

Podstawowe zagadnienia rozdrabniania

maj 1, 2025

Charakterystyka procesów rozdrabniania

Procesy rozdrabniania polegają na rozdzielaniu struktury ziaren materiału na więcej części przez zniszczenie ich wewnętrznej spistości wskutek oddziaływania obciążeń zewnętrznych lub obciążeń o innym charakterze.

Największe znaczenie mają metody mechaniczne, którymi wytwarza się praktycznie wszystkie materiały o uziarnieniu powyżej 1 mm oraz około 98÷99% ilości materiałów o drobniejszym uziarnieniu.

Podstawowy podział procesów rozdrabniania zawarto w wycofanej bez zastąpienia normie PN-72/C-47270.

W procesach rozdrabniania zachodzących w maszynach rozdrabniających występuje pięć głównych mechanizmów procesu rozdrabniania materiałów kruchych (rys. 2.1) , są to:

a - quasi statyczne ściskanie i ścieranie pojedynczego ziarna pomiędzy płytami, sferami, klinami – zachodzi w kruszarkach szczękowych, stożkowych, walcowych, młynach walcowych,

b - quasi statyczne ściskanie i ścieranie zbioru ziaren pomiędzy płytami względnie sferami - zachodzi w kruszarkach szczękowych, stożkowych, walcowych oraz w młynach walcowych wysokociśnieniowych,

c - quasi statyczne ściskanie pojedynczego ziarna pomiędzy klinami, które zachodzi w uzębionych kruszarkach walcowych, kruszarkach szczękowych i stożkowych - wyposażonych w profilowane elementy robocze,

d - dynamiczne (udarowe) rozbijanie pojedynczego swobodnego ziarna oraz zbioru swobodnych ziaren z dużą prędkością propagacji obciążeń – zachodzi w kruszarkach udarowych (bijakowych, młotkowych i odśrodkowych) i w młynach z mielnikami swobodnymi (wibracyjnych, planetarnych, udarowych, rolowo-misowych, strumieniowych),

e - niszczenie powierzchniowe struktur ziaren: „okruszanie” – które zachodzi w kruszarkach wibracyjnych oraz ścieranie – zachodzi w młynach z mielnikami swobodnymi dominująco w mieszadłowych, a w mniejszym stopniu w grawitacyjnych i wibracyjnych.

[Read more](#)

Własności uziarnionych materiałów rozdrabnianych

- własności wytrzymałościowe, głównie wytrzymałość na ściskanie,
- twardość,
- uziarnienie,
- gęstości, właściwa, nasypowa, kąt naturalnego usypu,
- wilgotność,
- inne, zróżnicowane w poszczególnych technologiach materiałów uziarnionych.

Podstawowe rodzaje ziaren materiałów naturalnych i syntetycznych

- krystalit (kryształ pierwotny) – najmniejszy element budowy materiału uziarnionego, proszku. Krystalit tworzy przestrzeń koherentnie rozpraszająca promieniowanie rentgenowskie wskutek wysokiego stopnia uporządkowania materii w jego obrębie, umożliwiającą pomiar jego wielkości przez wykorzystanie zjawiska poszerzenia dyfrakcyjnych refleksów rentgenowskich,
- agregat – tworzy go niewielka liczba krystalitów połączonych w bezporowaty zbiór,
- aglomerat – ziarno utworzone z wielu krystalitów i ewentualnie agregatów, charakteryzujące się porowatością,
- granulit - szczególna forma agregatu wytworzona sztucznie o regularnym kształcie (kulistym, elipsoidy obrotowej).

Podstawowe własności fizyczne materiałów uziarnionych pojedynczych ziaren oraz ich zbiorów to:

- wymiary (rozmiary) ziaren,
- kształt ziaren,
- powierzchnia ziaren,
- objętość ziaren,
- porowatość,
- wilgotność (jej rodzaj) i wilgoć,
- gęstość,
- parametry matematyczne ich zbioru, składu, rozkładu

W procesach rozdrabniania, wzbogacania stosuje się jeszcze inne kryteria rozdziału związane z własnościami to jest:

- skład densymetryczny,
- wilgotność,
- podatność na przesiewanie,
- podatność na wzbogacanie grawitacyjne,
- podatność na wzbogacanie magnetyczne,
- podatność na wzbogacanie elektryczne,
- podatność na flotację,
- podatność na inne technologie wzbogacania,
- podatność na aglomerację (bezciśnieniowa i ciśnieniową),
- podatność na polerowanie,
- mrozoodporność,

- nasiąkliwość,
- inne właściwości fizykomechaniczne,
- inne właściwości chemiczne,
- stopień koncentracji składnika użytecznego,
- właściwości optyczne,
- barwę materiału ziaren oraz ich połysk,
- kształt ziaren,
- współczynnik tarcia ziaren o powierzchnię materiału po której się poruszają,
- udział zanieczyszczeń,
- inne własności zwane też właściwościami.

Wskaźniki można podzielić na trzy grupy:

1. Wskaźniki fizyczne określające cechy geometryczne i własności fizyczne materiału uziarnionego, czyli: wymiary, kształty ziaren, rozkłady zbiorów ziaren, procentowe pozostałości na sitach kontrolnych, udziały procentowe zewnętrznych górnych lub dolnych klas ziarnowych, wymiary ziaren kontrolnych: średnich, najczęściej o określonym procencie ilościowo lub masowo, powierzchnię właściwą (statyczną, kinetyczną), gęstość piknometryczną, twardość, mikrotwardość, strukturę petrograficzną, wytrzymałość na ściskanie, wytrzymałość na rozciąganie (próba Brazylijska), wskaźniki związane z poborem energii na rozdrabnianie - indeksy pracy (Bonda, Hardgrove'a, Zeisela, Schillera lub inny), wytrzymałość na uderzenie, indeks abrazyjności (ścieralność), moduł Younga (statyczny i dynamiczny), współczynnik Poissona, kruchość, łupliwość, higroskopijność, zdolności adsorpcyjne i absorpcyjne, piroforyczność, barwę, połysk, objętość porów (całkowitą, średnią), rozkład, kształt porów, kąt tarcia wewnętrznego, kąt tarcia statycznego i kinetycznego o metal, kąt naturalnego usypu oraz szereg innych wskaźników dotyczących rozdrabniania materiałów w technologiach rozdrabniania np.: materiałów pochodzenia roślinnego, środków farmaceutycznych, farb i lakierów i innych.
2. Wskaźniki technologiczne: stopnie rozdrobnienia (graniczny, średni, n-procentowy), wzrostu powierzchni, podatność na mielenie, podatność na aglomerację (bezcisnieniową i ciśnieniową), udział wody, wydajność całkowitą, wydajność klasy użytecznej, jednostkowy pobór energii na proces rozdrabniania oraz procesy towarzyszące (klasyfikacji ziarnowej, wzbogacania i inne), efektywność (skuteczność) procesu rozdrabniania oraz wskaźniki dotyczące materiałów drobno uziarnionych – proszków, to jest: sypkość, zagęszczalność prasowalność, spiekalność i inne.
3. Własności fizykomechaniczne: wskaźniki chemiczne zawierające: udziały: materiału podstawowego, pozostałych składników, zanieczyszczeń faz (stałej, ciekłej i gazowej), występowanie powłok tlenkowych, aktywność, odporność na korozję, aktywność chemiczną, aktywność elektrochemiczną, zdolności katalityczne, toksyczność i inne.

W projektowaniu kruszarek i młynów stosowanych w górnictwie w przeróbce mechanicznej rud oraz rozdrabnianiu surowców skalnych, a także surowców i spoiw mineralnych większość producentów maszyn rozdrabniających w ich projektowaniu posługuje się wskaźnikiem WI, który najczęściej wyznacza w swoim firmowym laboratorium w standardowym młynie Bonda.

Dokładne określenie podatności materiału na rozdrabnianie jest przydatne dla inwestorów zakładów do rozdrabniania (kruszenia i mielenia), konstruktorów maszyn rozdrabniających oraz projektantów układów rozdrabniania.

Na jednostkowy pobór energii w procesie mielenia mają wpływ nie tylko własności fizyczne materiału – określane wskaźnikami WI, HGI lub innymi, ale także sposób rozdrabniania oraz środowisko rozdrabniania, czyli sposób mielenia na mokro lub na sucho. O rodzaju środowiska (woda, powietrze lub gazy suszące), decydują: własności fizyczne materiału, technologia rozdrabniania oraz jego przyszłe zastosowanie jako produktu finalnego lub nadawy do następnego procesu rozdrabniania.

W przypadku kruszenia dominująca większość procesów zachodzi na sucho, przy wilgotności złożowej lub powstałej podczas składowania materiału rozdrabnianego.

W przypadku mielenia środowisko rozdrabniania ma wpływ na jednostkowy pobór energii oraz na koszty suszenia, jeśli zmielony materiał wymaga suszenia.

Szereg materiałów można mleć w środowisku powietrza lub wody, a o rodzaju środowiska mielenia decydują całkowite koszty mielenia. Znaczną część materiałów: surowce cementowe, węgle energetyczne (pomijając nieliczne technologie wytwarzania wodnych zawiesin lub suspensji węgla), nawozy mineralne miele się na sucho w środowisku gazów suszących, a spoiwa mineralne (cement, wapno gips palony) nawozy mineralne oraz wiele surowców mineralnych i uziarnionych materiałów syntetycznych miele się na sucho w środowisku powietrza, natomiast niemal wszystkie rudy miele się tylko na mokro w środowisku wody.

Wymagania technologiczne produktów rozdrabniania

Do najbardziej popularnych młynów, czyli młynów grawitacyjnych – kulowych i prętowych maksymalny wymiar ziaren nadawy mieści się w zakresie 10÷50 mm, a najkorzystniejsze uziarnienie to klasa 0÷10 mm. Do młynów autogenicznych i semiautogenicznych maksymalny wymiar ziaren mieści się w zakresie 200÷500 mm.

Nadawa do młynów tocznych – rolowo-misowych powinna posiadać uziarnienie 0÷80 mm – przy największych młynach oraz 0÷40 mm – przy najmniejszych i powinna zawierać około 20% ziaren o „najgrubszym” uziarnieniu.

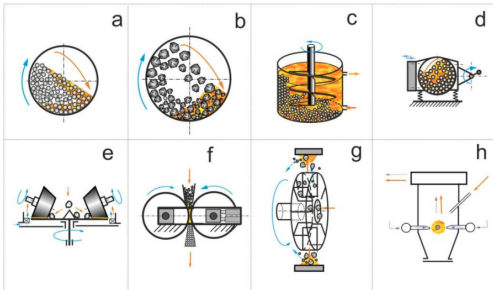
Uziarnienie nadawy do młynów wibracyjnych i udarowych uwarunkowane jest wymaganiami uziarnienia produktu mielenia i wynosi

0÷40 mm przy mieleniu drobnym, 0÷10 mm przy mieleniu bardzo drobnym oraz 0÷2 mm przy mieleniu koloidalnym. Uziarnienie nadawy do młynów mieszadłowych i strumieniowych wynosi najczęściej 0÷2 mm.

Uziarnienie produktów kruszenia oznaczane jest znormalizowaną metodą sitową – przez przesiewanie w dominującej większości przypadków na sucho, na sitach w przesiewaczu laboratoryjnym, który do wspomagania procesu przesiewania ma standardowo wbudowany wibrator bezwładnościowy z regulacją amplitudy drgań.

Znacznie większe zróżnicowanie uziarnienia produktów rozdrabniania ma miejsce w procesach mielenia, z których produkty mają bardziej rozległe zastosowanie. Na przykład najkorzystniejsze uziarnienie produktów mielenia wynosi: rud miedzi - poniżej 75 μm , rud cynku - poniżej 10 μm , rud innych metali: $d_{90} = 20 \mu\text{m}$,

surowców do produkcji cementu poniżej 90 μm , surowców do produkcji ceramiki sanitarnej: $1\div 3\%$ p.n.s. 0,063 mm, surowców do produkcji ceramiki szlachetnej klasy: $0\div 0,040$ mm; $0\div 0,063$ mm, $0\div 0,075$ mm, $0\div 0,125$ mm oraz $0\div 25$ mm, pigmentów $d_{50} = 3\div 10$ μm , wysokiej jakości granulowanych nawozów mineralnych udział klasy $0\div 10$ μm powyżej 70%.



Charakterystyka i wskaźniki technologiczne maszyn rozdrabniających

- wymagania technologiczne stawiane produktom rozdrabniania najczęściej udziały górnej i dolnej klasy ziarnowej, czyli ilości nadziarna lub podziarna - jeśli kruszarka lub młyn pracują w układzie otwartym,
- jednostkowy pobór energii na proces rozdrabniania w maszynie

rozdrabniającej i całym układzie rozdrabniania,

- dopuszczalna ilość zanieczyszczeń produktów rozdrabniania pochodzących ze zużywających się elementów roboczych maszyn rozdrabniających,
- wydajność – zmianowa, dobową, miesięczną, roczną, przy czym wydajność powinna być sprecyzowana dla określonych wymagań technologicznych produktu rozdrabniania i definiowana jest w kontraktach jako wydajność gwarantowana,
- podstawowe wyposażenie technologiczne i pomocnicze układu oraz liczba maszyn rozdrabniających,
- rodzaj cyklu pracy maszyn,
- współczynnik wykorzystania czasu pracy,
- wymagania w zakresie współdziałania układu rozdrabniania z innymi układami technologicznymi,
- wymagania dotyczące zasilania energetycznego,
- wymagania w zakresie AKP i sterowania automatycznego,
- wymagania dotyczące stanu obsługi,
- wymagania w zakresie strategii remontowej,
- wymagania dotyczące BHP i ochrony otoczenia

W procesach rozdrabniania (kruszenia i mielenia) materiałów kruchych występuje bardzo duże zróżnicowanie budowy i działania maszyn rozdrabniających, czyli kruszarek i młynów. Zróżnicowanie to spowodowane jest następującymi przesłankami:

- własnościami fizycznymi rozdrabnianych materiałów (wytrzymałością na ściskanie, twardością, składem mineralnym, strukturą, teksturą)
- pochodzeniem geologicznym udziałem zanieczyszczeń, podatnością na rozdrabnianie, abrazyjnością oraz innymi własnościami w specjalistycznych technologiach,
- uziarnieniem nadawy i produktów uziarnienia,
- wydajnością maszyny rozdrabniającej,
- zapotrzebowaniem energii na proces rozdrabniania oraz procesy
- pomocnicze (klasyfikacji ziarnowej, transportu, wzbogacania, suszenia i innych),
- kosztami wymiany elementów roboczych,
- pozostałymi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi,
- dostępnością maszyn rozdrabniających,

- dostępnością i kosztami serwisu.

Jednym z głównych czynników mających wpływ na dobór maszyny rozdrabniającej są własności fizyczne rozdrabnianego materiału. Własności fizyczne wpływają na rodzaj dominującego obciążenia, które wpływa na proces rozdrabniania pojedynczego ziarna oraz zbioru rozdrabnianych ziaren.

W praktyce dobór maszyny rozdrabniającej do rozdrabniania konkretnego materiału uwzględnia jeszcze wiele innych wymagań. Pozostałe podstawowe parametry maszyn rozdrabniających (maksymalny wymiar ziaren nadawy, średni stopień rozdrobnienia oraz wydajność) zostały określone w pracy. Zawierają je również katalogi producentów tych maszyn.

Elementy robocze, a także konstrukcyjne maszyn rozdrabniających przenoszą duże obciążenia. Ze względu na te obciążenia oraz silne oddziaływanie ściernie rozdrabnianych materiałów, następuje szybkie zużycie elementów roboczych. Stąd aby zapewnić wysoką niezawodność maszyn rozdrabniających przy ich projektowaniu i eksploatacji uwzględnia się jeszcze następujące czynniki:

- własności fizyczne i chemiczne rozdrabnianego materiału, to jest: skład ziarnowy oraz maksymalny wymiar ziarna nadawy i produktu rozdrabniania, twardość, wytrzymałość na ściskanie, abrazyjność, wilgotność nadawy i produktu rozdrabniania, stopień rozdrobnienia (maksymalny, średni, 97-procentowy, 90-procentowy lub inny),
- wydajność maszyny rozdrabniającej przy wymaganym uziarnieniu produktu rozdrabniania – przy pracy w cyklu otwartym, lub zamkniętym,
- koszty inwestycyjne i eksploatacyjne maszyny rozdrabniającej, jej układu technologicznego (instalacji),
- koszty eksploatacyjne: poboru energii, zużycia elementów roboczych, obsługi bieżącej, serwisu,
- koszty infrastruktury budowlanej, urządzeń pomocniczych, instalacji,
- koszty monitoringu, sterowania automatycznego, archiwizacji parametrów pracy,
- koszty BHP i ochrony otoczenia,
- zamienność technologiczną, łatwą sterowalność.

Maszyna rozdrabniająca (kruszarka, młyn) eksploatowana jest w układzie technologicznym zwanym instalacją, węzłem lub linią technologiczną, który oprócz urządzeń technologicznych wyposażony jest w urządzenia pomocnicze: monitorujące jego działanie, sterujące i kontrolno-pomiarowe.

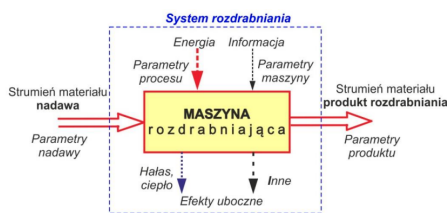
W przypadku układu kruszenia są to: urządzenie dozujące nadawę, a w przypadku równoczesnego suszenia - palenisko z gazami suszącymi, urządzenie odbierające produkt kruszenia, układ odpylania i oczyszczania powietrza, aparatura sterująca parametrami technologicznymi, aparatura monitorująca parametry pracy kruszarki i urządzeń pomocniczych.

Większość kruszarek użytkowana jest w instalacjach pracujących w cyklu otwartym, to znaczy bez klasyfikatora ziarnowego i zawrotu nadziarna. W przypadku nielicznych układów kruszenia pracujących w cyklu zamkniętym funkcję klasyfikatora ziarnowego pełni przesiewacz. **W przypadku układu mielenia są to: urządzenie dozujące nadawę, a w układzie susząco-mielącym - palenisko z gazami suszącymi, urządzenie**

odbierające produkt mielenia, układ odpylania i oczyszczania powietrza - przy mieleniu na sucho, a przy mieleniu na mokro: pompa dozująca wodną zawiesinę materiału lub odrębnie wodę, a w każdym przypadku: aparatura sterująca parametrami technologicznymi, aparatura monitorująca parametry pracy młyna i urządzeń pomocniczych.

Większość młynów użytkowana jest w instalacjach pracujących w cyklu zamkniętym, czyli z klasyfikatorem ziarnowym i zawrotem nadziarna za pomocą dodatkowych urządzeń transportowych (przenośników). W układach mielenia funkcję klasyfikatora ziarnowego pełni separator pneumatyczny (przepływowy, cyrkulacyjny, turbinowy lub inny) – w przypadku mielenia na sucho oraz hydrocyklon, separator spiralny lub sito łukowe – przy mieleniu na mokro.

W pewnych przypadkach w układach stosowana jest klasyfikacja ziarnowa nadawy przed podaniem jej do kruszarki lub młyna. Jest to najczęściej przesiewacz, a w przypadku bardzo drobnego mielenia separator pneumatyczny lub hydrocyklon.



Na rysunku przedstawiono uproszczony model systemu rozdrabniania (kruszenia lub mielenia), którego głównym elementem jest maszyna rozdrabniająca z zaznaczonymi strumieniami: masy (rozdrabnianego materiału), energii, informacji oraz efektów ubocznych (generowanego ciśnienia akustycznego, transmisji obciążeń dynamicznym na podłoże i innych).

Klasyfikacja i zastosowanie kruszarek

Jako główne kryterium podziału przyjęto – zamieszczony w pierwszej kolumnie tabeli, rodzaj obciążeń rozdrabniających. W drugiej kolumnie tej tabeli wyspecyfikowano kruszarki, w których występują dominujące sposoby. W kolumnie trzeciej podano przykłady typowych zastosowań kruszarek, czyli materiały, które są najczęściej w nich rozdrabniane oraz materiały, które można w nich rozdrabniać z pewnymi ograniczeniami.

Podstawowym kryterium doboru kruszarki są dwa parametry technologiczne, czyli jej wydajność oraz uziarnienie rozdrobnionego produktu kruszenia.

Przy rozdrabnianiu materiałów o znaczących właściwościach ścierających (głównie zawartości krzemionki krystalicznej), ważnym aspektem jest zużycie elementów roboczych kruszarek (płyt drobiących, okładzin stożków, płaszczy walców, elementów kształtowych walców uzębionych, a także młotków bijaków, płyt odbojowych). Bardzo ważne jest kryterium zużycia tych elementów – określane jednostkowym zużyciem, określane w g zużycia elementu roboczego na 1 Mg wytworzonego produktu kruszenia.

Głównymi producentami kruszarek w Europie są firmy: Metso Minerals (Svedala, Nordberg) – oddział firmy USA w Europie, Sandvik MiningConstruction Central Europe GmbH, Thyssenkrupp Fördertechnik GmbH, KHD Humboldt Wedag AG, Aubema Crushing Technology GmbH, Förderanlagen Magdeburg, Hazemag & Epr GmbH, Weil Brechertechnik GmbH, PSP Engineering a.s., KDS Maschinenbau GmbH, Liedlbauer Aufbereitungstechnik, Reiter & Crippa S.R.L, Ammann Aufbereitung AG, BHS-Sonthofen, Lut Metalltechnik GmbH. Merz Aufbereitungstechnik GmbH, DBT Mineral Processing GmbH, Thomaco Baumaschinen GmbH, Vortex Zerkleinerungstechnik GmbH, Martin Steckert, Giegold Maschinenbau GmbH, Magotteaux, Maschinenfabrik Liezen GMBH (przedstawiciel w Polsce - MRC Doltech Sp zo.o), Koeppern, PSP

Vertriebs GmbH, Brauer Aufbereitungsmaschinen GmbH & CO, FAM Magdeburger Förderanlagen und, Baumaschinen GmbH, GIPO AG (Gisler Power), Bücher Unipektin AG. BORAMTEC Bohr & Rammtechnik Berlin GmbH, ENCE GmbH, Grenzebach Maschinenbau GmbH, Pensylwania Crushers, McLanahan, Williams Crusher, DSMAC Dingsheng Machinery, Osborn, Powerscreen Pegson, Kleemann, Terex Finlay, Sandvik i inne.

W Polsce kruszarki produkują firmy; Makrum Project Management Sp. z o.o., KGHM- ZANAM Sp. z o.o., Zakłady Urządzeń Technicznych SA, Wamag, Carboma, Ofama Sp. z o.o., Hammerman, Mifama SA, Makrusz, Goster, Kopex Machinery, Fugor Sp. zo.o. i inne.

Klasyfikacja i zastosowanie młynów

Jako podstawowe kryterium klasyfikacji przyjęto sposób przekazywania energii elementom roboczym wydatkowanej na proces mielenia oraz rodzaj medium powodujących mielenie. Według tego kryterium młyny dzielą się na dziesięć grup:

1. Z mielnikami swobodnymi, ruchomą komorą z przekazywaniem energii przez komorę – grawitacyjne, wibracyjne, obrotowo-wibracyjne, planetarne, inne.
2. Z mielnikami swobodnymi, nieruchomą komorą z przekazywaniem energii przez wirnik – mieszadłowe (kulkowe, kuleczkowe, perełkowe).
3. Z prowadzonymi obrotowymi elementami roboczymi współpracującymi z obracającą się misą i dociskany do niej układem mechanicznym lub hydraulicznym – zwane tocznymi (z układami: rolki-misa, lub kule-misa), z przekazywaniem energii przez te elementy. Młyny te w zależności od kształtu elementów roboczych zwane są: rolowo-misowymi, kulowomisowymi, pierścieniowo-kulowymi. Występują również inne wersje tych młynów oraz różniące się od nich dwie odmiany konstrukcyjne. Są to młyn jednorolkowy (HoroMill), w którym proces mielenia zachodzi pomiędzy obrotową rolką i obrotowym walcem, przy czym oba te elementy mają poziome osie geometryczne oraz młyny wahadłowe, w których proces mielenia zachodzi na nieruchomym pierścieniu, do którego dociskane są rolki mielące, obracające się dzięki sile tarcia i dociskane do pierścienia siłą odśrodkową. W młynach wahadłowych elementy robocze mają pionowe osie geometryczne.
4. Wysokociśnieniowe: walcowe zwane prasami HPGR, które używane są też jako kruszarki oraz młyny Beta-Mill, Premill.
5. Udarowe z wirującymi elementami roboczymi w postaci młotków lub bijaków z przekazywaniem energii przez te elementy i rozdrabniające swobodne ziarna materiału w powietrzu (gazie), w tym młyny kawitacyjne.
6. Strumieniowe z dostarczaniem energii przez gazowe medium robocze (powietrze, parę, gaz).
7. Elektromagnetyczne.
8. Obrotowo-magnetyczne.
9. Dyspergatory z wirującymi elementami roboczymi w postaci kształtowych elementów, rozdrabniające materiał w cieczy.
10. Specjalne technologie mielenia.

Zapotrzebowanie energii na proces rozdrabniania wzrasta wraz ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren produktu rozdrabniania. Wzrost ten jest znacząco większy przy uziarnieniu produktu poniżej 100 μm , znacząco wzrasta przy uziarnieniu poniżej 10 μm , a najbardziej silny wzrost ma miejsce przy uziarnieniu poniżej 1 μm , czyli przy wytwarzaniu mikro i nanoproszków.

Wzrost jednostkowego poboru energii wynika również ze sposobu przekazywania energii na proces rozdrabniania, który w większości młynów (z mielnikami swobodnymi i strumieniowymi), różni się znacząco od sposobu przekazywania energii w kruszarkach.

W/w młynach w procesie rozdrabniania biorą udział swobodne pośrednie elementy robocze – mielniki (kule, pręty, cylpepsy), a przy młynach grawitacyjnych, wibracyjnych czy planetarnych część energii pobiera wprowadzana w ruch komora robocza.

W młynach strumieniowych większość energii pochłania sprężanie medium roboczego (powietrza).

Natomiast w młynach udarowych, w których stosuje się większe prędkości obrotowe wirników, większa niż w kruszarkach wirnikowych, część energii tracona jest na efekt wentylatorowy. Na większy pobór energii w młynach z mielnikami swobodnymi wpływa również znacznie dłuższy czas przebywania materiału w młynie, który w młynach grawitacyjnych pracujących w cyklu otwartym może dochodzić do pół godziny. **Stąd, aby zmniejszyć jednostkowy pobór energii, w każdym możliwym do realizacji przypadku powinno się do wstępnego rozdrabniania zastosować kruszarki, a do młynów podawać materiał o jak najdrobniejszym uziarnieniu.**

Wyjątek stanowią młyny toczne, do których w nadawie powinny być klasy ziarnowe o „grubszym” uziarnieniu, a bardzo drobna nadawa może spowodować znaczny wzrost oporów przepływu materiału przez młyn.

Na uwagę zasługuje porównanie efektywności maszyn rozdrabniających, które opracował Stairmand. Stairmand na podstawie doświadczeń wykazał, że największą efektywność rozdrabniania pojedynczego ziarna może osiągać kruszarka walcowa.

Wskaźniki efektywności rozdrabniania pojedynczych ziaren występujące w innych maszynach odniósł do wskaźnika kruszarki

walcowej. Zestawienie wskaźników typowych maszyn rozdrabniających (kruszarek i młynów podano w tabeli 2.14.

Wskaźniki efektywności rozdrabniania pojedynczego ziarna odniesione do kruszarki walcowej [47]

Tabela 2.14.

Rodzaj maszyny rozdrabniającej Efektywność [%]

Kruszarka walcowa $70 \div 100$

Młyn bijakowy $25 \div 40$

Młyn młotkowy $17 \div 25$

Młyn walcowy $7 \div 15$

Młyn kulowy $6 \div 9$

Młyn mieszadłowy $2 \div 6$

Młyn strumieniowy $1 \div 2$

Wskaźnik efektywności ma charakter porównawczy, ale może być przydatny do wstępnej oceny przydatności konkretnej maszyny rozdrabniającej.