

Alojzy RYNCARZ

KINETYKA POWSTAWANIA ZIARN RÓŻNEJ WIELKOŚCI W TRAKCIE ROZDRABIANIA  
CIAŁ STAŁYCH W MŁYNIIE KULOWYM

**Streszczenie.** Zaproponowano nową graficzną metodę wyznaczania prędkości powstawania ziarn różnej wielkości w młynie kulowym. Przyjęto, że na wykresie czas mielenia - wychód ziarn dowolnej wielkości, nachylenie krzywych jest obrazem prędkości powstawania ziarn, do jakiej to nachylenie się odnosi. Natomiast za miarę prędkości powstawania ziarn przyjęto tangens kąta nachylenia tych krzywych do osi poziomej. Na podstawie laboratoryjnego mielenia kwarcytu pochodzącego z krajowych złóż oraz radzieckiej rudy magnetycznej stwierdzono, że w początkowym czasie mielenia w młynie kulowym powstają głównie ziarnia średniej wielkości. Po dłuższym czasie mielenia prędkość powstawania ziarn średnich spada do poziomu prędkości powstawania ziarn najdrobniejszych (ruda magnetytowa żelaza) lub może być kilkakrotnie niższa (kwarcyt). Ponadto wykazano, że w najkrótszych czasach mielenia zależność wychodu ziarn dowolnej wielkości od czasu prowadzenia procesu jest prostoliniowa. Im rozpatrywane są mniejsze wielkości ziarn, tym ta prostoliniowa zależność utrzymuje się przez dłuższy czas mielenia.

## 1. Wprowadzenie

Rozdrabianie w przeróbce kopalni stałych może mieć na celu zmniejszenie wymiaru ziarn zgodnie z wymaganiami rynku zbytu lub, częściej, rozluźowanie i rozdzielanie zrośniętych ze sobą ziarn użytecznych i nieużytecznych. Tak przygotowana kopalina nabiera cech materiału przygotowanego do dalszych procesów przerobczych, głównie wzbogacania.

Rozdrabianie jest najdroższą operacją przerobczą ze względu na ilość zużywanej energii i części roboczych maszyn kruszących i mielących. Dlatego rozdrabianie nadające kopalinie wymiary mniejsze od stanu dostatecznego uwolnienia minerałów użytecznych lub też życzeń odbiorców stanowi bezcelowe marnotrawstwo zużycia energii, maszyn i czasu.

Należy podkreślić, że zbyt znaczne przemielanie kopaliny utrudnia właściwe przeprowadzenie kolejnej operacji wzbogacania i połączone jest często z dużą stratą minerałów użytecznych i podwyższeniem kosztów rozdziału. Stąd już w 1924 roku Czeczott[1] sformułował główną zasadę rozdrabiania "nie kruszyć nic zbyt dużego".

Zasada ta jest aktualna do dnia dzisiejszego. Jak podaje jej twórca, ma ona na celu osiągnięcie:

- oszczędności w zużyciu energii,

- zmniejszenie strat minerału użytecznego w odpadach, pyłe i mule,
- zwiększenie wydajności kruszarni, młynowni i sortowni,
- zmniejszenia zużywania się części roboczych maszyn rozdrabiających.

Powszechnie wiadomo, że skład granulometryczny produktu mielenia w młynie kulowym zależy, między innymi, głównie od długości czasu przebywania ciała stałego w bębnie młyna. Im czas ten jest większy, tym uziarnienie mlewa bardziej miazkie. W pracy tej postanowiono przeanalizować wpływ czasu mielenia ciał stałych na skład ziarnowy nowych ziarn, powstających w młynie kulowym. Informacja powyższa może być podstawą dla optymalnego wykorzystania zalet i możliwości mielenia ciał stałych w młynie kulowym.

## 2. Sposób prowadzenia doświadczeń

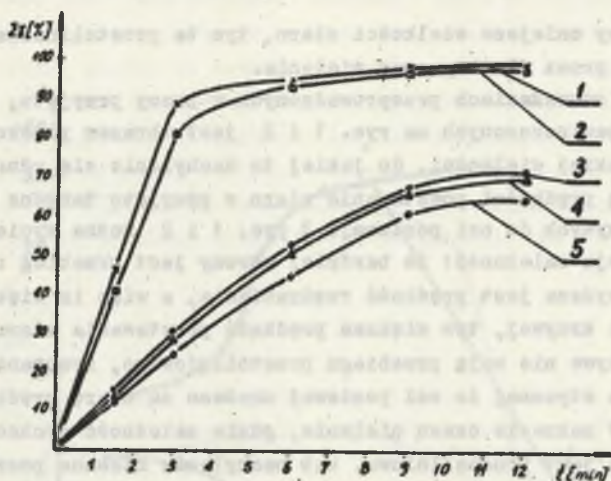
Do badań użyto kwarcytu pochodzącego z krajowego złoża oraz radzieckiej rudy magnetytowej. Próbkę kwarcytu pochodzi z kopalni znajdującej się w Wiśniówce Małej koło Kajetanowa w Górach Świętokrzyskich. Jest to kopalina składająca się prawie wyłącznie ze sprasowanych ziarn kwarcu o średnicy 0,1-0,3 mm i nosi nazwę kwarcytu "zagnańskiego".

Radziecka ruda magnetytowa pochodziła ze złoża leżącego w okolicach Krzywego Rogu.

W celu przygotowania do badań próbkę kwarcytu wstępnie rozdrobiono poniżej 4 mm. Doświadczenia prowadzono w laboratoryjnym młynie kulowym przeznaczonym do pracy cyklicznej w następujących warunkach: długość i średnica wewnętrzna bębna 305 mm, prędkość obrotowa bębna  $50 \text{ min}^{-1}$ , ilość mielników 27 kul o średnicy 38 mm, 57 kul o średnicy 25 mm oraz 201 kul o średnicy 19 mm, ciężar mielonego materiału 10,7 kg. Rudę magnetytową wstępnie rozdrobiono poniżej 9 mm, a badania prowadzono w młynie kulowym o średnicy wewnętrznej 464 mm, długości wewnętrznej 315 mm, prędkości obrotowej bębna  $32 \text{ min}^{-1}$ , ilość mielników 300 kul o średnicy 38 mm, ciężar mielonego materiału 12 kg. Mielenie kwarcytu prowadzono na sucho, natomiast mielenie rudy magnetytowej na mokro przy wilgotności nadawy 50%. Po każdym doświadczeniu wykonywano analizę granulometryczną produktu mielenia.

## 3. Wyniki badań i ich omówienie

Na rysunku 1 i 2 zamieszczono wyniki mielenia kwarcytu i rudy magnetytowej żelaza w młynie kulowym. Wyniki te przedstawiają wpływ czasu mielenia na wychód ziarn różnej wielkości. Widać, że wychody rozpatrywanych klas ziarnowych zawsze rosną wraz z czasem mielenia. W najkrótszych czasach mielenia zależność wychodu dowolnej klasy ziarnowej od czasu prowadzenia procesu (tzw. kinetyka mielenia) jest przestoliniowa.

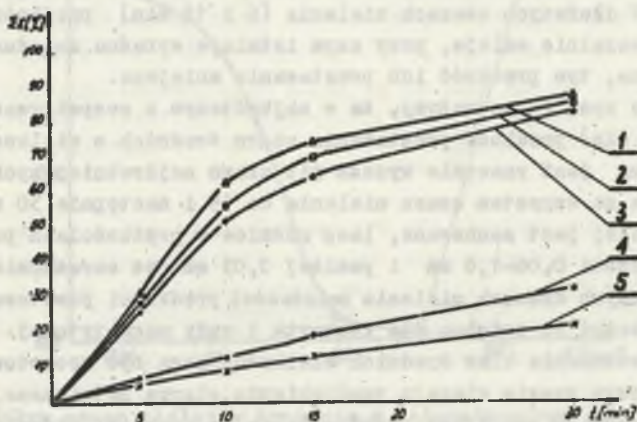


Rys. 1. Wpływ czasu mielenia kwarcytu w laboratoryjnym młynku kulowym na sumaryczny wychód ziarn różnej wielkości

1, 2, 3, 4, 5 - sumaryczny wychód ziarn poniżej 0,5; 0,2; 0,1; 0,088 i 0,06 mm

Fig. 1. The effect of the time of quartzite grinding in a laboratory ball mill on the total output of grains of various sizes

1, 2, 3, 4, 5 - total output of grains under 0,5; 0,2; 0,1; 0,088 and 0,06 mm



Rys. 2. Wpływ czasu mielenia rudy magnetytowej żelaza w laboratoryjnym młynku kulowym na sumaryczny wychód ziarn różnej wielkości

1, 2, 3, 4, 5 - sumaryczny wychód ziarn poniżej 0,5; 0,088; 0,06; 0,027 i 0,018 mm

Fig. 2. The effect of the time magnetite iron ore grinding in a laboratory ball mill on the total output of grains of various sizes

1, 2, 3, 4, 5 - total output of grains below 0,5; 0,088; 0,06; 0,027; and 0,018

Im rozpatrujemy mniejsze wielkości ziarn, tym ta prostoliniowa zależność utrzymuje się przez dłuższy czas mielenia.

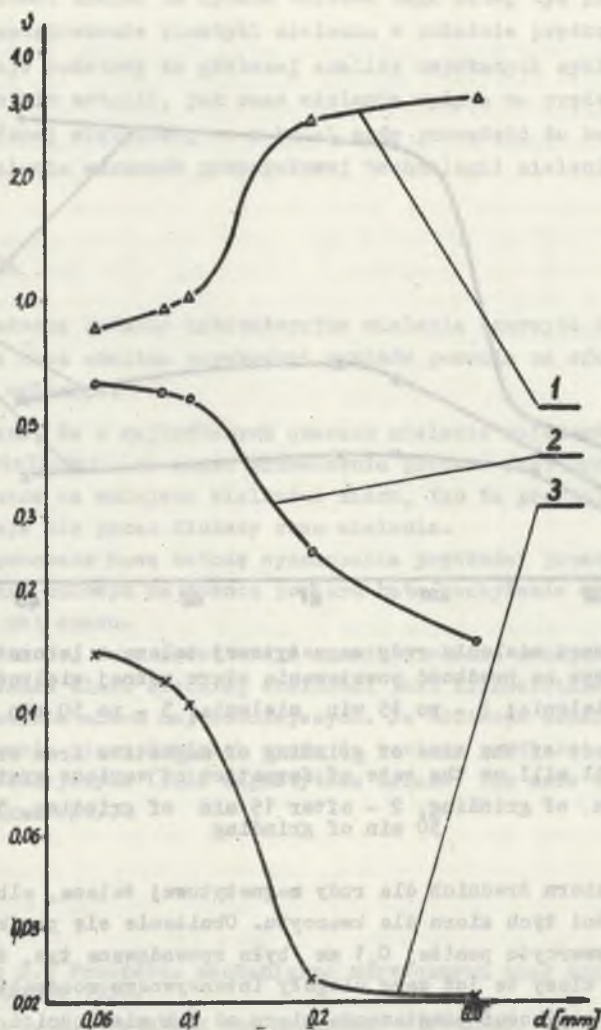
W dalszych rozważaniach przeprowadzonych w pracy przyjęto, że nachylenie krzywych zamieszczonych na rys. 1 i 2 jest obrazem prędkości powstawania ziarn takiej wielkości, do jakiej to nachylenie się odnosi. Natomiast za miarę prędkości powstawania ziarn  $v$  przyjęto tangens kąta nachylenia tych krzywych do osi poziomej. Z rys. 1 i 2 można wyciągnąć wniosek, że istnieje zależność: im bardziej stromy jest przebieg omawianej krzywej, tym wyższa jest prędkość rozdrabiania, a więc im większy jest kąt nachylenia krzywej, tym większa prędkość powstawania ziarn. W miejscach, gdzie krzywe nie mają przebiegu prostoliniowego, rysowano styczne i kąt nachylenia stycznej do osi poziomej uważano za miarę prędkości powstawania ziarn. W zakresie czasu mielenia, gdzie zależność wychodu ziarn od czasu mielenia jest prostoliniowa, kąt nachylenia nazwano początkową prędkością powstawania ziarn.

Dla obu badanych kopalin, na podstawie rysunków 1 i 2, wyznaczono prędkości powstawania ziarn różnej wielkości w zależności od czasu mielenia. Uzyskane wyniki zamieszczono na rys. 3 dla kwarcytu i rys. 4 dla rudy magnetytowej żelaza. Z rysunku 3 widać, że w najkrótszym analizowanym czasie mielenia (3 min) prędkości powstawania ziarn rosną wraz z wielkością analizowanych ziarn od 0,06 do 0,5 mm. Prędkości powstawania ziarn poniżej 0,1 mm są wyraźnie mniejsze od prędkości powstawania ziarn powyżej 0,2 mm. W dłuższych czasach mielenia (6 i 12 min) prędkość powstawania ziarn generalnie maleje, przy czym istnieje wyraźna zależność, że im większe ziarna, tym prędkość ich powstawania mniejsza.

Analizując rys. 4 zauważymy, że w najkrótszym z rozpatrywanych czasów mielenia (10 min) prędkość powstawania ziarn średnich o wielkościach od 0,06 do 0,5 mm jest znacznie wyższa niż ziarn najdrobniejszych poniżej 0,03 mm. Wraz ze wzrostem czasu mielenia do 15 i następnie 30 minut zależność ta dalej jest zachowana, lecz różnice w prędkościach powstawania ziarn o wielkości 0,06-1,0 mm i poniżej 0,03 mm są coraz mniejsze.

W najkrótszych czasach mielenia zależności prędkości powstawania ziarn różnych wielkości są podobne dla kwarcytu i rudy magnetytowej. Wysokie prędkości powstawania klas średnich wielkości mogą być spowodowane tym, że w początkowym czasie ulegają rozdrobieniu ziarna największe, o największych defektach struktury. Rozdrabianie to zachodzi głównie przez uderzające działanie kul, w wyniku którego powstaje stosunkowo niewielka ilość ziarn najdrobniejszych [2].

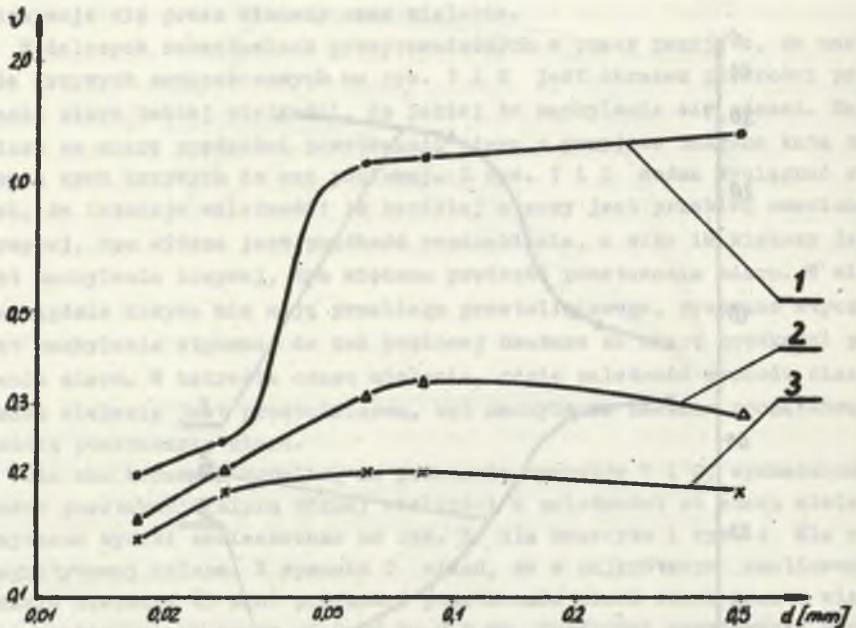
Po dłuższych czasach mielenia, kiedy to największe ziarna zostały już rozdrobione, a mniejsze znalazły się już w wolnych przestrzeniach pomiędzy kulami, głównym czynnikiem wpływającym na zmniejszanie się wielkości ziarn w młynie jest ocieranie ziarn między ciałami mielącymi i wykładziną bębna. Dla tych czasów mielenia zaobserwowano albo wyraźny spadek prędko-



Rys. 3. Wpływ czasu mielenia kwarcytu w laboratoryjnym młynku kulowym na prędkość powstawania ziarn różnej wielkości

1 - po 3 min mielenia; 2 - po 6 min mielenia; 3 - po 12 min mielenia

Fig. 3. The effect of the time of quartzite grinding in a laboratory ball mill on the rate of formation of grains of various sizes



Rys. 4. Wpływ czasu mielenia rudy magnetytowej żelaza w laboratoryjnym młynku kulowym na prędkość powstawania ziarn różnej wielkości  
1 - po 10 min mielenia; 2 - po 15 min mielenia; 3 - po 30 min mielenia

Fig. 4. The effect of the time of grinding of magnetite iron ore in a laboratory ball mill on the rate of formation of various grain sizes  
1 - after 10 min. of grinding, 2 - after 15 min of grinding, 3 - after 30 min of grinding

ci powstawania ziarn średnich dla rudy magnetytowej żelaza, albo też obniżenie się ilości tych ziarn dla kwarcytu. Obniżenie się prędkości powstawania ziarn kwarcytu poniżej 0,1 mm było spowodowane tym, że po 6 minutach mielenia klasy te już same ulegały intensywnemu rozdrabnianiu.

Z zależności prędkości powstawania ziarn od ich wielkości i czasu mielenia można wyciągać informacje do sposobu prowadzenia mielenia przemysłowego. Dla zachowania znanej w przeróbce kopalin tezy "nie kruszyć nic zbytecznego", np, z rys. 4 można wnioskować, że czas przebywania rudy magnetytowej w młynie kulowym nie powinien przekraczać 10 minut. W tym czasie prędkość powstawania ziarn najdrobniejszych poniżej 0,03 mm jest pięć do sześciu razy mniejsza w stosunku do prędkości powstawania ziarn powyżej 0,05 mm.

Wydaje się, że zaproponowany w pracy sposób pomiaru kąta nachylenia krzywej (lub stycznej do tej krzywej) w układzie wychód ziarn - czas roz-

drabiania może być miarą prędkości mielenia ziarn określonej wielkości. W najkrótszych czasach mielenia kąt ten jest miarą początkowej prędkości przyrostu ilości ziarn. Im wyższa wartość tego kąta, tym prędkość ta jest większa. Przedstawienie kinetyki mielenia w układzie prędkości powstawania ziarn daje podstawy do głębszej analizy uzyskanych wyników. Pozwala przede wszystkim ustalić, jak czas mielenia wpływa na prędkość powstawania ziarn różnej wielkości, co z kolei może prowadzić do bardziej racjonalnego ustalenia warunków przemysłowej technologii mielenia.

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania laboratoryjne mielenia kwarcytu i rudy magnetytowej żelaza oraz analiza uzyskanych wyników pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wykazano, że w najkrótszych czasach mielenia zależność wychodu ziarn dowolnej wielkości od czasu prowadzenia procesu jest prostoliniowa. Im rozpatrywane są mniejsze wielkości ziarn, tym ta prostoliniowa zależność utrzymuje się przez dłuższy czas mielenia.

2. Zaproponowano nową metodę wyznaczania prędkości powstawania nowych ziarn w młynie kulowym za pomocą pomiaru kąta nachylenia krzywej kinetyki mielenia do osi czasu.

3. Stwierdzono, że w początkowym czasie mielenia w młynie kulowym prędkość powstawania ziarn średniej wielkości jest kilkakrotnie wyższa od prędkości powstawania ziarn najdrobniejszych. Po dłuższym czasie mielenia prędkość powstawania ziarn średnich spada do poziomu prędkości powstawania ziarn najdrobniejszych (ruda magnetytowa żelaza) lub może być kilkakrotnie niższa (kwarcyt).

#### LITERATURA

- [1] Czeczott H.: Przeróbka mechaniczna użytecznych ciał kopalnych. Część I, tom I, Kraków 1930.
- [2] Lowrison G.Ch. Crushing and grinding. Cleveland, Ohio, USA, CRC PRESS, INC, 1974.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Olbracht Zbraniński

Wpłynęło do Redakcji w lipcu 1985 r.

## КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ЗЁРЕН РАЗНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ВО ВРЕМЯ ДРОБЛЕНИЯ ТВЁРДЫХ ТЕЛ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

### Р е з ю м е

В работе предложен новый графический метод определения скорости образования зёрен разной величины в шаровой мельнице. Принято, что на графике время молки - выход зёрен произвольной величины а наклон кривых характеризует скорость возникновения зёрен. В качестве показателя скорости возникновения зёрен принят тангенс угла наклона этих кривых к горизонтали.

На основе лабораторных проб молки кварцита добываемого из залежей в Польше а также советской магнитной руды установлено, что в начальной фазе молки в шаровой мельнице образуются в большинстве зёрна средней величины. После длительной молки скорость образования средних зёрен падает до уровня скорости образования мельчайших зёрен магнитная руда железа или-же может быть в несколько раз ниже кварцит .

Кроме этого показано, что в самых коротких периодах молки, зависимость образования зёрен произвольной величины от времени ведения процесса, является линейной. Чем меньше зёрна, тем линейная зависимость сохраняется в более длительном времени молки.

## THE KINETICS OF VARIOUS GRAIN SIZE FORMATION IN THE COURSE OF DIINTEGRATION OF SOLIDS IN A BALL MILL

### S u m m a r y

A new graphis method of determining the rate of formation of grains of various sizes in a ball mill has been suggested. It has been assumed that in the diagram the time of grinding, the output of grains of optional size, inclination of the curves, are the picture of the rate of formation to which the inclination refers. However, as the measure of the rate of grain formation the tangent of the angle of inclination of these curves to the horizontal exis has been assumed. On the basis of laboratory grinding of the quartzite from home deposits and the Soviet magnetite ore it has been found that during the initial time of grinding in a ball mill, mainly medium-size grains are formed. After a longer period of grinding the rate of medium grain size formation decreases to the level of the finest grains formation (magnetite iron ore) or may be several times lower (quartzite). Moreover, it has been shown that during the shortest periods of grinding the dependence of the output of optional size grains on the time of carrying out of the process is rectilinear. The lower are the grain sizes studied the longer is this rectilinear dependence maintained in the course of grinding.