar impacturile la care se degajă energie mare descresc semnificativ. Din acest punct de vedere, în cazul macinării unor particule grosiere și dure se va utiliza o cantitate mai mică de bile astfel ca să poată fi generate mai multe impacturi de energie semnificativă. Pe de altă parte,

particulele mai mici si mai moi trebuie macinate apelând la o încarcatura mai mare de corpuri de macinare.

În morile planetare, miscarea încarcaturii cu bile are un caracter complex fata de cea din morile vibratoare. Bilele au acceleratii diferite, care depind de locul în care se afla acestea în interiorul morii.

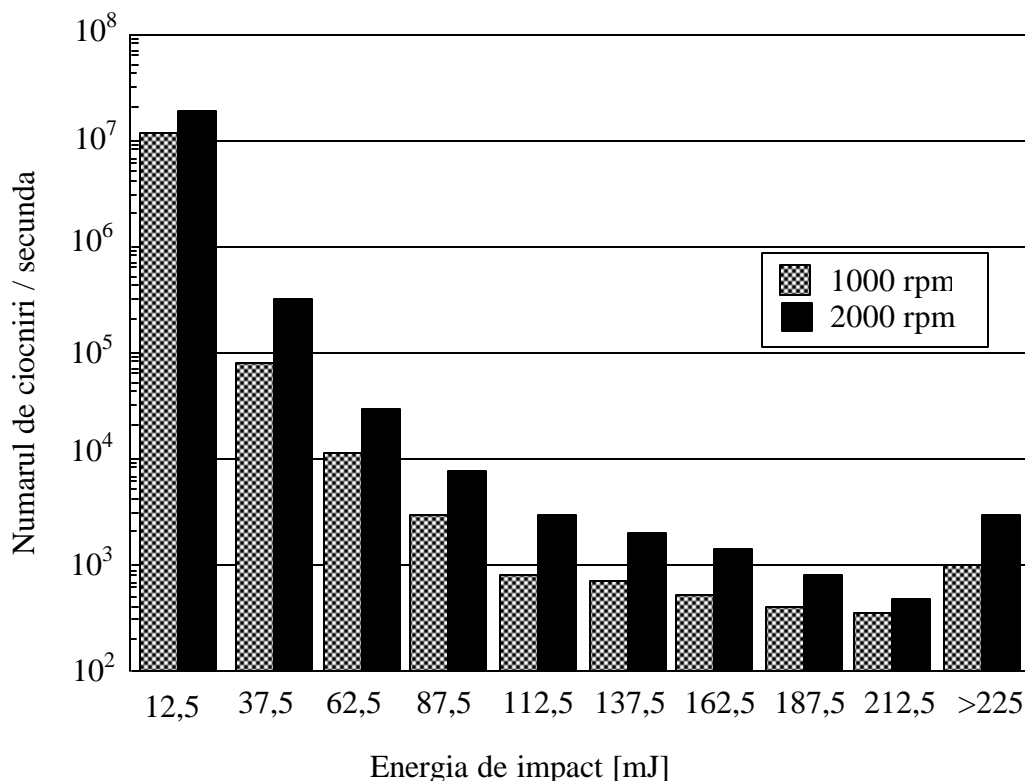


Figura 2. Distributia energiei de impact în moara vibratoare

A fost posibila determinarea distributiei impactului de energie din morile planetare. Aceasta s-a realizat într-o moara având  $f = 72\text{ mm}$  (diametrul corpului de macinare), umpluta cu  $j = 33\%$  corpuri de macinare. În figura 3 s-a încercat reprezentarea întregului spectru al fortelor de impact. Se observa ca miscarea încarcaturii, precum si numarul si intensitatea coliziunilor din interiorul morii variaza cu viteza si gradul de umplere al acesteia. În mai toate reprezentarile, efectul coeficientului de frecare dintre materialul de macinat, corpurile de macinat si peretii morii este neglijat. Figura 3 arata ca la o valoare mica a coeficientului de frecare  $m$ , toate impacturile degaja o energie mai mica de 50 mJ. Odata cu cresterea lui  $m$  se dezvolta un spectru energetic bine conturat, facându-si aparitia un numar semnificativ de impacturi de energie mare.

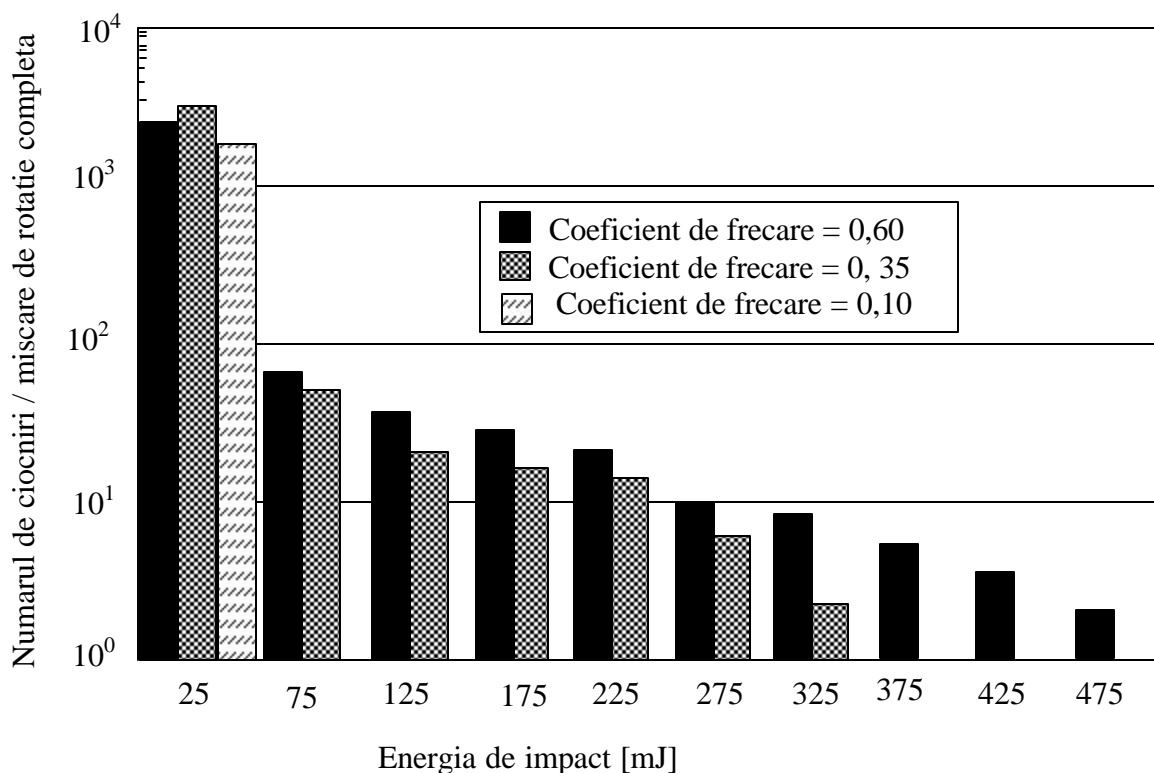


Figura 3. Spectrul distributiei de energie într-o moara planetara

#### 4. CONCLUZII

- a) Toate morile basculante (mori planetare si mori vibratoare) sunt similare din punct de vedere al functionarii. Gradul de finete al materialului obtinut în aceste mori este în functie de duritatea materialului si de spectrul energetic din moara.
- b) S-au efectuat experimente numerice care au probat influenta frecventei vibratiilor asupra profilului încarcaturii de bile si asupra spectrului energiei de impact al morilor vibratoare. Aceste experimente pot fi rapid extinse si asupra altor parametri, cum ar fi: gradul de umplere al morii ( $j$ ); amplitudinea vibratiei ( $a$ ).

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] Rajamani, Raj K - Simulation of charge motion in ball mills: Part 2, Numerical simulations, Int. J. Miner. Process 40 (1994) pag. 187-197
- [2] Songfack, Poly Mishra, B.K. - Mechanism of fine grinding in a planetary mill, Ph.D. Tesis, Nagoya University, Japan, 1989