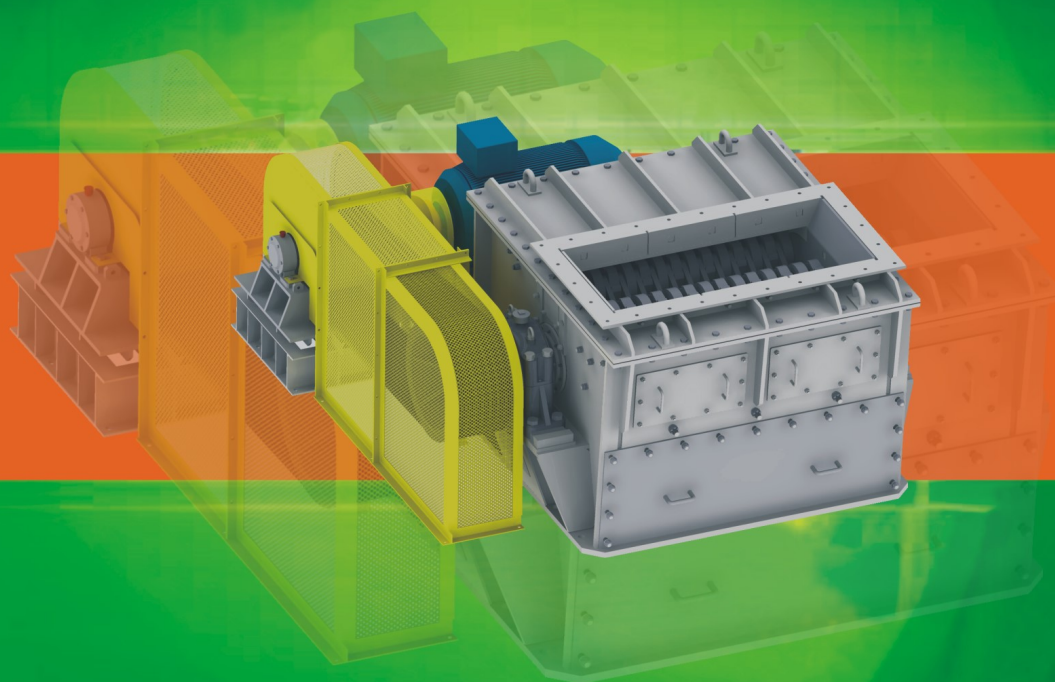


Jan SIDOR
Adam KLICH



WSPÓŁCZESNE MASZYNY DO ROZDRABNIANIA – KRUSZARKI I MŁYNY

**Jan Sidor
Adam Klich**

**Współczesne maszyny do rozdrabniania
- kruszarki i młyny**

Autorzy:

dr hab. inż. Jan Sidor, prof. nadzw. AGH – Akademia Górniczo- Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie

prof. dr hab. inż. Adam Klich - Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Henryk Otwinowski - Politechnika Częstochowska

prof. dr hab. inż. Piotr Wodziński - Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa
im. Prezydenta Stanisława Wojciechowskiego w Kaliszu

Redaktor techniczny:

mgr inż. Romana Zając

mgr inż. Elżbieta Dymarek

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę

Wydanie drugie poprawione (wersja elektroniczna)

Copyright by

Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2018

Wydawca:

Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice

ISBN 978-83-65593-10-8

Spis treści

	str.
1. Wstęp.....	1
2. Podstawowe zagadnienia rozdrabniania	4
2.1. Charakterystyka procesów rozdrabniania	4
2.2. Własności uziarnionych materiałów rozdrabnianych	8
2.3. Wymagania technologiczne produktów rozdrabniania...	18
2.4. Charakterystyka i wskaźniki technologiczne maszyn rozdrabniających	20
2.5. Klasyfikacja i zastosowanie kruszarek	27
2.6. Klasyfikacja i zastosowanie młynów	30
Literatura	34
3. Kuszarki z dominacją obciążeń wolnozmiennych	38
3.1. Problematyka kruszarek z obciążeniami wolnozmiennymi	38
3.2. Kuszarki walcowe i walcowo-szczękowe	39
3.3. Kuszarki szczękowe	62
3.4. Kuszarki stożkowe	70
Literatura	80
4. Kuszarki z dominacją obciążeń szybkozmiennych	83
4.1. Problematyka kruszarek z obciążeniami udarowymi	83
4.2. Kuszarki młotkowe	86
4.3. Kuszarki bijakowe	94
4.4. Kuszarki udarowe z wałem pionowym	103
4.5. Kuszarki udarowo-pierścieniowe i łańcuchowe	116
Literatura	121
5. Kuszarki wibracyjne i specjalne	124

5.1.	Problematyka kruszarek wibracyjnych	124
5.2.	Wibracyjne kruszarki szczękowe	128
5.3.	Wibracyjne kruszarki stożkowe	135
5.4.	Wibracyjne kruszarki rurowe i inne	140
5.5.	Kruszarki specjalne	143
5.6.	Specjalne technologie kruszenia	146
	Literatura	147
6.	Młyny grawitacyjne	150
6.1.	Problematyka młynów grawitacyjnych	150
6.2.	Młyny bębnowe, rurowe, kulowe i prętowe	153
6.3.	Młyny autogeniczne i semiautogeniczne	174
	Literatura	185
7.	Młyny mieszadłowe	188
7.1.	Problematyka młynów mieszadłowych	188
7.2.	Młyny z wirnikami pionowymi	198
7.3.	Młyny o dużej wydajności	206
7.4.	Młyny specjalne i laboratoryjne	215
	Literatura	217
8.	Młyny wibracyjne	220
8.1.	Problematyka młynów wibracyjnych	220
8.2.	Młyny rurowe	231
8.3.	Młyny toroidalne i specjalne	245
8.4.	Młyny obrotowo-wibracyjne	247
	Literatura	252
9.	Młyny planetarne	256
	Literatura	261

10. Młyny rolowo-misowe (toczne)	263
10.1. Problematyka młynów rolowo-misowych (tocznych) ...	263
10.2. Młyny rolowo-misowe	271
10.3. Młyny pierścieniowo-kulowe	282
10.4. Młyny wahadłowe	284
10.5. Młyny jednowalcowe – Horomill	287
Literatura	289
11. Młyny - prasy walcowe	292
11.1. Problematyka młynów - pras wysokociśnieniowych	292
11.2. Młyny walcowe wysokociśnieniowe HPGR	299
11.3. Młyny wysokociśnieniowe inne konstrukcje	304
Literatura	306
12. Młyny udarowe: młotkowe, bijakowe, dezintegratory	308
12.1. Problematyka młynów udarowych z rozdrabnianiem przez wirujące elementy robocze	308
12.2. Młyny młotkowe	313
12.3. Młyny bijakowe	320
12.4. Dezintegratory – młyny kołkowe	326
12.5. Młyny z wbudowanym separatorem	331
Literatura	336
13. Młyny wentylatorowe i odśrodkowe	338
13.1. Problematyka młynów z rozdrabnianiem udarowym na wykładzinie	338
13.2. Młyny wentylatorowe	339
13.3. Młyny odśrodkowe	345
Literatura	352
14. Młyny strumieniowe	355

14.1. Problematyka młynów strumieniowych	355
14.2. Młyny strumieniowe klasyczne	360
14.3. Młyny strumieniowo-fluidyzacyjne	367
Literatura	374
15. Młyny specjalne i eksperymentalne technologie mielenia	376
15.1. Problematyka młynów specjalnych	376
15.2. Młyny wirnikowe – wysokoenergetyczne	379
15.3. Młyny obrotowo-magnetyczne	381
15.4. Młyny elektromagnetyczne	381
15.5. Eksperymentalne technologie rozdrabniania	384
Literatura	387
Streszczenie	390
Abstract	392

1. Wstęp

Materiały uziarnione zwane też ziarnistymi stanowią fundament naszej cywilizacji. Już od zarania dziejów w epoce paleolitu człowiek zaczął posługiwać się tymi materiałami. Początkowo były to środki spożywcze, zboża, mąki, sól, a wraz z rozwojem cywilizacji, to jest przez mezolit, neolit, okres ceramiczny (ceramikę tworzą uziarnione materiały krystaliczne), coraz silniej zaznaczały się w egzystencji człowieka. W starożytności materiały te tworzyły podstawę wszystkich cywilizacji świata, jako materiały budowlane do budowy zamków, murów obronnych, dróg, mostów, a także sprzętów domowych.

Obecnie największe grupy materiałów uziarnionych stanowią materiały budowlane: kruszywa (naturalne i sztuczne), spoiwa mineralne (cementy, wapno, gipsy), żwiry, piaski, komponenty klejów, materiały izolacyjne, pigmenty chemiczne i ceramiczne i inne, nośniki energetyczne o fazie stałej (węgle i rozdrobnione materiały pochodzenia roślinnego), rudy metali, materiały ogniotrwałe, nawozy mineralne i sztuczne, surowce i produkty chemiczne, ceramiczne, pigmenty, farmaceutyki oraz wiele innych.

Zwiększył się też znacząco udział materiałów uziarnionych jako środków żywności (zbóż i produktów przeróbki zbóż), nasion roślin, orzechów, innych środków żywnościowych np. soli kamiennej, przypraw do żywności, a także jako kosmetyków, czy farmaceutyków.

Pewna ilość materiałów uziarnionych występuje jako rozdrobniona faza stała w stanie naturalnym. Stąd w inżynierii środowiska oraz niektórych innych naukach rozróżnia się uziarnione materiały: kamieniste o ziarnach $25 \div 300$ mm, żwirowe ($2 \div 25$ mm), piaskowe ($0,05 \div 25$ mm), pyłowe ($0,002 \div 0,05$ mm) i ilowe (poniżej 0,002 mm).

W niektórych branżach wyróżniana jest jeszcze klasa proszkowa – proszek o uziarnieniu $0,05 \div 0,5$ mm. Obecnie rozwój technologii rozdrabniania, zwłaszcza w inżynieriach: chemicznej, ceramicznej, elektronicznej, farmaceutycznej spowodował rozszerzenie dziedziny proszków o mikroproszki o uziarnieniu $0,1 \div 1$ μm oraz nanoproszki, zawierające ponad 50% ziaren, których jeden z wymiarów wynosi poniżej 100 nm.

Większość materiałów uziarnionych do wymaganego technologicznie czy komercyjnie uziarnienia przetwarzanych jest w drodze mechanicznej to jest w procesach rozdrabniania (kruszenia i mielenia). Do wytwarzania materiałów uziarnionych w tych procesach stosuje się maszyny rozdrabniające (krusarki i młyny), które zaczęto stosować już w XIX wieku. Szybki rozwój tych maszyn kontynuowany jest od drugiej połowy XX wieku.

Maszyny rozdrabniające o wydajności powyżej 20 Mg/h projektowane są do eksploatacji na okres minimum 30 lat, a okres użytkowania niektórych maszyn niekiedy przekracza 50 lat.

Procesy kruszenia i mielenia są bardzo energochłonne, stąd przy bardzo dużych wydajnościach tych maszyn: (500 ÷ 13 000 Mg/h - kruszarek oraz 100 ÷ 2 000 Mg/h młynów) zainstalowane moce jednej maszyny mieszczą się w zakresie 1÷35 MW.

Od początku XX wieku obserwuje się stały wzrost zapotrzebowania na materiały uziarnione w całym zakresie ich uziarnienia, od rozmiarów ziaren kilkudziesięciu mm (kruszyw, surowców mineralnych, paliw stałych i innych), poprzez ziarna o rozmiarach kilkudziesięciu μm – na materiały o takim uziarnieniu jest największe zapotrzebowanie. Są to: spoiwa mineralne, węgle, rudy i wiele innych.

Obecnie największy wzrost zapotrzebowania występuje w zakresie mikro i nanoproszków. Przesłanka ta jest głównym czynnikiem rozwoju maszyn do rozdrabniania, w szczególności młynów. Na rozwój mają jeszcze znaczący wpływ inne przesłanki, to jest:

- wzrost cen energii,
- konieczność redukcji kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, zwłaszcza kosztów personelu ich obsługi,
- postęp w dziedzinie wytwarzania nowych materiałów konstrukcyjnych, zwłaszcza materiałów na elementy robocze maszyn rozdrabniających,
- postęp w dziedzinie napędów maszyn w zakresie zespołów mechanicznych oraz elektrycznych,
- postęp w zakresie monitoringu i sterowania automatycznego,
- rozwój nauk podstawowych z dziedziny rozdrabniania,
- rozwój technik konstruowania, projektowania i symulacji komputerowych, co znacząco obniżyło koszty opracowania prototypów tych maszyn.

Mając na względzie powyższe przesłanki, w monografii podjęto próbę syntetycznego ujęcia aktualnego stanu wiedzy z dziedziny współczesnych maszyn rozdrabniających (kruszarek i młynów) w zakresie: zastosowania, podstawowych obliczeń i wstępnego doboru, stosowanych w inżynieriach: mineralnej, ceramicznej, chemicznej, energetyce, a także w przygotowaniu do recyklingu poużytkowych wyrobów SWE, ZSEE, AGD, gruzu budowlanego. Wiedza ta może być również przydatna w innych dziedzinach, w których zachodzi konieczność wytwarzania materiałów uziarnionych, np. w technologiach wytwarzania materiałów elektronicznych,

kompozytowych, spożywczych, farmaceutycznych, a także w technologiach zaawansowanych (*high, advanced technology*).

W monografii szczególną uwagę zwrócono na najnowsze rozwiązania konstrukcyjne maszyn rozdrabniających kruszarek (walcowych i odśrodkowych) i młynów (mieszadłowych, wibracyjnych, specjalnych) stosowanych w technologiach o dużej wydajności oraz o mniejszej skali dla potrzeb małych firm. Uwzględniono także zastosowanie tych maszyn w aspekcie własności fizycznych rozdrabnianego materiału, co powinno ułatwić poprawny dobór tych maszyn.

Odpowiedni dobór maszyny rozdrabniającej – dostosowanej technologicznie do własności fizycznych rozdrabnianego materiału, a także dostępność szybkiego i taniego serwisu, może znacznie obniżyć koszty inwestycyjne, a zwłaszcza eksploatacyjne (koszty energii elektrycznej) układu przerobczego.

Zawarty w monografii zakres wiedzy może być przydatny dla użytkowników maszyn rozdrabniających w dużych zakładach przemysłu górniczego, ceramicznego, zwłaszcza spoiw mineralnych, chemicznego, kruszyw naturalnych i wielu innych, w zakresie modernizacji eksploatowanego parku maszynowego, rozbudowy zakładu oraz dla przyszłych inwestorów nowych układów rozdrabniających. Monografia przeznaczona jest dla:

- projektantów układów rozdrabniających,
- konstruktorów maszyn rozdrabniających,
- inwestorów i użytkowników układów rozdrabniania,
- pracowników naukowych i studentów uczelni technicznych, wydziałów mechanicznych i technologicznych zajmujących się dziedziną wytwarzania materiałów uziarnionych.

2. Podstawowe zagadnienia rozdrabniania

2.1. Charakterystyka procesów rozdrabniania

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

Wyróżnić można następujące metody rozdrabniania:

- mechaniczne [1, 2, 3, 4],
- elektrohydrauliczną [5, 6],
- mikrofalową [7],
- z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego [6],
- Snydera (pneumatyczną) [8],
- inne - stosowane w technologiach wytwarzania proszków metalicznych, chemicznych, farmaceutycznych [9, 10].

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 – głównie w przemysłach: chemicznym, farmaceutycznym oraz spożywczym. Udział masowy proszków metalicznych, ceramicznych, chemicznych, farmaceutycznych i spożywczych wytwarzanych innymi niż mechaniczne metodami [9, 10] – w porównaniu z masą drobno uziarnionych spoiw mineralnych, paliw stałych, rud, nawozów mineralnych oraz uziarnionych nawozów sztucznych jest znacząco mniejszy.

Mechaniczne metody rozdrabniania, zwane dalej procesami rozdrabniania, którymi wytwarza się materiały uziarnione, zwłaszcza drobno uziarnione – proszki pochłaniają około 5% produkowanej w świecie energii elektrycznej. Masa materiałów uziarnionych wytwarzanych w świecie w ciągu jednego roku osiąga kilkadziesiąt miliardów Mg.

Podstawowy podział procesów rozdrabniania zawarto w wycofanej bez zastąpienia normie PN-72/C-47270. Norma ta dzieli procesy rozdrabniania na procesy kruszenia i mielenia. Jako umowne kryterium podziału tego procesu norma określa udział klas ziarnowych poniżej i powyżej 1 mm. Według normy, jeśli produkt rozdrabniania zawiera poniżej 50% klasy 0÷1 mm, to pochodzi z procesu kruszenia, a jeśli powyżej 50% z procesu mielenia.

Podział ten jest bardzo ogólny i dotyczy rozdrabniania maszynowego zbiorów ziaren. Dlatego w literaturze podawane bardziej szczegółowe podziały [1, 2, 3, 4, 11, 12], które wynikają z rozwoju technologii rozdrabniania oraz postępu w dziedzinie procesów i maszyn rozdrabniających. Pewnym

mankamentem tych podziałów jest uwzględnianie często tylko uziarnienia produktu rozdrabniania, lub stopnia rozdrabniania, a pominięcie uziarnienia nadawy.

Ponadto w literaturze związanej z technologiami rozdrabniania stosowanymi w poszczególnych branżach: kruszyw, rud, węgla, surowców ceramicznych, chemicznych farmaceutycznych występuje szereg innych różniących się wzajemnie podziałów procesów rozdrabniania – kruszenia i mielenia. Zróżnicowane klasyfikacje procesów rozdrabniania znajdują się również w literaturze dotyczącej elementarnych procesów rozdrabniania, które zawężają je do relacji geometrycznych pojedynczych ziaren materiałów kruchych [1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14].

Dlatego mając na względzie aktualny stan wiedzy i technologii rozdrabniania – umowny podział procesów rozdrabniania podano w tabeli 2.1. Podział ten uwzględnia uziarnienie nadawy i produktu rozdrabniania oraz procesy zachodzące w współczesnych kruszarkach i młynach użytkowanych w technologiach rozdrabniania we wszystkich branżach, a także w praktyce laboratoryjnej.

Klasyfikacja procesów rozdrabniania

Tabela 2.1.

Rodzaj procesu rozdrabniania		Maksymalne wymiary ziaren	
Kruszenie	Jednostki	Nadawa [mm]	Produkt [mm]
	Grube	300÷2 000	100÷350
	Średnie	100÷350	50÷100
	Drobne	50÷100	5÷20
	Bardzo drobne	10÷50	2÷5
Mielenie	Jednostki	Nadawa [mm]	Produkt [μm]
	Grube	80÷500	200÷800
	Średnie	40÷60	50÷500
	Drobne	10÷40	20÷100
	Bardzo drobne	1÷10	5÷10
	Koloidalne	0,5÷2	0,5÷5,0
	O skali nano	0,01÷0,1	0,050÷0,200

Rozdrabniane materiały ze względu na ich podstawowe własności fizyczne można podzielić na dwa zbiory, czyli materiały kruche oraz niekruche, zwane niekiedy plastycznymi. Dominującym zbiorem, ze względu na udział masowy, jest zbiór materiałów kruchych, czyli materiałów, których wytrzymałość na

rozciąganie jest mniejsza od 0,125 wytrzymałości na ściskanie. Materiałami kruchymi są surowce mineralne - do produkcji spoiw mineralnych, nawozów, ceramiki, produktów chemicznych, farmaceutycznych, spożywczych, kruszywa, węgle, rudy, materiały syntetyczne (klinkiery, betony, materiały ceramiczne, szkła, niektóre stopy metali i materiały kompozytowe), które rozdrabniane są w procesach rozdrabniania skrępowanego (w procesach kruszenia) i swobodnego (w procesach mielenia).

Zbiór materiałów niekruchych o bardzo zróżnicowanych własnościach fizycznych obejmuje materiały plastyczne, sprężyste, włókniste, metale, stopy metali, gumy, polimery, materiały celulozowe, biomasy oraz szeroką gamę materiałów kompozytowych. Materiały te rozdrabniane są głównie przez proces ścinania skrępowanego lub swobodnego.

W tabeli 2.2 zamieszczono ogólny podział rozdrabnianych surowców i materiałów syntetycznych, a w tabeli 2.3 sposoby ich rozdrabniania. W klasyfikacji jako podstawowe kryteria materiałowe określające rozdrabniany materiał przyjęto: twardość w skali Mohsa i wytrzymałość na ściskanie.

Podstawowa klasyfikacja rozdrabnianych materiałów [1, 2, 15]

Tabela 2.2.

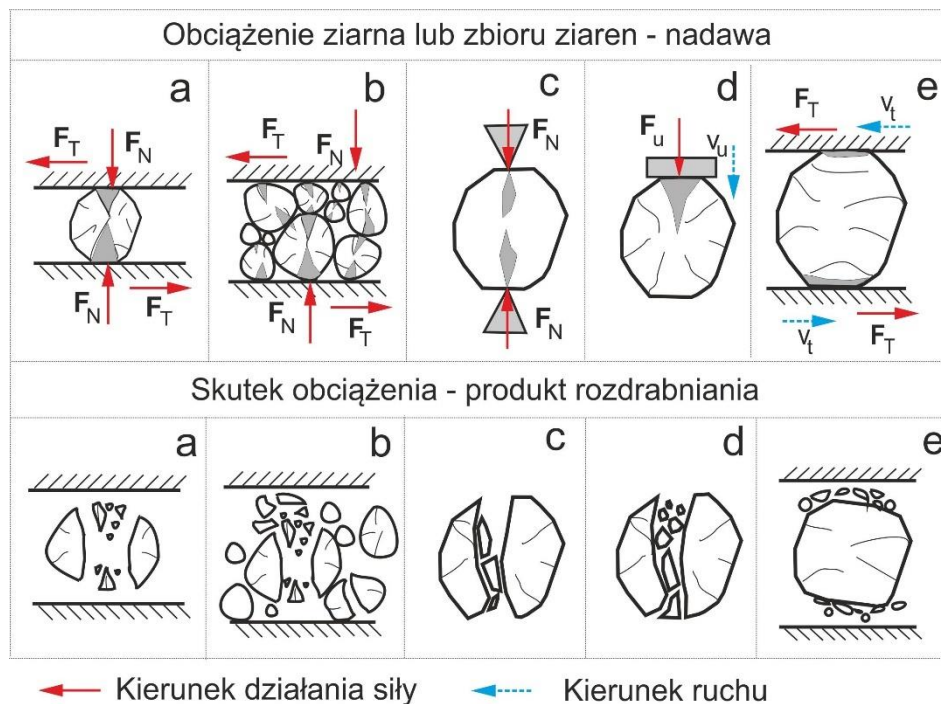
Rodzaj rozdrabnianego materiału	Podstawowe własności fizyczne	
	Twardość w skali Mohsa	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
Twardy, mocny - T	6 ÷ 10	200 ÷ 500
Średnio-twardy, średni - S	2 ÷ 5	100 ÷ 250
Miękki, słaby - M	1 ÷ 2	10 ÷ 100

Przy doborze maszyny rozdrabniającej uwzględnia się jeszcze ważną własność fizyczną rozdrabnianego materiału, czyli zdolności ścierające, które w znaczącej części surowców mineralnych wiążą się z ilością krzemionki.

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.



Rys. 2.1. Podstawowe – uproszczone przypadki rozdrabniania mechanicznego: a - quasi statyczne rozdrabnianie pojedynczego ziarna, b - quasi statyczne rozdrabnianie zbioru ziaren, c - quasi statyczne rozdrabnianie pojedynczego ziarna klinami, d - dynamiczne rozdrabnianie pojedynczego ziarna elementem roboczym poruszającym się z dużą prędkością, e - rozdrabnianie ziarna przez ścieranie, F_N - siła normalna, F_T - siła tarcia (styczna), F_u - siła uderzenia, v_u - kierunek prędkości uderzenia, v_t - kierunek prędkości siły tarcia

2.2. Własności uziarnionych materiałów rozdrabnianych

Dla potrzeb procesów rozdrabniania, a także zastosowania produktów rozdrabniania niezbędna jest znajomość podstawowych własności fizycznych, zwanych też własnościami fizyko-mechanicznymi materiałów, którymi są:

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

Materiał uziarniony tworzy zbiór ziaren. Budową elementów tego zbioru, czyli pojedynczych ziaren, a także ich zbiorów zajmuje się nauka zwana mikromerytyką. Nauka ta obejmuje wszystkie zagadnienia związane z ich kształtem geometrycznym, powierzchnią, formą, strukturą pojedynczych ziaren oraz składami (ilościowym i masowym), parametrami tych składów, składem mineralogicznym i chemicznym, korzystając z osiągnięć innych nauk to jest: mineralogii, chemii, inżynierii materiałowej i innych. Dotyczy to w szczególności ziaren wytwarzanych w procesach kruszenia i mielenia, a także w innych procesach np. klasyfikacji ziarnowej.

Podstawowe rodzaje ziaren materiałów naturalnych i syntetycznych w inżynierii mineralnej, ceramicznej, chemicznej i innych [15, 16, 17, 18, 19] to:

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

W innych specjalistycznych inżynieriach (chemicznej, mineralnej, farmaceutycznej, metalurgii proszków, ochrony środowiska - oczyszczania

gazów i cieczy z pyłów, przemyśle kosmetycznym i technologiach branży spożywczej) funkcjonują inne nazewnictwa.

Rozdrabnianie w nich materiały są zróżnicowane fizycznie i występują jako materiał:

- krystaliczny o wymiarach kryształów wielokrotnie większych od wymiarów ziaren produktu rozdrabniania,
- krystaliczny – w postaci ziaren będących agregatami kryształów tego samego materiału o wymiarach niewiele większych lub mniejszych od produktu rozdrabniania, czyli w postaci agregatów jednofazowych,
- polikrystaliczny – utworzony z ziaren będących agregatami kryształów różnych materiałów, o wymiarach większych lub mniejszych od produktu rozdrabniania, czyli agregatów wielofazowych,
- bezpostaciowy – amorficzny, jednofazowy,
- bezpostaciowy – amorficzny, wielofazowy, utworzony z dwóch lub więcej materiałów o zróżnicowanych właściwościach; mogą nim być amorficzne materiały ceramiczne,
- stop metaliczny lub metaloceramiczny,
- plastyczny – ale przyjmujący postać materiału kruchego wskutek działania dodatkowego czynnika zewnętrznego, na przykład niskiej temperatury.

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 i innych zastosowaniach drobno uziarnionych materiałów (proszków) stosowanych w rozdrabnianiu surowców mineralnych i materiałów syntetycznych stosuje się jeszcze inne kryteria rozdziału związane z własnościami [10, 15, 16, 19] 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 (bezcisnieniowa 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.

Dla celów technologicznych związanych z zastosowaniem materiałów uziarnionych, w tym proszków, a także wszystkich zagadnień związanych z ich wytwarzaniem i przyszłym zastosowaniem, porównuje się je oraz ocenia ich jakość przez wskaźniki porównawcze. 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 [50, 67, 80, 90, 97, 99] 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 tabeli 2.3 podano podstawowy podział głównych kryteriów rozdrabnianych – kruszonych materiałów [20]. Tabela 2.4 zawiera podział materiałów ze względu na wskaźnik abrazyjności – ścieralności oraz indeks ścieralności [20].

Podział podstawowych parametrów rozdrabnianych materiałów ze względu na podatność na kruszenie [20]

Tabela 2.3.

Rodzaj materiału	Indeks Bonda WI, [kWh/Mg]	Kruszalność [%]	Ścieralność, Los Angeles
Bardzo łatwy	0÷7	powyżej 50	powyżej 27
Łatwy	7÷10	40÷50	22÷27
Średni	10÷14	30÷40	17÷22
Trudny	14÷18	20÷30	12÷17
Bardzo trudny	poniżej 18	poniżej 20	poniżej 12

Podział podstawowych parametrów kruszonych materiałów ze względu wskaźniki ścieralności (*French Abrasion Index*) oraz (*Abrasion Index*) [20]

Tabela 2.4.

Rodzaj materiału	Wskaźnik ścieralności [g/Mg]	Wskaźnik abrazyjności
Nieścierające	0÷100	Poniżej 0,1
Słabo ścierające	100÷600	0,1÷0,4
Średnio ścierające	600÷1200	0,4÷0,6
Ścierające	1200÷1700	0,6÷0,8
Silnie ścierające	Powyżej 1700	Powyżej 0,8

Wartości indeksu Bonda dla rozdrabniania uderowego (*Impact Work Index*) oraz wskaźnika ścieralności (*Abrasion Index*) typowych materiałów podano w tabeli 2.5 [21].

Zestawienie wybranych podstawowych parametrów materiałów kruszonych [21]

Tabela 2.5.

Material	Udarowy Indeks Bonda WI [kW/Mg]	Ścieralność AI
Bazalt	18,1 ± 3,6	0,200 ± 0,20
Diabaz	17,2 ± 3,6	0,300 ± 0,10
Dolomit	10,9 ± 2,7	0,010 ± 0,050
Ruda żelaza, hematyt	11,8 ± 7,2	0,500 ± 0,30
Ruda żelaza, magnetyt	10,9 ± 7,2	0,200 ± 0,10
Gabro	18,1 ± 2,7	0,400 ± 0,10
Gnejs	14,5 ± 3,6	0,500 ± 0,10
Granit	14,5 ± 5,4	0,550 ± 0,10
Wapień	10,9 ± 3,7	0,001 ± 0,03
Kwarcyt	14,5 ± 2,7	0,750 ± 0,10
Porfir	16,3 ± 2,7	0,100 ± 0,90
Piasek kwarcowy	9,1 ± 2,7	0,600 ± 0,20
Sjenit	17,2 ± 3,6	0,400 ± 0,10

W tabeli 2.6 [22, 23] podano podstawowe własności rozdrabnianych popularnych surowców naturalnych. W tabeli 2.7 wartości indeksów Bonda WI wyznaczone przy rozdrabnianiu – mieleniu na sucho oraz na mokro oraz gęstości materiałów - pochodzące ze źródła amerykańskiego [24], a w tabeli 2.8 wartości WI, gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie wybranych materiałów wyznaczone przy rozdrabnianiu – mieleniu na sucho w Japonii [25].

Podstawowe własności mechaniczne niektórych surowców skalnych [22, 23]

Tabela 2.6.

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	Wytrzymałości [MPa] na				Moduł Younga <i>E</i> [MPa]
		ściskanie <i>R_c</i>	zginanie, <i>R_g</i>	ścieranie <i>R_t</i>	Udar, <i>R_u</i>	
Marmur	2690	55÷50	21,8	0,145	6,66	56500
Wapień średni	2630	40÷100	18,9	0,124	5,24	35000
Granit	2680	120÷160	22,8	0,015	6,57	51 500÷61 400
Kwarc	2640	80÷145	--	0,018	11,7	130÷190 [GPa] [23]
Piaskowiec	2280	50÷100	--	0,3	1,3	34 000÷50 000
Diabaz	3080	150÷250	30,0	0,029	36,0	61 200÷69 000

Wartości wskaźnika – Indeksu Bonda *WI* oraz gęstości typowych materiałów [24]

Tabela 2.7.

Materiał	Gęstość [kg/m ³]	<i>WI</i> przy rozdrabnianiu na mokro [kWh/Mg]	<i>WI</i> przy rozdrabnianiu na sucho [kWh/Mg]
Andezyt	2840	22,1	29,7
Baryt,	4280	6,3	8,4
Bazalt	2890	20,4	27,4
Boksyt	2380	9,4	12,7
Cegła	2590	15,5	20,8
Cyjanit	3230	18,9	25,3
Pumeks, naturalny	1960	11,9	16,0
Dioryt	2780	19,4	26,0
Dolomit	2820	11,3	15,2
Flint	2650	26,2	35,1
Fluoryt	2980	9,8	13,1
Gabro	2830	18,4	24,7
Gips	2690	8,2	10,9
Gnejs	2710	20,1	27,0
Gлина	2230	7,1	9,5
Gлина palona	2320	1,4	1,9
Granat	3300	12,4	16,6
Granit	2680	14,4	19,3
Grafit	1750	45,0	60,3
Kamień wapienny	2690	11,6	15,6
Kamień wapienny – surowiec cementowy	2680	10,2	13,6

cd. Tabeli 2.7.

Material	Gęstość [kg/m ³]	WI przy rozdrabnianiu na mokro [kWh/Mg]	WI przy rozdrabnianiu na sucho [kWh/Mg]
Klinkier portlandzki	3090	13,5	18,1
Koks	1510	20,7	27,8
Korund	3480	58,2	78,0
Krzemian sodowy	2100	13,0	17,4
Krzemionka	2710	13,5	18,1
Kwarc	2640	12,8	17,1
Kwarcyt	2710	12,2	16,3
Łupek	2580	16,4	22,0
Łupek ilasty	1760	18,1	24,3
Magnezyt, wypalony	5220	16,8	22,5
Molibden	2700	13,0	17,4
Mika	2890	134,5	180,2
Nawóz fosforanowy	2650	13,0	17,5
Piaskowiec	2680	11,5	15,4
Piryt	3480	8,9	11,9
Pirotyn	4040	9,6	12,8
Potaż	2370	8,9	11,9
Ruda chromu	4060	9,6	12,9
Ruda cynku	3680	12,4	16,6
Ruda cyny	3940	10,8	14,5
Ruda miedzi	3020	13,1	17,6
Ruda niklu	3320	11,9	15,9
Ruda ołowiu, galena	5390	10,2	13,7
Ruda ołowiu	3370	11,4	15,2
Ruda srebra	2720	17,3	23,2
Ruda złota	2860	14,8	19,9
Rudy żelaza	3960	15,4	20,7
syderyt	3320	11,3	15,2
hematyt lustrzany	3290	15,4	20,6
hematyt	3760	12,7	17,0
magnetyt	3880	10,2	13,7
Ruda tytanu - ilmenit	4270	13,1	17,6
Ruda tytanu	4230	11,9	15,9
Ruda uranu	2700	17,9	24,0

cd. Tabeli 2.7.

Material	Gęstość [kg/m ³]	WI przy rozdrabnianiu na mokro [kWh/Mg]	WI przy rozdrabnianiu na sucho [kWh/Mg]
Rutyl	2840	12,1	16,3
Sjenit	2730	14,9	20,0
Skaleń	2590	11,7	15,6
Skala fosforanowa	2660	10,1	13,6
Skala	2860	21,1	28,3
Szkło	2580	3,1	4,1
Węglik krzemu	2730	26,2	35,1
Żelazochrom	6750	8,9	11,9
Żelazomangan	5910	7,8	10,4
Żelazokrzem	4910	12,8	17,2
Żużel	2930	15,8	21,1
Żużel wielkopiecowy	2390	12,2	16,3
Żwir	2700	25,2	33,7

Indeksy Bonda WI, gęstości oraz wytrzymałości na ściskanie wybranych materiałów [25]

Tabela 2.8.

Material	Indeks Bonda WI [kWh/t]	Gęstość [kg/dm ³]	Wytrzymałość na ściskanie R _c [MPa]
Andezyt	18,25	2,84	160
Gлина	6,30	2,51	4
Węgiel	13,00	1,40	40
Dolomit	11,27	2,74	115
Gabro	18,45	2,33	145
Granit	15,13	2,66	140
Gneis	20,13	2,71	125
Grafit	43,56	1,75	75
Gips skała	66,73	2,69	5
Wapień	12,74	2,66	90
Marmur	10,00	2,65	115
Piskowiec	14,80	2,60	85
Serpentynit	12,10	2,83	145
Talk	7,80	2,83	75
Cyrkon-piasek	129,00	4,70	780
Gips*	6,30	2,30	35
Szkło kwarcowe*	14,80	2,20	430

cd. Tabeli 2.8.

Material	Indeks Bonda WI [kWh/t]	Gęstość [kg/dm ³]	Wytrzymałość na ściskanie Rc [MPa]
Szkło borowo-krzemowe*	15,20	2,33	210
Kwarc*	13,30	2,62	102
Skaleń*	12,40	2,55	140
Wapień*	9,40	2,70	63
Marmur*	6,70	2,70	56

* - zmierzone przez Yashimę

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 [26], który najczęściej wyznacza w swoim firmowym laboratorium w standardowym młynie Bonda. Natomiast w projektowaniu młynów do mielenia węgla, a także innych materiałów, w szczególności mieszanek węglowych i paliw pochodzenia roślinnego [27] stosowany jest wskaźnik Hardgrove'a HGI [26, 28], który dla konkretnego materiału firmy wyznaczają w znormalizowanym aparacie Hardgrove'a. W Polsce metoda oznaczania wskaźnika Hardgrove'a jest przedmiotem normy PN-ISO 5074:2002 "Węgiel kamienny – Oznaczanie wskaźnika podatności przemiałowej Hardgrove'a".

W 1998 w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie opracowano oryginalny aparat umożliwiający oznaczanie podatności na mielenie materiałów standardową metodą Hardgrove'a: czyli masy próbki 50 g oraz powiększonej do 200 g – przy dwóch układach rozdrabniania, czyli kulami o dwukrotnie większej średnicy oraz układem rolek toroidalnych [29] (rys. 2.2). Aparat wyposażono w dwie misy pomiarowe: standardową aparatu Hardgrove'a o średnicy podziałowej 76,2 mm - przystosowaną do kul o średnicy 25,4 mm oraz powiększoną o średnicy podziałowej 165 mm przystosowaną do kul o średnicy 50 mm oraz do układu trzech toroidalnych rolek o średnicy zewnętrznej 150 mm i szerokości 50 mm. Zwiększona masa próbki znacząco zmniejsza błąd pomiaru, a układ rolek toroidalnych czyni proces rozdrabniania w tym aparacie zbliżony do procesu zachodzącego w młynach rolowo-misowych, coraz częściej stosowanych w energetyce oraz przemyśle spoiw mineralnych. Oryginalny aparat (rys. 2.2) - wykonany wg projektu J. Sidora [29] wyposażony jest w dwa układy docisku kul - grawitacyjny - przy aparacie w wersji Hardgrove'a oraz hydrauliczny w wersji z powiększoną misą,

aparaturę pomiarową do pomiaru i rejestracji siły docisku, aparaturę do pomiaru pobieranej mocy oraz układ do bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej misy. Dodatkowy układ hydrauliczny ułatwia obsługę aparatu, ponieważ służy do podnoszenia zespołu docisku w górne położenie [29].



A



b



c

Rys. 2.2. Aparat AGH do oznaczania wskaźnika wg PN-ISO 5074:2002 oraz w wersji z czterokrotnie powiększoną masą próbki układami kul i rolek: a - widok aparatu, b - misa powiększona z układem kul, c - układ rolek i misa standardowa [29] (Fot. J. Sidor)

W niewielu przypadkach w projektowaniu młynów, niektóre firmy niemieckie używają jeszcze innych wskaźników podatności na mielenie. Są to wskaźniki wyznaczone metodami Zeisela i Schillera [30, 31].

W polskiej literaturze funkcjonują oryginalne dwie metody oznaczania energii jednostkowej rozdrabnianych materiałów [32]. Są to: wyznaczenie energii jednostkowej przez quasi-statyczne skrępowane ściskanie oraz dynamiczne, swobodne rozdrabnianie uderowe przy prędkości 50 m/s. Praca [32] zawiera wartości tego wskaźnika wyznaczonego tymi metodami dla wybranych dziesięciu polskich surowców mineralnych.

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.

2.3. Wymagania technologiczne produktów rozdrabniania

Wymagania technologiczne stawiane produktom rozdrabniania uwarunkowane są rodzajem procesu rozdrabniania (kruszenie, czy mielenie), a w szczególności ich konkretnym zastosowaniem.

Produkty kruszenia mogą mieć trzy główne zastosowania, jako:

- kruszywa – do budowy dróg, konstrukcji inżynierskich,
- komponenty do innych procesów technologicznych,
- nadawa do procesu mielenia.

Podział, zastosowanie oraz podstawowe wymagania jakościowe kruszyw podano w pracy [33], w pracy [34] podano metodę oceny jakości kruszywa ze względu na kształt ziaren, a w opracowaniu [35] klasyfikację kruszyw pod względem pochodzenia, uziarnienia oraz zastosowania. Zastosowanie

produktów kruszenia jako surowców lub komponentów w innych technologiach, wymaga spełnienia przez nie wymagań charakterystycznych dla konkretnej technologii.

W przypadku zastosowania produktu kruszenia jako nadawy do procesu mielenia w większości przypadków kształt ziaren nie ma szczególnego znaczenia, a najczęściej wymagane jest jak najdrobniejsze uziarnienie materiału uwarunkowane rodzajem użytego do procesu mielenia młyna. Do najbardziej popularnych młynów, czyli młynów grawitacyjnych – kulowych i prętowych maksymalny wymiar ziaren nadawy mieści się w zakresie $10 \div 50$ mm, a najkorzystniejsze uziarnienie to klasa $0 \div 10$ mm. Do młynów autogenicznych i semiautogenicznych maksymalny wymiar ziaren mieści się w zakresie $200 \div 500$ mm.

Nadawa do młynów tocznych – rolowo-misowych powinna posiadać uziarnienie $0 \div 80$ mm – przy największych młynach oraz $0 \div 40$ mm – przy najmniejszych i powinna zawierać około 20% ziaren o „najgrubszym” uziarnieniu. Uziarnienie nadawy do młynów wibracyjnych i uderowych uwarunkowane jest wymaganiami uziarnienia produktu mielenia i wynosi $0 \div 40$ mm przy mieleniu drobnym, $0 \div 10$ mm przy mieleniu bardzo drobnym oraz $0 \div 2$ mm przy mieleniu koloidalnym. Uziarnienie nadawy do młynów mieszadłowych i strumieniowych wynosi najczęściej $0 \div 2$ 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 $75 \mu\text{m}$, rud cynku - poniżej $10 \mu\text{m}$, rud innych metali: $d_{90} = 20 \mu\text{m}$, surowców do produkcji cementu poniżej $90 \mu\text{m}$, 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 $d_{50} = 3 \div 10 \mu\text{m}$, wysokiej jakości granulowanych nawozów mineralnych udział klasy $0 \div 10 \mu\text{m}$ powyżej 70%.

W niektórych technologiach mielenia opracowanych przez J. Sidora [36] produkty mielenia miały następujące uziarnienie:

- tlenek glinu do produkcji lamp sodowych d_{90} poniżej $8 \mu\text{m}$,

- SiC – komponent do ceramiki specjalnej: klasa $0\div 0,2\ \mu\text{m}$ minimum 95%, udział klasy powyżej $1\ \mu\text{m}$ maksimum 1,5%,
- dolomit specjalny udział klasy ziarnowej $0\div 40\ \mu\text{m}$ minimum 95%,
- proszek standardowy hydroksyapatytu: udział klasy ziarnowej $0\div 63\ \mu\text{m}$, minimum 98%, proszek hydroksyapatytu do nakładania elektroforetycznego wymiar ziarna d_{50} mniejszy od $0,6\ \mu\text{m}$,
- proszek węgla tytanowo-krzemowego - komponent do ceramiki specjalnej: wymiar ziarna $d_{90} = 18,5\pm 0,5\ \mu\text{m}$ oraz $d_{50} = 4,0\pm 0,2\ \mu\text{m}$,
- proszek tlenku chromu: udział klasy $0\div 63\ \mu\text{m}$ powinien wynosić maksimum 0,05%,
- cementy glinowe, palonka i tworzywo glinowo-cykonowe: powierzchnia właściwa oznaczona aparatem Blaine'a, powinna być powyżej $400\ \text{m}^2/\text{kg}$.

Do oznaczania uziarnienia zmielonych poniżej $100\ \mu\text{m}$ materiałów stosuje się szereg metod analitycznych. Są to metody: przesiewanie na mokro, przesiewanie na sucho z wspomaganie pneumatycznym, dyfraktometryczna (dyfrakcji laserowej), sedymentacyjna (w polu grawitacyjnym oraz w polu siły odśrodkowej), konduktometryczna, mikroskopowa (mikroskop optyczny, skaningowy), rozpraszania promieniowania podczerwonego i wiele innych.

Do oznaczania syntetycznego wskaźnika uziarnienia – powierzchni właściwej stosuje się w zależności od jej rodzaju: metody adsorpcyjne – przy statycznej powierzchni właściwej oraz permeabilimetrię - przy kinetycznej powierzchni właściwej.

2.4. Charakterystyka i wskaźniki technologiczne maszyn rozdrabniających

Podstawowe kryteria zastosowania odpowiedniego procesu technologicznego z odpowiednią maszyną (maszynami) rozdrabniającą, jej układem technologicznym do rozdrabniania konkretnego materiału to:

- 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,

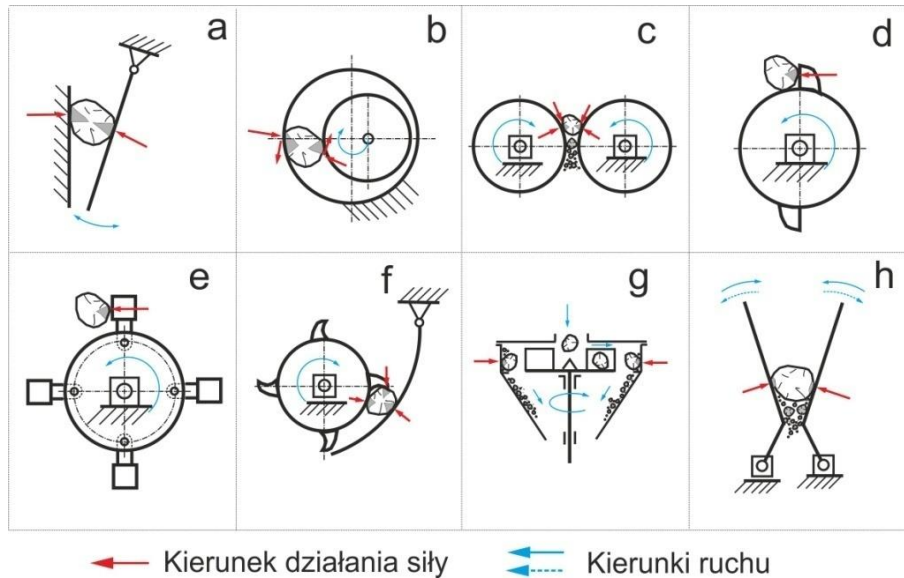
- wydajność – zmianowa, dobową, miesięczną, roczną, przy czym wydajność powinna być sprecyzowana dla określonych wymagań technologicznych produktu rozdrabniania i definiowana jest w kontraktach jako wydajność gwarantowana,
- podstawowe wyposażenie technologiczne i pomocnicze układu oraz liczba maszyn 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.

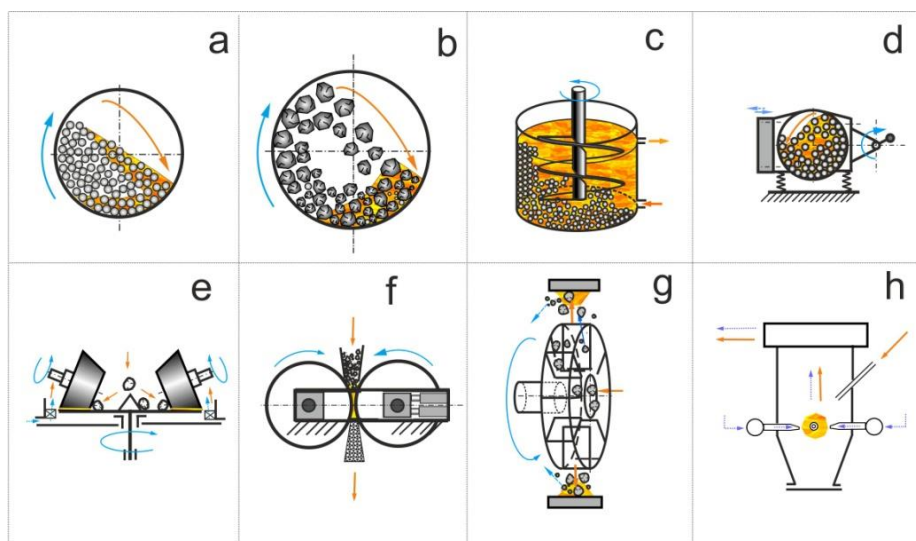
Na rysunku 2.3 przedstawiono schematy budowy i działania maszyn stosowanych w rozdrabnianiu – kruszeniu materiałów kruchych z uwzględnieniem budowy ich elementów roboczych i strefy rozdrabniania.

Na rysunku 2.4 przedstawiono schematy działania i elementy budowy najczęściej stosowanych młynów - o wydajności powyżej 5 Mg/h.



Rys. 2.3. Sposoby rozdrabniania maszynowego w kruszarkach: a - szczękowej, b - stożkowej, c - walcowej z walcami gładkimi, d - bijakowej (listwowej), e - młotkowej, f - walcowo-szczękowej, g - odśrodkowej, h - wibracyjnej szczękowej

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 tabeli 2.9 przedstawiono ogólne przesłanki doboru rodzaju dominującego mechanizmu rozdrabniania do własności fizycznych rozdrabnianego materiału.



Ruch: elementów młyna, materiału, powietrza, strefa mielenia

Rys. 2.4. Sposoby rozdrabniania – mielenia w młynach: a - grawitacyjnych (kulowych, prętowych), b - grawitacyjnych (AG, SAG), c - mieszadłowych, d - wibracyjnych, e - rolowo-misowych, f - walcowych wysokociśnieniowych, g - udarowych - wentylatorowych, h - strumieniowych (strumieniowo-złożowych)

Rodzaje obciążeń w rozdrabnianiu poszczególnych rodzajów materiałów [37]

Tabela 2.9.

Rodzaj materiału	Rodzaj oddziaływania rozdrabniającego				
	Nacisk	UE	UZ	Tarcie	Cięcie
Twardy	■	■	▼	O	O
Średnio-twardy	■	■	■	▼	O
Miękki	▼	▼	■	■	■

UE – uderzanie elementu roboczego (bijaki, młotka) w ziarno,

UZ – uderzenie poruszającego się ziarna w nieruchomy element roboczy,

■ – zalecany, ▼ – ograniczony, O – nieodpowiedni

Zastosowanie kruszarek w rozdrabnianiu poszczególnych rodzajów materiałów kruchych zamieszczono w tabeli 2.10, a młynów w tabeli 2.11.

Stosowalność i zakresy podstawowych parametrów współczesnych kruszarek

Tabela 2.10.

Rodzaj kruszarki	Material			Wymiar ziaren nadawy [mm]	Stopień rozdrobnienia [-]	Wydajność [Mg/h]
	T	S	M			
Szczękowa	■	■	O	150÷2000	3÷7	80÷2400
Stożkowa	■	■	■	25÷1800	10÷30	100÷10300
Walcowa uzębiona	▼	■	■	150÷1500	5÷10	80÷4000
Walcowa walce gładkie	▼	■	■	10÷600	4÷6	100÷1000
Walcowo-szczękowa	▼	■	■	150÷1000	3÷7	80÷6500
Młotkowa	O	■	■	50÷2400	10÷30	100÷2800
Bijakowa	▼	■	■	80÷1500	15÷50	100÷1200
Odśrodkowa	▼	■	■	40÷300	8÷12	100÷900

T – materiał twardy, S – materiał średnio-twardy, M – materiał miękki

■ – zalecany, ▼ – ograniczony, O – nieodpowiedni

Stosowalność i zakresy podstawowych parametrów współczesnych młynów

Tabela 2.11.

Rodzaj młyna	Material			Wymiar ziaren nadawy [mm]	Stopień rozdrobnienia [-]	Wydajność [Mg/h]
	T	S	M			
Kulowy, prętowy	■	■	■	10÷100	500÷1000	80÷400
AG i SAG	■	■	■	100÷500	50÷100	150÷700
Rolowo-misowy	▼	■	■	30÷120	100÷600	50÷1250
Walcowy wysokociśnien.	▼	■	■	5÷30	20÷100	80÷4200
Mieszadłowy	▼	■	■	0,1÷5	50÷200	10÷300
Wibracyjny	■	■	■	1÷40	100÷1200	5÷60
Planetarny	■	■	■	5÷40	50÷300	5÷30
Wentylatorowy	O	■	■	5÷60	20÷100	20÷130
Udarowy - bijakowy	O	■	■	1÷50	30÷500	20÷250
Udarowy - młotkowy	O	■	■	1÷50	20÷40	10÷200
Udarowy - odśrodkowy	O	■	■	1÷50	10÷30	5÷300
Strumieniowy klasyczny	O	■	■	0,1÷2	25÷100	1÷30
Strumieniowo-złożowy	▼	■	■	0,1÷3	25÷100	1÷30

T – materiał twardy, S – materiał średnio-twardy, M – materiał miękki

■ – zalecany, ▼ – ograniczony, O – nieodpowiedni

Podane w tabelach 2.10 oraz 2.11 zastosowania maszyn uwzględniają tylko główne kryterium stosowania maszyn rozdrabniających, którym jest

twardość rozdrabnianego materiału. 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 [38]. 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 (krusząca, 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

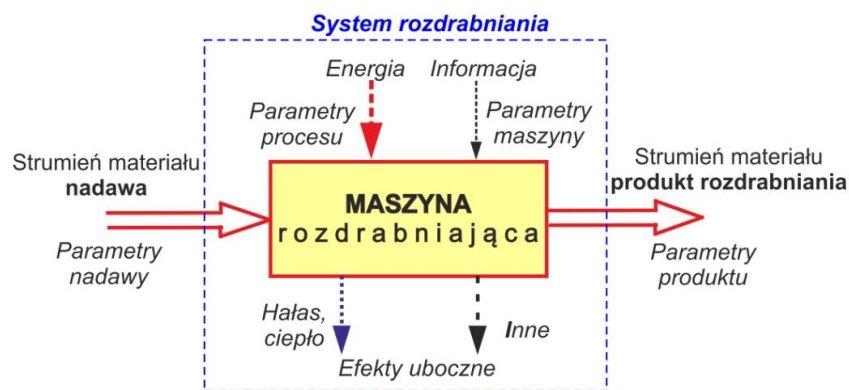
monitorująca parametry pracy kruszarki i urządzeń pomocniczych. Większość kruszarek użytkowana jest w instalacjach pracujących w cyklu otwartym, to znaczy bez klasyfikatora ziarnowego i zawrotu nadziarna. W przypadku nielicznych układów kruszenia pracujących w cyklu zamkniętym funkcję klasyfikatora ziarnowego 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 przypadku eksploatacji młyna w cyklu otwartym zarówno przy mieleniu na sucho, jak i na mokro w układzie mielenia nie występuje klasyfikator ziarnowy, dzięki czemu budowa układu mielenia jest mniej skomplikowana, ale tego rodzaju układ charakteryzują znacznie mniejsze możliwości technologiczne oraz większa wrażliwość na zmiany parametrów technologicznych nadawy.

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 2.5 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).



Rys. 2.5. Model systemu rozdrabniania typu „czarna skrzynka”

2.5. Klasyfikacja i zastosowanie kruszarek

Główny podział kruszarek związany jest z kryterium rodzaju obciążeń przekazywanych na ziarna materiału, powodujących ich rozdrobnienie. W rozdrabnianiu mechanicznym wyróżnić można następujące przypadki rozdrabniania (rys. 2.3):

- quasi statyczne zgniatanie swobodnych ziaren materiału pomiędzy dwoma elementami roboczymi (o niewielkiej prędkości, z częstotliwością rzędu $3 \div 7$ Hz) całych ziaren materiału oraz ich mniejszych kawałków, które występują w kruszarkach szczękowych i stożkowych (wielokrotnie) oraz w kruszarkach walcowych (jednokrotnie),
- quasi statyczne zgniatanie ziaren materiału skrępowanych w złożu pomiędzy dwoma walcami zachodzące z dużymi naciskami oraz z niewielką prędkością $0.5 \div 1,5$ m/s przemieszczanych pomiędzy walcami - co zachodzi w młynach (prasach) walcowych,
- dynamiczne rozbijanie całych ziaren oraz ich mniejszych kawałków przez młotki listwy, pręty z prędkością $20 \div 40$ m/s i dochodzącą nawet do 100 m/s – co zachodzi w kruszarkach młotkowych, odrzutowych i prętowych,
- dynamiczne rozbijanie całych ziaren oraz ich mniejszych kawałków rozpędzonych do prędkości powyżej 40 m/s i dochodzącej nawet do 100 m/s - o nieruchome elementy robocze (kowadła), lub złożę utworzone z rozdrabnianego materiału - co zachodzi w kruszarkach odśrodkowych,
- dynamiczne rozbijanie całych ziaren oraz ich mniejszych kawałków rozpędzonych do prędkości od 5 m/s i dochodzącej nawet do 12 m/s na

- ruchomym złożu utworzonym z rozdrabnianego materiału - co zachodzi w młynach autogenicznych AG i semiautogenicznych SAG, przy czym w młynach semiautogenicznych wspomagane jest działaniem niewielkiej ilości (do 10% masowo) swobodnych młynników - kul,
- dynamiczne "obkruszanie" ("okruszanie") ziaren grubych z zewnątrz na znacznie mniejsze kawałki wskutek dynamicznego oddziaływania o dużej częstotliwości rzędu 17-30 Hz - co zachodzi w kruszarkach wibracyjnych.

Klasyfikacje starszych kruszarek, często jeszcze używanych w przemyśle podano w pracach [1, 2, 3, 14, 22, 24, 39, 40, 41]. Klasyfikacje te zawierały aktualne wówczas produkowane maszyny. Natomiast w tabeli 2.12 zamieszczono uaktualniony podział tych maszyn uwzględniający maszyny produkowane obecnie.

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 własnościach 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.

W tabeli 2.12 pominięto kruszarki zwane rozdrabniaczami pracującymi z dominacją ścinania i stosowanymi w rozdrabnianiu tworzyw polimerowych, kompozytowych, biomasy i materiałów włóknistych. Zastosowanie kruszarek w rozdrabnianiu surowców mineralnych podano w pracy [42], a w pracy [43] kryteria doboru tych kruszarek.

Podział i podstawowe zastosowanie kruszarek

Tabela 2.12.

Rodzaj obciążeń	Rodzaj kruszarki	Rodzaj rozdrabnianego materiału
Z dominacją obciążeń wolno zmiennych – quasistatycznych	Szczękowe	Surowce skalne (kamień naturalny miękki, średnio-twardy, twardy, żwiry), rudy, żużle hutnicze, gruz budowlany (cegłany, betonowy). Rzadko: węgiel kamienny, odpady komunalne, ceramiczne, szkło, klinkiery cementowe
	Walcowo-szczękowe	
	Stożkowe	Surowce skalne – jw., klinkiery cementowe, rudy, żużle hutnicze, odpady komunalne twarde, Bardzo rzadko: gruz budowlany
	Walcowe gładkie	Surowce skalne naturalne miękkie, średnio-twarde, rudy miękkie, żużle hutnicze, gruz budowlany (cegła), surowce ilaste. Rzadko: kamień naturalny twardy, żwir, węgiel, klinkier cementowy
	Walcowe uzębione	Surowce skalne naturalne średnio-twarde, twarde (niektóre wersje), rudy żużle hutnicze, gruz budowlany (cegłany). Odpady komunalne (wersje mobilne), SWE, ZSEE, zużyte opony, inne elementy gumowe i AGD
	Prasy walcowe HPGR stosowane również jako młyny	Klinkiery cementowe, surowce skalne, rudy
Z dominacją obciążeń szybkozmiennych dynamicznych	Młotkowe	Surowce naturalne miękkie, średnio-twarde, twarde, węgiel, rudy, żużle hutnicze, asfalt, odpady komunalne, SWE, ZSEE i AGD. Bardzo rzadko: gruz budowlany, żwiry
	Bijakowe (listwowe)	Surowce naturalne, miękkie, średnio-twarde, twarde rudy, żużle hutnicze, węgiel, gruz budowlany, klinkiery cementowe
	Palcowe - trzpieniowe	
	Odśrodkowe autogeniczne	Surowce naturalne, miękkie, średnio-twarde, rudy, żużle hutnicze, węgiel, gruz budowlany, klinkiery cementowe
	Odśrodkowe mechaniczne	Surowce naturalne, średnio-twarde, rudy, żużle hutnicze, węgiel, gruz budowlany
	Wibracyjne: szczękowe, stożkowe, rurowe i inne	Surowce naturalne, średnio-twarde, twarde, rudy, żużle hutnicze, węgiel, gruz budowlany, szkło zbrojone (szczękowe)
Specjalnego przeznaczenia, technologie specjalne	Młotkowe, bijakowe, rozdrabnianie elektrohydrauliczne, mikrofalowe, inne	Surowce naturalne, miękkie, średnio-twarde

SWE – samochody wycofane z eksploatacji po uprzednim przygotowaniu usunięciu płynów eksploatacyjnych, elementów pirotechnicznych, szyb i innych elementów,

ZSEE – zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny – po uprzednim przygotowaniu.

Głównymi producentami kruszarek w Europie są firmy: Metso Minerals (Svedala, Nordberg) – oddział firmy USA w Europie, Sandvik Mining-Construction 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. z o.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. z o.o. i inne.

2.6. Klasyfikacja i zastosowanie młynów

Klasyfikacje starszych typów młynów, przeprowadzonych przy różnego rodzaju kryteriach podziału podano w pracach [1, 2, 3, 19, 24, 37, 38, 39, 40]. Klasyfikacje te, tak jak w przypadku kruszarek, zawierały aktualne wówczas produkowane i eksploatowane młyny. Stąd uwzględniając szybki postęp techniczny w tej dziedzinie zaproponowano nowy podział młynów (tabela 2.13), w którym 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, kulowo-misowymi, 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 [1, 2, 3, 14, 19, 23, 38, 41], a najbardziej silny wzrost ma miejsce przy uziarnieniu poniżej 1 μm , czyli przy wytwarzaniu mikro i nanoproszków [45, 47, 48].

Wzrost jednostkowego poboru energii wynika również ze sposobu przekazywania energii na proces rozdrabniania, który w większości młynów (z mielnikami swobodnymi i strumieniowych), 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. W tabeli 2.13 podano podstawową klasyfikację i zastosowanie najważniejszych pięciu grup młynów. Pierwsza kolumna zawiera sposoby przekazywania energii w poszczególnych rodzajach młynów. W drugiej kolumnie zamieszczono podstawowe rodzaje młynów oraz najczęściej stosowane ich odmiany konstrukcyjne. Trzecia kolumna zawiera zestawienie podstawowych materiałów do mielenia, dla których młyny te są przeznaczone.

W procesach mielenia surowców mineralnych, rud, materiałów syntetycznych (spoiw mineralnych), innych uziarnionych materiałów budowlanych, surowców, półproduktów i uziarnionych produktów ceramicznych, chemicznych, paliw stałych, a także wielu innych materiałów w technologiach o wydajności poniżej 1 Mg/h stosowane są najczęściej młyny z pierwszych siedmiu grup. Trzy ostatnie grupy młynów to młyny o ograniczonym zastosowaniu, często eksperymentalnym, półtechnicznym lub laboratoryjnym.

Dominująca większość producentów kruszarek produkuje również młyny. Jednak producentów młynów stosowanych w poszczególnych inżynieriach jest znacznie więcej niż producentów kruszarek.

Podział i podstawowe zastosowanie młynów

Tabela 2.13.

Rodzaj obciążeń	Rodzaj młyna	Rodzaj rozdrabnianego materiału
Z mielnikami swobodnymi i ruchomą komorą roboczą z przekazywaniem energii przez komorę	Grawitacyjne: bębnowe, kulowe, rurowo-kulowe, prętowe, AG, SAG, sitowe	Surowce skalne, naturalne o twardości całej skali Mohsa, rudy, spoiwa mineralne: cement, wapno, gips, węgle: półprodukty, ceramiczne, chemiczne, nawozy mineralne oraz inne uziarnione surowce, półprodukty i produkty. Mielenie w nich zachodzi na sucho oraz z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności poniżej 8%, lub na mokro.
	Wibracyjne	
	Planetarne	
Z mielnikami swobodnymi i nieruchomą komorą roboczą, z przekazywaniem energii przez wirnik	Mieszadłowe: z komorą pionową, poziomą. Z wirnikiem: trzpieniowym, tarczowym, ślimakowym lub innym	Surowce skalne, naturalne o twardości od 2 do 5,5 w skali Mohsa, rudy, surowce, półprodukty i produkty: ceramiczne, chemiczne (farby lakiery), oraz szereg innych nieplastycznych uziarnionych materiałów. Mielenie w tych młynach zachodzi najczęściej na mokro, rzadko na sucho o wilgotności poniżej 1%.
Z prowadzonymi obrotowymi elementami roboczymi współpracującymi z obracającą się misą i dociskane układem mechanicznym lub hydraulicznym	Toczne: rolowo-misowe, pierścieniowo-kulowe. Z rolkami: stożkowymi, walcowymi, toroidalnymi, półtoroidalnymi, kształtowymi, kulami	Surowce skalne, naturalne o twardości od 2 do 5,5 w skali Mohsa, surowce oraz spoiwa mineralne: cement, wapno, gips, surowce, węgle: kamienny i brunatny, półprodukty, ceramiczne, chemiczne, nawozy mineralne. Mielenie w nich zachodzi tylko na sucho, lub z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności poniżej 15%.
Z obrotowymi elementami roboczymi prowadzonymi po stałym pierścieniu i dociskany siłą odśrodkową.	Wahadłowe, Wahadłowo-odśrodkowe, (toczne). Z rolkami walcowymi	Surowce, półprodukty, ceramiczne, chemiczne, nawozy mineralne 2 do 5,5 w skali Mohsa,. Mielenie w nich zachodzi tylko na sucho, lub z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności poniżej 10%.
Wysokociśnieniowe z rolkami dociskany układem hydraulicznym [44].	HPGR, Beta-Mill, HoroMill, Premill	surowce, spoiwa mineralne półprodukty, ceramiczne, chemiczne, nawozy mineralne 2 do 6 w skali Mohsa. Mielenie w nich zachodzi tylko na sucho, materiałów o wilgotności poniżej 1%.
Udarowe z przekazywaniem energii przez obrotowe elementy robocze rozdrabniające swobodne ziarna materiału [45].	Młotkowe	2 do 3,5 w skali Mohsa, surowce, półprodukty, ceramiczne, chemiczne, spożywcze, nawozy mineralne. Mielenie w nich zachodzi tylko na sucho, lub z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności poniżej 2%.
	Bijakowe	
	Palcowe	
	Kształtowe (palcowe)	
	Wentylatorowe	
	Odśrodkowe i inne	
Strumieniowe z dostarczaniem energii przez gazowe medium robocze [46]	Strumieniowe: Przeciwbieżne, Z płaską komorą, strumieniowo-złożowe, inne.	Surowce, półprodukty, ceramiczne, chemiczne, farmaceutyczne 1 do 7 w skali Mohsa. Mielenie tylko na sucho, lub z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności poniżej 10%.

AG - autogeniczne, SAG - semiautogeniczne

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 [47]. 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 ÷ 100
Młyn bijakowy	25 ÷ 40
Młyn młotkowy	17 ÷ 25
Młyn walcowy	7 ÷ 15
Młyn kulowy	6 ÷ 9
Młyn mieszadłowy	2 ÷ 6
Młyn strumieniowy	1 ÷ 2

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

Literatura

1. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
2. Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie
3. Pasher C.I. Crushing and Grinding Process Handbook Ed. J. Wiley, Chichester 1987
4. Schönert, K., Bruchvorgänge und Mikroprozesse des Zerkleinerns, s. 185, H. Schubert (Ed.) Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik, Wiley-VCH Weinheim 2003
5. Klich A.: Niekonwencjonalne techniki urabiania skał. Wydawnictwo Śląsk Katowice 1998
6. Reś J.: Rozdrabnianie ponadwymiarowych brył metodą elektrohydrauliczną. Rozprawy Monografie 75. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 1998

7. Kobusheshe J.: Microwave Enhanced Processing of Ores. The University of Nottingham June 2010
8. Bela Beke; The Process of Fine Grinding. Martinus Nijhoff /Dr W. Junk Publishers The Hague/Boston/London 1981
9. Preparation of ceramic powders. home.agh.edu.pl/.../TPCP-TPCP_Methods-of-Powder-Preparation.
10. Skotnicowa K., Kursa M., Szurman I.: Powder Metalurgy. VŠB – Technical University of Ostrava 2014
11. Koch R., Noworyta A.: Procesy mechaniczne w inżynierii chemicznej. WNT Warszawa 1995
12. Blaschke J.: Procesy technologiczne w przeróbce kopalin użytecznych. Wydawnictwo AGH. Kraków 1987
13. Mechanical Process Engineering - Particle Technology Comminution Prof. Dr. J. Tomas 15.03.2014, www.mvt.ovgu.de/mvt_media/Vorlesungen/.../Fig_MPE_2.pdf
14. Zawada J.: Wstęp do mechaniki procesów kruszenia, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom 1988
15. Hentzschel W.: Technologie der Bindenbaustoffe, Band 2 Aufbereitungsprozesse und Aufbereitungssysteme, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1980
16. Pampuch R., Haberkow K., Kordek M.: Nauka o procesach ceramicznych, PWN 1992
17. Alex W.: Prinzipien und Systematik der Zählverfahren in der Teilchengrößenanalyse - Teil 1, Aufbereitungs Technik, Nr 2, 1972, s. 105÷111
18. Alex W.: Prinzipien und Systematik der Zählverfahren in der Teilchengrößenanalyse - Teil 1, Aufbereitungs Technik, Nr 3, 1972, s. 168÷182
19. Drzymała J.: Podstawy mineralurgii, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2009
20. Wear and materials. Wear parts application guide. Subject To Alteration Without Prior Notice. Brochure No. 2604-03-11-Sbl/Tampere- English 2011 Metso
21. Basics in Minerals Processing. Edition 10, 2015. English. www.metso.com
22. Sapożnikov H., Drozdov N.: Spravočnik po oborudovanii zavodov stroitel'nykh materialov. Izdatel'stvo Gosstroizdat, Moskva 1959
23. Perry's Chemical Engineers' Handbook. 6. edition. McGraw-Hill, New York u.a. O. 1984
24. Poradnik Górnika t.5, Wydawnictwo Śląsk 1976, s. 589
25. home.agh.edu.pl/~zak/downloads/MP3-2010.ppt

26. Tanaka T.: Ermittlung der Geschwindigkeitsfunktion bei der Zerkleinerung als Hilfsmittel zur Planung und Auslegung von Rohrmühlen. Zement Kalk Gips Nr 8 1975 S. 309-315
27. Moroń W., Bębenek Z., Żelkowski J.: Podatność przemiałowa węgla i mieszanin węglowych. Energetyka i Ekologia 2004 Nr 10, s. 613-617
28. Haese U., Scheffler D., Fasbender H.: Mahlbarkeitsprüfung und Rohrmühlenausleitung bei Zementrohrstoffen, (Grindability testing and tube mill design for cement raw materials) Cement-Kalk-Gips No 8 1975. S. 316-324
29. Obniżenie energochłonności procesu mielenia węglowych mieszanek energetycznych. 1998 Projekt Badawczy KBN 9T12A 13013. Zadanie: Opracowanie koncepcji, projekt i wykonanie urządzenia do badania podatności węgla na mielenie metodami: Hardgrove'a, kulami $\Phi 2''$ i rolkami
30. www.thecementgrindingoffice.com
31. <https://www.vdz-online.de/leistungen/forschung-und-technologie/umwelt-und-betriebs-technik/mechanische-verfahrenstechnik/mahlbarkeit/>
32. Sokołowski M.: Energia rozdrabniania. Wyd. Instytutu Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego Warszawa 1995
33. Stefan Góralczyk S., Kukielska D.: Jakość krajowych kruszyw. Górnictwo i Geoinżynieria Rok 34, Zeszyt 4, 2010 s. 211-224
34. Miskiewicz W., Utrata A., Trzaskuś-Żak B.: Wykorzystanie wskaźników płaskości i kształtu do oceny jakości kruszywa. Przegląd Górniczy Nr 8, 2015, s. 62-66
35. Rucińska T.: Kruszywa budowlane. trucinska.zut.edu.pl/fileadmin/Kruszywa_budowlane.pdf
36. Sidor J.: Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych, UWN AGH, Rozprawy i Monografie Nr 150, Kraków 2005
37. Vauck W.R.A., Müller H.A.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik, 11. überarbeitete und erweiterte Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Stuttgart 2000
38. Zogg M.: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, B. G. Teubner, Stuttgart 1993
39. Battaglia A., Banaszewski T.: Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych. Cz.1 maszyny do rozdrabniania. Warszawa Kraków PWN 1972
40. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
41. Lowrison G. Ch.: Crushing and Grinding. London, Butterworths 1974

42. Gawenda T.: Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych. *Górnictwo i Geoinżynieria* R. 34 2010. Zeszyt 4 s. 195-209
43. Gawenda T.: Zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw. *Rozprawy Monografie* Nr 304 Wydawnictwa AGH Kraków 2015
44. Sidor J.: Młyny walcowe w procesach wstępnego i finalnego rozdrabniania surowców, rud i cementu W: *Innowacyjne i Przyjazne Dla Środowiska Techniki i Technologie Przeróbki Surowców Mineralnych. Bezpieczeństwo Jakość Efektywność*. KOMEKO 2015. Praca Zbiorowa. red. nauk. A. Klich, A. Kozieł. KOMAG. Instytut Techniki Górniczej. Gliwice, 2015. s. 123–135
45. Sidor J.: Postęp techniczny w konstrukcji młynów stosowanych w procesach bardzo drobnego mielenia. *Powder & Bulk*. 2012 nr 6, s. 26-34
46. Zbroński D.: Młyny powietrzno-strumieniowe stosowane w przeróbce wybranych materiałów ziarnistych. *Górnictwo i Geoinżynieria*, Rok 35 Zeszyt 4, 2011, s. 167-177
47. Sidor J.: Mechaniczne metody otrzymywania mikro- i nanoproszków, CERAMIKA/ CERAMICS, Polish Ceramic Bulletin Polish Academy of Science - Kraków Division, Polish Ceramic Society vol. 103, 2008. s. 758÷764
48. Bhushan B.: *Handbook of Nanotechnology*, Springer 2004
49. Stairmand, C.J.: The energy efficiency of milling processes 4. *Europ. Symp. Zerkleinern*, Nürnberg 1975. *Dechema Monographien*, 1975, 79, s. 1-17

3. Kruszarki z dominacją obciążeń wolnozmiennych

3.1. Problematyka kruszarek z obciążeniami wolnozmiennymi

Ogólny podział i podstawowe zastosowanie kruszarek podano w tabeli 2.12. Kruszarki z dominacją obciążeń wolnozmiennych znalazły zastosowanie już pod koniec XIX wieku. Obecnie produkuje się kruszarki z wszystkich sześciu grup kruszarek, przy czym w ostatnich kilkunastu latach największe zainteresowanie użytkowników znajdują dwie grupy kruszarek, to jest kruszarki walcowe z walcami uzębionymi i kruszarki stożkowe. Kruszarki tej grupy znalazły zastosowanie w rozdrabnianiu materiałów o największej wytrzymałości na ściskanie oraz o największej abrazyjności, ale znaczna ich część – kruszarki walcowe z walcami uzębionymi, walcowo-szczękowe w rozdrabnianiu materiałów o średniej wytrzymałości.

Najmniej skomplikowaną budowę mają kruszarki walcowe oraz szczękowe, natomiast korzystniejsze parametry technologiczne mają kruszarki stożkowe – okupione bardziej skomplikowaną budową oraz wyższymi kosztami inwestycyjnymi.

Obecnie wraz z postępem w technologii wytwarzania materiałów konstrukcyjnych o korzystniejszych własnościach mechanicznych, zwłaszcza wytrzymałości na zużycie ściernie, z których wytwarzane są elementy robocze tych maszyn, kruszarki walcowe uzębione stosuje się do materiałów o dużej wytrzymałości na ściskanie i abrazyjności, a także w przygotowaniu do recyklingu – przez rozdrobnienie, materiałów metalicznych – SWE (samochody wycofane z eksploatacji), ZSEE (zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny), AGD (artykuły gospodarstwa domowego) oraz pozużytkowych monomateriałowych i kompozytowych materiałów oraz gumowych.

W ostatnich dwudziestu latach największe zainteresowanie inwestorów i producentów, a także tematyka prac rozwojowych związane są z kruszarkami walcowymi z walcami uzębionymi. Rozwiązania konstrukcyjne typowych kruszarek dwuwalcowych i walcowo-szczękowych rozwinięto w trój- i czterowalcowe maszyny oraz nowe rozwiązania, które zastosowano jako wyposażenie łyżek koparek, do rozdrabniania materiałów podczas transportu, do rozdrabniania materiałów w złożu, do urabiania materiału z podłoża oraz do frezowania zużytych powierzchni asfaltowych. W układach napędowych tych kruszarek zastosowano nowe silniki elektryczne o powiększonych momentach rozruchowych oraz silniki hydrauliczne. Pewne wątpliwości w klasyfikacji występują przy wysokociśnieniowych młynach walcowych. Niektórzy autorzy młyny te (zwane przez niektórych producentów prasami walcowymi), a które w wersji najbardziej popularnej w literaturze anglojęzycznej oznaczane są

symbolem HPGR, zaliczają do kruszarek walcowych, ze względu na ich budowę zbliżoną do kruszarek walcowych z walcami gładkimi. Jednak sposób ich działania oraz uziarnienie produktu rozdrabniania, wskazują, że należy zaliczyć je do młynów i taką miały pierwszą nazwę w języku niemieckim *Gutbett Walzenmühlen*, którą zaproponował ich twórca Klaus Schönert.

Za zaliczeniem ich do młynów wskazują istotne różnice tych maszyn ze względu na ich rozwiązanie konstrukcyjne oraz sposób działania, czyli:

- znacznie mniejsze prędkości obwodowe walców $0,5 \div 1,5$ m/s, (w kruszarkach $5 \div 15$ m/s), co skutkuje znacznie mniejszą prędkością propagacją obciążeń rozdrabniających,
- inny charakter rozdrabniania, to jest rozdrabnianie całego złoza materiału, w tym ziaren o znacznie „drobniejszym” uziarnieniu, a nie tylko ziaren o wymiarach większych od wymiaru szczeliny,
- znacznie większe naciski do 500 MPa - generujące wielokrotnie większe obciążenia walców, skutkujące innymi rozwiązaniami węzłów łożyskowania,
- od kilku do kilkunastu razy większa moc przy tych samych wymiarach walców,
- inna budowa walców i całej maszyny.

Z tego względu młyny (prasy walcowe) walcowe ujęto w odrębnym rozdziale.

Podstawowe obliczenia mechaniczne i technologiczne tej grupy kruszarek z uwagi na ich charakter ściśle związany ze sposobem działania kruszarek (walcowych, szczękowych, stożkowych) zamieszczono w podrozdziałach dotyczących problematyki tych kruszarek.

3.2. Kruszarki walcowe i walcowo-szczękowe

Klasyfikacje i podstawowe obliczenia kruszarek

Wśród kruszarek, w których proces rozdrabniania zachodzi z dominacją obciążeń wolnozmiennych jednymi z najwcześniej zastosowanymi były kruszarki walcowe. Krużarkę walcową z jednym walcem roboczym zastosowano do rozdrabniania kruchych surowców mineralnych ponad 100 lat temu (Patent USA, A. Tomas 1864) [1], natomiast opis budowy kruszarki walcowej z walcami gładkimi w niemieckojęzycznej literaturze pojawił się pod koniec XIX wieku (1887) [2]. Krużarki walcowe i walcowo-szczękowe są najmniej skomplikowane ze względu na zastosowany w nich mechanizm kinematyczny oraz prostą budowę. Pewną wadą technologiczną tych kruszarek, zwłaszcza w wersji z walcami gładkimi jest często nie pożądana znaczna ilość

ziaren płaskich. W Polsce kruszarki te były przedmiotem wycofanej bez zastąpienia normy PN-M-47270-00:1979 „Maszyny do rozdrabniania i kruszenia surowców mineralnych - Kruszarki do surowców mineralnych - Nazwy, określenia, podział i symbole klasyfikacyjne”.

Kolejne rozwiązania konstrukcyjne kruszarek już jako dwuwalcowych pojawiały się na początku XX wieku [3]. Rozwiązania konstrukcyjne i podstawowe obliczenia, zastosowanie oraz niektóre parametry pracy starszych konstrukcji kruszarek walcowych przedstawiono w pracach [4, 5, 6, 7, 8]. Kruszarki te umieszczane są na pierwszym i drugim stopniu rozdrabniania, zwłaszcza jeśli produkt kruszenia nie wymaga odpowiedniego składu ziarnowego oraz ziaren o wymaganym kształcie.

Prędkości obwodowe walców kruszarek wynoszą od 3 do 15 m/s [4], a w przypadku niektórych konstrukcji do bardzo drobnego kruszenia lub mielenia dochodzą do 20 m/s [5]. Przy czym w nowych kruszarkach prędkość ta wynosi powyżej 5 m/s.

Klasyfikację kruszarek walcowych łącznie z młynami walcowymi, wysokociśnieniowymi młynami (prasami) walcowymi oraz wolnoobrotowymi kruszarkami (rozdrabniaczami uzębionymi) zawarto w pracy [9]. Natomiast do tej grupy kruszarek zaliczono również rozdrabniacze z walcami uzębionymi, zwanymi przez niektórych producentów kruszarkami uzębionymi wolnoobrotowymi. Kruszarki te stosowane są w przygotowaniu do recyklingu i utylizacji (rozdrabnianiu) SWE, ZSEE, zużytego AGD, drewna, biomasy, odpadów tworzyw polimerowych, wstępnego rozdrabniania urobku w kopalniach węgla, a także rozdrabniania (rozbylania) - dla potrzeb dozowania lub transportu, zbrylonego (aglomerowanego) materiału powstałego podczas składowania rozdrobnionego wcześniej materiału.

W ostatnich dwudziestu latach nastąpił znaczący wzrost zainteresowania, zwłaszcza kruszarkami z walcami uzębionymi i to zarówno w technologiach rozdrabniania materiałów kruchych, jak i materiałów plastycznych (metalowych i polimerowych), a także włóknistych i aglomeratów.

Główny podział kruszarek przeprowadza się według kryterium ilości walców roboczych. Stąd wyróżnia się kruszarki:

- jednowalcowe, walcowo-szczękowe,
- dwuwalcowe – najwięcej konstrukcji i najczęściej stosowanych,
- trójwalcowe,
- czterowalcowe,
- pięciowalcowe.

Drugi podział dotyczy rodzajów napędu:

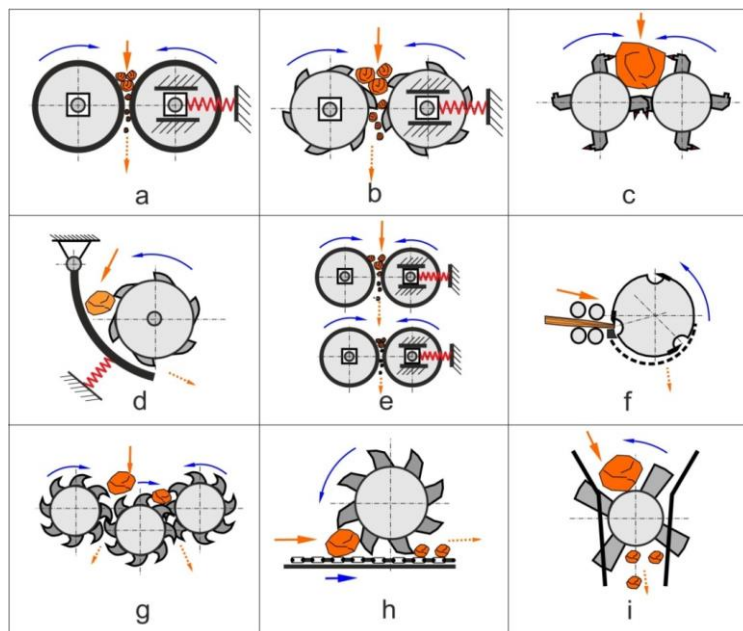
- klasyczny mechaniczny (przekładnia pasowa, przekładnia łańcuchowa (niewielkie maszyny), motoreduktor,
- hydrauliczny, przy największych mocach.

W napędzie mechanicznym napęd każdego z walców może być realizowany odrębnie z synchronizacją prędkości obrotowych walców za pomocą przekładni zębatej, lub bez synchronizacji prędkości obrotowych obu walców. Mniejsze rozdrabniacze mogą mieć jeden napęd z przekładnią mechaniczną rozdzielającą moment obrotowy do każdego z walców.

Podział trzeci związany jest z budową walców roboczych i rozróżnia:

- walce monolityczne gładkie, lub z niewielkimi elementami roboczymi mocowanymi nierozłącznie na pobocznicy obu walców,
- walce rowkowe (starsze konstrukcje),
- walce uzębione – monolityczne lub segmentowe.

Na rysunku 3.1 przedstawiono schematy budowy i działania kruszarek walcowych stosowane do rozdrabniania materiałów kruchych.



Rys. 3.1. Schematy kruszarek i rozdrabniaczy walcowych: a - z walcami gładkimi, oraz jej odmiana stosowana jako młyn (prasa) wysokociśnieniowy, b - z walcami uzębionymi, c - z nożami, d - walcowo-szczękowa, e - czterowalcowa, f - rębak (rozdrabniacz drewna), g - trójwalcowa uzębiona, h - podścianowa, i - rozbrylacz jednowalcowy

Najwięcej odmian konstrukcyjnych mają kruszarki jednowalcowe. Zróżnicowanie budowy i działania spowodowane jest ich zastosowaniem, a w szczególności własnościami fizycznymi rozdrabnianych materiałów oraz wydajnością kruszarki. Na zróżnicowanie budowy ma również wpływ polityka w zakresie praw autorskich.

Niektóre z kruszarek, jako specjalistyczne wersje - stosowane do rozdrabniania surowców mineralnych, plastycznych, poużytkowych odpadów noszą inne nazwy (kruszarki wałowe, wałowe wolnoobrotowe, strzępiarki, shreddery, rębaki i inne). Rysunek 3.1 nie uwzględnia schematów specjalistycznych rozdrabniaczy stosowanych do rozdrabniania gumy, polimerów, folii, materiałów włóknistych. Tego rodzaju kruszarki (rozdrabniacze, młyny nożowe), budowane są z wirnikami walcowymi usytuowanymi poziomo, rzadziej pionowo oraz jako wielokrawędziowe.

Wśród kruszarek i rozdrabniaczy, których elementami roboczymi są obrotowe: dwa, trzy, cztery lub tylko jeden wałek wyróżnić można dziewięć podstawowych konstrukcji (rys. 3.1). Dla tego rodzaju kruszarek – z wałkami gładkimi przy minimalnej wartości współczynnika tarcia rozdrabnianego materiału o wałce 0,3, przyjmowane są następujące zależności pomiędzy wymiarem maksymalnego ziarna nadawy, a średnicą walca. Średnica walców powinna być wyznaczona z zależności [6]:

$$D_w \geq 70 s$$

gdzie: D_w – średnica walca, m
 s – szczelina pomiędzy wałkami, m

Stąd przyjmuje się, przy zachowaniu pewnego zakresu pewności działania kruszarki, że średnica walców powinna wynosić wg [6]:

$$D_w \approx 20 d_o$$

Literatura polska [3, 4] zaleca przyjmowanie średnicy walców D_w z zależności:

$$D_w \approx 18 d_o \text{ - dla walców gładkich,}$$

$$D_w \approx 12 d_o \text{ - dla walców rowkowanych,}$$

$$D_w \approx 25 d_o \text{ - dla walców uzębionych.}$$

Przed zakupem kruszarki walcowej jej przyszły użytkownik powinien wstępnie oszacować dwa główne parametry kruszarki oraz jej układu kruszenia, to jest wydajność i moc napędu, gwarantowanych do uzyskania przy założonych parametrach fizycznych nadawy i wymaganiach uziarnienia

produktu rozdrabniania. Ponadto powinien mieć na uwadze jej koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, w tym koszty obsługi serwisowej.

Wydajności kruszarki: objętościową Q_v i masową Q_m w sposób przybliżony oblicza się ze znanych wyrażeń [3, 4, 5]:

$$Q_v = \pi 60 k D_w s L n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$Q_m = \pi 60 k D_w s L n \rho_n \quad [\text{Mg}/\text{h}]$$

gdzie: L – długość robocza walca, m,
 s – szczelina pomiędzy walcami, m,
 n – prędkość obrotowa walców, obr/min,
 k – współczynnik wypełnienia strefy kruszenia, [-],
 ρ_n – gęstość nasypowa materiału kruszonego, Mg/m^3 .

Według [3, 5] wartość współczynnika k należy przyjmować: $0,1 \div 0,3$ – dla twardych surowców mineralnych oraz $0,5 \div 0,6$ dla materiałów średniotwardych i miękkich, natomiast według [4] współczynnik ten należy przyjmować: $0,2 \div 0,3$ – dla twardych surowców mineralnych oraz $0,5 \div 0,7$ dla glin.

Wstępny – przybliżony pobór mocy przez kruszarkę walcową można obliczyć z wyrażenia [3]:

$$P = K q_j Q_v \rho_n \quad [\text{kW}]$$

gdzie: K – współczynnik równy 0,75,
 q_j – jednostkowy pobór energii, kWh/Mg – dla surowców cementowych wynosi od $0,4 \div 1,6 \text{ kWh}/\text{Mg}$.

Według [10] przybliżony pobór mocy P przez kruszarkę walcową oblicza się z wyrażenia:

$$P = Q_v q_j \quad [\text{kW}]$$

gdzie: q_j – jednostkowy pobór energii, kWh/Mg , który wynosi:
 $0,75 \div 0,90 \text{ kWh}/\text{Mg}$ - dla kruszarek o walcach uzębionych przy średnim rozdrabnianiu glin,
 $1,20 \div 1,35 \text{ kWh}/\text{Mg}$ - dla kruszarek o gładkich walcach przy drobnym kruszeniu miękkich i średniotwardych surowców,
 $1,5 \div 3,0 \text{ kWh}/\text{Mg}$ - dla kruszarek o gładkich walcach przy średnim kruszeniu twardych surowców skalnych,
 $0,75 \div 1,35 \text{ kWh}/\text{Mg}$ - dla kruszarek o gładkich walcach przy kruszeniu: glin, gipsu, koksu i kredy.

Zapotrzebowanie mocy przez kruszarkę jednowalcową w sposób przybliżony oblicza się z wyrażenia podanego w pracy [5]:

$$P_k = k_m D_w L, \quad [\text{kW}]$$

gdzie: P_k – pobór mocy przez kruszarkę, kW,

k_m - współczynnik uwzględniający właściwości mechaniczne rozdrabnianego materiału i konstrukcji kruszarki – przyjmuje wartości w przedziale $25 \div 100 \text{ kW/m}^2$.

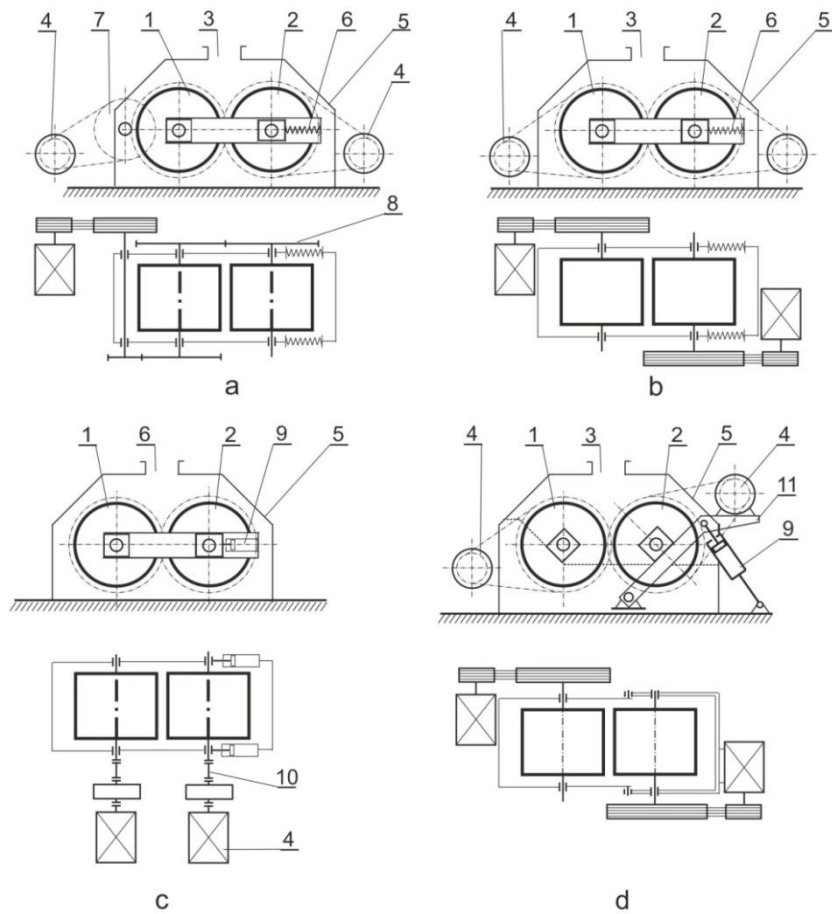
Jednostkowe zapotrzebowanie energii w kruszarkach jednowalcowych przy rozdrabnianiu materiałów o wytrzymałości na ściskanie poniżej 100 MPa mieści się w zakresie $0,3 \div 1,5 \text{ kWh/Mg}$ [5], a wg [11] - $0,5 \div 1,0 \text{ kWh/Mg}$, natomiast dla kruszarek dwuwalcowych $0,3 \div 1,5 \text{ kWh/Mg}$ [11].

Kruszarki walcowe z walcami gładkimi

Kruszarki walcowe z dwoma walcami gładkimi są nadal produkowane. Schematy budowy najczęściej produkowanych kruszarek przedstawiono na rysunku 3.2.

Kruszarki te oferowane są z dwoma gładkimi walcami jako klasyczne kruszarki, a także jako młyny. Do surowców skalnych stosuje się walce, które na powierzchni mają wspawane niewielkie elementy zwiększające lokalne naciski na rozdrabniany materiał, co ułatwia jego rozdrabnianie oraz umożliwia zwiększenie wymiaru ziaren nadawy. Mając na względzie niewielkie rozmiary tych elementów w stosunku do wymiarów walców, kruszarki te zaliczono do kruszarek z walcami gładkimi, chociaż dokładnie są quasi gładkie, ale znacząco różnią się od walców uzębionych.

Stopień rozdrobnienia w tych kruszarkach wynosi zwykle $3 \div 4$, a w pewnych przypadkach może osiągnąć 8. Wymiary walców największych kruszarek wynoszą $\varnothing 2,5 \times 2,5 \text{ m}$, wymiary maksymalnych ziaren osiągają 1000 mm, a wydajność kruszarek dochodzi do 2000 Mg/h. Przykładem takiej kruszarki jest kruszarka firmy ThyssenKrupp, którą zamieszczono na rysunku 3.3 [12]. Kruszarka ta przy rozdrabnianiu wapienia osiąga wydajność 2000 Mg/h. Wymiary walców tej kruszarki wynoszą $\varnothing 2,0 \times 2,0 \text{ m}$, a wytworzony w niej produkt rozdrabniania ma uziarnienie poniżej 300 mm.



Rys. 3.2. Schematy budowy kruszarek walcowych z walcami gładkimi: a – kruszarki z indywidualnymi napędami obu walców z zabezpieczeniem sprężynowym, b – kruszarki z wspólnym napędem obu walców z zabezpieczeniem sprężynowym, c – kruszarki z indywidualnymi napędami obu walców wałami kardana z zabezpieczeniem hydraulicznym, d – kruszarki z indywidualnymi napędami obu walców z zabezpieczeniem hydraulicznym walca z osadami łożysk usytuowanych na dźwigniach, 1 - wałek ze stałymi osadami łożysk, 2 – wałek z ruchomymi osadami łożysk, 3 – wlot nadawy, 4 – silnik, 5 – obudowa, 6 – zabezpieczenie sprężynowe, 7 – napęd pośredni, 8 – przekładnia zębata, 9 – cylinder hydrauliczny, 10 – wał kardana, 11 – dźwignia.

Firma ThyssenKrupp [13] zaleca stosowanie kruszarek walcowych do rozdrabniania materiałów o własnościach:

- wytrzymałość na ściskanie - poniżej 150 MPa,
- zawartość krzemionki – poniżej 15%,
- wilgotność - poniżej 20%,
- stopień rozdrobnienia 3÷6 [-].



Rys. 3.3. Kruszarka walcowa do wstępnego kruszenia kamienia wapiennego firmy ThyssenKrupp [12] podczas montażu

Firma FLSmidth oferuje dwa typy kruszarek walcowych z walcami quasi gładkimi. Są to kruszarki typu E wyposażonymi w walce z niewielkimi występami mocowanymi na powierzchni gładkich walców (rys. 3.4) [14]. Typoszereg tych kruszarek obejmuje pięć wielkości kruszarek o wydajności od 120 do 750 Mg/h i zainstalowanej mocy od 45 do 500 kW. Kruszarki z tego rodzaju walcami oferuje szereg firm. Np. firma Sandvik oferuje tego typu kruszarkę z hydrauliczną regulacją szczeliny (rys.3.5), które pełni jednocześnie funkcję zabezpieczenia kruszarki przed uszkodzeniem elementami metalowymi [15].

Firma Sandvik oferuje typoszereg kruszarek CR 450 zawierający osiem wielkości maszyn przeznaczonych do bardzo drobnego kruszenia materiałów twardych o wydajności od 12 do 65 Mg/h, przy maksymalnym uziarnieniu nadawy od 10 mm – dla najmniejszej kruszarki, do 35 mm dla największej.



Rys. 3.4. Kruszarka walcowa typ E firmy FLSmidth [14] w linii technologicznej



Rys. 3.5. Kruszarka walcowa typ CR 450 firmy Sandvik [15]

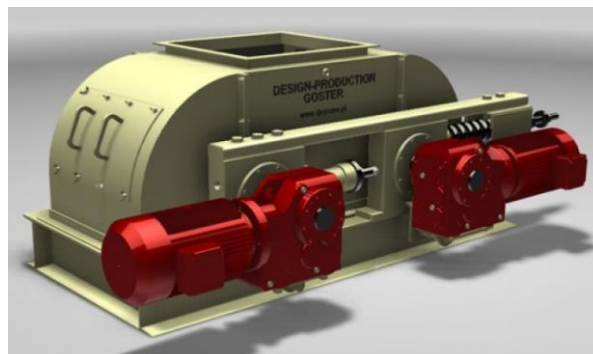
Firma Aubema oferuje dużą kruszarkę walcową typ 2322 o wydajności do 2500 m³/h, maksymalnym wymiarze ziaren nadawy 1500 mm, o mocy 2x250 kW [16] (rys. 3.6). Dla firm, stosujących kruszarki o niewielkiej i średniej wydajności tego typu kruszarki oferuje firma Goster [17] (rys. 3.7). Oferowany typoszereg tych kruszarek obejmuje osiem wielkości o wydajności

najmniejszej kruszarki GR-45 około 12 m³/h i mocy 2x5,5 kW, a największej kruszarki GR-15 około 300 m³/h i mocy 2x60 kW [17]. Firma Goster zastosowała oryginalny napęd indywidualny obu walców motoreduktorami ślimakowymi, co skutkuje niewielkimi gabarytami kruszarki. Ponadto zastosowano w niej dwa rodzaje zabezpieczeń: mechaniczne z ręczną regulacją szczeliny oraz podwójne (hydrauliczne i elektryczne) z możliwością regulacji szczeliny z pulpitu operatora. Firma Goster opracowała także wersję kruszarki przystosowaną do pracy w atmosferze wybuchowej oraz wersję wyposażoną w agregat prądotwórczy.

W kraju firma Makrum oferuje kruszarki walcowe typ RC (rys. 3.8). Podstawowe parametry tych kruszarek podano w tabeli 3.1 [18].



Rys. 3.6. Kruszarka walcowa typ 2322 firmy Aubema [16]



Rys. 3.7. Kruszarka walcowa typ GR firmy Goster [17]



Rys. 3.8. Kruszarka walcowa serii RC firmy Makrum z hydrauliczną regulacją szczeliny [18]

Parametry kruszarek produkcji Makrum [18]

Tabela. 3.1.

Parametry	Typ				
	RC 40.49	RC 40.59	RC 40.63	RC 40.68	RC 40.71
	Rodzaj walców				
	Zębate	Gładkie	Zębate	Gładkie	Zębate
Wymiary walców [mm]	1500x2500	1000x350	1000x1000	600 x 500	600 x 500
Maksymalny wymiar ziaren nadawy [mm]	300	45	120	60	100
Zakres regulacji szczeliny wylotowej [mm]	40-150	2-10	10-30	3-15	20-40
Wydajność [Mg/h]	1200	3-15	20-60	5-15	12 - 20
Moc napędu [kW]	2x110	2x13	2x37	2x11	2x11
Masa kruszarki z napędem [Mg]	41,2	7,5	9,7	2,8	2,4

Obecnie w nowych kruszarkach nawet o niewielkiej wydajności (poniżej 25 Mg/h) instaluje się układy hydrauliczne do szybkiej regulacji szczeliny oraz zabezpieczające kruszarkę przed uszkodzeniem wskutek pojawienia się w nadawie elementu metalicznego. Rozwiązanie to zwiększa koszty wytworzenia i serwisu kruszarki, ale jest szczególnie przydatne w zakładach

przeróbczych, w których niezbędne są bardziej stabilne parametry uziarnienia produktu kruszenia, szybka zmiana tych parametrów oraz większa pewność działania kruszarki.

Kruszarki walcowe z walcami uzębionymi i wolnoobrotowe

Do rozwoju konstrukcji tych kruszarek przyczyniły się ich duże możliwości technologiczne, niskie koszty ich wytwarzania w porównaniu z kruszarkami szczękowymi, a zwłaszcza stożkowymi. Wzrosło również zapotrzebowanie na nie w rozdrabnianiu surowców mineralnych, rud, odpadów betonowych, gruzu, innych przemysłowych uziarnionych produktów i odpadów. Zastosowano je także w rozdrabnianiu użytkowych wyrobów: sprzętu AGD, urządzeń elektrycznych, elektronicznych (ZSEE) oraz wyeksploatowanych pojazdów mechanicznych (SWE). Do rozwoju tych kruszarek znacząco przyczynił się postęp techniczny w dziedzinie inżynierii materiałowej zarówno w technologiach wytwarzania nowych tworzyw konstrukcyjnych na elementy robocze kruszarek, a także w zakresie wytwarzania napędów dużej mocy, w tym napędów hydraulicznych.

Kruszarki te nazywane są też rozdrabniaczami lub nożycami obrotowymi, kruszarkami wolnoobrotowymi lub jedno lub wielowalowymi. Funkcjonują również ich nazwy angielskie: shredder [19] - w odmianach stosowanych do rozdrabniania SWE, ZSEE oraz użytkowych wyrobów gumowych, polimerowych, folii wieloskładnikowych, odpadów produkcji roślinnej, czy papieru oraz impactor [20] – w przypadku zastosowania do rozdrabniania gruzu betonowego, ceglanego lub surowców mineralnych.

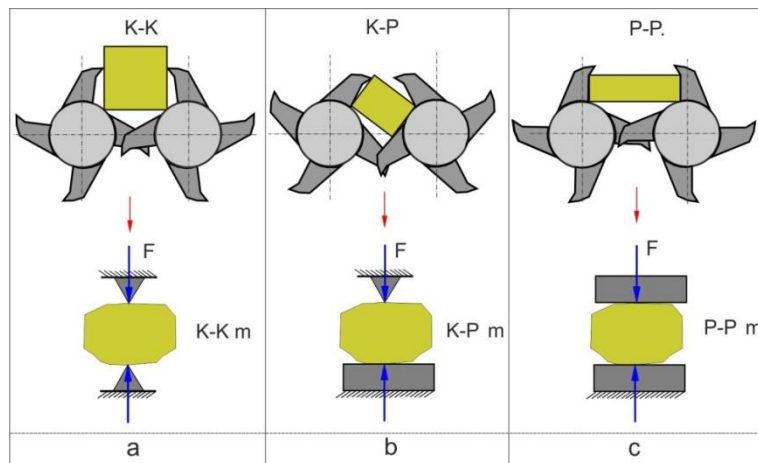
Na rynku oferowane są obecnie nowe rozwiązania rozdrabniaczy wyposażonych w dwa, trzy i cztery, a nawet pięć uzębionych walców roboczych [21]. Rozwiązanie z dwoma walcami uzębionymi w tych wersjach, różni się od klasycznej kruszarki walcowej brakiem podparcia sprężystego opraw łożysk jednego z walców, całkowicie zmienioną budową części roboczej walców oraz mniejszą prędkością obwodową walców – zwykle poniżej 2 m/s. Stąd używana jest również inna nazwa tej kruszarki, to jest: walcowa wolnoobrotowa. Najczęściej użytkowane są jako maszyny stacjonarne, rzadziej mobilne – z własnym napędem, w tym autonomicznym napędem silnikiem spalinowym.

Znaczne różnicowanie budowy kruszarek – rozdrabniaczy walcowych, zwanych dalej krótko kruszarkami, zdeterminowane jest ich zastosowaniem, wymaganiami produktu rozdrabniania, własnościami fizycznymi rozdrabnianych materiałów, a także wydajnością i polityką patentową ich producentów.

Przez wiele lat kruszarki te stosowano do rozdrabniania surowców mineralnych, to jest materiałów kruchych o wytrzymałości na ściskanie poniżej 100 MPa oraz mało abrazyjnych. Postęp w wytwarzaniu tworzyw konstrukcyjnych stosowanych na elementy robocze tych kruszarek – głównie na uzębione walce lub wymienne noże, profilowane tarcze oraz wykładziny rozdrabniające mocowane na walcach umożliwiły zastosowanie, zwłaszcza kruszarek dwuwalcowych, do rozdrabniania materiałów mineralnych o większej wytrzymałości na ściskanie oraz metalowych użytkowych wyrobów w tym SWE i ZSEE.

Na rysunku 3.9 zamieszczono trzy uogólnione przypadki stanu obciążenia ziaren materiału występujące przy rozdrabnianiu materiałów kruchych w kruszarkach dwuwalcowych, których występuje najwięcej na rynku.

Bardzo podobne przypadki stanu obciążenia ziaren występują w kruszarkach trójwalcowych, czterowalcowych oraz kruszarce pięciowalcowej. Dla tego rozwiązania kruszarki o schemacie budowy podanym na rysunku 3.9 b, można wyróżnić jeszcze jeden przypadek – model K-P, który odzwierciedla tzw. rozłupywanie klinem ziarna znajdującego się na płycie [11].



Rys. 3.9. Modelowe stany obciążenia ziaren w kruszarce dwuwalcowej uzębionej:
a – obciążenie ziarna z obu stron klinami, b – obciążenie klinem ziarna znajdującego się na płycie, c – obciążenie ziarna płytami, K-K – obciążenie dwustronne klinami, K-Km – model tego obciążenia, K-P - obciążenie klinem ziarna na płycie, K-Pm – model tego obciążenia P-P - obciążenie dwustronne płytami, P-Pm – model tego obciążenia, F – sumaryczna siła obciążająca ziarno [11]

Wymienione przypadki stanów obciążenia ziaren przydatne są do modelowania pracy kruszarek przy quasistatycznych przypadkach propagacji obciążeń niszczących.

Kruszarki te wyposażane są w dwa rodzajów napędów:

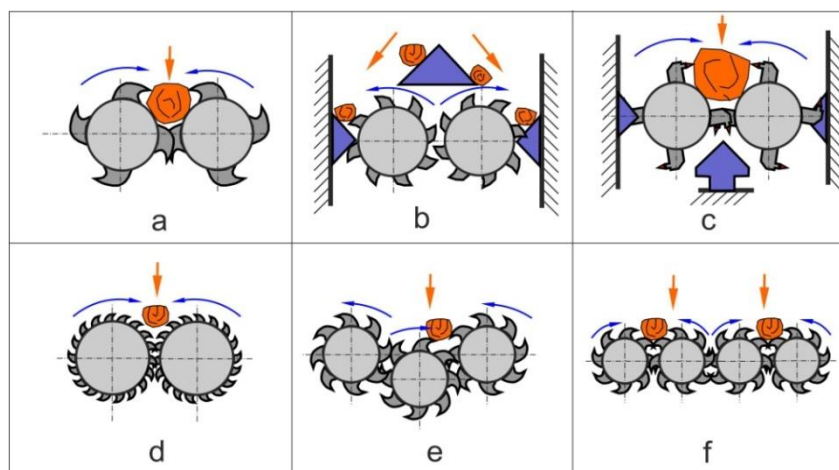
- klasyczny mechaniczny (motoreduktor z przekładnią zębatą przenoszącą moment obrotowy na dwa walce, motoreduktory napędzające indywidualnie każdy z walców),
- hydrauliczny z silnikiem hydraulicznym (z przekładnią zębatą przenoszącą moment obrotowy na dwa walce z jednego silnika hydraulicznego, indywidualny silnik hydrauliczny napędzający każdy z walców, a nawet z dwoma silnikami hydraulicznymi usytuowanymi na obu czopach wału jednego walca – stosowany w dużych rozdrabniaczach do SWE).

Duże kruszarki, zwłaszcza stosowane w przygotowaniu do recyklingu SWE wyposażane są w układy napędowe z rewersją prędkości obrotowej walców.

Kruszarki te wyposażane są w kilka rodzajów walców roboczych różniące się znacznie budową. Są to:

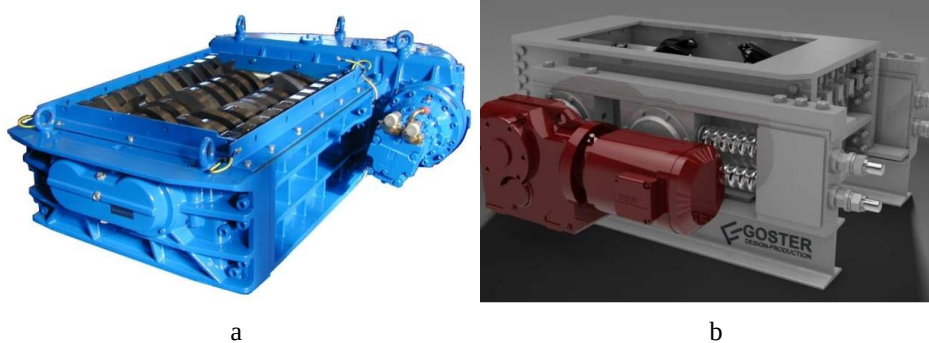
- walce z elementami roboczymi w kształcie tarcz z nożami roboczymi w ilości od dwóch do kilkunastu mocowanych na wale o przekroju kwadratowym, sześciokątnym lub innym kształtowym – tarcze mogą być monolityczne lub posiadać noże wymienne mocowane złączami śrubowymi,
- walce monolityczne z elementami roboczymi jako noże mocowane na obwodzie walca za pomocą złączy śrubowych,
- walce monolityczne z elementami roboczymi – nożami styczno-obrotowymi – stosowanymi w organach urabiających kombajnów górniczych – osadzanych w odpowiednich obsadach usytuowanych na powierzchni walcowej obu walców,
- walce monolityczne z elementami roboczymi w kształcie prostopadłościanów mocowanymi na obwodzie walca za pomocą złączy spawanych [26].

Na rysunku 3.10 zamieszczono schematy budowy i działania najczęściej produkowanych kruszarek dwu, trzy i czterowalcowych. Jeden z producentów oferuje również kruszarkę pięciowalcową [21].

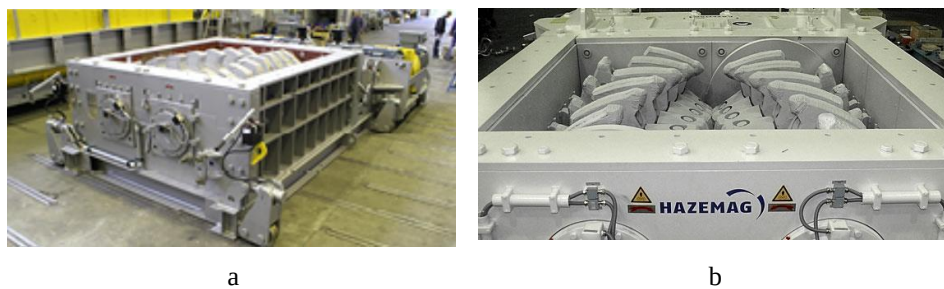


Rys. 3.10. Schematy budowy i działania kruszarek wielowalcowych:
 a – dwuwalcowych ze ścieżką rozdrabniania pomiędzy wałami, z prędkością obrotową wałów „do siebie”, b – dwuwalcowa ze ścieżką rozdrabniania na zewnątrz wałców, na wystęпах oporowych, z prędkością obrotową wałów „od siebie”, c – dwuwalcowa z nożami styczno-obrotowymi, z prędkością obrotową wałów „do siebie”, z trzema ścieżkami rozdrabniania pomiędzy wałami, na dwóch bocznych i jednym dolnym występie oporowym, d – dwuwalcowa do średniego rozdrabniania z wieloma (6÷24) nożami rozdrabniającymi, e – trójwalcowa, f – czterowalcowa [27]

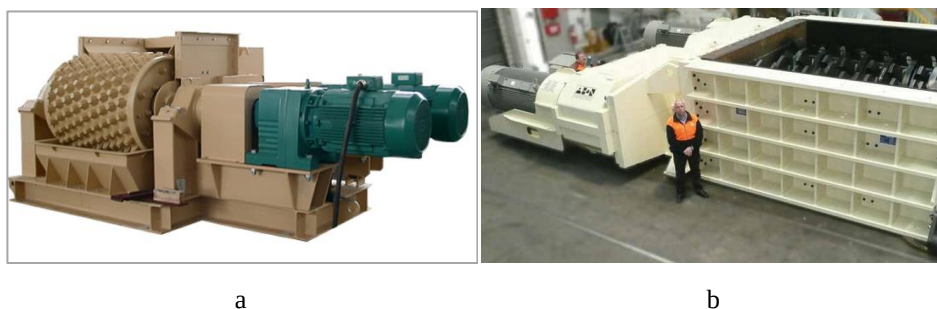
W ostatnich latach coraz częściej stosowane są kruszarki dwu i wielowalcowe z wałami uzębionymi. Najwięcej użytkowanych jest w wersji dwuwalcowej [22, 23, 24]. Kilka firm oferuje kruszarki trójwalcowe [21, 26] czterowalcowe [19, 21]. Większość kruszarek produkowana jest jednak jako kruszarki dwuwalcowe (rys. 3.11, 3.12 oraz 3.13).



Rys. 3.11. Kusrarki dwuwalcowe: a – firmy Satrin z napędem hydraulicznym wałców [26],
 b – firmy Goster ze sprężystym podparciem opraw łożysk jednego walca [17]



Rys. 3.12. Kruszarki dwuwalcowe dużej wydajności Hazemag serii HCS [23]:
a kruszarka, b – strefa rozdrabniania z tarczami rozdrabniającymi



Rys.3.13. Kruszarki dwuwalcowe: a – firmy Zemag z walcami monolitycznymi [24],
b – firmy FLSmidth z tarczami rozdrabniającymi [25]

Podstawowe parametry kruszarek serii HCS firmy Hazemag zawarto w tabeli 3.2.

Podstawowe parametry wybranych kruszarek serii HCS [23]

Tabela 3.2.

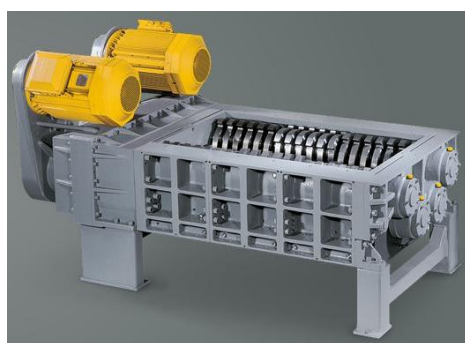
Typ	Napęd, moc [KW]	Wymiary walców DxL [m]	Masa [Mg]	Uziarnienie produktu [mm]	Uziarnienie nadawy [mm]	Wydajność [Mg/h]
HRC 0605	15-37	0,600x0,510	6,35-7,20	15-60	75-250	105
HRC 0610	37-55	0,600x1,020	11,2-14,5	15-60	75-250	210
HRC 0620	45-90	0,600x2,040	22,0-24,5	15-60	75-250	420
HRC 0810	45-90	0,800x1,020	12,7-15,2	25-150	125-500	565
HRC 0816	90-160	0,800x1,530	25,5-29,3	25-150	125-500	900
HRC 1020	90-160	1,000x2,040	39,5-44,0	30-200	150-700	1480

Cd., tabeli 3.2.

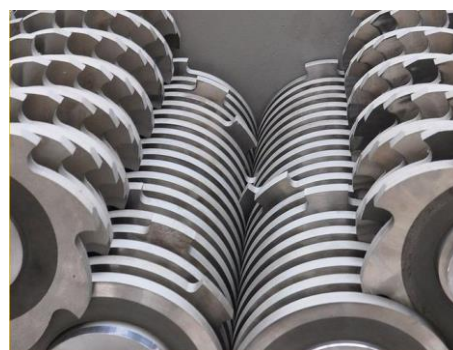
Typ	Napęd, moc [KW]	Wymiary walców DxL [m]	Masa [Mg]	Uziarnienie produktu [mm]	Uziarnienie nadawy [mm]	Wydajność [Mg/h]
HRC 1220	200-315	1,200x2,050	69,1-77,1	30-250	150-400	1800
HRC 1225	200-315	1,200x2,550	80,5-89,5	30-250	150-400	2250
HRC 1425	250-355	1,400x2,550	86,5-91,5	50-250	150-500	2400
HRC 2020	250-500	2,000x2,050	113-1230	200-400	800-1 200	4350
HRC 2025	250-800	2,000x2,550	154-178	200-400	800-1 500	5450
HRC 2030	450-1000	2,000x3,050	195-226	200-400	800-2 000	6500

Wydajność dotyczy rozdrabniania wapienia o średniej wytrzymałości mechanicznej.

Na rysunku 3.14 przedstawiono rozwiązanie kruszarki czterowalcowej.



a



b

Rys. 3.14. Rozwiązanie konstrukcyjne kruszarki czterowalcowej firmy Franklin Miller Inc.:
a – widok kruszarki, b – widok strefy rozdrabniania [21]

Kruszarki walcowo-szczękowe i jednowalcowe

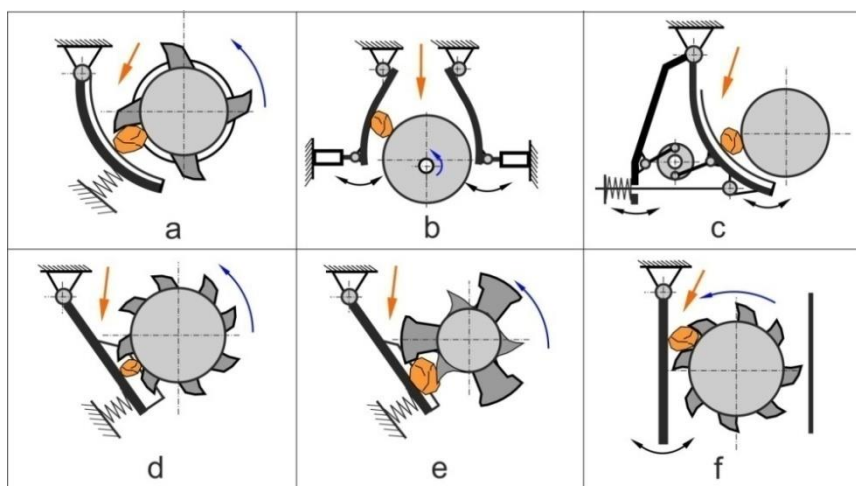
Kruszarki walcowo-szczękowe z jednym walcem są od wielu lat stosowane. Na rynku oferowane są jeszcze nowe wersje kruszarek z jednym walcem – bez szczęki. Rozwiązania konstrukcyjne kruszarek jednowalcowych

cechuje duże zróżnicowanie budowy, zwłaszcza rozdrabniaczy przeznaczonych do rozdrabniania gumy, polimerów [28, 29]. Zróżnicowana jest również budowa ich walców rozdrabniających – zwanymi też wirnikami [30, 31].

Przy rozdrabnianiu surowców mineralnych stosowane są zwykle wirniki monolityczne i modułowe, przy rozdrabnianiu SWE i ZSEE segmentowe z wymiennymi krótkimi nożami, a przy rozdrabnianiu gumy i tworzyw polimerowych wirniki monolityczne z długimi nożami.

Na rysunku 3.15 umieszczono schematy budowy jednowalcowych kruszarek walcowo-szczękowych.

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



Rys. 3.15. Schematy budowy i działania kruszarek jednowalcowych:
a – ze szczęką łukową, b – z dwoma szczękami i wałkiem roboczym – typu Rotex,
c – z napędzaną szczęką wyrównującą siły dynamiczne z biernym wałkiem,
d – z pochyloną szczęką, wirnikiem modułowym z wymiennymi elementami roboczymi,
e – ze szczęką pochyloną, wirnikiem monolitycznym, f – ze szczęką pionową ruchomą (lub stałą) i wirnikiem modułowym [27]

Nowe rozwiązania konstrukcyjne kruszarek jednowalcowych obecnie często stosowane zamieszczono na rysunku 3.16.



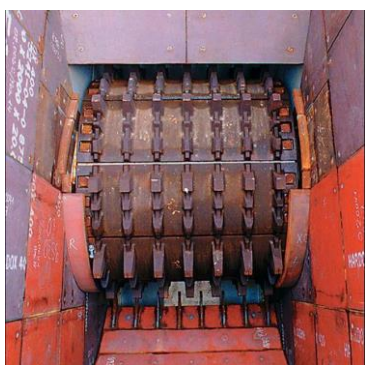
a



b

Rys. 3.16. Kruszarki jednowalcowe: a – firmy FAM, [31], b – firmy Cogar [32]

Na rysunku 3.17 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne walców rozdrabniających oraz stref roboczych kruszarek jednowalcowych stosowanych w przeróbce surowców mineralnych.



a



b

Rys. 3.17. Strefy kruszenia kruszarek jednowalcowych: a – kruszarki firmy FAM [31] do drobnego kruszenia, b – kruszarki firmy McLanahan [33] – do średniego kruszenia

Kruszarki walcowe - specjalne

Kruszarki jednowalcowe przeznaczone są do rozdrabniania innych materiałów, z których większość to materiały plastyczne, włókniste i inne niekrucho, cechuje duże zróżnicowanie budowy uwarunkowane właściwościami fizycznymi materiałów, które są w nich rozdrabniane oraz innymi względami, zwłaszcza ich zastosowaniem.

Kruszarki te można podzielić na dziewięć grup, przeznaczonych do rozdrabniania:

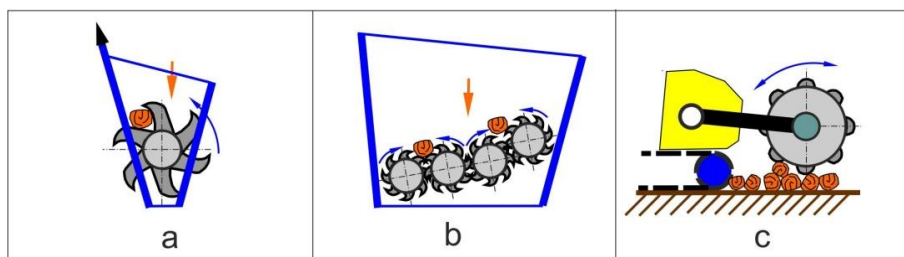
- materiałów kruchych – podczas załadunku w łyżce koparki [34, 35], (rys. 3.18 a i b oraz rys. 3.20 a i b),
- materiałów kruchych na podłożu oraz frezowania podłoża [36, 37] (rys. 3.18 c i 3.20 c),
- elementów drewnianych (rębaki) [38] (rys. 3.19 c i d),
- materiałów kruchych – głównie nadgabarytowych brył węgla podczas transportu na przenośniku [39], zwane kruszarkami ścianowymi (rys. 3.19 a i b oraz 3.21 a),
- zaglomerowanych materiałów (rozbylacze) [40] (rys. 3.19 e i f oraz rys. 3.21 b),
- materiałów metalicznych SWE, ZSEE (shreddery), [41, 42] (rys. 3.21),
- poużytkowych tworzyw polimerowych [43, 44], (rys. 3.22),
- poużytkowych wyrobów gumowych [43, 44]. (rys. 3.22),
- odpadów komunalnych [45].

Kilka firm oferuje kruszarki walcowe uzębione jako wyposażenie łyżek koparek najczęściej jako dwu walcowe. Produkowane są także maszyny jednowalcowe (rys. 3.18 a), trój- i czterowalcowe (rys. 3.1 b). Kruszarki te wyposażane są w hydrauliczny napęd jednego walca lub wszystkich walców [34, 35] i stanowią wyposażenie seryjnych koparek.

Kruszarki ścianowe jednowalcowe są wyposażeniem zmechanizowanych i zautomatyzowanych kompleksów ścianowych w kopalniach węgla. Umieszcza się je nad przenośnikami zgrzeblowymi transportującymi węgiel (rys. 3.19 a i b) [39, 46].

Do rozdrabniania swobodnych ziaren kruszywa na podłożu produkowane są jako jednowalcowe [36, 37]. Instalowane są na podwoziach kołowych lub gąsienicowych. Wśród tych maszyn są tzw. kombajny frezujące, które odpajają warstwę materiału z podłoża naturalnego – skalnego oraz do frezowania podłoża sztucznego - asfaltu (rys. 3.18 c).

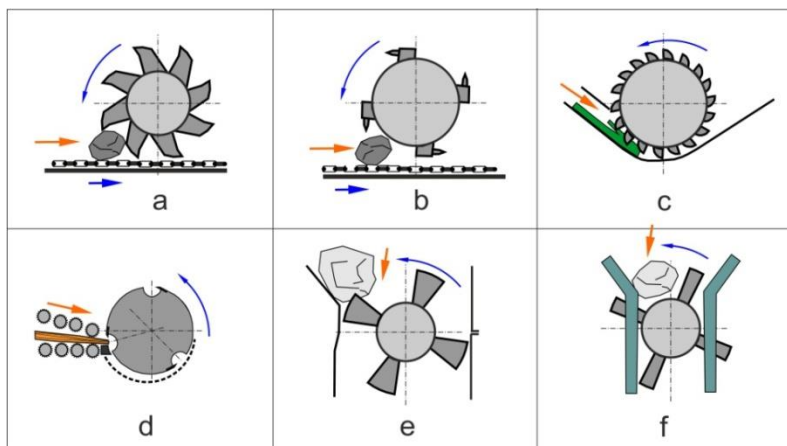
Całkowicie różnymi konstrukcjami są jednowalcowe rozdrabniacze do drewna – rębaki budowane w dwóch wersjach (rys. 3.19 c i d).



Rys. 3.18. Schematy budowy i działania kruszarek: a – jednowalcowej w łyżce koparki, b – czterowalcowej w łyżce koparki, c - na podwoziu gąsienicowym do rozdrabniania materiału w złożu [27]

Na rysunku 3.19 zamieszczono schematy kruszarek: ścianowych (a i b), rębaków (c i d) oraz rozbrylaczy (e i f).

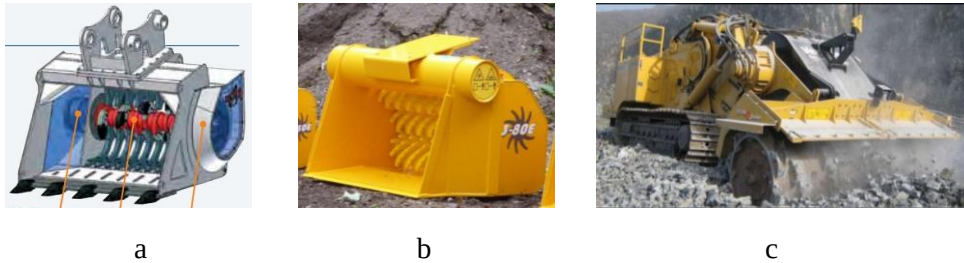
Wyspecjalizowane wersje niewielkich konstrukcji takich rozdrabniaczy używane są jako niszcarki papieru.



Rys. 3.19. Schematy budowy i działania kruszarek jednowalcowych: a – ścianowa do węgla z wirnikiem kształtowym b – ścianowa z nożami stycznymi, c – rębak gałęzi, d - rębak do bali, e - rozbrylacz materiałów (np. po suszeniu) bez przegród, f - rozbrylacz materiałów z przegradami [27]

Rysunek 3.20 przedstawia trzy specjalizowane rozwiązania kruszarek walcowych uzębionych. Są to dwie kruszarki usytuowane w łyżce koparki, które rozdrabniają materiał podczas rozładunku łyżki oraz kruszarkę do rozdrabniania swobodnych ziaren znajdujących się na podłożu oraz urabiania, frezowania jego powierzchni. Kruszarki te jako agregaty (kombajny) urabiają

oraz wstępnie rozdrabniają materiał przez co eliminują kruszarki wstępne. Stosowane są również do urabiania surowców skalnych, węgla (brunatnego i kamiennego) oraz soli kamiennej i innych surowców mineralnych w kopalniach odkrywkowych [37]. Podstawowe parametry kruszarek montowanych w łyżkach koparek zamieszczono w tabeli 3.3.



Rys. 3.20. Nowe zastosowanie kruszarek: a – jednowalcowa łyżka rozdrabniająca [34], b - trójwalcowa łyżka rozdrabniająca [35], walec rozdrabniający [36]

Podstawowe parametry wybranych kruszarek serii HCS [30]

Tabela.3.3.

Parametr	Typ kruszarki				
	CBE10	CBE20	CBE30	CBE 40	CBE 50
Szerokość [mm]	1250	1400	1640	1860	2440
Pojemność wg SAE [m ³]	0,40	0,60	0,82	1,05	1,80
Masa łyżki [kg]	880	1340	2290	2890	4640
Długość walca [mm]	550	630	750	970	1290
Liczba zębów, sztuk	5	5	6	8	10
Kategoria koparki	8-12	12-18	18-30	24-35	35-50
Wydatek oleju [l/min]	80-190	100-230	200-400	200-400	350-550
Ciśnienie oleju [bar]	350 -230	350-230	350-230	350-230	350-230

Na rysunku 3.21 zamieszczono przykładowe rozwiązania konstrukcyjne innych wyspecjalizowanych jednowalcowych kruszarek, to jest kruszarki ścianowej stanowiącej wyposażenie podziemnych kopalń węgla kamiennego (rys. 3.21 a) oraz kruszarki zwanej też rozdrabniaczem lub rozbrylaczem brył materiału rozdrobnionego, który aglomerował bezciśnieniowo, wskutek

składowania, lub wysuszenia (rys. 3.21 b). Kruszarki ścianowe montowane są nad przenośnikami zgrzeblowymi, które odprowadzają z pod walca kruszarki rozdrobniony materiał. Kruszarki – rozbrylacze cechują niewielkie zainstalowane moce oraz duże zróżnicowanie budowy.



a



b

Rys. 3.21. Kusrzarki jednawalcowe: a – ścianowa [46], b - rozbrylacz [32]

Na rysunku 3.22 przedstawiono kruszarkę jednawalcową do wstępnego rozdrabniania SWE i innych użytkowych wyrobów metalowych, a na rysunku 3.23 kruszarkę modułową rozdrabniającą użytkowe wyroby polimerowe oraz gumowe.

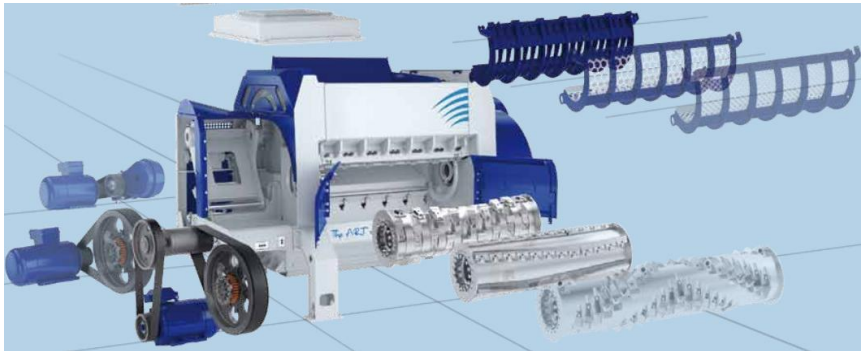


a



b

Rys. 3.22. Kusrzarka (*shredder*; strzępiarka) firmy Zato model GF 4000:
a – widok, b - strefa i nóż rozdrabniający [41]



Rys. 3.23. Wariantowe rozwiązanie kruszarki - rozdrabniacza firmy Lindner o trzech parach wymiennych elementów roboczych (walców z sitami) [42].

Kruszarki – rozdrabniacze walcowe zwane też rozdrabniaczami stosowane w rozdrabnianiu tworzyw polimerowych, gumy oraz innych materiałów niekruchych stanowią przedmiot wielu opracowań [28, 29, 30, 43] i znajdują się w ofercie wielu polskich i zagranicznych firm.

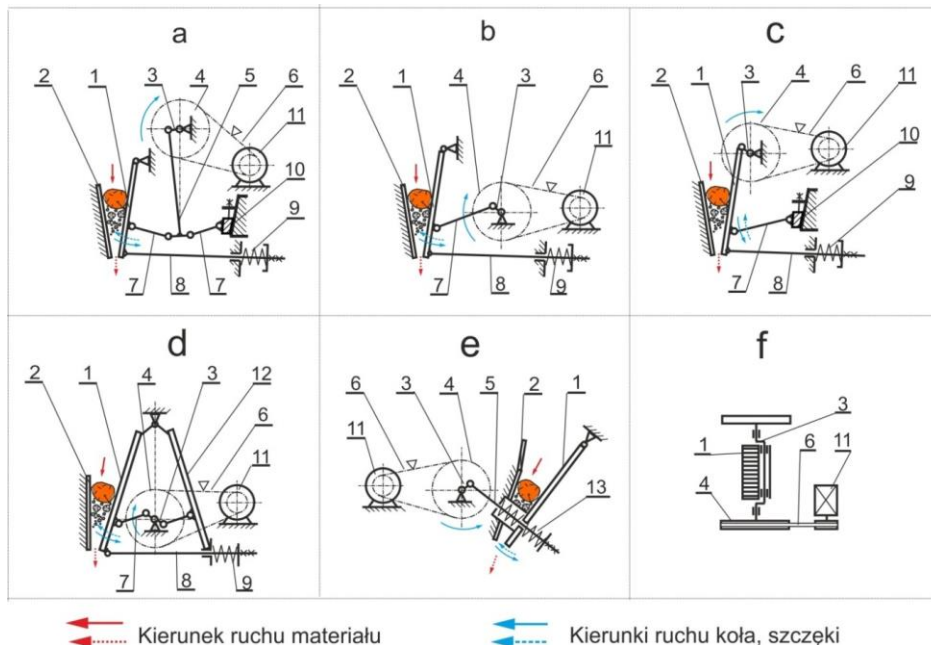
3.3. Kruszarki szczękowe

Kruszarka szczękowa została wynaleziona i opatentowana w USA przez Blake’a w 1858 roku, czyli sześć lat wcześniej od opatentowania kruszarki walcowej. Była to kruszarka o prostym ruchu szczęki – dwurozporowa - produkowana obecnie w udoskonalonych wersjach. Już w XIX wieku w USA uzyskano kilkadziesiąt patentów kruszarek szczękowych z napędem jednej szczęki, obu szczęk, z górnym, dolnym i środkowym zawieszeniem szczęki ruchomej [47]. W XX wieku opracowano jeszcze wiele rozwiązań konstrukcyjnych tej kruszarki, w których strefa rozdrabniania pozostała w niewiele zmienionej postaci. Udoskonalono głównie konstrukcję wałów mimośrodowych, wykładziny kruszące szczęk, napędy, konstrukcje płyt rozporowych, wprowadzono centralne smarowanie i monitoring pracy kruszarki. Podstawowe rozwiązania konstrukcyjne kruszarek szczękowych zamieszczono na rysunku 3.24.

Wyróżnić można kilka odmian konstrukcyjnych tych kruszarek, różniących się ruchem wykonywanym przez szczękę roboczą oraz mechanizmem, który wprowadza ją w ruch oraz przenosi obciążenie niezbędne do niszczenia struktury ziaren rozdrabnianego materiału, czyli jego rozdrabniania. Przyjmując te kryteria wyróżnić można kruszarki:

- o prostym ruchu szczęki – dwurozporową (rys. 3.24 a),
- o prostym ruchu szczęki (rys. 3.24 b),

- o złożonym ruchu szczęki – jednorozporową (rys. 3.24 c),
- o prostym ruchu szczęki z przeciwszczęką (rys. 3.24 d),
- o prostym ruchu szczęki ze szczęką napędzaną więzią sprężystą – udarową (rys. 3.24 e).



Rys. 3.24. Schematy budowy kruszarek: a - o prostym ruchu szczęki - dwurozporowa, b - o prostym ruchu szczęki, c - o złożonym ruchu szczęki – jednorozporowa, d - o prostym ruchu szczęki z przeciwszczęką, e – szczękowa – udarowa, f – mechanizm mimośrodowy napędzający szczęki, 1 – szczęka ruchoma, 2 – szczęka stała, 3 – wał mimośrodowy, 4 – koło pasowe – zamachowe, 5 – cięgło napędowe, 6 – przekładnia pasowa, 7 – płyta rozporowa, 8 – cięgło, 9 – sprężyna, 10 – mechanizm regulacji szczeliny, 11 – silnik, 12 – przeciwszczęka, 13 – więź sprężysta

Kruszarki te o bardzo zróżnicowanej wydajności oferuje kilkanaście dużych światowych firm oraz kilkadziesiąt mniejszych. We wszystkich kruszarkach szczęka ruchoma wprowadzana w ruch wahadłowy bezpośrednio przez mechanizm napędzany wałem mimośrodowym napędzanym z jednego lub dwóch silników przekładnią pasową. Wyjątek stanowi kruszarka szczękowa – udarowa, której szczęka napędzana jest przez więź sprężystą (rys. 3.24 e).

W literaturze [5] znajdują się wzmianki o jeszcze innych rozwiązaniach kruszarek szczękowych, na przykład: kruszarka o prostym ruchu szczęki z napędem hydraulicznym, z hydraulicznym systemem regulacji szczeliny, z dwoma parami szczęk i inne, ale ze względu na ich wysoki koszt produkcji, lub skomplikowaną budowę rzadko są oferowane. Jedną z odmian kruszarki szczękowej to kruszarka z poziomą strefą rozdrabniania. Kruszarka ta kruszy urobek transportowany na przenośniku zgrzeblowym [39, 48].

W dominującej większości kruszarek zabezpieczeniem przed uszkodzeniem są dwie lub jedna płyta rozporowa. W kruszarkach o niewielkiej wydajności jedna firma stosuje mechanizm dźwigniowo-sprężynowy usytuowany na kole pasowym znajdującym się na wale mimośrodowym napędzającym szczękę.

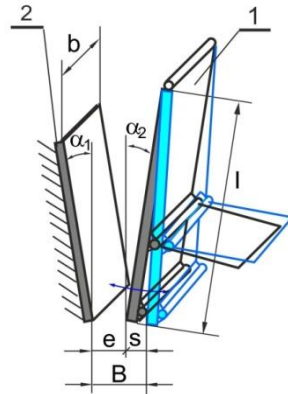
Na wstępny dobór kruszarki mają najważniejszy wpływ takie czynniki, jak:

- wydajność,
- maksymalny wymiar ziaren nadawy,
- uziarnienie produktu kruszenia,
- moc silnika.

Natomiast na wydajność kruszarki ma wpływ:

- maksymalny wymiar ziarna nadawy i jej uziarnienie,
- uziarnienie produktu kruszenia – uwarunkowane wymiarem szczeliny wylotowej,
- prędkość obrotowa wału mimośrodowego,
- budowa kruszarki, w szczególności lokalizacja punktu obrotu szczęki, co dokładnie podano w pracy [3], kształt strefy rozdrabniania, skok szczęki ruchomej oraz kształt powierzchni wykładziny szczęk,
- wilgotność materiału, która wpływa na parametry wytrzymałościowe rozdrabnianego materiału (tab. 2.7), oraz na współczynnik tarcia - na którą użytkownik kruszarki może wpływać, ale tylko w pewnym zakresie - na przykład przez odpowiednie składowanie materiału,
- współczynnik tarcia rozdrabnianego materiału o materiał szczęk, na ten parametr użytkownik nie ma wpływu,
- inne parametry eksploatacyjne, jak równomierne dozowanie nadawy, stabilność jej uziarnienia i własności fizycznych i inne.

Schemat strefy kruszenia kruszarki szczękowej zamieszczono na rysunku 3.25.



Rys. 3.25. Schemat budowy strefy kruszenia w kruszarce szczękowej: 1 – szczęka ruchoma, 2 – szczęka nieruchoma, b – szerokość szczęki, l – długość szczęki, e – szczelina wylotowa przy szczękach zwartych, B – szczelina wylotowa przy szczękach rozwartych, s – skok szczęki, α_1 , α_2 – kąty pochylenia szczęk do pionu

Wydajność kruszarki szczękowej Q_v w przybliżony sposób oblicza się z empirycznego wyrażenia [6]:

$$Q_v = 3,1 \, k_b \, B \, b \, 10^{-4} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

gdzie: k_b – współczynnik szerokości, mm (tab.3.4),

B – szczelina pomiędzy szczękami - przy rozwarciu szczęk, mm

b – szerokość szczęk, mm

s – skok szczęki, mm.

Wartości współczynnika k_b

Tabela 3.4.

b	400	600	900	1200	1500	2100
k_b	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,9

W sposób bardziej dokładny wydajność kruszarki można obliczyć z wyrażenia [6]:

$$Q_v = c \, b \, B \, s \, n \, p \, K_o \, 10^{-7} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

gdzie: c – współczynnik rodzaju materiału i kształtu szczęk, mm (tab.3.5),

s – skok szczęki, mm,

n – prędkość obrotowa wału mimośrodowego, obr./min,

p – współczynnik uwzględniający kąt pomiędzy szczękami, przy $26^\circ \, p = 1$,

K_o – współczynnik obciążenia, poniżej 1.

Wartości współczynnika c [6]

Tabela 3.5.

Rodzaj materiału	Rodzaj wykładziny kruszącej szczęk	
	Gładka	Profilowana
Naturalna nadawa	1,4	1,0
Nadawa wstępnie odsiana	1,25	0,85
Duże ziarna	1,0	0,7

Pobór mocy kruszarki szczękowej można obliczać z wielu wyrażeń. Najczęściej wstępny pobór mocy obliczany jest na podstawie hipotezy Kicka [3, 4, 5]. Jednak praktycznie wygodniej użyć do tego celu hipotezę Bonda – opracowaną do wyznaczania mocy młynów grawitacyjnych, której wskaźniki WI są bardziej dostępne. Oprócz tych wyrażeń w literaturze występują jeszcze wyrażenia empiryczne [3, 5]. Dobre rezultaty można otrzymać posługując się prostym wyrażeniem empirycznym, do którego nomogram podano w pracy [5].

Według [5] pobór mocy przez kruszarkę oblicza się z wyrażenia:

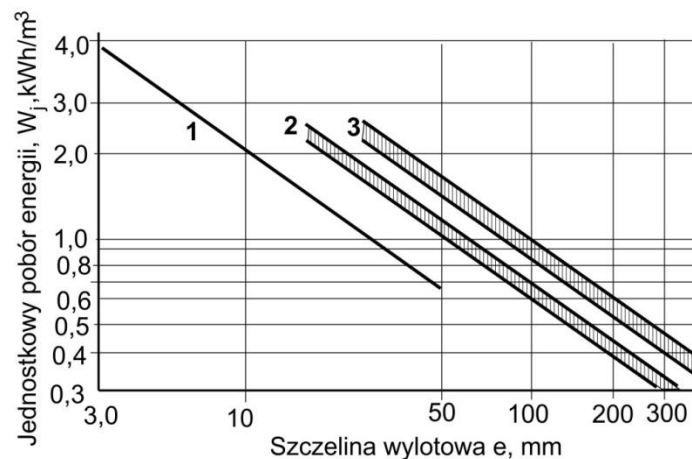
$$P = W_j Q_v$$

gdzie: W_j – jednostkowy pobór energii, kWh/m³.

Wartości W_j – zawiera nomogram podany na rysunku 3.26 [5].

Obecnie w Polsce kruszarki szczękowe oferuje kilka firm. Najbardziej znane są kruszarki produkowane przez firmę Makrum [18]. Firma ta oferuje dwa typy kruszarek szczękowych o prostym i złożonym ruchu szczęki. Są to trzy kruszarki typu JC-S o wydajności od 15 do 200 m³/h i mocy silnika od 40 do 2x75 kW oraz kruszarki typu JS-C (6 wielkości) o wydajności od 0,5 do 375 m³/h i mocy silnika od 11 do 110 kW.

Druga firma z Bydgoszczy Makrusz oferuje jeden typ kruszarki szczękowej o wydajności 50÷150 Mg/h o mocy silnika 75 kW [49]. Większy program produkcyjny ma firma Goster, która oferuje typoszereg składający się z 7 kruszarek o wydajności od 10 do 600 Mg/h i mocy silnika od 11 do 160 kW. Produkuje je również firma KGHM ZANAM.



Rys. 3.26. Nomogram jednostkowego poboru energii W_j w kruszarkach: 1 – szczękowej dla materiałów średnio-twardych twardych (Tab. 2.2), 2 – kruszarek stożkowych z wałem podwieszonym, 3 – kruszarek stożkowych z wałem podpartym [5].

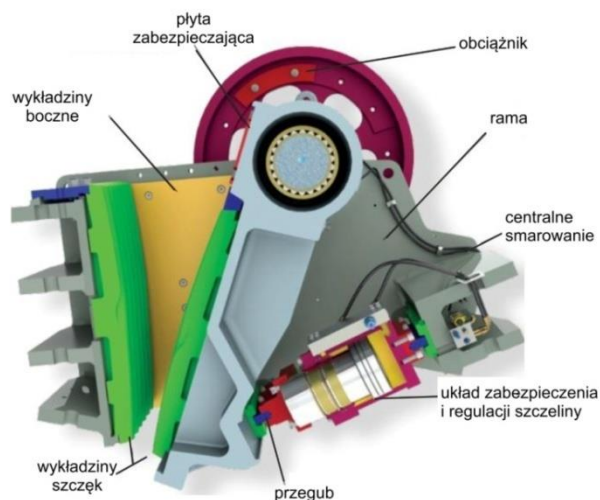
Kruszarki o znacznie większych wydajnościach oferują firmy FLSmidth, Thyssen-Krupp, Metso, Sandvik, Terex, DSP Přerov, Aubema, KPI-JCI Astec Companies, Telsmith i inne. Kruszarki te produkują również firmy rosyjskie, chińskie, japońskie, hinduskie, tureckie i inne.

Firma Sandvik oferuje 12 modeli kruszarek szczękowych o złożonym ruchu szczęki, o wydajności od 80 do 1160 Mg/h. Rozwiązanie konstrukcyjne tej kruszarki zamieszczono na rysunku 3.27, a na rysunku 3.28 oferowane do niej wykładziny drobiące [50].

Na rysunku 3.29 przedstawiono kruszarkę szczękową firmy Nordberg z grupy Metso [22], a na rysunku 3.30 zamieszczono kruszarkę Hydra Jaw firmy Telsmith [51] z hydraulicznym zabezpieczeniem i regulacją szczeliny.

W tabeli 3.6 ujęto wybrane modele kruszarek serii C grupy Metso, a w tabeli 3.7 parametry kruszarek produkowanych obecnie przez firmę Thyssen-Krupp [52].

480 Mg/h oraz zainstalowanej mocy od 93 do 112 kW. Szerokość szczęk poszczególnych kruszarek wynosi od 965 do 1270 mm. Maksymalny wymiar ziaren nadawy do tych kruszarek wynosi około 1000 mm. Układ hydrauliczny ma zainstalowaną moc 5,6 kW dla wszystkich kruszarek. Firma oferuje opcjonalnie układ smarowania kruszarki sterowany automatycznie.



Rys. 3.30. Kruszarka Hydra Jaw firmy Telsmith o złożonym ruchu szczęki i hydraulicznym układzie zabezpieczenia, regulacji szczeliny i oczyszczania strefy kruszenia [51]

Podstawowe parametry wybranych kruszarek serii C grupy Metso [22]

Tabela 3.6.

Model	C80	C 100	C1250	C145	C160	C200
Szerokość wlotu [mm]	800	1000	1250	1450	1600	2000
Głębokość zasypu [mm]	510	760	950	1100	1200	1500
Moc [kW]	75	110	160	200	250	400
Prędkość obr. [obr/min]	350	260	220	220	220	200
Produkt [mm]	Szczelina [mm]	Wydajność [Mg/h]				
0-60	40	55-75				
0-75	50	65-95	*			
0-90	60	80-110	*			
0-105	70	95-135	125-175			
0-120	80	110-150	145-200	•		
0-135	90	125-175	160-220	*		
0-150	100	140-190	180-250	245-335	*	*

cd. Tabeli 3.6.

Produkt [mm]	Szczelina [mm]	Wydajność [Mg/h]					
		175-245	220-310	295-405	335-465		*
0-185	125	175-245	220-310	295-405	335-465		*
0-225	150	210-290	265 - 365	345-475	395-545	430-610	*
0-260	175	245-335	310-430	395-545	455-625	495-695	630 - 890
0-300	200		355-490	445-615	510-710	560-790	710-1000
0-340	225			495-685	570-790	625-880	785-1105
0-375	250			545-755	630-870	685-965	865-1215
0-410	275				690-950	745-1055	940-1320
0-450	300					815-1145	1015-1435

Podstawowe parametry wybranych kruszarek serii EBM i EB ThyssenKrupp [52]

Tabela 3.7.

Typ	Wymiar wlotu [mm x mm]	Wydajność [Mg/h]	Szczelina, max. [mm]	Moc, [kW]	Masa, [kg]
EBM 0907	900 x 600	100 -180	80- 150	55-75	14.000
EBM 1108	1050 x 750	180 - 280	100 - 200	90-132	22 500
EBM 1209	1200 x 900	200 - 350	100 - 225	110-200	29 100
EBM 1210	1200 x 1000	250 - 400	125 - 225	132 - 200	30 000
EBM 1510	1500 x 1000	300 - 500	125 - 250	160 - 250	44 500
EBM 1512	1500 x 1200	400 - 600	150-300	200 - 280	78 000
EB 1210 N	1200x 1000	250 - 500	125-275	110-132	42 000
EB 1210H	1200 x 1000	200 - 400	125-275	132-160	48 000
EB 1411N	1400 x 1100	350 - 700	135-285	132-160	56 000
EB 1411H	1400 x 1100	250 - 500	135 - 285	160 - 200	62 000
EB 1612 N	1600 x 1200	450 - 900	150-300	160 - 200	70 000
EB 1612H	1600 x 1200	300 - 600	150-300	200 - 250	85 000
EB 1814 N	1800 x 1400	600- 1100	165-315	200 - 250	96 000
EB 1814 H	1800 x 1400	400 - 800	165-315	250-315	110 000
EB 2015N	2000 x 1500	800- 1400	180 - 330	250-315	130 000
EB 2015 H	2000 x 1500	500-1000	180 - 330	250 - 355	150 000

3.4. Kruszarki stożkowe

Kruszarka stożkowa z wałem podwieszonym została wynaleziona w USA w roku 1895. Opatentowano ją pod nazwą *gyratory jaw-crusher*, a pierwszy jej egzemplarz wyprodukowała firma Allis-Chalmers Co w Chicago pod nazwą Comet Crusher. W XX wieku opracowano szereg rozwiązań konstrukcyjnych tych kruszarek, które zastosowano głównie w przeróbce surowców mineralnych jako kruszarki wstępnego, średniego i drobnego kruszenia [3, 4, 5, 6].

Kruszarki te w porównaniu z kruszarkami szczękowymi charakteryzują się znacznie korzystniejszymi zaletami technologicznymi i technicznymi w porównaniu z kruszarkami walcowymi i szczękowymi:

- wytworzony w nich produkt kruszenia cechuje znacznie większa ilość ziaren kubicznych,
- ruch obrotowy głównego elementu roboczego – stożka zapewnia bardziej spokojną pracę, generuje znacznie mniejsze obciążenia na konstrukcję hali, a konstrukcja kruszarki stożkowej nie wymaga stosowania koła zamachowego,
- posiadają wydajność większą ($2,5 \div 3$ razy) przy zbliżonych do kruszarek szczękowych szerokościach wlotu,
- charakteryzują się mniejszym zapotrzebowaniem jednostkowym energii,
- przy tej samej wydajności jak kruszarki szczękowe mają mniejsze wymiary gabarytowe,
- można zasilać je na całym obwodzie otworu wlotowego.

Wady tych kruszarek w porównaniu z kruszarkami szczękowymi i walcowymi to:

- bardziej skomplikowana budowa, większa masa, wyższe koszty inwestycyjne, większe koszty serwisu,
- brak możliwości rozdrabniania materiałów plastycznych oraz materiałów o podwyższonej wilgotności,
- wyższy koszt elementów roboczych (stożków, wewnętrznego i zewnętrznego),
- wyższe kwalifikacje obsługi.

Kruszarki stożkowe stosuje się do rozdrabniania materiałów twardych o wytrzymałości na ściskanie powyżej 150 MPa o właściwościach ścierających. Stosowane są w procesach wstępnego (grubego), średniego i drobnego kruszenia o dużej i średniej wydajności. Stopień rozdrobnienia kruszarek stożkowych stosowanych do wstępnego rozdrabniania wynosi $3 \div 4$, maksymalnie 8. Jednostkowe zapotrzebowanie energii wynosi $0,5 \div 2,5$ kWh/Mg, a jednostkowe zużycie elementów roboczych wynosi od 0,005 do 0,03 kg/Mg. Stopień rozdrobnienia kruszarek stożkowych do rozdrabniania średniego i drobnego wynosi $4 \div 7$, maksymalnie 15. Jednostkowy pobór energii wynosi $0,1 \div 1,3$ kWh/Mg, a jednostkowe zużycie elementów roboczych wynosi od 0,001 do 0,005 kg/Mg.

Proces kruszenia ziaren materiału w tych kruszarkach zachodzi pomiędzy dwoma stożkami: ruchomym wewnętrznym i nieruchomym zewnętrznym, przy czym stożek wewnętrzny, którego oś geometryczna jest odchylona od nieruchomej osi geometrycznej stożka zewnętrznego o niewielki kąt (kilku

rozdrabnianego materiału. Wydajność kruszarek (o stożkach przeciwbieżnych) do wstępnego kruszenia w sposób uproszczony można obliczyć z wyrażenia [6]:

$$Q_s = 0,8 \rho_m e D^{2,5} \quad [\text{Mg/h}]$$

gdzie: Q_s – wydajność kruszarki, Mg/h,

ρ_m – gęstość nasypowa rozdrabnianego materiału, Mg/m³

D – średnica podstawy stożka kruszącego, m

e – najmniejszy wymiar szczeliny, m.

Wydajność kruszarek średniej i małej wydajności określa wyrażenie [4]:

$$Q_s = 0,98 \rho_m e D^{2,5} \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

Zapotrzebowanie mocy dla kruszarek o stożkach przeciwbieżnych oblicza się z wyrażenia [3]:

$$N_s = 85 D_{\max}^2 \quad [\text{kW}]$$

gdzie: $D_{\max}$ – największa (dolna) średnica stożka wewnętrznego, m.

Natomiast dla kruszarek o stożkach współbieżnych [3]:

$$N_s = 12,6 \phi_{\max}^2 n \quad [\text{kW}]$$

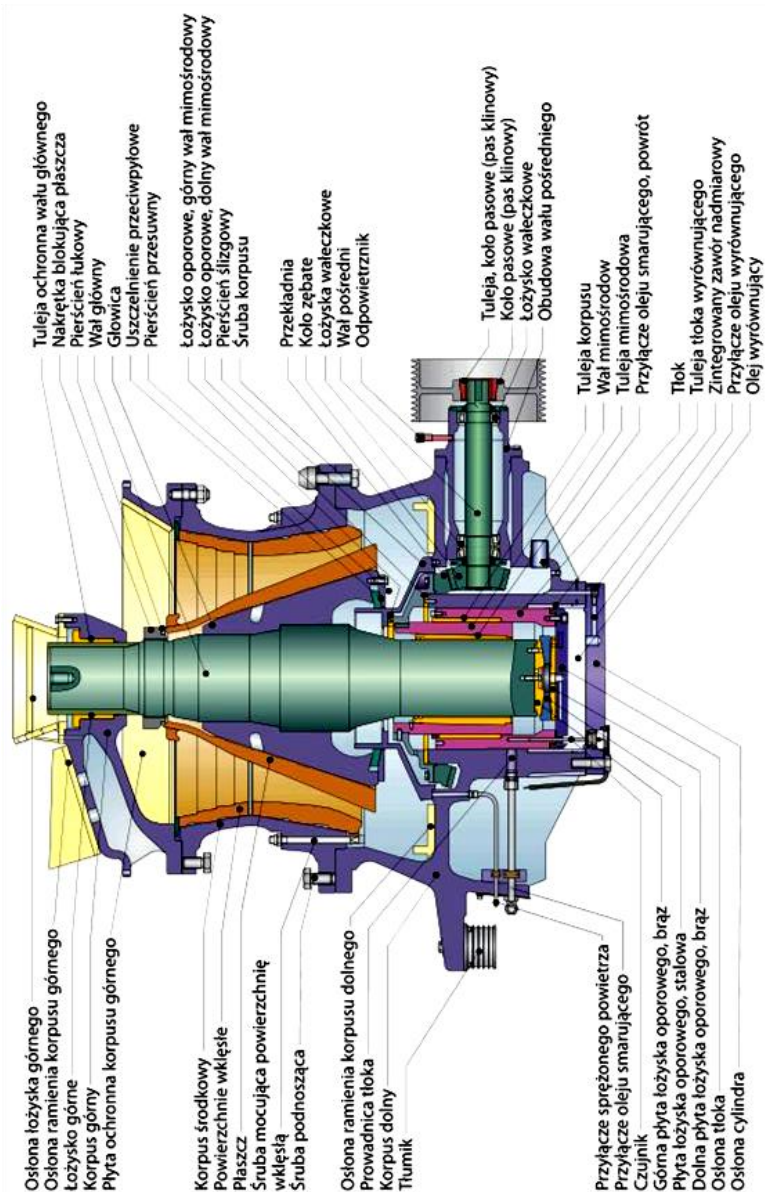
gdzie: n – prędkość obrotowa stożka, 1/s,

$\phi_{\max}$ – średnica podstawy stożka, m.

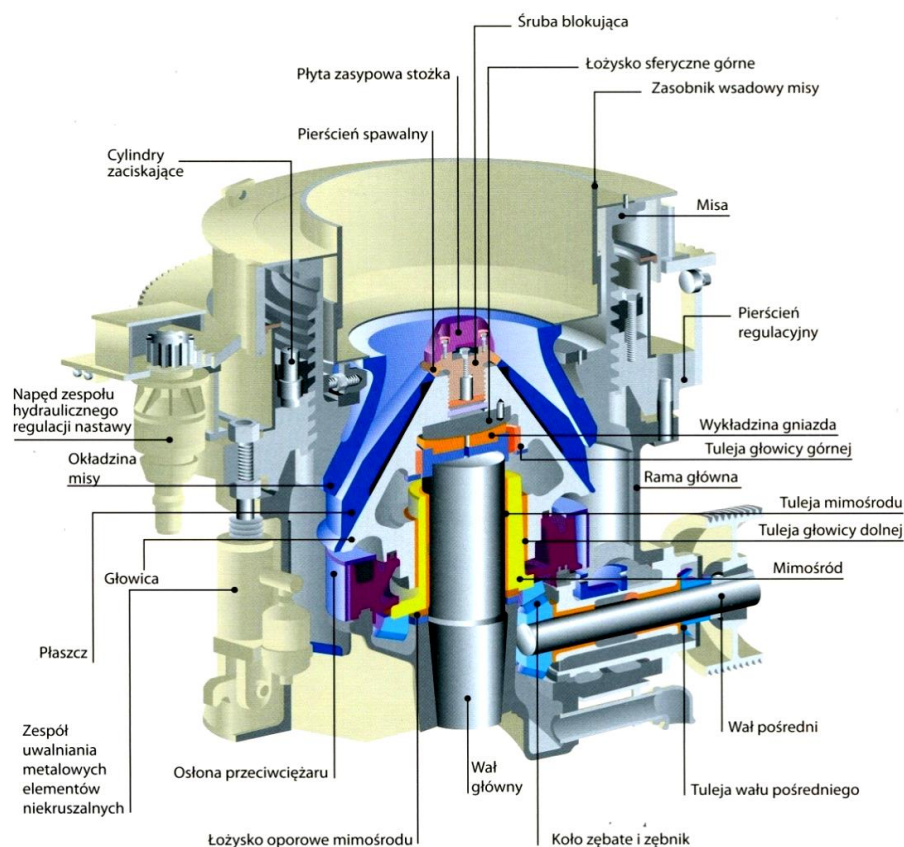
Rozwiązania konstrukcyjne dwóch typów kruszarek oferowanych przez firmę Metso zamieszczono na rysunkach 3.32 oraz 3.33.

Firma Makrum oferuje 4 modele kruszarki serii CC o wydajności od 6 do 406 Mg/h – w zależności od uziarnienia nadawy i produktu kruszenia. Zakres zainstalowanej mocy tych kruszarek wynosi 45÷315 kW. Mniejszy asortyment tych kruszarek oferuje firma Goster. Są to dwie maszyny o wydajności 20÷60 Mg/h, a zakres mocy tych kruszarek wynosi 55÷90 kW.

Znacznie większą ofertę kruszarek stożkowy ma firma Metso. Podstawowe dane techniczne jednej z serii kruszarek – HP podano w tabeli 3.8.



Rys. 3.32. Rozwiązanie konstrukcyjne kruszarki stożkowej typ GP Superior z wałem podwieszonym firmy Metso [54]

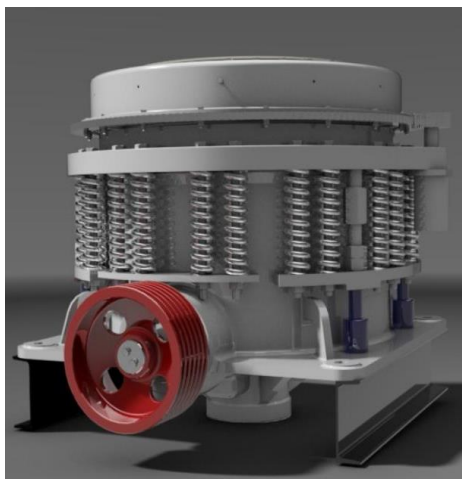


Rys. 3.33. Rozwiązanie konstrukcyjne kruszarki stożkowej typ HP z wałem podpartym [55]

Na rysunku 3.34 zamieszczono kruszarkę stożkową firmy Makrum, a na rysunku 3.35 kruszarkę stożkową firmy Goster.



Rys. 3.34. Kruszarka stożkowa serii CC firmy Makrum [56]



Rys. 3.35. Krusarka stożkowa typ GC firmy Goster [57]

Podstawowe parametry kruszarek typoszeregu HP firmy Metso [55]

Tabela 3.8.

Model	HP-100	HP-200	HP-300	HP-400	HP-500	HP-800
Masa kompletnej kruszarki [kg]	5 400	10 400	15 810	23 000	33 150	68 650
Masa wykładziny nasadki [kg]	1 320	2 680	3 525	4 800	7 200	17 350
Masa płaszcza i płyty zasypu [kg]	600	1 200	2 060	3 240	5 120	10 800
Moc [kW]	90	132	200	315	355	600
Prędkość obrot. wału pośredniego [obr/min]	750÷1200	750÷1200	700÷1200	700÷1000	700÷950	700÷950
Wydajność kruszarki [Mg/h]	45÷140	90÷250	115÷440	140÷630	175÷690	260÷1200
Zakres zmiany szczeliny [mm]	6÷32	10÷38	10÷45	10÷51	10÷51	10÷51

Na rysunku 3.36 przedstawiono kruszarkę HP-5 firmy Metso ze zmodernizowanego typoszeregu kruszarek serii HP oznaczonych symbolami: HP3, HP4, HP5 oraz HP6 [55]. Są to kruszarki nowej generacji, o znacznie korzystniejszych parametrach technologicznych produkowanej od kilkunastu lat kruszarek serii HP, których parametry ujęto w tabeli 3.9. Potrzebę opracowania nowego typoszeregu zdeterminowały potrzeby rynku, czyli firm produkujących kruszywa, które powinny zawierać jak największą ilość klasy ziarnowej 0÷10 mm oraz wytwarzania kruszywa o wymaganej jakości uziarnienia

w trzecim stopniu kruszenia. Na rysunku 3.37 zamieszczono przekrój kruszarki firmy Sandvik serii CG o dużej wydajności [60]. Podstawowe parametry tej kruszarki podano w tabeli 3.10.



Rys. 3.36. Kruszarka stożkowa nowy typ HP-5 firmy Metso [59]



Rys. 3.37. Kruszarka stożkowa firmy Sandvik [60]: 1 – przegub, 2 – stożek, 3 – stożek zewnętrzny, 4 - tłok, 5 – wlot medium

Podstawowe parametry nowej serii kruszarek HP [59]

Tabela 3.9.

Model	Uziarnienie nadawy [mm]	Moc, [kW]	Wydajność, [Mg/h]	Zakres regulacji szczeliny [mm]	Masa kompletnej kruszarki [kg]
HP3	220	220	94+280	8+45	17600
HP4	252	315	135+400	8+45	25800
HP5	312	370	158+460	8+45	28820
HP6	330	450	220+570	10+45	45400

Masa kompletnej kruszarki uwzględnia masy: kruszarki, ramy, silnika z ramą, przenośnika dozującego z ramą i przenośnika odbierającego.

Podstawowe parametry dużych kruszarek serii CG [60]

Tabela 3.10.

Model	Uziarnienie nadawy [mm]	Moc [kW]	Wydajność, [Mg/h]	Masa [Mg]	Zakres regulacji szczeliny [mm]	Prędkość obrót, wału pośredniego [obr/min]
CG650	1150x3170	375	910+2460	181	100+175	460
CG820	1350x3350	450	1530+3580	262	130+205	440
CG840	1550x4140	600	2370+5540	451	150+235	430
CG850	1550x4140	800	3090+6980	523	150+235	420

Na podstawie własnych doświadczeń firma Metso stwierdziła, że najlepsze parametry jakościowe produktu rozdrabniania można otrzymać dzięki przestrzeganiu pewnych reguł eksploatacyjnych zwanych „złotymi regułami” [61]. Zasady te są znane użytkownikom kruszarek stożkowych, a ich stosowanie zapewnia właściwe wykorzystanie tych urządzeń oraz otrzymywanie produktów kruszenia wysokiej jakości.

Najważniejsze „złote reguły” to:

- wypełnienie komory kruszenia rozdrabnianym materiałem wraz ze stabilnym i ciągłym podawaniem nadawy,
- stabilne utrzymywanie w nadawie materiału o rozmiarze ziaren poniżej rozmiaru szczeliny,
- zachowanie odpowiedniego rozmiaru ziaren materiału podawanego na trzeci stopień kruszenia,
- właściwe rozprowadzenie nadawy do kruszarki,
- racjonalne ustawienie szczeliny w celu uzyskiwania wymaganej klasy ziarnowej produktu kruszenia.

Dobre rezultaty, zwłaszcza w tych kruszarkach można uzyskać przy użytkowaniu kruszarki w cyklu zamkniętym to jest z klasyfikatorem ziarnowym (przesiewaczem). Sposób ten dzięki zawrotowi nadwymiarowych ziaren zapewnia [61]:

- w drugim stopniu kruszenia: właściwe zapewnienie komory kruszenia, stabilizację wymiarową największych ziaren w produkcie kruszenia kierowanym do trzeciego stopnia rozdrabniania,
- w trzecim stopniu kruszenia: polepszenie kształtu ziaren produktu przez zapewnienie autogenicznego oddziaływania wzajemnego rozdrabnianych ziaren w komorze, a dzięki temu uzyskiwanie stabilnej krzywej uziarnienia produktu, a w przypadku trudnych materiałów dokruszenie - kubizację płaskich ziaren.

Najkorzystniejszy rezultat technologiczny można uzyskać w układzie technologicznym kruszarki stożkowej użytkowanej w cyklu zamkniętym, w którym dodatkowo zastosuje się wstępne odsiewanie podziarna z nadawy do kruszarki, co zrealizowała firma Metso [59].

W unowocześnionych kruszarkach HP 3÷6 wprowadzono również szereg zmian konstrukcyjnych, których celem było skrócenie czasu postojów oraz poprawa bezpieczeństwa obsługi. Uzyskano to przez:

- zastosowanie grubszych wykładzin roboczych stożka jak i misy,
- wyeliminowanie konieczności używania masy wypełniającej przy montażu wykładzin – co skróciło czas uruchomienia kruszarki zaraz po montażu nowego kompletu wykładzin, bez oczekiwania na utwardzenie się masy,
- zastosowanie mechanizmu ograniczającego obrót stożka oraz akumulatorów hydraulicznych dwustopniowego działania eliminujących przeciążenia kruszarki oraz zabezpieczającej ją w przypadku dostania się elementu metalicznego,
- zastosowanie obudowy kruszarki, w celu ochrony obsługi oraz eliminacji emisji pyłu.

Bardzo ważnym zagadnieniem jest odpowiedni dobór kruszarki do własności fizycznych rozdrabnianego materiału, przy zachowaniu możliwie najniższych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych oraz jakości produktu kruszenia. Zagadnienie to jest przedmiotem wielu prac, w tym prac o charakterze podstawowym [62, 63]. Stąd przed podjęciem decyzji o modernizacji lub budowie nowego układu kruszenia dobry rezultat można osiągnąć po skorzystaniu z tej literatury, zwłaszcza że została opracowana na

podstawie wieloletnich doświadczeń z eksploatacji zakładów przeróbki mechanicznej wielu zakładów w Polsce i za granicą.

Dobór technologii kruszenia powinien uwzględnić nie tylko parametry techniczne i technologiczne kruszarek, ale całych układów kruszenia.

Literatura

1. <http://www.slideshare.net/Utsavkant/crushing-of-coal-and-calculation-of-size-reduction-efficiency>
2. Linkenbach, C.: Die Aufbereitung der Erze. Julius Springer Verlag, Berlin, 1887
3. Battaglia A., Banaszewski T.: Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych, Cz. 1. Maszyny do przesiewania i rozdrabniania. Warszawa, Kraków, PWN 1972
4. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
5. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
6. Schubert H.: Aubereitung fester mineralischer Rohstoffe, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1987
7. Zogg M.: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik. B. G. Teubner Stuttgart 1993
8. Unland G., Schmidt M.: Zur Systematik von Walzenbrechern (Classification of Roll Crushers). Aufbereitungs Technik 48 2007, No 4 s. 6-17
9. Poradnik Górnika t.5, Wydawnictwo Śląsk 1976
10. Ilievč A. P.: Mašiny i oborudovanie dla zavodov po proizvodstvu keramiki i ognieuporov. Izdatielstvo Mašinostrojenije. Moskva 1968
11. Schmidt M.: Modellierung der Zerkleinerung in Profilwalzenbrechern. Technische Universität Bergakademie Freiberg 2011
12. Optimized crusher selection for the cement industry. Technical paper for APAAC, XXVI Technical Congress, September 7-10, 2009, Bogota - Colombia
13. www.krupprobins.com/Publications/.../0613_mineral_processing
14. www.flsmidth.com/en-US/.../Crushing/RollCrushers/RollCrushers
15. <http://pdf.directindustry.com/pdf/sandvik-mining-rock-technology/san>
16. www.aubema.com
17. www.dpgoster.pl
18. www.makrum.pl
19. <http://www.utshredder.com>
20. www.arjes.de/wp-content/uploads/.../impaktor-800-2016-de.pdf
21. <https://www.franklinmiller.com/product/delumper-multi-shaft-lp/>

22. <http://www.metso.com/industries/recycling>
23. <http://www.hazemag-group.com/homepage/>
24. <http://zemag-zeitz.com/>
25. <http://www.directindustry.de/prod/flsmidth-dorr-oliver-eimco/product-62016-1637178.html>
26. <https://www.satrindtech.com/>
27. Sidor J.: Współczesne konstrukcje kruszarek – rozdrabniaczy walcowych: Innowacyjne i Przyjazne dla Środowiska Techniki i Technologie Przeróbki Surowców Mineralnych: Bezpieczeństwo – Jakość – Efektywność. KOMEKO 2017. Praca zbiorowa. Red. nauk. A. Klich, A. Kozieł. Gliwice. Instytut Techniki Górniczej KOMAG 2017. s. 47-62
28. Pahl M.H.: Praxiwissen Verfahrrentechnik Zerkleinerungstechnik, Fachbuchverlag Leipzig 1993. Verlag TÜV Rheinland, Köln
29. Macko M.: Metoda doboru rozdrabniaczy wielokrawędziowych do przeróbki materiałów polimerowych. Wydawnictwo Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego, Bydgoszcz 2011
30. Sykutera D.: Rozwój konstrukcji wirników młynów nożowych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna 2010, 49, 5, s. 113-114
31. <http://www.fam.de/>
32. <http://cogarmanufacturing.com/crushing-equipment/>
33. <http://mclanahan.com/products/roll-crushers/single-roll-crushers>
34. www.simex.it
35. <https://www.vermeer.de>
36. <https://www.reinhardt-nubau.de>
37. Władzielczyk K., Kipczak P., Dudek R.: Perspektywy zastosowania kombajnów frezujących do urabiania złóż surowców skalnych. Monografia „Problemy Eksploatacji i Zarządzania w Górnictwie. Red. K. Krauze. Akademia Górniczo-Hutnicza Kraków 2017, s. 259-268
38. www.b2bbioenergy.eu/b2b/offerimages/factsheet-111.pdf
39. Sidor J., Feliks J., Mazur M.: Kruszarki do rozdrabniania węgla w warunkach kopalń podziemnych. Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych. Monografia, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie. Kraków, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics. Department of Mining, Dressing and Transporting Machines, 2013. S. 438–445
40. <http://pacecompany.com>
41. <http://www.zatoshredder.com/>
42. <http://www.l-rt.com/de/produkte/produkt-uebersicht.html>
43. Flizikowski J.: Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno Rolniczej w Bydgoszczy. Bydgoszcz 1998

44. <http://www.granutech.com/>
45. Fitzgerald G. C.: Technical and Economic Analysis of Pre-Shredding Municipal Solid Wastes Prior to Disposal. Columbia University September 2009
46. [www.kopex.com.pl/idm, 1066, urzadzenia-kruszace-i-rozdrabniajace](http://www.kopex.com.pl/idm,1066,urzadzenia-kruszace-i-rozdrabniajace)
47. <https://www.911metallurgist.com/rock-crushers/>
48. www.dbt.de
49. www.makrusz.com.pl
50. www.construction.sandvik.com.
51. www.astec-tona.pl/wp-content/.../HydraJaw0211H3244LR.pdf
52. Jaw Crushers ThyssenKrupp Fördertechnik.
[www.krupprobins.com/Publications/ /pdf/ 1238_jaw_crusher.pdf](http://www.krupprobins.com/Publications/ /pdf/1238_jaw_crusher.pdf)
53. www.telsmith.com
54. Metso SUPERIOR® gyratory crushers 2705-01 -12-ESBL/Pittsburg - Metso Minerals Brochure No. 2984-04-14-ESBL/Macon-English
55. Kruszarki stożkowe serii Nordberg HP Metso Minerals. Broszura nr 2191-01-08/Macon-Polish
56. www.makrum.pl/page/34813226/edytor/file/karta_kruszarki_cc.pdf
57. www.qoster.pl/uploads/catalogs/GOSTER_kruszarki_stozkowe.pdf
58. Subject to alteration without prior notice, Metso Minerals. Brochure No. 2008-12-14- ESBL/Macon-English
59. Metso's Crushing and Screening Solutions. Brochure No. 1582-10-09-ESBL/Tampere-English 2009.
www.pumpserve.co.za/downloads/Metso%20Crushers.pdf
60. www.miningandconstruction.sandvik.com/ ,.../Products*5CCrus.
61. Mrowiec M.: Nowe podejście do optymalizacji pracy kruszarek stożkowych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 134, 2012, Studia i Materiały Nr 41 s. 201-208
62. Gawenda T.: Problematyka doboru maszyn kruszących w instalacjach produkcji kruszyw mineralnych. Górnictwo i Geoinżynieria. Rok 34. Zeszyt 4.2010, s. 195-209
63. Gawenda T.: Zasady doboru kruszarek oraz układów technologicznych w produkcji kruszyw. Wydawnictwa AGH, 2015. Seria Rozprawy Monografie ISSN 0867-6631

4. Kruszkarki z dominacją obciążeń szybkozmiennych

4.1. Problematyka kruszarek z obciążeniami udarowymi

Historia techniki rozdrabniania podaje, że pomysł zastosowania rozdrabniania udarowego pojawił się w USA w roku 1830. Pierwszy patent na kruszarkę młotkową uzyskano w 1840 roku [1]. Kruzkarkę odśrodkową, stosowaną również jako młyn – opatentowano w Niemczech w 1877 roku (Schleuderprallmühle. Deutsches Reichs-Patent No. 364 v. 6. Sept. 1877). Kruzkarkę prętową, zwaną też dezintegratorem opatentowano w roku 1898 [1], ale dopiero w 1909 roku znalazła zastosowanie w rozdrabnianiu węgla.

Kruszarki udarowe zwane ogólnie w języku angielskim: *impact crusher*, a w języku niemieckim: *Prallbrecher*, cechuje znacznie większa efektywność – większy stopień rozdrobnienia, większa wydajność przy mniejszych gabarytach i masie maszyny. Dodatkową zaletą tych kruszarek jest większa skuteczność rozdrabniania selektywnego, co jest szczególnie ważne przy rozdrabnianiu i wzbogacaniu rud oraz przy wytwarzaniu produktu kruszenia bardziej jednorodnego pod względem uziarnienia. W pewnych przypadkach ich zaletą jest także wyeliminowanie ziaren nadwymiarowych w produkcie kruszenia – co ma miejsce w kruszarkach z rusztem. Przy wzbogacaniu rud kruszarki te zapewniają możliwość otrzymywania już w procesie kruszenia klas ziarnowych znacząco wzbogaconych lub zubożonych w składniki technologicznie użyteczne, a przy wytwarzaniu kruszyw umożliwiają usunięcie z rozdrabnianego materiału składników o większej podatności na rozdrabnianie, o gorszej jakości – to jest ziaren zwietrzałych, czy spękanych, płaskich, czy też o nieregularnych kształtach, czyli uszlachetnienie kruszywa.

Kruszarki udarowe w wersjach specjalnych znalazły zastosowanie również w rozdrabnianiu udarowym materiałów plastycznych (SWE, ZSEE użytkowego AGD), a także jako kruszarko-suszarki z jednoczesnym rozdrabnianiem i suszeniem rozdrabnianego materiału oraz jako strzępiarki do rozdrabniania materiałów włóknistych.

Ogólną klasyfikację kruszarek udarowych podano w rozdz. 2.3. Bardziej dokładne ich podziały związane są z budową i sposobem działania. Stąd do grupy kruszarek udarowych, zwanych też kruszarkami wirnikowymi można zaliczyć:

- kruszarki młotkowe zwykłe i z rusztem,
- bijakowe (listwowe, udarowe [2], uderzeniowe [3], lub odrzutowe [4]),
- odśrodkowe,
- prętowe,

- specjalne – kruszarko-suszarki, kruszarki do rozdrabniania materiałów na mokro oraz jako specjalizowane maszyny będące wyposażeniem mobilnych agregatów rozdrabniających.

Jako odrębną grupę kruszarek o działaniu uderowym potraktowano kruszarki wibracyjne.

Kruszarki uderowe stosowane są obecnie w procesach kruszenia materiałów średnio-twardych i miękkich o twardości poniżej 5 w skali Mohsa, o wytrzymałości na ściskanie poniżej 200 MPa oraz wilgotności poniżej 10%.

Wyjątkiem są kruszarki odśrodkowe w wersji autogenicznej, w których można rozdrabniać materiały o twardości nawet do 7 w skali Mohsa. Wszystkie kruszarki uderowe wymagają stabilnego dozowania nadawy o w przybliżeniu stałym uziarnieniu.

Podstawowe informacje dotyczące obliczeń projektowych, a także wyniki badań podstawowych kruszarek uderowych podano dla kruszarek: młotkowych [5, 6], bijakowych [5, 7, 8] oraz odśrodkowych [5, 9].

Warunkiem rozdrobnienia ziarna materiału w kruszarkach uderowych jest spełnienie zależności:

$$E_k \geq L \quad [J]$$

gdzie: E_k – energia jaka powinna być przekazana na rozdrobnienie ziarna, J,
 L – praca kruszenia danego materiału, J.

Pracę niezbędną do rozdrobnienia ziarna materiału można obliczyć z wyrażenia [4]:

$$L = K_j \frac{\pi d^3 \rho}{6} L_j^3 \sqrt{\frac{d_k}{d}} \quad [J]$$

gdzie: d – średni wymiar (zastępcza średnica) ziarna, m,

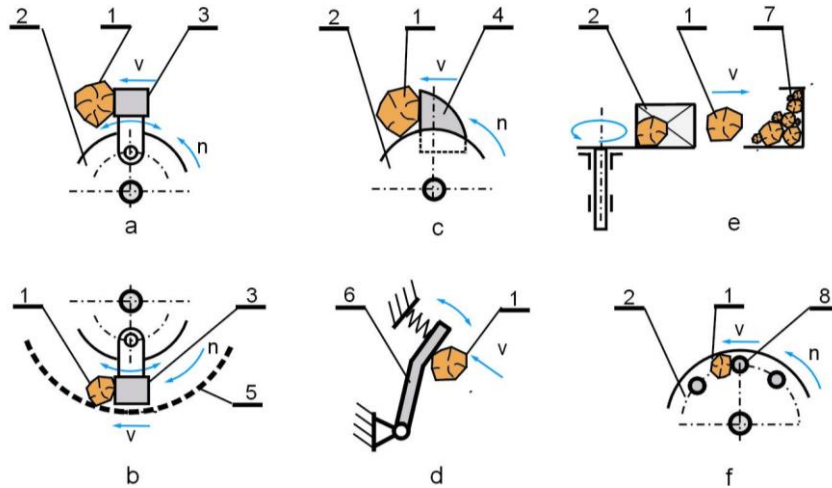
ρ – gęstość materiału ziarna, kg/m³,

L_j – praca jednostkowa materiału ziarna wyznaczona w maszynie wytrzymałościowej dla ziarna w postaci kuli o zastępczej średnicy d_k , 10⁻² J/kg,

K_j – współczynnik uwzględniający użyte jednostki.

Podstawowe przypadki rozdrabniania pojedynczych ziaren materiału występujące w typowych kruszarkach uderowych podano na rysunku 4.1. W kruszarkach młotkowych zachodzi przypadek podany na rysunku 4.1 a, przy czym w młotkowych z rusztem również przypadek podany na rysunku 4.1 b. W kruszarkach bijakowych materiał rozdrabniany jest przez bijaki (rys. 4.1 c) oraz na płytach odbojowych (rys. 4.1 d). W kruszarkach odśrodkowych

rozdrabnianie zachodzi na wykładzinach strefy kruszenia (gładkiej, profilowanej, kowadłach, rolkach lub materiale znajdującym się w tzw. kieszeniach (rys. 4.1 e). W kruszarkach prętowych (rys. 4.1 f) rozdrabniającymi elementami są pręty usytuowane na wirnikach - jednym lub dwóch obracających się w przeciwnych kierunkach.



Rys. 4.1. Podstawowe przypadki kruszenia udarowego w kruszarkach: a – młotkowej, b – młotkowej z rusztem, c – bijakowej, d – bijakowej na płycie odbojowej, e – odśrodkowej, f – prętowej, 1 – ziarno, 2 – wirnik, 3 – młotek, 4 – bijak, 5 – ruszt, 6 – płyta odbojowa, 7 – kieszeń, 8 – pręt (palec trzpień), n – prędkość obrotowa wirnika, v – prędkość elementu roboczego, ziarna

Na proces kruszenia udarowego wpływa głównie energia kinetyczna, wynikająca z prędkości liniowej w momencie rozdrabniania, niezależnie od sposobu jej wytworzenia, czyli przez uderzenie z poruszającego się z dużą prędkością elementu roboczego kruszarki (młotka, bijaka, pręta) w poruszające się z niewielką prędkością ziarno, lub rozpędzonego do dużej prędkości ziarna w płytę odbojową, lub w zbiór nieruchomych ziaren tego samego materiału znajdujących się w kieszeniach kruszarki (odśrodkowej).

Stąd w momencie uderzenia energię kinetyczną ziarna ujmuje wyrażenie:

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{\pi d^3 \rho v^2}{6 \cdot 2} \quad [J]$$

gdzie: v – prędkość uderzenia ziarna, m/s.

Z tej zależności wyznaczyć można prędkość uderzenia, przy której nastąpi rozdrobnienia ziarna o zastępczym wymiarze d , którą opisuje wyrażenie:

$$v = \sqrt{2gL_j} \sqrt[3]{\frac{d_k}{d}} \quad [\text{m/s}]$$

Prędkości uderzania elementów roboczych w ziarna rozdrabniane w kruszarkach udarowych mieszczą się w zakresie 20÷50 m/s, a w rozdrabnianiu materiałów o mniejszej abrazyjności wynosi 70 m/s, natomiast w wersjach stosowanych do bardzo drobnego kruszenia osiągają 100 m/s.

Analizując rozwój wszystkich rodzajów kruszarek można stwierdzić, że w ostatnich kilkunastu latach największy jego udział dotyczył kruszarek odśrodkowych. Kruszarki te nazywane są również kruszarkami udarowymi z wirnikiem pionowym, a często z wałem o osi pionowej, przy czym wiele firm stosuje ich własne nazwy handlowe - nie związane z ich działaniem czy budową. Na wystawach sprzętu budowlanego Bauma w latach 2013, 2015 oraz 2017, które odbywały się w Monachium, kruszarki te zdecydowanie dominowały, a ich eksponaty stanowiły około 80% wszystkich wystawionych kruszarek.

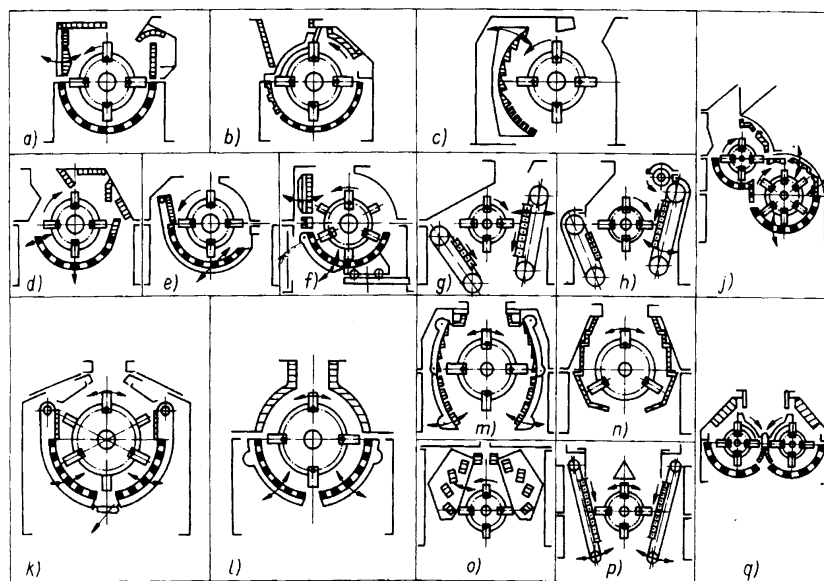
Przy podwyższonych parametrach pracy (większych prędkościach obrotowych wirników) oraz mniejszej wydajności kruszarki te coraz częściej stosowane są jako młyny młotkowe, bijakowe, a w szczególności prętowe, dlatego ujęto je odrębnie jako młyny udarowe w rozdziale dotyczącym młynów. Dlatego maszyny te jako kruszarki rzadko występują w programach produkcyjnych producentów maszyn rozdrabniających. Dotyczy to głównie kruszarek prętowych z napędem jednego wirnika lub dwóch wirników obracających się w przeciwnym kierunku [4, 5].

4.2. Kruszarki młotkowe

Kruszarka młotkowa jest jedną z najwcześniej stosowanych maszyn rozdrabniających. Pierwsze jej rozwiązanie pojawiło się w roku 1840 [1]. Początkowo stosowano ją jako młyn młotkowy. Nazwa kruszarki młotkowej w języku angielskim to *hammer crusher*, a w języku niemieckim *Hammerbrecher*. Zestawienie większości rozwiązań produkowanych obecnie kruszarek młotkowych podano w pracy [5] oraz na rysunku 4.2.

W kruszarkach młotkowych główne elementy robocze - młotki usytuowane są przegubowo w sworzniach umieszczonych w tarczach wirnika. Stąd do rozdrabniania absorbowana jest energia kinetyczna młotka, który po uderzeniu w ziarno przemieszcza się w kierunku przeciwnym niż ziarno -

zgodnie z zasadą zachowania energii. Swobodne przemieszczenie młotków zmniejsza oddziaływanie dynamiczne przekazywane podczas uderzenia młotka w ziarno lub ich zbiór na wirnik kruszarki. Druga faza rozdrabniania zachodzi w tej kruszarce na wykładzinie rozdrabniającej, lub ruszcie - w przypadku kruszarek wyposażonych w ten podzespół, przy czym oba te podzespoły połączone są w tych kruszarkach sztywno z ich konstrukcją. Występują również pewne rozwiązania kruszarek - stosowanych w rozdrabnianiu materiałów abrazyjnych, w których wykładzina jest ruchoma – przesuwna (rys. 4.2 g, h i p). Znane są również rozwiązania kruszarek, w których wykładzinę kruszącą tworzą układy rolek obrotowych napędzanych przekładnią łańcuchową i usytuowanych z jednej strony wirnika – w kruszarkach z jednym kierunkiem prędkości obrotowej wirnika oraz po obu stronach wirnika w kruszarkach rewersyjnych.



Rys. 4.2. Podstawowe rodzaje kruszarek młotkowych [5]:

- a – jednowimikowa z rusztem i podawaniem materiału od góry, b – jednowimikowa z rusztem i podawaniem materiału przez zsuwnię, c – jednowimikowa bez rusztu i podawaniem materiału przez zsuwnię, d – jednowimikowa z rusztem i podawaniem materiału przez zsuwnię, e – jednowimikowa z rusztem i podawaniem materiału od góry, f – jednowimikowa z rusztem i ruchoma płytą odbojową, g – jednowimikowa bez rusztu z obrotowymi płytami odbojowymi, h – jednowimikowa bez rusztu z obrotowymi płytami odbojowymi, j – dwuwimikowa z różnymi wirnikami i dwoma rusztami, k – jednowimikowa rewersyjna z rusztem, l – jednowimikowa rewersyjna z rusztem, m – jednowimikowa rewersyjna bez rusztu, n – jednowimikowa rewersyjna bez rusztu, o – jednowimikowa rewersyjna bez rusztu z górnymi płytami odbojowymi, p – jednowimikowa rewersyjna z obrotowymi płytami odbojowymi, q – dwuwimikowa z jednakowymi wirnikami i dwoma rusztami

Podstawowe obliczenia kruszarek młotkowych dotyczą wydajności i poboru mocy.

W sposób przybliżony wydajność objętościową Q_V kruszarki oblicza się z wyrażen [4]:

$$\text{Dla warunku: } D > L \rightarrow Q_V = 100 D^2 L n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

$$\text{Dla warunku: } D < L \rightarrow Q_V = 100 D L^2 n \quad [\text{m}^3/\text{h}]$$

gdzie: D – średnica wirnika, m,

L – długość wirnika, m,

n – prędkość obrotowa, obr/min.

Wstępnie moc silnika tej kruszarki oblicza się z empirycznego wyrażenia [4]:

$$P = 0,15 D^2 L n \quad [\text{kW}]$$

Literatura [5, 6, 10, 11] podaje jeszcze inne empiryczne wyrażenia na obliczenie szacunkowego zapotrzebowania mocy, np.:

$$P = 450 D L n \quad [\text{kW}]$$

$$P = (21 \div 33) i Q_{ms} \quad [\text{kW}]$$

gdzie: Q_{ms} - wydajność masowa, kg/s,

i - średni stopień rozdrobnienia, [-].

Dane do tego wyrażenia wyznaczane są doświadczalnie.

Znaczące zalety kruszarek młotkowych to:

- prosta budowa – najczęściej jeden obrotowy wirnik,
- mniejsze dynamiczne obciążenia wirnika powodowane nierównomiernym ruchem elementów roboczych (szczęk, stożków), bijaków - sztywno połączonych z wirnikiem,
- wysoki stopień rozdrobnienia,
- większe możliwości rozdrabniania selektywnego, co ma ważne znaczenie przy wzbogacaniu rud oraz uszlachetnianiu kruszyw mineralnych.

Maszyny te mają też pewne wady, z których główne to:

- generowanie wysokiego poziomu ciśnienia akustycznego,
- efekt wentylatorowy, który wymaga wyposażenia kruszarki w sprawną instalację odpylającą, zwłaszcza przy rozdrabnianiu materiałów o niskiej wilgotności,
- szkodliwy wpływ na elementy robocze dużej zawartości krzemionki,
- duża wrażliwość na nierównomierne dozowanie nadawy.

Wg informacji firmy ThyssenKrupp stopień rozdrobnienia w kruszarkach młotkowych dwuwirnikowych osiąga około 100 – przy rozdrabnianiu materiałów o wytrzymałości na ściskanie poniżej 150 MPa, zawartości krzemionki do 8% i wilgotności poniżej 15% [11].

Na rysunku 4.3. zaprezentowano kruszarkę młotkową serii HC produkcji firmy Makrum [12], a w tabeli 4.1 podano podstawowe parametry tej serii kruszarek.

Podstawowe parametry kruszarek młotkowych firmy Makrum [12]

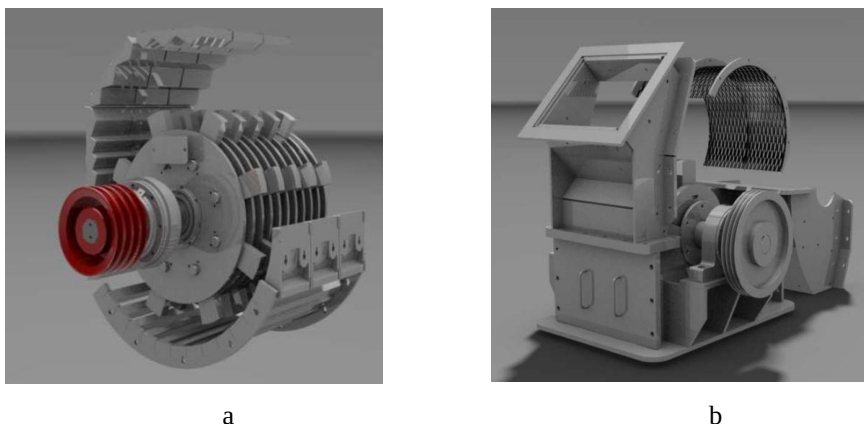
Tabela 4.1.

Wymiary	Typ	HC 40.80	HC 40.99	HC 41.90	HC 41.97	HC 41.98	HC 44.12
Wymiary wirnika [mm]		ø2500x1700	ø2720x2250	ø750x425	ø1000x430	ø1000x730	ø1000x1000
Maks. wymiar nadawy [mm]		1400	1400	50	70	70	300
Szczelina rusztu [mm]		25 lub 40	25 lub 40	25	5	5	25
Wydajność [m ³ /h]		180÷280	250÷375	6÷12	14÷18	22÷27	25÷40
Moc silnika [kW]		320	630	22	37	75	75
Masa kruszarki [Mg]		82	136	2.2	3.95	5.65	8



Rys. 4.3. Kruszarka młotkowa z rusztem produkcji firmy Makrum [12]: a – widok strefy kruszenia, b – widok kruszarki z otwartą obudową: 1 – blokada położenia obudowy, 2 – pokrywa rewizyjna, 3 – ruszt

Na rysunku 4.4 zamieszczono kruszarki młotkowe firmy Goster, a w tabeli 4.2 podano ich podstawowe parametry [13].



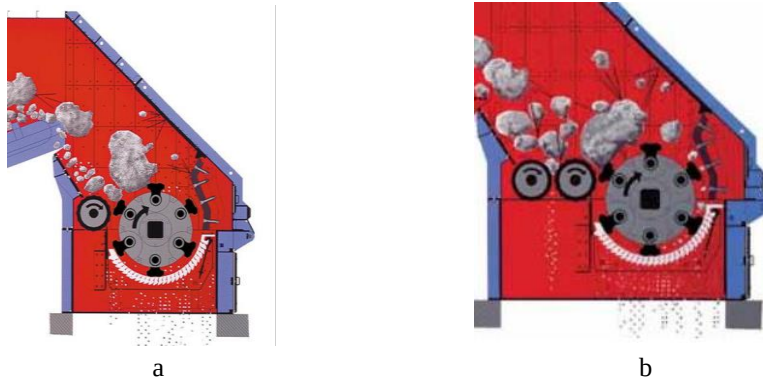
Rys. 4.4. Kruszarka młotkowa z rusztem produkcji firmy Goster [13]:
a – widok strefy kruszenia, b – kruszarka z otwartą obudową

Podstawowe parametry kruszarek młotkowych firmy Goster [13]

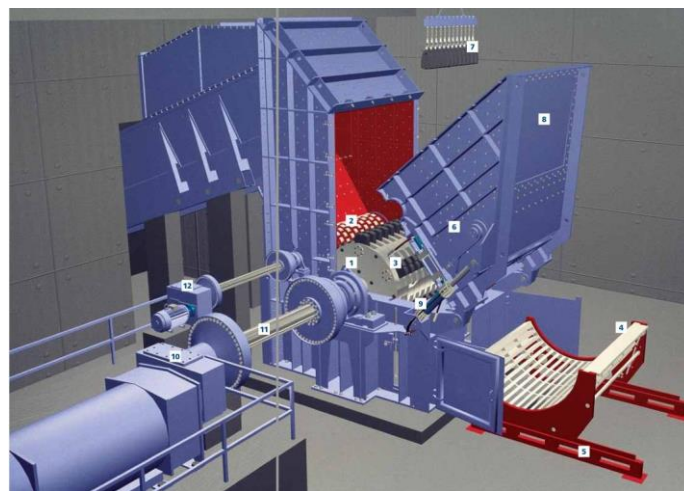
Tabela 4.2.

Typ kruszarki	Wymiary wirnika [mm]	Uziarnienie produktu, [mm]	Wydajność [m ³ /h]	Moc [kW]	Masa [kg]
GH-44	Φ 400x400	0÷30	do 10	15	950
GH-74	Φ 700x400	0÷50	do 15	22	2000
GH-107	Φ 1000x700	0÷50	do 20	55	5000
GH-1010	Φ1000x1000	0÷80	do 50	75	6000

Niektóre firmy, zwłaszcza amerykańskie oferują kruszarki młotkowe z rusztem odsiewającym podziarno z nadawy wbudowanym w konstrukcję kruszarki. Rozwiązanie to znacząco poprawia pracę kruszarki, przez zmniejszenie obciążenia strefy kruszenia materiałem, którego uziarnienie nie wymaga rozdrobnienia. Przy niektórych materiałach udział tej części nadawy może dochodzić do 30%. Dzięki temu można zwiększyć wydajność kruszarki oraz wytworzyć produkt o bardziej jednorodnym uziarnieniu. Kruszarki z wstępnym - obrotowym rusztem oferuje też firma FLSmidth [14], której dwa rozwiązania różniące się budową obrotowego rusztu podającego zamieszczono na rysunku 4.5, a na rysunku 4.6 kompletną kruszarkę z wysuniętym rusztem nieruchomym, a ich podstawowe parametry podano w tabeli 4.3.



Rys. 4.5. Kruszarki młotkowe typ EV produkcji firmy FLSmidth [14]:
a – z walcem podającym, b – dwuwalcowym rusztem podającym



Rys. 4.6. Kruszarka młotkowa typ EV z rusztem podającym produkcji firmy FLSmidth [14]:
1 – wirnik, 2 – walec podający, 3 – młotki, 4 – ruszt, 5 – prowadnica, 6 – obudowa,
7 – odbojniki, 8 – wykładzina, 9 – siłownik, 10 – silnik, 11 – wał główny, 12 – napęd walca

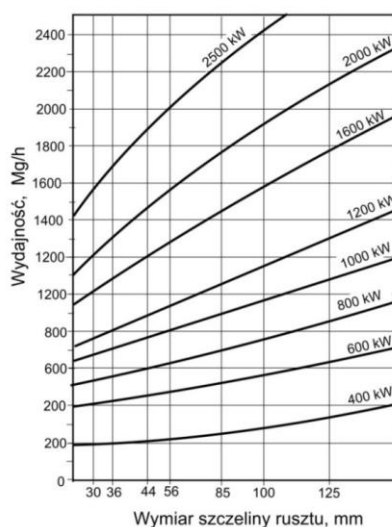
Produkt rozdrabniania z kruszarki EV ma uziarnienie $0\div 25$ mm, przy maksymalnych wymiarach nadawy kamienia wapiennego o wymiarach do 2,5 m i masie do 5 Mg osiągając w jednym stadium rozdrabniania stopień rozdrobnienia około 100. Kruszarka może być wyposażona w wstępny ruszt stały lub obrotowy (jedno lub dwuwalcowy). Wydajność kruszarki osiąga 2200 Mg/h - z drugim rusztem wylotowym usytuowanym pod wirnikiem oraz 2500 Mg/h bez rusztu. Moce silników standardowych kruszarek wynoszą $500\div 2500$ kW.

Podstawowe parametry kruszarek młotkowych firmy FLSmidth [13]

Tabela 4.3.

Type	Ruszt obrotowy			Wirnik		Nadawa		Masa
	Szt.	Prędkość obwodowa [m/s]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Prędkość obwodowa [m/s]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Maksym wymiar [mm]	Maks. Masa [Mg]	Komplet. kruszar. [Mg]
EV 150*150-1	1	1	24	30÷39	380÷495	900	1,50	71
EV 150*200-1	1	1	24		380÷495	1,200	1,80	79
EV 200*200-1	1	1	19		290÷375	1,400	2,00	95
EV 200*200-2	2	0,67/1	13/19		290÷375	1,400	2,00	107
EV 200*300-1	1	1	19		290÷375	2,000	3,00	131
EV 200*300-2	2	0,67/1	13/19		290÷375	2,000	3,00	146
EV 250*250-1	1	1	19		230÷300	1,900	3,50	157
EV 250*250-2	2	0,67/1	13/19		230÷300	1,900	3,50	170
EV 250*300-1	1	1	19		230÷300	2,400	5,00	174
EV 250*300-2	2	0,67/1	13/19		230÷300	2,400	5,00	190

Pierwsza faza rozdrabniania w tej kruszarce zachodzi przez dynamiczny uder swobodnych ziaren, a w fazie drugiej następuje rozdrabnianie ziaren materiału, zatrzymanych na ruszcie wylotowym. Dzięki temu kruszarka jest mniej wrażliwa na nierównomierne dozowanie oraz nierównomierne uziarnienie nadawy, zachowując w przybliżeniu stabilne uziarnienie produktu rozdrabniania. Na rysunku 4.7 podano nomogram doboru kruszarek typu EV [13].

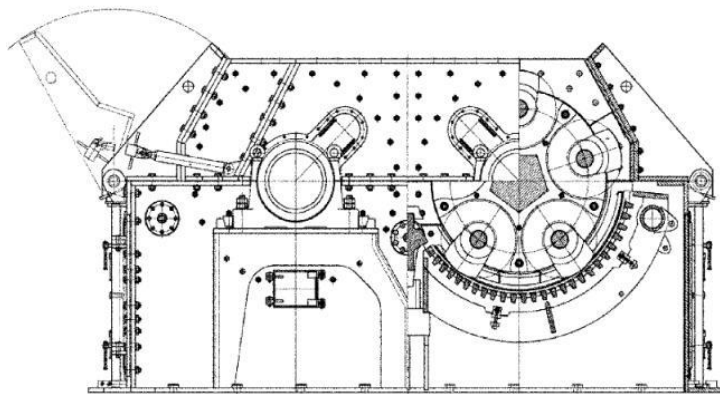


Rys. 4.7. Nomogram doboru kruszarek młotkowych typ EV firmy FLSmidth [14]

Na rysunku 4.8 przedstawiono dwuwirnikowe kruszarki młotkowe firmy ThyssenKrupp o średniej i największej wydajności [15]. Podstawowe parametry tych kruszarek podano w tabeli 4.4.

Wg informacji firmy ThyssenKrupp stopień rozdrobnienia w kruszarkach młotkowych może - w zależności od ich rozwiązania konstrukcyjnego wynosić: 20÷60 - przy rozdrabnianiu materiałów o wytrzymałości na ściskanie poniżej 175 MPa, udziale krzemionki do 12% i wilgotności poniżej 8% [11].

Możliwość rozdrabniania materiału o tak dużej zawartości silnie abrazyjnej krzemionki uzyskano przez zastosowanie elementów roboczych kruszarki (młotków, wykładziny strefy kruszenia i rusztu z wysokiej jakości odpornych na ścieranie materiałów konstrukcyjnych.



a



b

Rys. 4.8. Kruszarki młotkowe typ EV z rusztem podającym produkcji firmy ThyssenKrupp [15]: a – uproszczony rysunek konstrukcyjny, b – kruszarka podczas montażu

Podstawowe parametry kruszarek młotkowych firmy ThyssenKrupp [15]

Tabela 4.4.

TITAN® Typ	Wymiary wlotu [m]	Wymiary wirnika, śred. x dł. [m]	Wydajność przy szczelinie 30÷90 mm [Mg/h]	Moc, [kW]	Masa [Mg]
40 D 50	2,35x1,29	Φ 1,32x1,34	180 ÷ 280	2 x 130	30
48 D 50	2,35x1,51	Φ 1,32x1,56	220 ÷ 320	2 x 160	33
56 D 50	2,35x1,73	Φ 1,32x1,78	260 ÷ 370	2 x 200	35
48 D 75	2,70x1,28	Φ 1,60x1,34	300 ÷ 430	2 x 225	49
56 D 75	2,70x1,48	Φ 1,60x1,54	350 ÷ 500	2 x 275	53
64 D 75	2,70x1,68	Φ 1,60x1,74	425 ÷ 650	2 x 325	56
72 D 75	2,70x1,88	Φ 1,60x1,94	500 ÷ 750	2 x 375	60
72 D 100	2,85x1,97	Φ 1,80x2,03	600 ÷ 900	2 x 450	82
80 D 101	2,85x2,18	Φ 1,80x2,24	700 ÷ 1100	2 x 525	90
88 D 100	2,85x2,39	Φ 1,80x2,45	800 ÷ 1200	2 x 600	98
60 D 161	3,10x1,85	Φ 2,00x1,92	900 ÷ 1350	2 x 650	105
70 D 160	3,10x2,15	Φ 2,00x2,22	1050 ÷ 1500	2 x 700	117
80 D 160	3,10x2,45	Φ 2,00x2,52	1250 ÷ 1700	2 x 825	129
90 D 160	3,10x2,75	Φ 2,00x2,82	1500 ÷ 2100	2 x 950	142
96 D 180	3,90x2,76	Φ 2,40x2,84	1750 ÷ 2400	2 x 1100	201
108 D 180	3,90x3,10	Φ 2,40x3,18	2000 ÷ 2800	2 x 1500	220

Dominująca ilość kruszarek młotkowych budowana jest jako kruszarki jednowirnikowe, co znacząco obniża koszty ich wykonania oraz koszty eksploatacyjne. Jednak w przypadku konieczności uzyskania większych wydajności kruszarki, zamiast zastosowania dwóch kruszarek jednowirnikowych, koszty inwestycyjne można obniżyć przez zastosowanie jednej kruszarki dwuwirnikowej.

4.3. Kruszarki bijakowe

Kruszarki bijakowe stosowane są we wszystkich stadiach rozdrabniania: pierwszym, średnim i trzecim. W języku angielskim nazywane są: *impact crusher*, a niekiedy *horizontal shaft impactor* (HSI) lub *beater crusher*. Kruszarki te posiadają większość zalet i wad kruszarek młotkowych. Istotną różnicą z kruszarkami młotkowymi jest sposób i ilość energii przekazywanej na rozdrabnianie. W przypadku kruszarki młotkowej, młotek po uderzeniu w ziarno odchyła się na osi, natomiast w przypadku kruszarki bijakowej bijak jest sztywno złączony z wirnikiem, stąd jego reakcja uderzenia przekazywana jest na cały wirnik. Dlatego wirniki tych kruszarek mają znacznie bardziej

solidną budowę oraz większą masę, co jest niezbędne aby uzyskać jak największy moment bezwładności. Druga istotna różnica to inna budowa strefy kruszenia, w której umieszczane są podparte sprężyste wahlwie płyty odbojowe w konstrukcji kruszarki, na których zachodzi znacznie większy udział procesu rozdrabniania, niż na wykładzinach stref kruszenia kruszarek młotkowych. Ruchome płyty odbojowe mogą być zastępowane – przy rozdrabnianiu materiałów o dużej podatności na rozdrabnianie, wykładzinami prętowymi, co dodatkowo ułatwia rozdrabnianie materiałów o większej wilgotności. Kruszarki te budowane są również jako kruszarki-suszarki do jednoczesnego rozdrabniania i suszenia materiału. W kruszarce młotkowej wykładzina krusząca jest najczęściej sztywno połączona z konstrukcją kruszarki. Kolejna różnica w budowie kruszarki bijakowej to brak rusztu – z wyjątkiem kruszarek o niewielkiej wydajności i egzemplarzy laboratoryjnych.

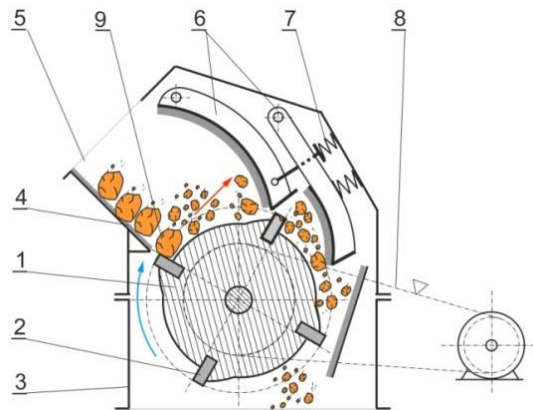
Zaletami kruszarek bijakowych w stosunku do kruszarek młotkowych to:

- łatwiejsza regulacja uziarnienia produktu kruszenia – przez zmianę położenia płyt odbojowych w stosunku do wirnika,
- zmianę kształtu płyt,
- zmianę sztywności podparcia płyt,
- zmianę kąta pochylenia płyty ślizgowej wprowadzającej nadawę na wirnik.

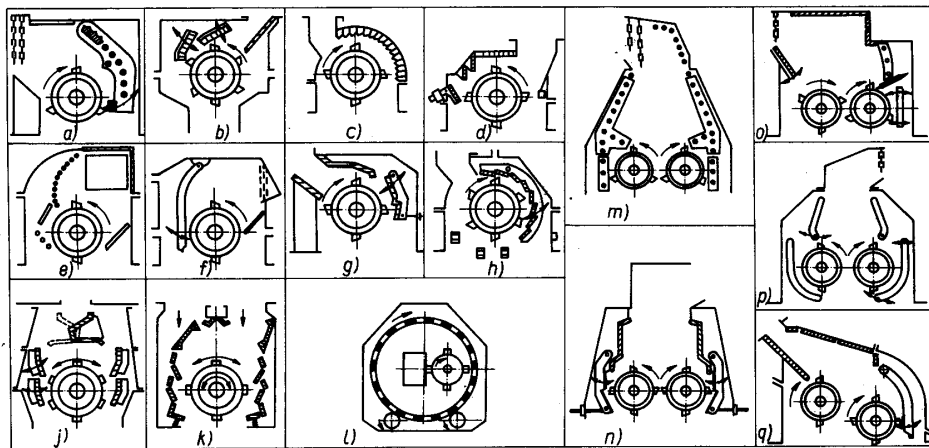
Pewnymi wadami kruszarek bijakowych to:

- większe zużycie bijaków (listew),
- większa ilość w produkcie rozdrabniania klasy $0 \div 2$ mm, często nie pożądaną,
- obniżenie wytrzymałości większych ziaren przez duże obciążenia podczas uderzenia powodujące pęknięcia na powierzchni i wewnątrz struktury ziaren,
- znaczny większy wpływ uziarnienia i nierównomierności dozowania nadawy na uziarnienie produktu kruszenia,
- wyższy poziom ciśnienia akustycznego.

Na rysunku 4.9 zamieszczono schemat budowy i działania typowej kruszarki bijakowej, a na rysunku 4.10 zestawienie schematów rozwiązań konstrukcyjnych najczęściej stosowanych kruszarek bijakowych [5].



Rys. 4.9. Schemat budowy i działania typowej kruszarki bijakowej: 1 – wirnik, 2 – bijak (listwa), 3 – korpus, 4 – zsuwania, 5 – wlot, 6 – płyty odbojowe, 7 – podparcie sprężyste, 8 – napęd, 9 – rozdrabniany materiał



Rys. 4.10. Podstawowe rodzaje kruszarek bijakowych [5]: a - jednowirnikowa bez rusztu z jedną płytą odbojową, b - jednowirnikowa bez rusztu z dwiema płytami odbojowymi, c - jednowirnikowa bez rusztu ze nieruchomą wykładziną kruszącą, d - jednowirnikowa bez rusztu z trzema płytami odbojowymi, e - jednowirnikowa bez rusztu i z płytą odbojową i wykładziną prętową, f - jednowirnikowa bez rusztu z jedną płytą odbojową, g - jednowirnikowa bez rusztu z nieruchomą wykładziną i płytą odbojową, h - jednowirnikowa bez rusztu z segmentowymi sztywnymi płytami odbojowymi, i - jednowirnikowa, rewersyjna bez rusztu z dwoma parami płyt odbojowych, j - jednowirnikowa, rewersyjna bez rusztu z segmentami sztywnych par płyt odbojowych, k - jednowirnikowa z obrotowym rusztem, l - jednowirnikowa z obrotowym rusztem, m - dwuwirnikowa bez rusztu i z dwoma segmentami wykładzin prętowych, n - dwuwirnikowa bez rusztu i z dwoma parami płyt odbojowych, o - dwuwirnikowa bez rusztu z jedną płytą odbojową, p - dwuwirnikowa bez rusztu i z dwoma parami płyt odbojowych, q - dwuwirnikowa z szeregowym usytuowaniem wirników i jedną płytą odbojową

Klasyfikacja tych kruszarek jest podobna do klasyfikacji kruszarek młotkowych. Stąd rozróżnia się kruszarki:

- jedno i dwu wirnikowe,
- jednowirnikowe zwykłe lub rewersyjne,
- z jedną płytą odbojową,
- z dwoma płytami odbojowymi,
- z trzema płytami odbojowymi,
- ze sztywną wykładziną kruszącą,
- z wykładziną prętową,
- z dwoma, trzema, czterema lub sześcioma bijakami.

Do rozdrabniania węgla i materiałów o podobnych właściwościach fizycznych stosuje się szereg kruszarek o bardziej zróżnicowanej budowie, uwzględniającej właściwości fizyczne węgla oraz wymagania jego uziarnienia jako produktu handlowego.

Dobór kruszarki bijakowej do rozdrabniania konkretnego materiału powinien rozpocząć się od doboru wymiarów wirnika, które wg [5, 17] można wyznaczać z zależności:

- do wstępnego rozdrabniania (dużych kruszarek) - $D_w \geq (1,5 \div 3) d_{nmaks}$,
- do średniego rozdrabniania (średnich kruszarek) - $D_w \geq (1,2 \div 1,5) d_{nmaks}$,
- do drobnego rozdrabniania (średnich kruszarek) - $D_w \geq (3) d_{nmaks} + 0,55$,
- długość wirnika powinna wynosić około $L = (0,5 \div 1,5) D_w$.

gdzie: D_w – średnica wirnika, m,

d_{nmaks} – maksymalny wymiar ziarna nadawy, m,

L – długość wirnika, m.

Pobór mocy można obliczyć z wyrażenia [5]:

$$P = (P_r + P_t + P_w) / \eta$$

gdzie: P – pobór mocy przez kruszarkę, kW,

P_r – pobór mocy na proces rozdrabniania, kW,

P_t – pobór mocy na straty tarcia w łożyskach, kW,

P_w – pobór mocy na efekt wentylatorowy, kW [7],

η – sprawność napędu.

$$P_r = (1,3 \div 3) \Delta E n z$$

gdzie: ΔE – zmiana energii wirnika (pobrana na rozdrabnianie), J,
 n – prędkość obrotowa wirnika, obr/s,
 z – liczba uderzeń.

$$\Delta E = J \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2}$$

gdzie: J – moment bezwładności wirnika, kg m²,
 ω_1 – prędkość kątowna przed uderzeniem w ziarna, rad/s,
 ω_2 – prędkość kątowna po uderzeniu w ziarna, rad/s.

Pobór mocy przez kruszarkę bijakową można wstępnie obliczyć z wyrażen [18]:

$$P = 0,15 D_w^2 L n \quad - \text{dla } D_w > 1,3 \text{ m},$$

$$P = 0,21 D_w^2 L n \quad - \text{dla } D_w > 1,3 \text{ m}.$$

Wydajność kruszarki można obliczyć z wyrażenia [18]:

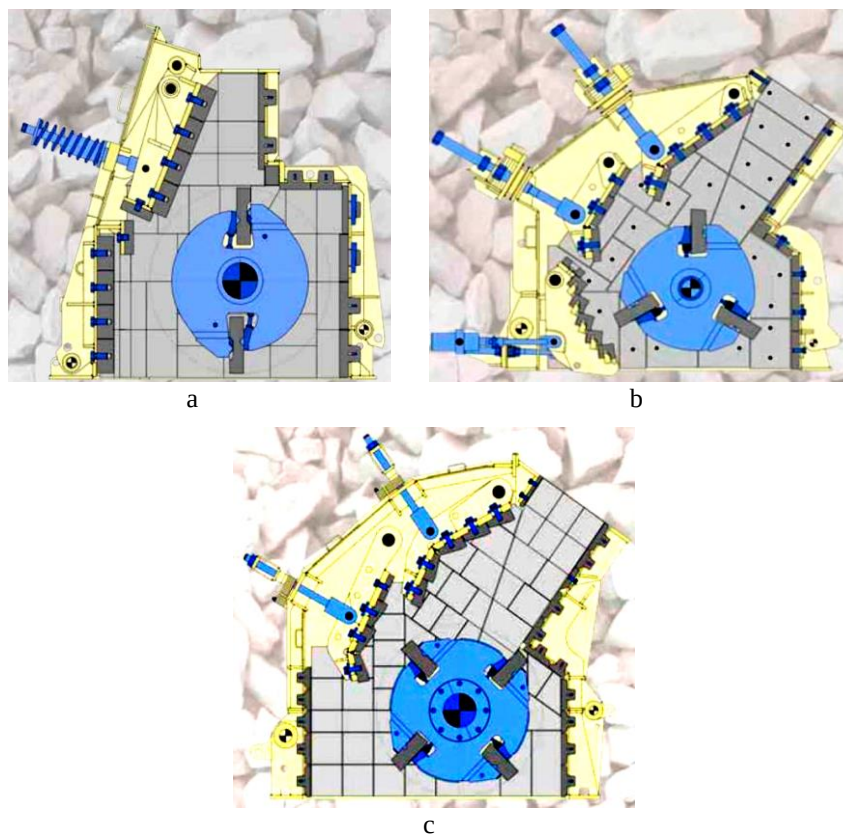
$$Q_m = P/W_B$$

gdzie: P – moc silnika kruszarki, kW,
 Q_m – wydajność masowa kruszarki, Mg/h,
 W_B – jednostkowy pobór energii wyznaczony z hipotezy Bonda, kWh/Mg lub z innej zależności podanej w pracy [18].

Zróznicowanie rozwiązań konstrukcyjnych kruszarek bijakowych (rys. 4.10) wynika z konieczności dostosowania kruszarek, w szczególności budowy ich wirników i stref kruszenia do własności fizycznych rozdrabnianych materiałów. Na rozwiązanie ma także wpływ polityka patentowa firm. Kruszarki te znajdują się w ofercie większości firm produkujących kruszarki.

Ze względu na duże prędkości obwodowe bijaków kruszarki te wymagają specjalnych zabezpieczeń stref kruszenia, przed wydostaniem się z nich ziaren rozdrabnianego materiału. Ich obudowy przystosowane są do szybkiego otwarcia za pomocy układów hydraulicznych, a efekt wentylatorowy, który w nich występuje wymaga zastosowania sprawnego układu odpylania.

Typowe rozwiązania konstrukcyjne kruszarek bijakowych produkowanych przez firmę ThyssenKrup zaprezentowano na rysunku 4.11 [19]. Na rysunku 4.12 zamieszczono rysunek kruszarki udarowej firmy Metso serii NP [20]. Kruszarki do wstępnego i średniego kruszenia firmy ThyssenKrup przedstawiono na rysunku 4.13 [19].

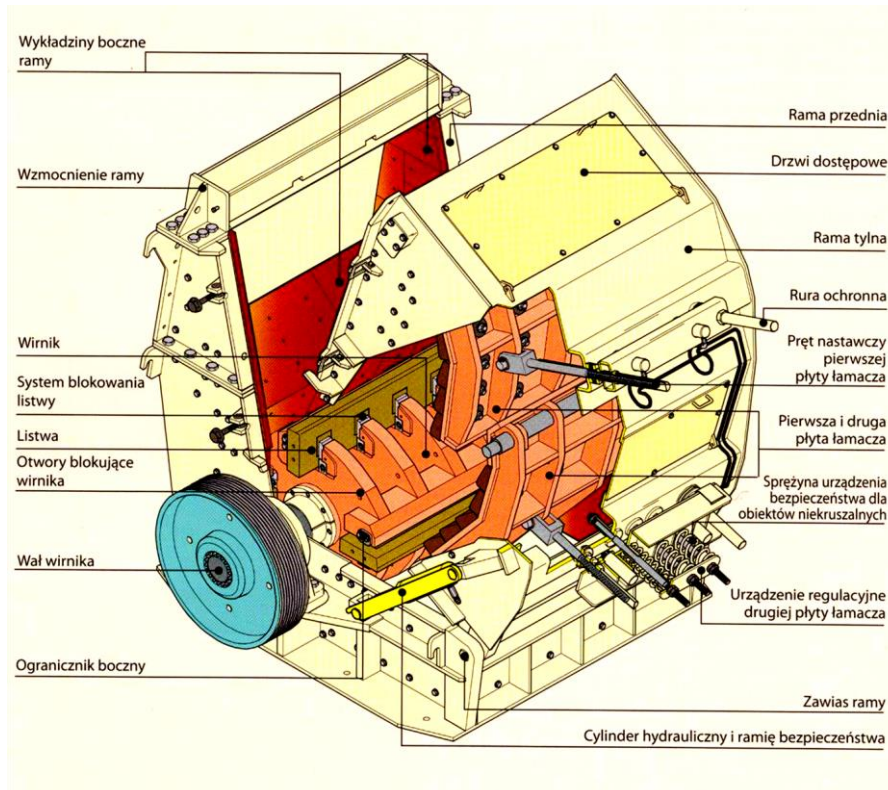


Rys. 4.11. Kruszarki bijakowe oferowane przez firmę ThyssenKrupp [19]:
a – Sandpactor, b – Allpactor PKna, c – Allpactor PK

Ilość bijaków na wirniku uwarunkowana jest uziarnieniem nadawy. Przy największym uziarnieniu stosuje się tylko dwa bijaki. W miarę zmniejszania się wymiarów ziaren nadawy ilość bijaków wynosi trzy, cztery, pięć, a nawet sześć. Wymiary ziaren nadawy wpływają również na budowę bijaków i strefy kruszenia, to jest na kształt, liczbę i usytuowanie płyt odbojowych (rys. 4.11).

Napęd kruszarek bijakowych, jak również młotkowych, realizowany jest przez przekładnię pasową, której bierne koło pasowe umieszczone na wale wirnika dodatkowo zwiększa jego moment bezwładności, a paski klinowe łagodzą obciążenia silnika kruszarki.

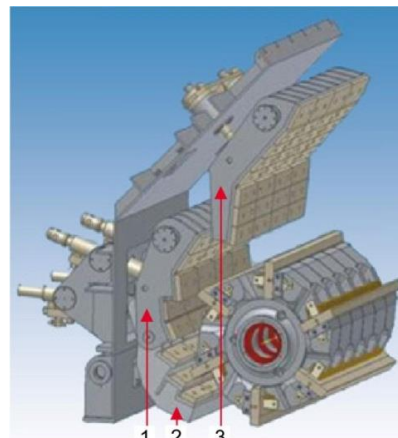
Kruszarki udarowe wymagają równomiernego dozowania nadawy oraz zabezpieczenia, najczęściej na drodze elektrycznej przed zasypaniem kruszarki przy podaniu do niej nadawy o dużym udziale ziaren o największych wymiarach.



Rys. 4.12. Uproszczony rysunek konstrukcyjny z widokiem strefy kruszenia kruszarki bijakowej firmy Metso serii NP [20]



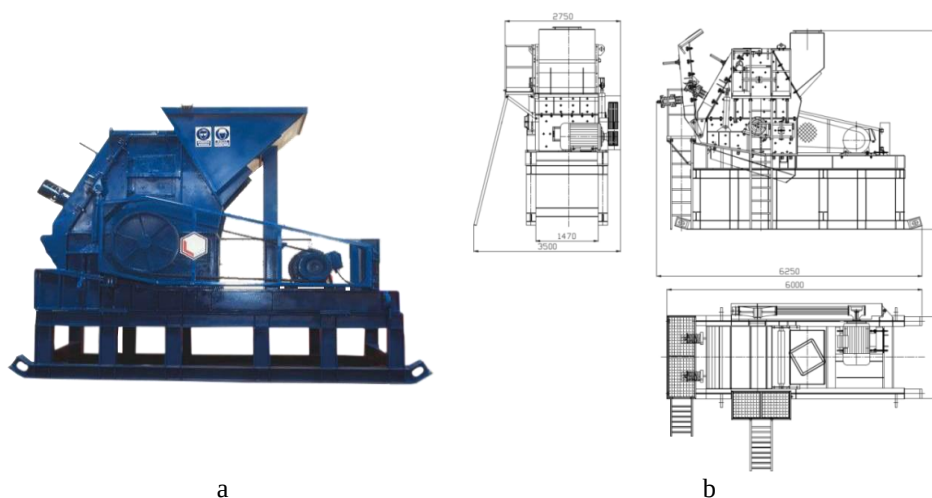
a



b

Rys. 4.13. Kruszarka bijakowa serii BP firmy ThyssenKrupp [19]: a – wirnik, b – strefa rozdrabniania, 1 – dolny segment dolnej płyty odbojowej o regulowanym hydraulicznie położeniu, 2 – górny segment dolnej płyty odbojowej o regulowanym hydraulicznie położeniu, 3 – górna płyta odbojowa o położeniu ustalonym hydraulicznie

Na rysunku 4.14 przedstawiono kruszarkę firmy KGHM-ZANAM stosowaną do rozdrabniania granitu i gruzu budowlanego [21].



Rys. 4.14. Kruszarka KDU 120/130E firmy KGHM ZANAM [21]:
a – widok kruszarki, b – rysunek katalogowy

Podstawowe parametry kruszarki KDU 120/130E [21]:

- wydajność do 110 m³/h – przy rozdrabnianiu gruzu,
- wydajność do 70 m³/h – przy rozdrabnianiu granitu,
- maksymalny wymiar ziaren nadawy 700 mm,
- stopień rozdrobnienia 10÷50, moc silnika 160 kW, masa 22,1 Mg.

W tabelach 4.4; 4.5; 4.6 i 4.7 podano podstawowe parametry kruszarek udarowych o zróżnicowanej wydajności stosowanych we wszystkich stopniach kruszenia.

Podstawowe parametry kruszarek bijakowych firmy Goster [22]

Tabela 4.4.

Typ	Wymiary wirnika [mm]	Maksym. wymiar nadawy [mm]	Uziarnienie produktu [mm]	Wydajność [m ³ /h]	Moc [kW]	Masa [kg]
GI-67	Ø 600x700	200	0÷30	< 40	45	4000
GI-76	Ø 700x600	250	0÷50	< 60	55	4500
GI-86	Ø 800x600	300	0÷50	< 80	75	5000
GI-88	Ø 800x800	350	0÷80	< 120	90	6000
GM-06	Ø 1000x600	350	0÷100	< 150	90	6000
GI-1010	Ø 1000x1000	550	0÷100	< 220	132	9000
GI-1012	Ø 1000x1200	600	0÷150	< 320	160	12000

Parametry kruszarek bijakowych jednowirnikowych firmy Makrum [23]

Tabela 4.5.

Typ Parametr	ICO40.75	ICO 40.76	ICO 40.77	ICO40.78	ICO 44.26	ICO97.58
Wymiary wirnika [mm]	Ø1000x1000	Ø1000x600	Ø700x600	Ø1600x1600	Ø1200x1000	Ø800x600
Nadawa [mm]	< 100	< 100	< 150	< 500	< 400	< 150
Uziarnienie produktu [mm]	0÷20	0÷20	0÷15	0÷25	0÷50	0÷15
Wydajność [m³/h]	30÷45	20÷30	15÷20	133÷173	50÷150	15÷20
Moc silnika [kW]	110	55	45	250	110	45
Masa [Mg]	9,2	5,8	4,5	41,4	21,5	4,8

**Podstawowe parametry dużych kruszarek bijakowych do wstępnego kruszenia
firmy ThyssenKrupp [24]**

Tabela 4.6.

Typ	Wymiary wirnika [mm]	Maksym. wymiar nadawy [mm]	Wydajność [m³/h]
PB 160/150 CR	Ø 1600x1500	1 410 x 1 520	400
PB 160/200 CR	Ø 1600x 2000	1 410 x 2 020	650
PB 180/200 CR	Ø 1800x2000	1 640 x 2 030	800
PB 180/250 CR	Ø 1800 x2500	1 640 x 2 530	1000
PB 200/250 CR	Ø 2000x2500	1 845 x 2 530	1300
PB 200/300 CR	Ø 2000x3000	1 845 x 3 030	1500
PB 220/250 CR	Ø 2200x2500	1 950 x 2 530	1700
PB 220/300 CR	Ø 2200x3000	1 950 x 3 030	2000
PB 250/250 CR	Ø 2500x2500	2 150 x 2 530	1850
PB 250/300 CR	Ø 2500x3000	2 150x3 030	2400

**Podstawowe parametry dużych kruszarek udarowych do średniego kruszenia
firmy ThyssenKrupp [24]**

Tabela 4.7.

Typ	Wymiary wirnika [mm]	Maks. wymiar nadawy [mm]	Wydajność [m³/h]
PB 100/100	Ø 1000x1000	710 x 1 060	110
PB 100/125	Ø 1000x1250	710 x 1310	145
PB 125/125	Ø 1250x1250	950 x 1 310	230
PB 140/150	Ø 1400x1500	1 000 x 1 560	330
PB 140/175	Ø 1400x1750	1000 x1810	400
PB 140/200	Ø 1400x2000	1 000 x 2 060	450
PB 140/250	Ø 1400x2500	1 000 x 2 560	550
PB 140/300	Ø 1400x3000	1 000 x 3 060	650

4.4. Kruszarki udarowe z wałem pionowym

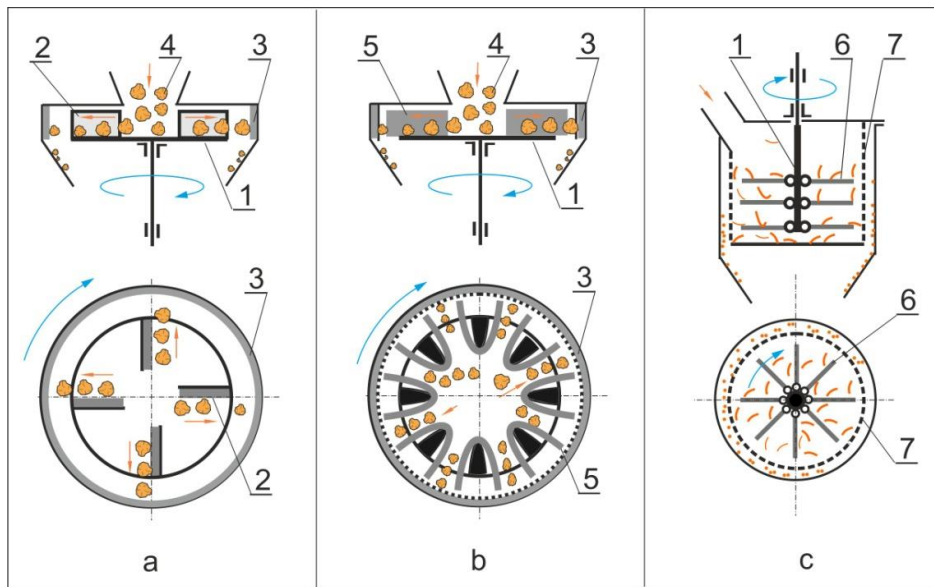
W tej grupie kruszarek występują trzy grupy maszyn (rys. 4.15):

- odśrodkowe – najbardziej liczna grupa,
- z wałem pionowym i elementami roboczymi w kształcie podków usytuowanych swobodnie na występach wsporczych wirnika,
- z wałem pionowym i elementami roboczymi (prętami, łańcuchami) mocowanymi przegubowo na zaczepach wirników - zwane odśrodkowo-udarowymi.

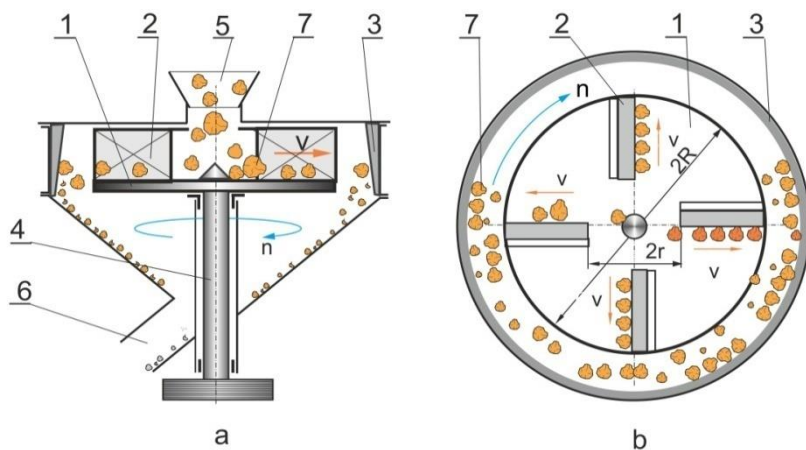
Kruszarki z pierwszej i drugiej grupy przeznaczone są do rozdrabniania materiałów kruchych, natomiast trzeciej głównie do rozdrabniania niekruchych materiałów, np.: złomu elektronicznego, metalowego, poużytkowych opakowań kompozytowych, odpadów drewna i innych. Kruszarki odśrodkowe nazywane są kruszarkami z wałem o osi pionowej, w literaturze anglojęzycznej mają kilka nazw: *centrifugal crusher*, *vertical shaft impactor VSI*, *rotor centrifugal crusher*, *vertical mill*, w niemieckojęzycznej: *Rotorschleuderbrecher*, *Prallbrecher mit Schleuderrotor* lub *Prallspalter* [10].

W dominującej większości kruszarek odśrodkowych proces rozdrabniania polega na wykorzystaniu działania siły odśrodkowej, która nadaje ziarnom rozdrabnianego materiału prędkość liniową, a tym samym energię kinetyczną. Energia ta wydatkowana jest na zniszczenie struktury ziaren materiału podczas zderzenia rozpędzonego ziarna z nieruchomą wykładziną kruszącą. Swobodne ziarna materiału wprowadzane do wirnika - usytuowanego na pionowym wale, w jego osi geometrycznej, wskutek jego prędkości obrotowej przemieszczają się na wirniku dzięki sile odśrodkowej, a otrzymana energia kinetyczna zamieniana jest na pracę rozdrabniania.

Rozdrabnianie swobodnych ziaren zachodzi na wykładzinie komory kruszenia, która ma postać gładkiej (walcowej lub stożkowej) powierzchni, gładkich lub profilowanych segmentów płyt odbojowych zwanych kowadłami, rolek, względnie zbioru ziaren rozdrabnianego materiału usytuowanego w tak zwanych kieszeniach. Jeśli energia ziaren w momencie uderzenia będzie większa od pracy kruszenia charakterystycznej dla danego materiału, ziarno rozpadnie się na dwa, a najczęściej więcej mniejszych ziaren. Wymaganą prędkość ziarnom materiału nadaje obracający się wirnik, na który w jego geometrycznej osi obrotu podawane są ziarna materiału. Ziarna te wrzucane są na zewnątrz wirnika za pomocą łopatek na wykładzinę komory kruszącej, na której ulegają rozdrobnieniu – rys. 4.16.



Rys. 4.15. Kruszkarki z wałem pionowym: a – odśrodkowe, b – ze swobodnymi elementami roboczymi, c – z elementami roboczymi zamocowanymi przegubowo



Rys. 4.16. Schemat budowy i działania kruszarki odśrodkowej:

a - przekrój kruszarki, b – wirnik od góry,

1 – wirnik, 2 – łopatką z wykładziną, 3 – wykładzina, 4 – wał wirnika z kołem pasowym, 5 – wlot nadawy, 6 – wylot produktu kruszenia, 7 – rozdrabniany materiał, v – prędkość ziaren wzdłuż łopatki, n – prędkość obrotowa wirnika, $2R$ – średnica zewnętrzna wirnika, $2r$ – średnica wprowadzenia materiału na wirnik

Na ziarno przemieszczające się na wprawionym w ruch obrotowy wirniku, oddziałują następujące siły: bezwładności, odśrodkowa, tarcia, docisku do łopatk, Coriolisa, ciężkości, wyporu, oporu hydraulicznego, wzajemnego oddziaływania z innymi ziarnami. Ponadto przy łopatkach zakrzywionych oraz łopatkach z „kieszeniami”, w których znajdują się ziarna rozdrabnianego materiału, występują jeszcze dodatkowe siły związane z kształtem łopatek oraz oporów przemieszczania się po materiale. Praktycznie największe znaczenie mają siły: bezwładności, odśrodkowa, tarcia oraz docisku do łopatk.

Stąd na ziarno materiału, które rozpędzane jest w wirniku oddziałuje uproszczony układ sił opisany wyrażeniem:

$$B = F - T$$

$$\text{gdzie: } B = m \frac{d^2x}{dt^2}, \quad F = m \omega^2 x, \quad T = C \mu = 2 m \omega \frac{dx}{dt},$$

B – siła bezwładności, N,

F – siła odśrodkowa, N,

T – siła tarcia, N

C – siła tarcia (pochodząca od siły Coriolisa), N,

m – masa ziarna, kg,

μ – współczynnik tarcia ziarna o łopatkę, [-],

x – droga ziarna wzdłuż łopatk, m.

Po podstawieniu powyższych zależności do pierwszego równania otrzymano równanie różniczkowe o postaci:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \omega^2 x - 2 m \omega \frac{dx}{dt}$$

Po scałkowaniu równania różniczkowego w/w granicach $\{r; R\}$ otrzymuje się wyrażenie na prędkość promieniową ziarna: $v_r = \frac{dx}{dt}$, które dla konstruktora kruszarki ma raczej drugorzędne znaczenie, ponieważ w budowie kruszarki najważniejsza jest prędkość całkowita ziarna v_c , czyli prędkość z jaką opuszcza wirnik ziarno rozdrabnianego materiału oraz wartość kąta α , czyli kąta pomiędzy w/w wektorami prędkości.

Oznaczając średnicę zewnętrzną wirnika jako $2R$, a średnicę wprowadzenia ziaren do wirnika jako $2r$ prędkość ziarna v_r można z pewnym przybliżeniem obliczyć z wyrażenia:

$$v_r = \omega \sqrt{R^2 - r^2}$$

Natomiast całkowitą prędkość ziarna v_c z wyrażenia:

$$v_c = \sqrt{v_t^2 + v_r^2} = v_t \sqrt{2 - \frac{r^2}{R^2}}$$

Kąt α można obliczyć ze stosunku prędkości v_r oraz v_t , przy czym $v_t = \omega r$.

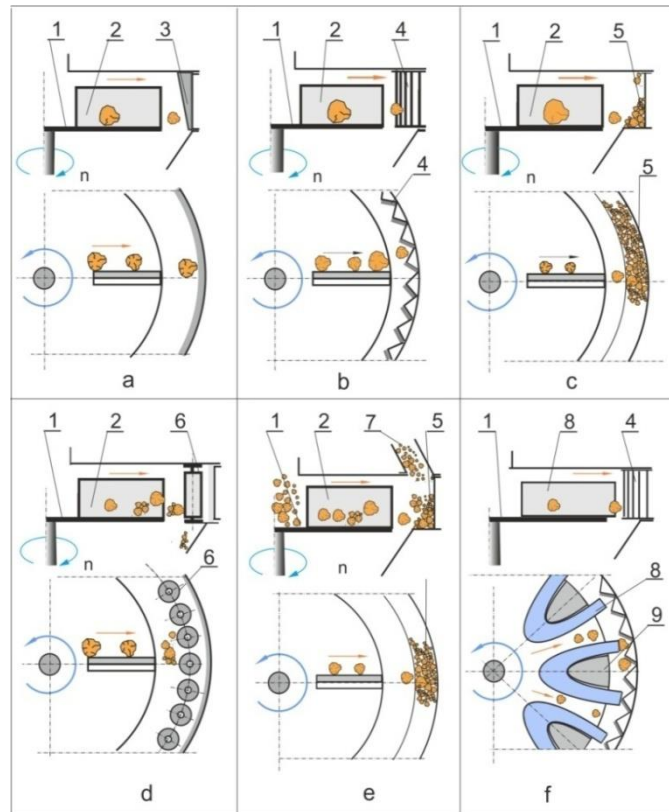
Przedstawione wyżej obliczenia prędkości ziarna są słuszne dla prostych łopatek usytuowanych promieniowo na wirniku. W przypadku, gdy linia utworzona na przedłużeniu łopatek nie przechodzi przez oś geometryczną wirnika należy jeszcze uwzględnić kąt pomiędzy promieniem wirnika a łopatką [5, 29]. Metodę dokładnych obliczeń kruszarki odśrodkowej podano w pracy [9].

Z przedstawionych wyżej obliczeń można wyznaczyć jedynie prędkość obrotową wirnika, ale ten parametr jest w przypadku tej kruszarki najważniejszy. W literaturze brak jest zależności do obliczeń wydajności kruszarki odśrodkowej. Wydajność tą można obliczyć, tylko w bardzo przybliżony sposób, z natężenia przepływu strumienia masy nadawy znając przekrój wlotu, gęstość nasypową kruszonego materiału i współczynnik rozluźnienia.

Pobór mocy kruszarki odśrodkowej można wyznaczyć z hipotezy Bonda – przyjmując wskaźnik WI dla rozdrabniania udarowego.

Głównym kryterium klasyfikacji kruszarek odśrodkowych jest budowa strefy rozdrabniania, czyli układu wirnik-wykładzina krusząca. Stąd wyróżnić można pięć głównych odmian kruszarek odśrodkowych:

- a) z wykładziną gładką stożkową, w których ziarna rozdrabniane są głównie na tej wykładzinie (rys. 4.17 a),
- b) z wykładziną segmentową z płytami odbojowymi – kowadłami, na których ziarna rozdrabniane są głównie na tej wykładzinie (rys. 4.17 b),
- c) z wykładziną z obrotowych rolek (rys. 4.17 c),
- d) z wykładziną, którą tworzą ziarna rozdrabnianego materiału umieszczone na współśrodkowej z wirnikiem półce, lub w tzw. kieszeniach – (rys. 4.17 d),
- e) z wykładziną, którą tworzą ziarna rozdrabnianego materiału umieszczone na półkach, usytuowanych współśrodkowo na zewnątrz wirnika, na których rozdrabniają się ziarna wyrzucane przez wirnik oraz ziarna wprowadzane na półkę z pominięciem wirnika (rys. 4.17 e),
- f) z wykładziną profilowaną, na której opuszczające wirnik ziarna materiału rozdrabniane są przez segmenty robocze umieszczone swobodnie na wystęпах wirnika i dociskane do wykładziny siłą odśrodkową generowaną przez wirnik (rys. 4.17 f.).



Rys. 4.17. Schemat budowy stref kruszenia podstawowych typów kruszarki odśrodkowej: a – z wykładziną gładką stożkową, b – z wykładziną segmentową z kowadłami, c – z wykładziną z rozdrabnianym materiałem umieszczonym na półce, d – z wykładziną rolkową, e – z wykładziną z rozdrabnianego materiału oraz bocznym strumieniem materiału, f – ze swobodnymi elementami kruszącymi

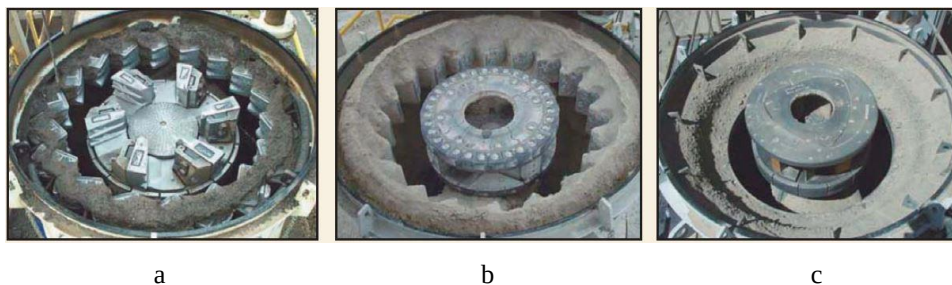
Kruszarka przedstawiona na rysunku 4.17 f nie jest typową kruszarką odśrodkową. Posiada tylko pionowe usytuowanie wału wirnika, natomiast zachodzący w niej mechanizm rozdrabniania jest całkowicie odmienny od mechanizmu występującego w/w kruszarkach odśrodkowych. W tej kruszarce siła odśrodkowa powoduje tylko transport ziaren do strefy kruszenia, w której ziarna są rozdrabniane przez swobodne elementy robocze w kształcie podków, które dociskane są do ich wsporników i swobodnych ziaren powodując ich rozdrabnianie.

Drugim, ważnym kryterium podziału tych kruszarek jest budowa wirnika. Wirniki mają dwa rozwiązania, to jest wirnik otwarty i zamknięty. Wirnik otwarty to wirnik, w którym łopatki mocowane są tylko z jednej strony - to jest od dołu do tarczy dolnej. W wirniku zamkniętym łopatki mocowane są

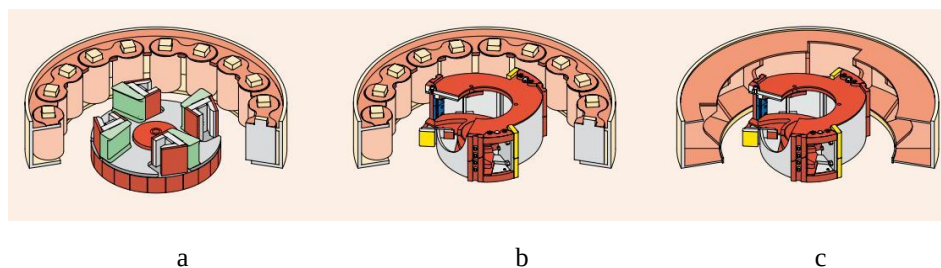
dodatkowo do tarczy górnej wirnika. Drugi podział wirników jest znacznie bardziej zróżnicowany dotyczy usytuowania łopatek na tarczy wirnika, które w pewnym stopniu determinuje rozwiązanie wykładziny kruszącej.

Przykłady niektórych rozwiązań konstrukcyjnych wirników oraz stref kruszenia stosowanych w kruszarkach odśrodkowych zamieszczono na rysunkach 4.18, 4.19, 4.20, 4.21. Rysunek 4.18.a przedstawia strefę kruszenia materiałów o „najgrubszym” uziarnieniu i średniej abrazyjności, rysunek 4.18.b materiałów o „średnim” uziarnieniu i średniej abrazyjności, a rysunek 4.18.c materiałów o „średnim” uziarnieniu i wysokiej abrazyjności (silnie ścierające).

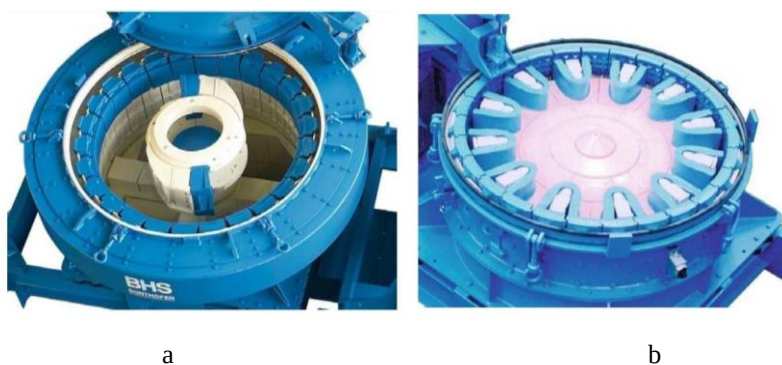
Kruszarki te produkowane są w Niemczech, USA, Francji, Hiszpanii, Czechach, Rosji, Chinach, Indiach i w innych krajach. W Polsce kruszarki odśrodkowe oferują firmy: Doltech [25], Mifama [26] (granulator udarowy), Wtórmech [27] (kruszarka U-110). Kuszarki te znalazły zastosowanie w procesach rozdrabniania udarowego, w zakresie kruszenia średniego, a najczęściej do drobnego i bardzo drobnego, uziarnionych surowców mineralnych oraz materiałów syntetycznych (klinkieru, żużli hutniczych), do selektywnego rozdrabniania uziarnionych odpadów, zwłaszcza gruzu budowlanego oraz do uszlachetniania – kubizacji ziaren kruszyw mineralnych. Uziarnienie nadawy do tych kruszarek nie przekracza na ogół 80 mm. Wyjątek stanowią kruszarki Canica firmy Terex [28], w których – w największej maszynie (o wydajności 500÷900 Mg/h) maksymalny wymiar ziaren nadawy osiąga 300 mm, a w maszynach o wydajności 370÷750 Mg/h mieści się w zakresie 150÷200 mm.



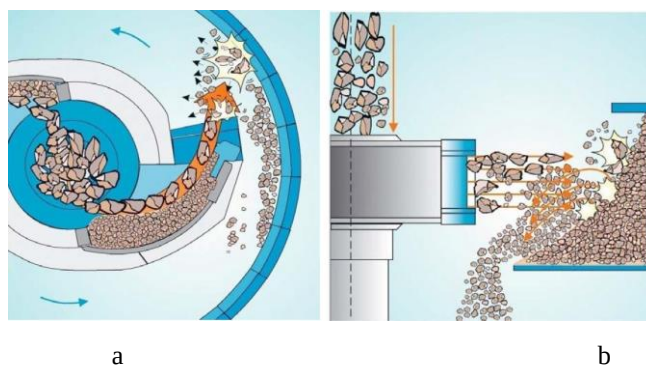
Rys. 4.18. Wirniki oraz strefy kruszenia kruszarek odśrodkowych produkowanych przez firmę Terex [30]: a - z wirnikiem otwartym, b - z wirnikiem zamkniętym, c - z wirnikiem zamkniętym i półką wypełnioną kruszonym materiałem



Rys. 4.19. Wirniki oraz strefy kruszenia kruszarek odśrodkowych produkowanych przez firmę Metso Minerals [31]: a - z wirnikiem otwartym czteropłatkowym i wykładziną rolkową, b - z wirnikiem zamkniętym z trzema łopatkami i wykładziną rolkową, c - z wirnikiem zamkniętym z trzema łopatkami i wykładziną z „kieszeniami” wypełnionymi rozdrabnianym materiałem



Rys. 4.20. Wirniki oraz strefy kruszenia kruszarek odśrodkowych produkowanych przez firmę BHS [32]: a - z wirnikiem otwartym dwupłatkowym, b - z wirnikiem otwartym ze swobodnymi elementami kruszącymi



Rys. 4.21. Budowa strefy kruszenia kruszarek odśrodkowych przeznaczonych do najbardziej abrazyjnych materiałów produkowanych przez firmę BHS [32, 33]: a - widok z góry na wirnik z kieszenią wypełnioną kruszonym materiałem, b - widok z boku na półkę wypełnioną kruszonym materiałem

Optymalizację rozwiązań konstrukcyjnych wirników kruszarek odśrodkowych podano w pracy [34], a informacje o najnowszych rozwiązaniach w pracach [35, 36].

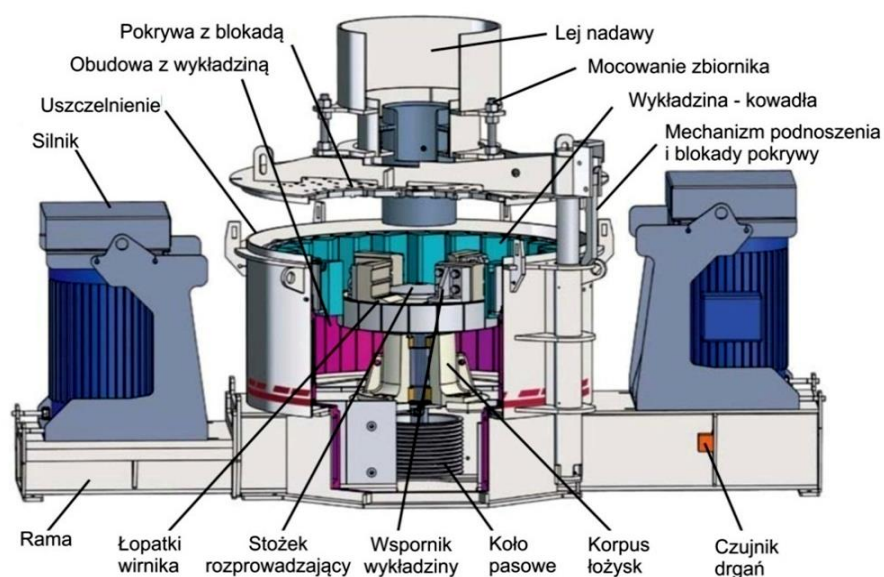
Cechą wspólną budowy kruszarek odśrodkowych jest usytuowanie pionowe wału wirnika. Wał łożyskowy jest w łożyskach o wzmocnionej konstrukcji. Niemal wszystkie kruszarki mają wirnik napędzany przez przekładnię pasową z jednego silnika. Na rysunkach 4.22 i 4.23 przedstawiono budowę kruszarek firm Terex i Metso.

Wszystkie kruszarki posiadają leje nadawy usytuowane na pokrywach wirników. Pokrywy wyposażone są w mechanizmy lub podnośniki do szybkiego ich demontażu z kruszarki – przy dużych kruszarkach z hydraulicznym napędem. Duże kruszarki – o wydajności powyżej 50 Mg/h wyposażone są w układy smarowania i chłodzenia łożysk.

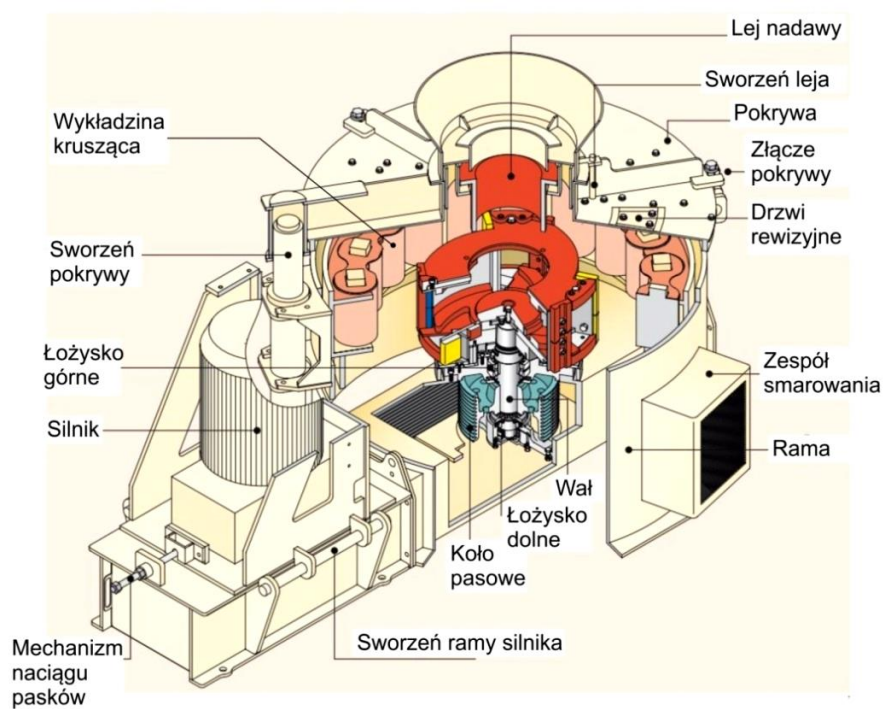
Jak wcześniej wspomniano głównym parametrem decydującym o efektywności procesu rozdrabniania w kruszarce odśrodkowej jest prędkość, którą nadaje ziarnom rozdrabnianego materiału obracający się wirnik. Zwykle podawana jest jej składowa v_t , którą w pewnym przybliżeniu reprezentuje prędkość obwodowa wirnika. Prędkość ta mieści się w zakresie 40÷86 m/s. Wydajność kruszarek wynosi 10÷900 Mg/h i podawana jest w szerokim zakresie, który zdeterminowany jest własnościami fizycznymi rozdrabnianego materiału.

Uziarnienie nadawy uwarunkowane jest także właściwościami fizycznymi, głównie podatnością na kruszenie, indeksem abrazyjności AI oraz wielkością kruszarki. Uziarnienie nadawy wynosi 45÷170 mm, graniczny stopień rozdrobnienia wynosi: od 1,2÷1,5 - przy najmniej podatnych na rozdrabnianie i silnie abrazyjnych materiałach do 1,5÷3 - przy materiałach o dużej podatności na rozdrabnianie i niewielkiej abrazyjności, a średni stopień rozdrobnienia wynosi 3÷8. Kruszarki mają zainstalowaną moc 10÷890 kW, a masa samej kruszarki mieści się w zakresie 10÷32 Mg.

Informacje o parametrach kruszarek podawane przez firmy nie są spójne. Firmy często nie podają jednocześnie pięciu ważnych parametrów: rodzaju rozdrabnianego materiału, uziarnienia nadawy i produktu rozdrabniania, wydajności i zainstalowanej mocy. Dlatego porównanie parametrów poszczególnych kruszarek praktycznie jest nie możliwe. Największe wydajności osiągają kruszarki produkowane przez firmy amerykańskie.



Rys. 4.22. Budowa kruszarek firmy Terex [28]



Rys. 4.23. Budowa kruszarek firmy Metso [31]

Może to wynikać ze znacznie „grubszej” nadawy o wymiarach ziaren dochodzących do 300 mm, co z pewnością skutkuje znacznie „grubszym” uziarnieniem produktu kruszenia.

Podstawowe parametry kruszarek odśrodkowych podano w tabelach 4.8; 4.9 i 4.10.

Podstawowe parametry kruszarek odśrodkowych firmy PSP [37]

Tabela 4.8.

Typ	Maks. uziarnienie nadawy [mm]	Prędkość obwodowa wirnika [m/s]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]	Wymiary: dl. x szer. x wysok. [mm]
ODV1183S/SM	32	80	10÷50	37÷55	2650x1404x1481
ODV 1186S/SM	50	75	50÷140	90÷160	3600x2410x1750
ODV1186M	50	75	50÷140	90÷160	3290x1950x1750
ODV 1187S/SM	70	75	100÷250	110÷200	3800x2600x1860
ODV 1187M	70	75	100÷250	110÷200	3490x2140x1860
ODV1188S/SM	70	70	150÷450	200÷315	4710x3310x2400
ODY1188M	70	70	150÷450	200÷315	3981x2372x2400

Parametry techniczne kruszarek Canica VSI firmy Terex [28]

Tablica 4.9.

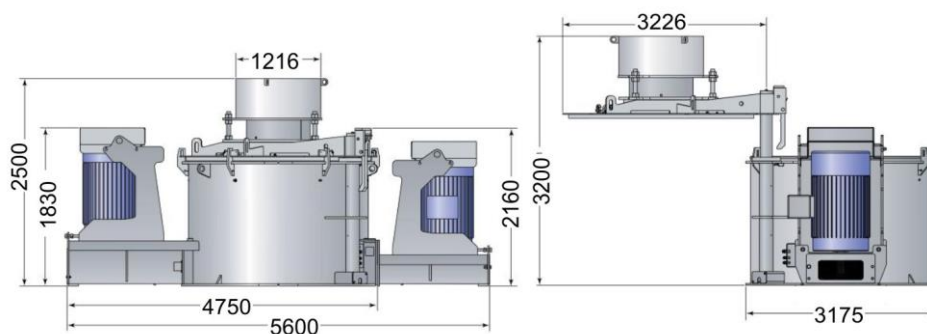
Typ	Moc silnika [kW]	Wydajność [Mg/h]	Maks. wymiar nadawy [mm]	Masa kruszarki [Mg]
1200	37÷112	64	38	3,63
1400	75÷186	113	51	5,44
2000SD - 1 napęd	149÷248	227	102	10,99
2000DD - 2 napędy	298÷522	317	102	12,47
2050	298÷522	363	102	14,06
100	298÷522	363	127	14,15
2300	298÷522	454	127	15,42
105	373÷594	454	152	18,14
2350	373÷594	544	152	16,33
2500	447÷746	726	203	23,13
3000	522÷894	907	305	26,31

Parametry techniczne kruszarek firmy Doltech [25]

Tabela 4.10.

Typ	Maks. uziarnienie nadawy [mm]	Masa [Mg]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika [kW]	Średnica wirnika [mm]
ZS 80	40	4,1	30÷60	75÷132	800
ZS 1000	40	7,0	50÷90	132÷200	1000
ZS 100/OR	100	10,0	65÷100	160÷200	1000
ZS 120	120	12,0	65÷125	200÷250	1200

W materiałach firmy Terex brak jest informacji o uziarnieniu produktów kruszenia z kruszarek Canica. Rysunek 4.24 przedstawia największą produkowaną obecnie kruszarkę odśrodkową. Do tej kruszarki dozowana jest nadawa o maksymalnym wymiarze ziaren dochodzącym do około 300 mm, a w większości produkowanych tego typu kruszarek maksymalny wymiar ziarna nie przekracza 80 mm.



Rys. 4.24. Największa produkowana obecnie kruszarka odśrodkowa Canica 3000 [28]
z podstawowymi wymiarami montażowymi

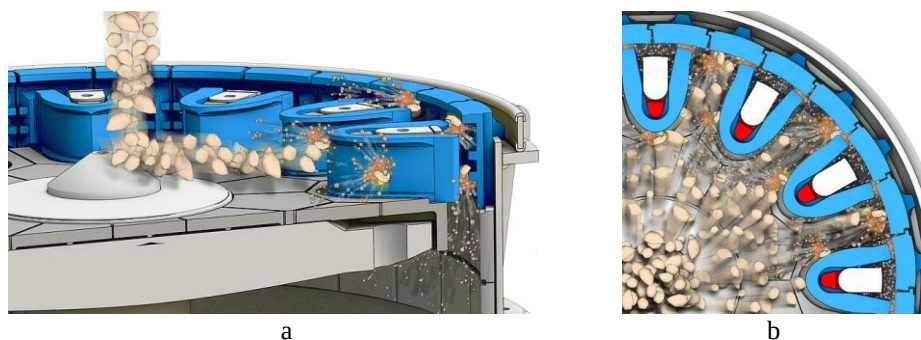
Kruszarki odśrodkowe mają zróżnicowaną budowę - uwarunkowaną własnościami fizycznymi materiału nadawy, głównie podatnością na kruszenie i abrazyjnością, rozmiarami ziaren nadawy, wymaganiami uziarnienia produktu kruszenia, polityką patentową firm, dostępnością materiałów odpornych na zużycie. Zróżnicowanie to dotyczy wirnika oraz strefy kruszenia (wykładziny kruszącej), czyli tzw. kowadeł. Część tych elementów konstruowana jest w kilku wariantach, które mogą być używane zamiennie. Przy kruszeniu nadawy o największych rozmiarach ziaren nadawy (70÷300 mm) wirniki mają dwie łopatki. Liczba łopatek wzrasta do 6 przy kruszeniu drobniejszej nadawy (30÷70 mm). Przy mniej abrazyjnych materiałach wykładzina strefy kruszenia wykładana jest łatwo wymiennymi segmentami, a przy nadawie silnie

abrazyjnej wirnik i kieszenie wykładziny mają tzw. kieszenie wypełniające się kruszonym materiałem, co znacznie zmniejsza zużycie elementów roboczych, ale skutkuje bardziej „grubym” produktem rozdrabniania. Przy nadawie bardzo podatnej na rozdrabnianie do strefy kruszenia podaje się nadawę dwoma strumieniami: przez wirnik oraz poza wirnikiem, co znacznie zwiększa wydajność kruszarki. Nadawę do kruszarek dozuje się przenośnikiem taśmowym. Kruszarki wyposażane są w urządzenia do szybkiego demontażu pokrywy. Wadą kruszarki jest wysoki poziom ciśnienia akustycznego oraz możliwość emisji pyłu, zwłaszcza przy kruszeniu suchych materiałów. Kruszarki te oprócz klasycznego rozdrabniania stosuje się również do kubizacji kruszyw mineralnych. Niektóre konstrukcje kruszarek wytwarzają tak drobny produkt kruszenia, że mogą być stosowane jako młyny.

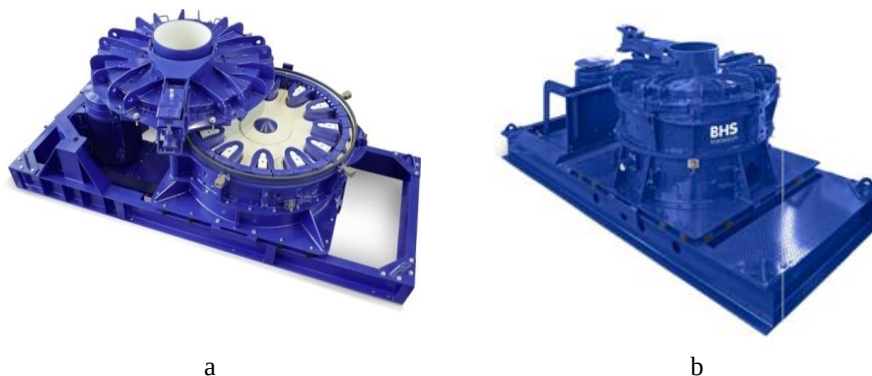
Odrębnego potraktowania wymaga kruszarka odśrodkowa ze swobodnymi elementami roboczymi w kształcie wydłużonych podków umieszczanych swobodnie w występach wirnika - nazwana przez producenta młynem udarowym – *Rotorprallmühle* (rys. 4.15 b). Jednak ze względu na uziarnienie produktu rozdrabniania, które oprócz szkła (zawierającego około 60% klasy $0 \div 1$ mm) dla wszystkich pozostałych rozdrobnionych materiałów wynosi poniżej 20% ilość klasy $0 \div 1$ mm. Dlatego maszynę tę zaliczono do kruszarek.

Proces rozdrabniania zachodzi w niej dwuetapowo. W pierwszym etapie ziarna rozdrabniane są tak jak w typowej kruszarce odśrodkowej, a drugi etap - znacznie bardziej efektywny to rozdrabnianie przez wahliwe elementy przemieszczane na zewnątrz siłą odśrodkową robocze na gładkiej lub profilowanej wykładzinie (rys. 4.15 b i 4.17 f).

Sposób działania tej kruszarki zaprezentowano na rysunku 4.25 [35, 36], a rozwiązanie konstrukcyjne na rysunku 4.26.



Rys. 4.25. Sposób działania kruszarki odśrodkowo-udarowej [35]:
a – strefa dozowania nadawy, b – strefa rozdrabniania



a b
Rys. 4.26. Kuszarka odśrodkowo-udarowa firmy BHS [35, 36]:
a - z otwartą strefą rozdrabniania, b - w stanie roboczym

Podstawowe parametry kruszarek odśrodkowo-udarowych podano w tabeli 4.11.

Parametry techniczne kruszarek firmy BHS typ RPMV [36]

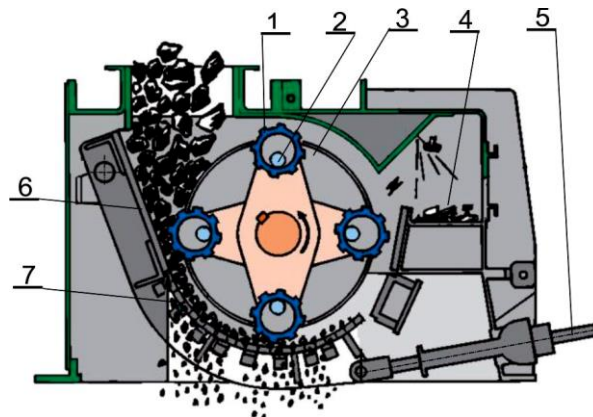
Tabela 4.11.

Typ	Wymiary wirnika [mm]	Liczba elementów rozdrabniających, sztuk	Prędkość obwodowa wirnika [m/s]	Moc silnika [kW]
RPMV 0813	Φ 850x135	6	65	75
RPMV 1113	Φ 1150x135	8	70	132
RPMV 1513	Φ 1150x135	12	70	200
RPMV 1113	Φ 1200x160	8	90	315
RPMV 1516	Φ 1200x160	12	90	315

Całkowicie inną budowę wirnika ma kuszarka, której schemat budowy zamieszczono na rysunku 4.15 c. Wirnik tej kruszarki wyposażony jest w przegubowo zamocowane prętowe bijaki, które podczas postoju opadają pod wpływem grawitacji w dół, a podczas obracania się wirnika pod wpływem siły odśrodkowej podnoszą się do poziomu i rozdrabniają materiał najczęściej odpady pochodzenia roślinnego. Niektóre wersje kruszarek stosowane do rozdrabniania nawozów zamiast prętów mają w wirniku zamocowane łańcuchy [38].

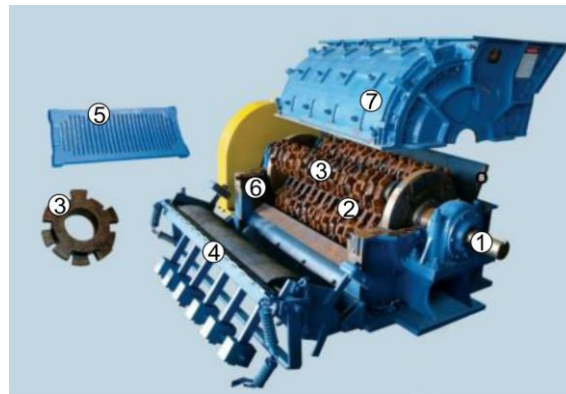
4.5. Kruszarki udarowo-pierścieniowe i łańcuchowe

Wśród kruszarek stosowanych do materiałów kruchych, zwłaszcza węgla kamiennego i przerostów węglowych stosowana jest kruszarka zwana udarowo-pierścieniową [4], młotkowo-pierścieniową, lub pierścieniową. W języku angielskim nosi nazwę: *ring hammer crusher*, *roll crusher*, *ring granulator*, a niemieckim: *Ring-Hammerbrecher*. Kruszarka ta może być stosowana do rozdrabniania materiałów suchych i mokrych, których poziom wilgotności nie przekracza 15%, a także do rozdrabniania innych materiałów: soli kamiennej, kredy, gipsu i wapieni. W USA stosowana jest także w recyklingu do rozdrabniania odpadów. Schemat budowy tej kruszarki zamieszczono na rysunku 4.27, a wybrane rozwiązania konstrukcyjne na rysunkach 4.28, 4.29 oraz 4.30.

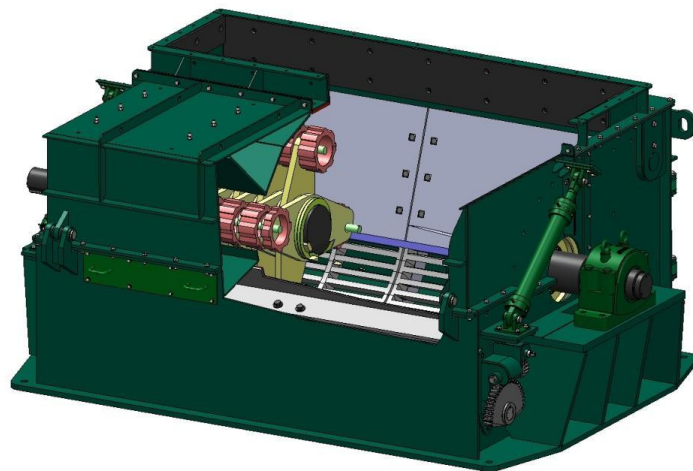


Rys. 4.27. Schemat budowy i działania kruszarki młotkowo-pierścieniowej [39]:

1 – młotek-pierścień, 2 – sworzeń, 3 – wirnik, 4 – kieszeń zanieczyszczeń,
5 – naciąg rusztu, 7 – ruszt, 8 – wykładzina



Rys. 4.28. Kruszarka młotkowo-pierścieniowa amerykańskiej firmy Recycling Machinery International [40]: 1 – wał, 2 – wirnik, 3 – pierścień, 4 – drzwi rewizyjne, 5 – ruszt, 6 – wykładzina boczna, 7 – pokrywa



Rys. 4.29. Strefa kruszenia kruszarki młotkowo-pierścieniowej firmy Recycling Machinery International [39]



Rys. 4.30. Kruszarka młotkowo-pierścieniowa firmy Osborn [41]

Wirnik kruszarki młotkowo-pierścieniowej zbudowany jest z wału, na którym umieszczone są tarcze, lub wsporniki (rys. 4.27 i 4.29) wsporniki połączone czterema sworzniami na których umieszczane są swobodnie młotki w kształcie pierścienia o wewnętrznej średnicy kilkakrotnie większej od średnicy zewnętrznej sworzni. W niektórych kruszarkach znajdują się cztery pary sworzni. Młotki - pierścienie kruszące mogą być uzębione na powierzchni zewnętrznej lub gładkie. Pierścienie gładkie umieszczane wspólnie z pierścieniami uzębionym w tej samej płaszczyźnie, lecz na przemian. Pierścienie są podstawowymi elementami roboczymi w tych kruszarkach. Luźne zamocowanie pierścieni na sworzniach powoduje bardziej selektywne rozdrabnianie, a zarazem ich mniejsze zużywanie się. Obrotowy kształt

pierścieni zwiększa ich trwałość oraz zapewnia dłuższy okres użytkowania, co w porównaniu z elementami roboczymi innych kruszarek młotkowych sprawia, że są one bardziej trwałe, co zmniejsza koszty ich wymiany.

Wirnik kruszarki usytuowany jest w strefie kruszenia, w której w górnej części umieszczony jest wlot nadawy, od dołu ruszt, a z boku wykładzina (rys. 4.27). Z boku, wzdłuż wirnika usytuowany jest otwór, przez który wydostają się ziarna nierozdrobnione, zwykle wtrącenia metaliczne. W tej kruszarce proces rozdrabniania zachodzi w dwóch etapach. W pierwszym etapie ziarna rozdrabniane są przez pierścieniowe młotki w momencie uderzenia ich w ziarna, a w drugim dokruszają nierozdrobnione ziarna na gładkiej wykładzinie oraz na ruszcie (rys. 4.27, 4.28 i 4.29). Ze względu na duże prędkości obwodowe pierścieni oraz swobodę ich ruchu, w kruszarce nie powinny być rozdrabniane materiały silnie abrazyjne, np. z dużą ilością krzemionki krystalicznej.

Podstawowe parametry kruszarek młotkowo-pierścieniowych firmy ATA Enterprise [39], podano w tabeli 4.12, a w tabeli 4.13 ujęto parametry kruszarek firmy Zhengzhou Dingsheng Engineering Technology Co Ltd.

Parametry kruszarek młotkowo-pierścieniowych firmy ATA Enterprise [39]

Tabela 4.12.

Typ	Średnica wirnika [mm]	Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	Maks. wymiar nadawy [mm]	Wydajność [Mg/h]	Masa [Mg]
TR-24	Φ 610	720	200	120÷150	4,4
TR-33	Φ 700	720	200	250÷300	6,0
TR-36	Φ 765	720	300	450÷500	11,0
TR-41	Φ 1120	720	275	550÷600	15,0
TR-42	Φ 1120	720	275	600÷700	15,0
TR-120X270	Φ 1210	720	300	750÷1000	21,0
TRM-53	Φ 1370	720	350	900÷1050	30,0
TRM-54	Φ 1350	720	300	1050÷1200	32,0
TR-160X330	Φ 1600	720	400	1300÷1800	35,0
TR-180X330	Φ 1800	600	400	1800÷2400	43,0

Parametry kruszarek młotkowo-pierścieniowych firmy Zhengzhou Dingsheng Engineering Technology Co Ltd [42]

Tabela 4.13.

Typ	Wymiary wirnika [m]	Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	Wymiary gabarytowe [mxmxm]	Wymiary wlotu [mxm]	Wydajność [Mg/h]	Moc [kW]
PCH0404	Φ 0,4x0,4	970	1,7x1,0x0,6	310x440	16÷25	11
PCH0604	Φ 0,6x0,4	970	2,0x1,4x0,8	460x530	22÷33	18,5
PCH0606	Φ 0,6x0,6	980	2,2x1,4x0,8	460x670	30÷55	30
PCH0808	Φ 0,8x0,8	740	2,8x1,7x1,1	470x828	70÷105	45
PCH1010	Φ 1,0x1,0	740	3,6x2,0x1,3	586x1040	150÷300	110
PCH1016	Φ 1,0x1,6	740	5,4x2,8x1,4	446x1732	400÷500	200

W Polsce tego typu kruszarki opracowano w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG [43]. Kruszarki te oznaczone symbolem UPK przeznaczone są do rozdrabniania węgla, koncentratu wzbogacania, przerostów i kamienia płuczkowego o uziarnieniu do 300 mm. Zaletami tych kruszarek jest zwarta konstrukcja, pewność działania, niskie koszty eksploatacji i konserwacji, łatwa obsługa i konserwacja, możliwość zmiany szczeliny w ruszcie, łatwy odbiór produktu, prosty napęd - bezpośredni z silnika lub z przystawki napędowej.

Kruszarki wyposażane są w elementy robocze wykonane z materiałów o dużej odporności na ścieranie i posiadają możliwość użytkowania w lini technologicznej wyposażonej w układ automatycznego sterowania [43]. ITG KOMAG oferuje dwa typy kruszarki: UPK 1000x1000 oraz UPK 1000x1500. Projektowa wydajność kruszarek wynosi odpowiednio: 100 oraz 160 Mg/h, przy zainstalowanych mocach: 132 oraz 160 kW. Masa kruszarek wynosi w zależności od wykonania odpowiednio 11,15÷11,7 Mg – kruszarki UPK 1000x1000 oraz 13,95÷15,09 Mg – kruszarka UPK 1000x1500 [43].

Kruszarki oznaczone tymi samymi symbolami o zbliżonych parametrach oferuje w Polsce firma Fugor S.A. [44]. Kruszarki te zamieszczono na rysunku 4.31.

Najwięcej producentów kruszarek młotkowo-pierścieniowych znajduje się w Chinach. Wynika to zapewne z największego na świecie wydobycia węgla kamiennego. Oferuje się tam kruszarki o niewielkich wydajnościach około 10÷30 Mg/h, a także wydajnościach znacznie większych – dochodzących do 500 Mg/h. Największe tego typu kruszarki o wydajności powyżej 2000 Mg/h produkowane są w USA. Znaczna ich część stosowana jest w recyklingu materiałów budowlanych, a także odpadów komunalnych.



Rys. 4.31. Kruszarka młotkowo-pierścieniowa firmy Fugor S.A [44]:
a – widok kruszarki od strony napędu, b – widok strefy kruszenia kruszarki

Oryginalne rozwiązanie kruszarki nazywanej ze względu na zastosowane elementy robocze - łańcuchy kruszarką łańcuchową zamieszczono na rysunku 4.32 [45]. Kuszarka ta wyposażona jest w nietypowe elementy robocze ciężkie łańcuchy ogniwowe, mocowane na sworzniach znajdujących się na wirniku. Rozmiar ogniów oraz ich rozmieszczenie, które wynosi od 40 do 110 mm, dostosowane są do wielkości kruszarki. Zespół roboczy kruszarki wykonywany w dwóch wersjach, to jest jako jedno lub dwu wirnikowy. W wersji z dwoma wirnikami wirniki obracają się w przeciwnych kierunkach. Wirniki (jeden lub dwa) kruszarki napędzane są tak jak wirniki typowych kruszarek młotkowych przez przekładnię pasową. Prędkość obrotowa wirników wynosi około 1500 obr/min. Zainstalowane moce silników wynoszą od 2 x 5,5 do 90 kW [45].



Rys. 4.32. Kuszarka łańcuchowa w wersji dwuwirnikowej [45]

Elementy robocze tych kruszarek (wirniki, łańcuchy) oraz ich strefy kruszenia wykonuje się ze stali odpornych na zużycie abrazyjne, a także ze stali odpornych na korozję (nierdzewnej). Dzięki dużej prędkości łańcuchów, kruszarka łańcuchowa może być stosowana również jako młyn.

Szczególne zastosowanie znalazły te kruszarki przy rozdrabnianiu kruszeniu i mieleniu zbrylonych materiałów wilgotnych, lepiących się, występujących w postaci naturalnej lub pochodzących z syntezy mono i wielomateriałowych oraz innych lepkich materiałów przy minimalnym zalepianiu strefy kruszenia. Możliwość zalepiania się strefy rozdrabniania eliminują wirujące łańcuchy oraz brak rusztu, co dodatkowo upraszcza jej budowę oraz zmniejsza jej masę. Strefa kruszenia wyłożona jest od góry w wykładzinę, a od dołu jest otwarta.

Kruszarki te używane są w rozdrabnianiu nawozów sztucznych (superfosfatu prostego, superfosfatu potrójnego), a także nawozów naturalnych (wapniowych, wapniowo-magnezowych i innych). W kruszarkach tych można rozdrabniać także poprodukcyjne odpady z produkcji wyrobów drzewnych (trociny, ścinki) oraz inne materiały, które zbrylają się podczas składowania.

Literatura

1. Lynch A.J., Rowland Ch. A.: The History of Grinding, Copyright © 2005 by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. All rights reserved. Electronic edition published 2009
2. Poradnik Górnika t.5, Wydawnictwo Śląsk 1976
3. Battaglia A., Banaszewski T.: Maszyny do przeróbki węgla, rud i surowców mineralnych, Cz. 1. Maszyny do przesiewania i rozdrabniania. Warszawa, Kraków, PWN 1972
4. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
5. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
6. Holländer J.: Berechnung und Analyse von Hammerbrechen. Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2001
7. Wegner Th.: Prallzerkleinerung grober Einzelpartikel als Auslegungsgrundlage für Rotorprallbrecher, Dissertation, Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2005
8. Deepak Gupta: Design and Analysis of a Horizontal Shaft Impact Crusher National Institute of Technology. Rourkela 769008, India (niedatowana)

9. Rychel R.: Modellierung des Betriebsverhaltens von Rotorschleuderbrechern. Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2001
10. Sidor J.: Rozwój konstrukcji kruszarek udarowych – odśrodkowych. W: Innowacyjne i Przyjazne dla Środowiska Techniki i Technologie Przetwórstwa Surowców Mineralnych: Bezpieczeństwo Jakość Efektywność. KOMEKO 2015 Pr. Zbior. red. nauk. A. Klich, A. Kozieł KOMAG. Instytut Techniki Górniczej. Gliwice, 2014. s. 133-145
11. Muckerman J.: Optimized crusher selection for cement industry. Technical paper for PCAC, XXVI Technical Congress. Bogota. 7-10. September 2009
12. Kruszarki udarowe młotkowe seria HC www.makrum.pl
13. www.goster.pl/uploads/catalogs/katalog_mlotkowe.pdf
14. EV Hammer impact crusher. www.flsmidth.com
15. www.thyssenkrupp-industrial-solutions-asia-pacific.com/.../titan_
16. Zogg M.: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik. B. G. Teubner Stuttgart 1993
17. Schubert H.: Aubereitung fester mineralischer Rohstoffe, Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1987
18. Spravočnik po obagaščenju rud. Izdatielstvo Nedra Moskva 1972
19. Technische Änderungen vorbehalten PKV 01 DE 03 2A – Materiały firmowe ThyssenKrupp 2011
20. NP Series impact crushers, www.metso.com/miningandconstruction
21. <http://www.kghmzanam.com/index.php/produkty/kruszarki/kruszarki-04/kdu120-130e>
22. www.goster.pl/kruszarki-udarowe-firmy-goster
23. Kruszarki udarowe jednowirnikowe seria ICO www.makrum.pl
24. www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com
25. www.doltech.pl
26. <http://mifama.com.pl/kruszarki-i156.pl.html>
27. Kruszarka udarowa odśrodkowa o pionowej osi wału U-110. Materiały firmy Wtórmech sp. z o.o. Bytom (niedatowane)
28. vertical shaft impact crushers, www.terexmps.com USA
29. Rychel R.: Modellierung des Betriebsverhaltens von Rotorschleuderbrechern, Dissertation Freiberg, der Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2001
30. Canica Vertical Shaft Impact Crushers / Prallbrecher mit vertikaler Welle. Web-Site: www.terex.com/tmp – Materiały firmowe firmy Terex USA

31. Crushing and Screening Handbook Metso Minerals Brochure No. 2051-09-06-CSR/Tampere-English ©2006 Metso Minerals
32. RSMX Rotorschleuderbrecher - Materiały firmowe BHS-Sonthafen GmbH
33. Guldan, D., Däschlein, A.: Auf Linie gebracht. wissensportal baumaschine.de 1(2010), www.bhs-sonthofen.de
34. Grunditz S.: Modeling and Optimization of a Vertical Shaft Impactor for Production of Artificial Sand. Master of Science Thesis. Department of Product and Production Development Chalmers University Of Technology. Gothenburg, Sweden 2015
35. <http://exhibitors.bauma.de/en/press/press-information/press-information-details/actionpress/detail/objIdpress/662>
36. http://www.at-minerals.com/de/artikel/artikel_984951.html
37. Vertical impact crushers ODV, www.pspeieneering.cz
38. <http://www.hongjigroup.com/product/fertilizer%20chain%20crusher.html>
39. www.trf.co.in/.../Ring%20Granulator/catlounge%20of%20ring%20...
40. <http://recyclingmachineryinternational.com>
41. www.osborn.co.za/sites/default/files/.../46-CoalCrusher.pdf
42. Zhengzhou Dingsheng Engineering Technology Co.,Ltd. www.dscrusher.com
43. <http://komag.eu/nauka/baza-innowacji/987-kruszarka-pierscieniowa>
44. <http://www.fugor.pl/kruszarki-upk>
45. <http://www.powderbulksolids.com/article/Chain-Mill-Crusher-Primer-04-18-2017>

5. Kruszarki wibracyjne i specjalne

5.1. Problematyka kruszarek wibracyjnych

Dokładne określenie „kruszarła wibracyjna” sprawia pewien problem, ponieważ strefy rozdrabniania dwóch najbardziej znanych i stosowanych odmian tych kruszarek, to jest stożkowych i szczękowych, są bardzo podobne do stref występujących w kruszarkach klasycznych. Jednak od strony fizycznej proces rozdrabniania w kruszarkach wibracyjnych znacząco różni się od procesu rozdrabniania w kruszarkach klasycznych. Stąd w pracy [1] przyjęto umowne założenie, że kruszarła wibracyjna to maszyna krusząca spełniająca następujące warunki:

- zachodzi w niej ruch drgający co najmniej jednego elementu roboczego (stożka, szczęki, rury),
- proces rozdrabniania zachodzi w skutek dynamicznych - krótkotrwałych oddziaływań elementów roboczych, a nie przez quasistatyczne ściskanie - co ma miejsce w kruszarkach klasycznych,
- minimalna częstotliwość oddziaływań (drgań) elementów (elementu) roboczych na ziarna rozdrabnianego materiału jest co najmniej dwa razy większa od maksymalnej częstotliwości oddziaływań elementów roboczych w klasycznych kruszarkach, czyli praktycznie powyżej 15 Hz.

Główny podział kruszarek związany jest z kształtem elementów roboczych i strefy rozdrabniania, stąd wyróżnia wibracyjne kruszarki:

- stożkowe,
- szczękowe,
- rurowe.

Oprócz nich w branży odlewniczej użytkowane są maszyny wibracyjne do rozdrabniania poużytkowych form odlewniczych, w otwartych kształtowych komorach oraz na kratkach, których ruch drgający generowany jest elektrowibratorami bezwładnościowymi. Maszyny te nazywane są również kruszarkami wibracyjnymi, pomimo że nie są typowymi maszynami do rozdrabniania.

W języku angielskim występuje wiele nazw tych kruszarek, stożkowych: *vibratory cone crusher*, *vibrating cone crusher*, *vibrative gyratory crusher*, *inertial (inertia) cone crusher*, *inertial vibratory crusher*, a także, *inertial cone grinder*, a szczękowych: *jaw vibratory crusher*. W języku niemieckim kilka występuje nazw ich ogólnych: *Schwingbrecher*, *Vibrationbrecher*, *Vibrationsbrecher*, *Vibro-brecher* oraz *Rüttelbrecher*.

Pierwsze rozwiązanie konstrukcyjne kruszarki wibracyjnej (stożkowej) opatentowano w USA w 1921 roku (US1385244 A). Wiele rozwiązań konstrukcyjnych tych kruszarek zgłaszano do ochrony patentowej pod koniec ubiegłego wieku, a nowe rozwiązania techniczne są przedmiotem prac

badawczych oraz zgłoszeń do ochrony praw autorskich także w obecnym wieku. W latach 70 ubiegłego wieku produkowane były seryjnie w ZSRR i sprzedawane do zakładów przerobczych wielu krajów. Obecnie również firmy z Federacji Rosyjskiej (Spurt, Mekhanobr i inne) są największymi producentami tych maszyn rozdrabniających. Producentem wibracyjnych kruszarek stożkowych z poza Federacji Rosyjskiej jest francuska firma Fives FCB.

Wśród wibracyjnych kruszarek stożkowych wyróżnić można cztery rozwiązania konstrukcyjne [1]:

- z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym umieszczonym w wewnętrznym stożku roboczym,
- z dwumasowym wibratorem bezwładnościowym umieszczonym na wale wewnętrznego stożka roboczego,
- z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym umieszczonym na wale wewnętrznego stożka roboczego,
- z dwumasowym, wibratorem bezwładnościowym napędzającym zewnętrzny stożek roboczy (z nieruchomym stożkiem wewnętrznym).

Większe zróżnicowanie występuje w przypadku konstrukcji wibracyjnych kruszarek szczękowych. Główny ich podział związany jest z liczbą napędzanych szczęk. Stąd można wyróżnić [1]:

- kruszarki z napędem jednej szczęki,
- kruszarki z napędem obu szczęk.

Inny ważny podział dotyczy rodzaju wibratorów napędzających szczękę [1] stąd wyróżnia się napęd:

- wibratorem bezwładnościowym jednomasowym,
- wibratorem bezwładnościowym dwumasowym,
- wibratorem mechanicznym kinematycznym,
- wibratorem hydraulicznym.

W przypadku wibracyjnych kruszarek szczękowych ważny podział uwzględnia miejsce zawieszenia szczęk [1]:

- kruszarki z górnym zawieszeniem szczęk,
- kruszarki z dolnym zawieszeniem szczęk.

Jak uprzednio wspomniano sposób działania kruszarek wibracyjnych, różni się istotnie od mechanizmu rozdrabniania, który zachodzi w kruszarkach udarowych (młotkowych, listwowych, prętowych czy odśrodkowych). Pomimo dynamicznego oddziaływania elementów roboczych – o budowie zbliżonej do budowy tych elementów w kruszarkach klasycznych (szczęk, czy stożków), początkowo ziarna materiału są rozdrabnianie tylko na powierzchniach stykających się powierzchniami elementów roboczych – bez zniszczenia w pierwszej fazie kruszenia struktur całych ziaren. Jest to tzw. „okruszanie”

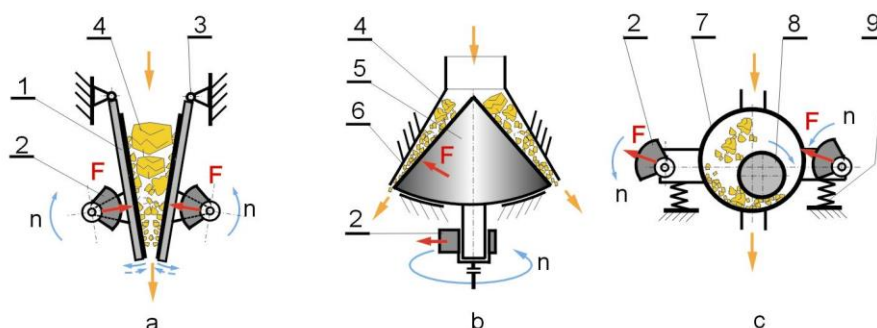
ziaren, czyli odspajanie niewielkich części ich zewnętrznych powierzchni, uderzanych okresowo przez szczęki lub stożek, a pozostawianiu nienaruszonej ich środkowej części w początkowej fazie rozdrabniania, która jest rozdrabniania sukcesywnie, podczas przesuwania się grawitacyjnie w dół strefy rozdrabniania, a po całkowitym rozdrobnieniu wydostaje się z kruszarki przez szczelinę wylotową [2]. W kruszarkach klasycznych ziarna materiału rozdrabniane są już podczas pierwszych oddziaływań elementów roboczych.

Stąd główną różnicą kruszarek vibracyjnych w stosunku do klasycznych kruszarek szczękowych i stożkowych jest znacznie większa częstotliwość oddziaływania ich elementów roboczych na rozdrabniany materiał, która mieści się w granicach 15-35 Hz [3].

Najszerze zastosowanie znalazły vibracyjne kruszarki szczękowe i stożkowe, których schematy budowy i działania zamieszczono na rysunku 5.1 a i b.

Maszyny te posiadają szereg zalet w stosunku do tradycyjnych kruszarek, z których najważniejsza to znacznie 2÷5 razy większe stopnie rozdrobnienia, co skutkuje mniejszą liczbą maszyn w linii kruszenia.

Szczególną zaletą kruszarek vibracyjnych jest możliwość kruszenia materiałów o bardzo wysokich wartościach wytrzymałości na ściskanie nawet powyżej 500 MPa a także materiałów o złożonej budowie, to jest szkła zbrojonego, gruzu budowlanego, wszelkiego rodzaju żużli hutniczych. Natomiast wadą jest brak możliwości rozdrabniania materiałów miękkich o niskiej wytrzymałości na ściskanie, wilgotnych, które mogą przylegać do elementów roboczych kruszarek (szczęk, stożków).



Rys. 5.1. Schematy budowy i działania typowych kruszarek vibracyjnych:
a – szczękowej, b – stożkowej, c – rurowej: 1 – szczeka, 2 – wibrator bezwładnościowy,
3 – przegub zawieszenia szczęki, 4 – rozdrabniany materiał, 5 – stożek wewnętrzny –
kruszący, 6 – stożek zewnętrzny, 7 – rura (komora kruszenia), 8 – walec kruszący,
9 – podparcie, F – siła rozdrabniania, n – prędkość obrotowa wału wibratora

Wyniki badań wibracyjnego kruszenia przeprowadzone w laboratoryjnych wibracyjnych kruszarkach szczękowych w Akademii Górniczo-Hutniczej wykazały, że kruszarki te można zastosować do rozdrabniania materiałów twardych i bardzo twardych o dużej wytrzymałości mechanicznej (korundu, węgla tytanowo-krzemowego, żelazokrzemu [3], popularnych surowców mineralnych (kamienia wapiennego, dolomitu, kwarcytu, diabazu i innych) [4, 5, 6], odpadów ceramicznych (korundowych, ceramiki czerwonej, sanitarnej, ferrytów) [7], a także odpadów ceramiki sanitarnej przeprowadzonych w kruszarce przemysłowej [8]. Kruszarki te szczególnie są przydatne także do rozdrabniania gruzu budowlanego, szkła zbrojonego – ułatwiając oddzielenie szkła od stalowej siatki. Nie można w nich rozdrabniać materiałów o twardości w skali Mohsa poniżej 3 oraz materiałów o wilgotności powyżej 8%.

Pierwsza wzmianka o kruszarkach wibracyjnych pojawiła się w literaturze w 1961 roku [9]. Podano tam opis wibracyjnej kruszarki stożkowej z dwoma napędami stożka roboczego (ruchu drgającego i obrotowego) o skomplikowanej budowie. Zespół roboczy kruszarki zawieszony był na ramie na linach. W latach 80 ubiegłego wieku rosyjska firma Mekhanobr oferowała dwa typy szeregi kruszarek wibracyjnych (stożkowych KID - 8 typów o wydajności od 2 do 350 Mg/h i mocy od 11 do 400 kW oraz szczękowych – VJC o wydajności od 1,5 do 300 Mg/h i mocy od 2x11kW do 2 x 55 kW) [10].

W Polsce pierwsze konstrukcje tych kruszarek opracowano w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w Instytucie Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Automatyki - obecnie Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych. W IMGPiA opracowano dwa typy szczękowych kruszarek wibracyjnych różniące się miejscem zamocowania szczęk dolnym i górnym. Szczęki tych kruszarek wykonywały ruch prosty i napędzane były przez dwumasowe wibratory bezwładnościowe - po jednym wibratorze na każdą szczękę. Ruch przeciwsobny szczęk, czyli synchroniczny w kierunku "do siebie" lub "od siebie" zapewniła synchronizacja wibratorów za pomocą przekładni z paskiem zębatym. Zaletą tego typu konstrukcji było wyeliminowanie typowych zabezpieczeń kruszarek szczękowych przed jej przeciążeniem, których funkcję przejęły układy 4 sprężyn oraz wibratory bezwładnościowe (rys. 5.2 c).

Zupełnie inne rozwiązanie wibracyjnej kruszarki szczękowej, o znacznie mniej skomplikowanej budowie, opracowano również w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie w Instytucie Maszyn Hutniczych i Automatyki - obecnie Katedra Systemów Wytwarzania [1, 6, 7]. Zespół roboczy tej kruszarki, stanowiły dwie ruchome szczęki zamocowane wahliwie u dołu. Szczęki tej kruszarki napędzane są wibratorami mechanicznymi kinematycznymi. Jedna ze

szczęk ma mechanizm regulacji szczeliny wylotowej. Oba wały wibratora sprzężone są przekładnią łańcuchową, napędzaną z silnika elektrycznego, a ruch obu szczęk zachodzi w sposób przeciwsobny, to znaczy jednocześnie szczęki zbliżają się do siebie lub od siebie oddalają. Kruszarka ma możliwość regulacji skoku obu szczęk, a układ zasilania silnika elektrycznego zapewnia bezstopniową regulację prędkości obrotowej wałów wibratora, a tym samym częstotliwości drgań szczęk. Wszystkie w/w kruszarki wibracyjne zostały w 2012 roku zmodernizowane i użytkowane są obecnie w AGH na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych.

5.2. Wibracyjne kruszarki szczękowe

Kruszarki te mają mniej skomplikowaną budowę. Ich przemysłowe wersje produkowane są przez firmy rosyjskie. Schematy budowy i działania znanych rozwiązań konstrukcyjnych tych kruszarek zamieszczono na rysunku 5.2.

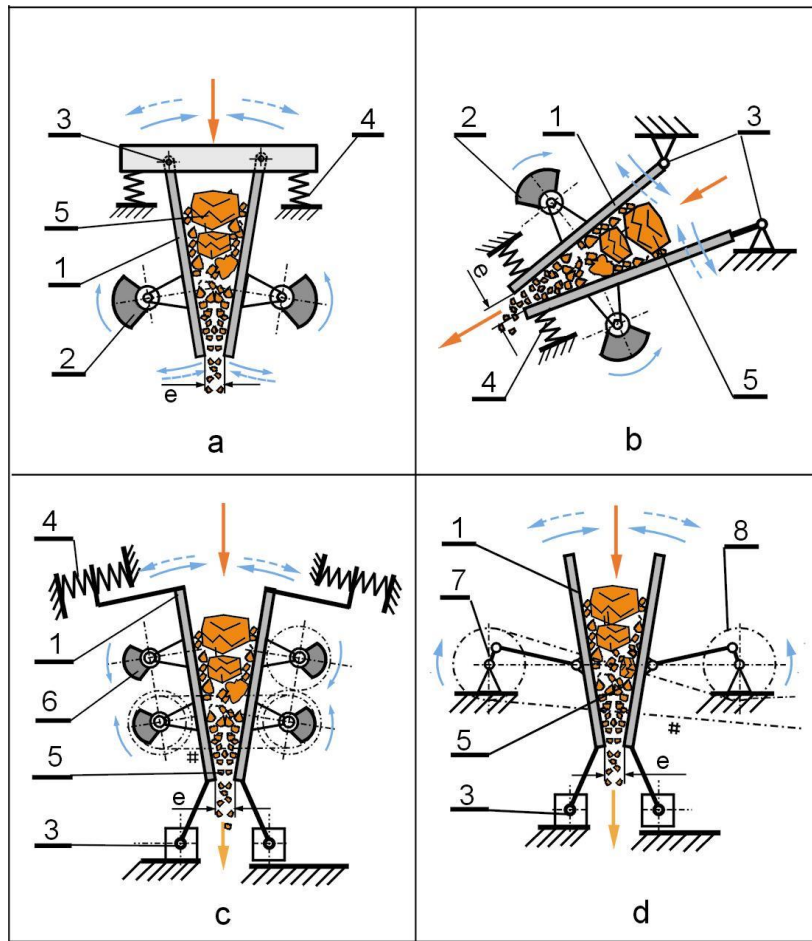
W AGH prowadzi się obecnie prace podstawowe eksperymentalne nad tymi kruszarkami. Ich rezultatem jest rozprawa doktorska [11]. W tej pracy na podstawie wyników badań eksperymentalnych wyznaczono najkorzystniejsze parametry procesu kruszenia dwóch materiałów pochodzenia mineralnego i jednego syntetycznego. Opracowano również metodę wyznaczania wskaźnika Bonda WI przy kruszeniu wibracyjnym – niezbędnego do projektowania kruszarek przemysłowych.

Na rysunkach 5.3 i 5.4 zamieszczona przykłady rozwiązań kruszarek szczękowych oferowanych przez firmy rosyjskie [12, 13].

Zespół drgający kruszarki, w skład którego wchodzi dwie szczęki wraz z wibratorami zawieszone wahliwie na wspólnej ramie, posadowiony jest na elementach sprężystych na fundamencie (rys. 5.2 a).

Takie rozwiązanie umożliwia ruch drgający zespołu roboczego kruszarki także w kierunku pionowym, co przyspiesza rozładunek strefy kruszenia oraz pełni rolę wibroizolacji zespołu drgającego. Przeciwsobny ruch szczęk, który zapewniła synchronizacja prędkości obrotowych obu wibratorów napędzających szczęki kruszarki. Synchronizację prędkości obrotowych silników uzyskano na drodze elektrycznej, dzięki czemu wyeliminowano przekładnię mechaniczną.

W tabeli 5.1 podano podstawowe parametry kruszarek serii VJC produkowanych przez firmy Mekhanobr i Spurt [12, 13, 14].



Rys. 5.2. Schematy budowy i działania wibracyjnych kruszarek szczękowych:

- a – z górnym zawieszeniem szczęk, napędem swobodnych szczęk wibratorem jednomasowym, pionową ścieżką rozdrabniania (produkcji rosyjskiej),
- b – z górnym zawieszeniem szczęk, napędem podpartych sprężystości szczęk wibratorem jednomasowym, pochyloną ścieżką rozdrabniania (produkcji amerykańskiej),
- c – z górnym zawieszeniem szczęk, napędem szczęk wibratorem dwumasowym, pionową ścieżką rozdrabniania (laboratoryjna KMGPiT),
- d – z dolnym zawieszeniem szczęk, napędem szczęk wibratorem kinematycznym, pionową ścieżką rozdrabniania (laboratoryjna KMGPiT i przemysłowa [8]),
- 1 - szczeka, 2 – jednomasowy wibrator bezwładnościowy,
- 3 – przegub zawieszenia szczęki, 4 – podparcie sprężyste, 5 – rozdrabniany materiał,
- 6 – dwumasowy wibrator bezwładnościowy, 7 – wibrator kinematyczny,
- 8 – przekładnia łańcuchowa napędu i synchronizacji ruchu szczęk



Rys. 5.3. Kruszarka typu VJC produkcji firmy Spurt [12]



Rys. 5.4. Kruszarka WSzD 1238 [13]

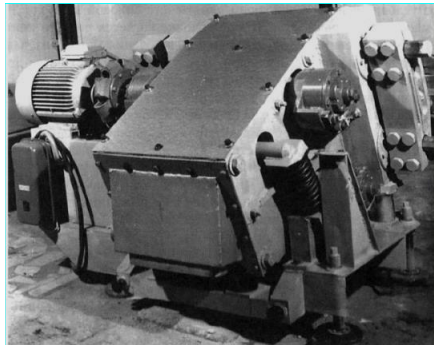
Podstawowe parametry wibracyjnych kruszarek szczękowych VJC produkcji rosyjskiej firmy Spurt [12]

Tabela 5.1.

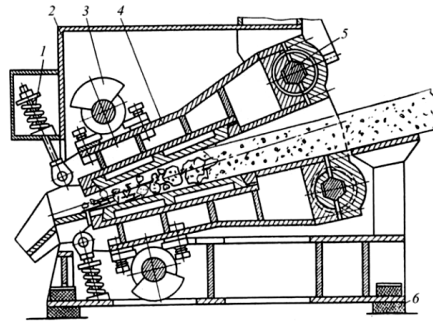
Oznaczenie kruszarki	VJC 130x300	VJC 400x800	VJC 440x1200	VJC 600x800	VJC 1200x1500
Wymiary wlotu [mm]	130x300	440x800	440x1200	600x800	1200x1500
Wydajność [Mg/h]	1,5	35	50	60	300
Maksymalny wymiar ziaren nadawy [mm]	110x250	400x750	400x1100	550x1100	1100x1400
Produkt, uziarnienie [mm]	0÷20	0÷45	0÷50	0÷70	0÷70
Moc napędu [kW]	2x11	2x30	2x45	2x37	2x55
Masa [Mg]	1,5	15	20	25	54

Podstawowe parametry kruszarki szczękowej WSzD 1238: częstotliwość drgań szczęk 25 Hz, wydajność 35÷55 Mg/h, moc 2x37 kW, masa 6 Mg, maksymalny wymiar ziaren nadawy do 500 mm, stopień rozdrobnienia 10 [13].

Całkowicie inną konstrukcją jest kruszarka wibracyjna amerykańskiej firmy Eagle Crusher Company [14]. Możliwość łatwiejszego podawania materiału w postaci np. całych płyt betonowych uzyskano poprzez pochylenie szczęk o określony kąt (rys. 5.5).



a



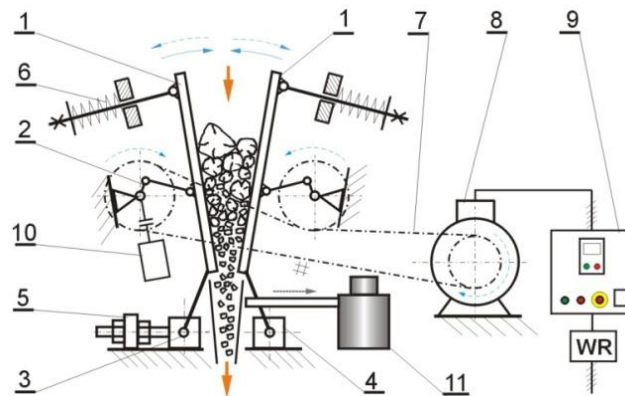
b

Rys. 5.5. Wibracyjna kruszarka szczękowa produkcji Eagle Crusher Company [15]:

a - widok, b – przekrój, 1 – zawieszenie sprężyste, 2 – obudowa,
3 – wibrator, 4 – szczęka, 5 – przegub, 6 – belka – podstawa

Na rysunkach 5.6 i 5.7 przedstawiono schemat laboratoryjnej szczękowej kruszarki wibracyjnej KW 40/1 skonstruowanej przez J. Sidora [1, 4, 7] oraz jej stanowisko badawcze. Kruszarka ma dwie ruchome napędzane szczęki zamocowane wahliwie w przegubach u dołu. Jeden z przegubów jest przesuwany, co umożliwia regulację wymiaru szczeliny wylotowej. Podstawowe parametry szczękowej kruszarki wibracyjnej typu KW 40/1: wymiary wlotu: 100 x 160 mm, zakres regulacji szczeliny: 0,5÷10 mm, częstotliwość drgań szczęk: 8÷25 Hz, moc silnika 2,2 kW, maksymalne ziarno nadawy: 40 (50) mm, wymiary 840 x 420 x 980 mm, masa: 145 kg, wydajność: 50÷500 kg/h.

Kruszarka wyposażona jest w mechanizm regulacji szczeliny wylotowej – przesuwający oprawy łożysk osi zawieszenia jednej szczęki. Obie szczęki napędzane są mechanicznymi wibratorami kinematycznymi sprzężonymi za pomocą przekładni łańcuchowej. Ruch obu szczęk zachodzi w sposób przeciwny.



Rys. 5.6. Schemat kruszarki szczękowej KW-40/1 [7]: 1 – szczęka, 2 – wibrator, 3 – przegub, 4 – przegub z regulacją szczeliny, 5 – mechanizm regulacji szczeliny, 6 – układ sprężysty, 7 – napęd szczęk -przekładnia łańcuchowa, 8 – silnik, 9 – układ zasilania i sterowania, 10 – czujnik prędkości obrotowej, 11 – układ odpylania i oczyszczania powietrza, WR – watomierz rejestrujący



Rys. 5.7. Stanowisko badawcze kruszarki szczękowej: 1 – kruszarka KW-40/1, 2 – dozownik ze zbiornikiem nadawcy, 3 – zasilacz (falownik), 4 – układ odpylania i oczyszczania powietrza, 5 – układ pomiaru i rejestracji mocy (Foto M. Mazur)

Kruszarka posiada wykładzinę szczęk gładką - stalową, jednak sposób jej mocowania umożliwia zastosowanie wykładziny ceramicznej. Kruszarka ma także możliwość regulacji skoku obu szczęk. Przy maksymalnej szczelinie można w niej otrzymać uziarnienie produktu kruszenia $0 \div 10$ mm, a przy szczelinie najmniejszej oraz $0 \div 2$ mm [1, 3, 4, 7].

Na rysunkach 5.8 i 5.9 przedstawiono przemysłowe wersje kruszarki wibracyjnej z kinematycznym wymuszeniem ruchu drgającego.



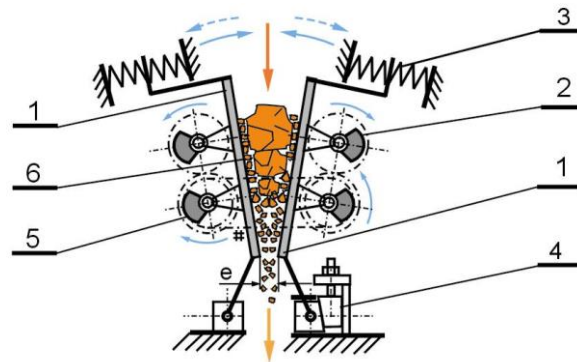
Rys. 5.8. Wibracyjna kruszarka VB-C-30x8 do rozdrabniania przemysłowych odpadów ceramicznych w linii kruszenia [8] (Foto J. Sidor)



Rys. 5.9. Wibracyjna kruszarka VC-E-9x30 do rozdrabniania nadwymiarowych ziaren w przemyśle chemicznym (Foto J. Sidor)

Na rysunku 5.10 przedstawiono kruszarkę wibracyjną KWB-d z bezwładnościowym wymuszeniem ruchu drgającego i dolnym zawieszeniem szczęk znajdująca się w KMGPiT AGH opracowaną pod kierunkiem profesora T. Banaszewskiego [16, 17] i zmodernizowaną przez M. Mazura [3].

Podstawowe parametry kruszarki wibracyjnej typu KWB-d to: wymiary wlotu: 120 x 150 mm, zakres regulacji szczeliny: 1÷20 mm, częstotliwość drgań szczęk: 22÷32 Hz, moc silnika 2,9 kW, wymiary 825x480x770 mm, masa: 200 kg, wydajność: 50÷800 kg/h, wymiar maksymalnego ziarna nadawy: 50 mm, uziarnienie produktu kruszenia 0÷15 mm – przy maksymalnej szczelinie oraz 0÷5 mm – przy szczelinie najmniejszej.



a



b

Rys. 5.10. Wibracyjna kruszarka szczękowa KWB-d z dolnym zawieszeniem szczęk:
a – schemat budowy, b – widok kruszarki, 1 - szczęka, 2 - wibrator, 3 - sprężyny,
4 - mechanizm regulacji szczeliny, 5 - przekładnia zębata, 6 - kruszony materiał

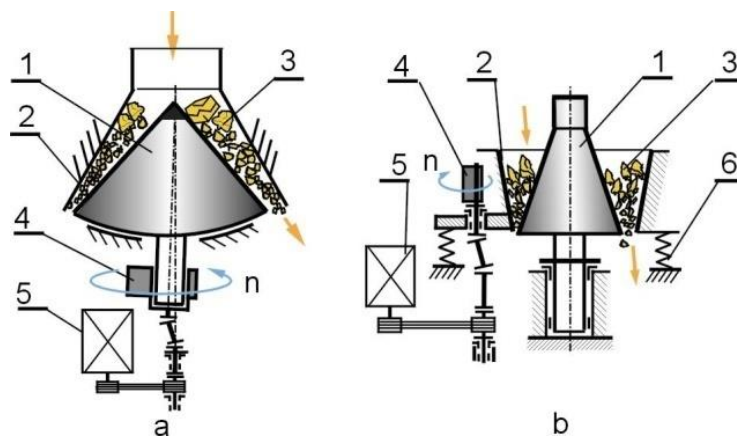
Podczas badań eksperymentalnych kruszarka KWB-d wyposażona jest w te same co kruszarka KW 40/1 układy dozowania nadawy, odpylania i oczyszczania powietrza, zasilania elektrycznego z regulacją częstotliwości drgań szczęk oraz układem pomiaru i rejestracji poboru mocy.

Obie w/w kruszarki wibracyjne opracowane jako laboratoryjne, mogą być również użytkowane przez małe firmy jako maszyny przemysłowe o wydajności do 0,5 Mg/h do bardzo drobnego kruszenia głównego produktu, a zwłaszcza komponentu o mniejszym udziale w całości produktu. Dzięki dużemu stopniowi rozdrobnienia mogą zastąpić dwie klasyczne kruszarki o dominacji obciążeń quasistatycznych.

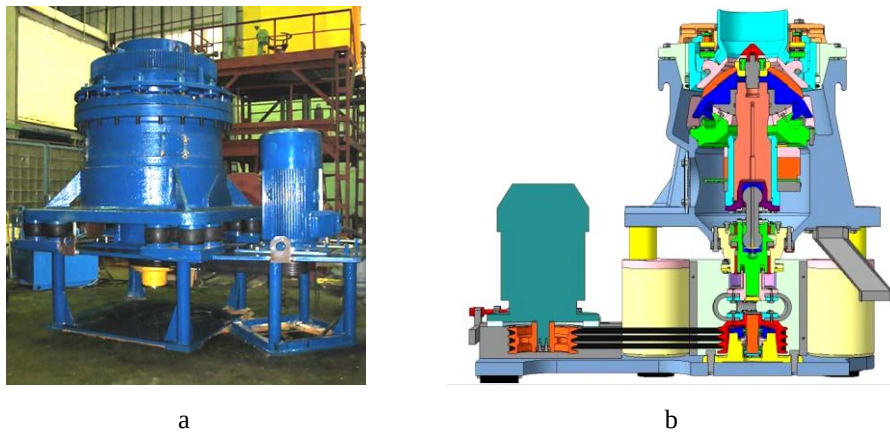
5.3. Wibracyjne kruszarki stożkowe

Najszerze zastosowanie znalazły kruszarki stożkowe zwane kruszarko-młynami „Vibrokon” z napędem stożka wewnętrznego, których schemat budowy i działania przedstawia rysunek 5.11.a. Oferowany jest jeszcze jeden rodzaj tej maszyny z napędem stożka zewnętrznego (rys. 5.11 b).

W Rosji firma Mekhanobr produkuje typoszereg takich kruszarek oznaczonych symbolami: KID-300, KID-450, KID-600, KID-900, KID-1200, KID-1500, KID-1750 [12]. Skrót KID oznacza nazwę kruszarki stożkowej wibracyjnej, a liczba średnicę otworu stożka zewnętrznego w mm. Na rysunku 5.12 przedstawiono przekrój i widok kruszarki stożkowej z napędem stożka wewnętrznego KID-900 produkcji rosyjskiej firmy Mekhanobr, Spurt i Automatika [12, 13, 14].



Rys. 5.11. Schematy budowy i działania wibracyjnych kruszarek stożkowych:
a – z napędem stożka wewnętrznego (o wydajności powyżej 30 Mg/h), b – z napędem stożka zewnętrznego: 1 – stożek wewnętrzny, 2 – stożek zewnętrzny, 3 – rozdrabniany materiał, 4 – wibrator, 5 – silnik, podparcie sprężyste



Rys. 5.12. Kruszarka stożkowa z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym umieszczonym na wale wewnętrznego stożka roboczego a – widok kruszarki KID-900 produkcji Mekhanobr oraz Spurt Rosja [14], b – przekrój [18]

Podstawowe parametry niektórych kruszarek podano w tabelach 5.2 i 5.3.

Parametry techniczne kruszarek stożkowych o wydajności do 35 Mg/h [12]

Tabela 5.2.

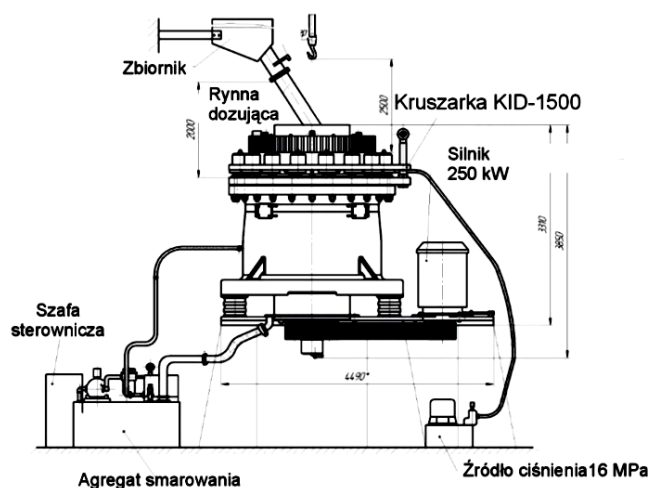
Parametr	Typ	KID-300-2	KID-450-1	KID-600-2	KID-900-1	KID-900-2
Wydajność [Mg/godz]		1	2,5	4,0	25	35
Nadawa $D_{\max}/D_{80}$ [mm]		35/20	35/25	60/50	60/50	80/90
Produkt, $d_{\max}$ [mm]		4	4	15	25	35
Moc silnika [kW]		11	37	75	160	160
Masa [Mg]		1,35	4,5	8	20	20
Wymiary: dł. x szer. x wys. [mm]		1420x800 x1175	1830x1152 x1730	2450x1500 x2320	3300x1970 x2580	3300x1970 x2580

Parametry techniczne kruszarek stożkowych o wydajności od 75 do 160 Mg/h [12]

Tabela 5.3.

Parametr	Typ	KID-1200-2	KID-1500-1	KID-1500-2	KID-1750-1	KID-1750-2
Wydajność [Mg/godz]		75	110	180	90	160
Nadawa $D_{\max}/D_{80}$ [mm]		100/80	100/80	140/110	90/70	180/140
Produkt, $d_{\max}$ [mm]		30	10	40	12	40
Moc silnika [kW]		200	315	315	400	400
Masa [Mg]		30	63	63	100	100
Wymiary: dł. x szer. x wys. [mm]		3950x2400 x2630	4490x300 x3650	4490x3000 x3850	5800x3500 x4500	5800x3500 x4500

Na rysunku 5.13 przedstawiono inne rozwiązanie konstrukcyjne wibracyjnej kruszarki stożkowej z napędem stożka wewnętrznego, a na rysunku 5.14 z pojedynczym napędem stożka zewnętrznego.



Rys. 5.13. Wibracyjna kruszarka stożkowa KID-1500 produkcji Mechanobr, Rosja [12]

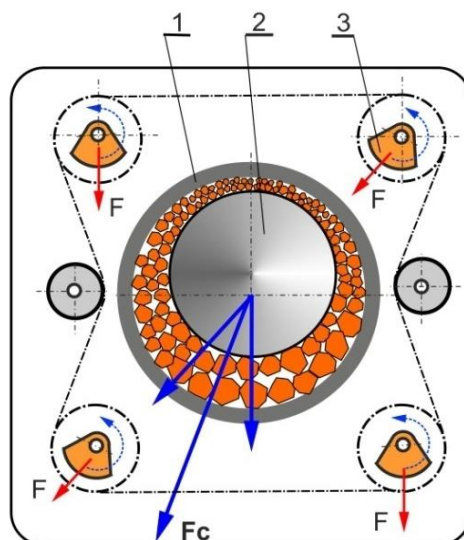


Rys. 5.14. Stożkowa kruszarka wibracyjna WKDC-700 z napędem stożka zewnętrznego [18]

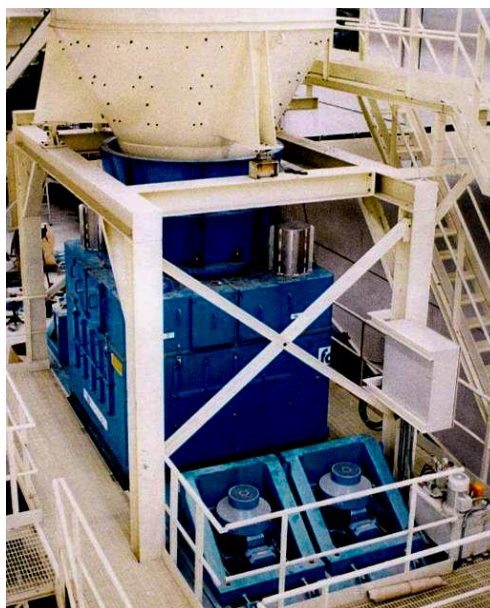
Firma Mekhanobr informuje [7, 8], że maszyny tego typu pracują już w Japonii, USA, Chinach, Francji, Niemczech, Egipcie i wielu innych krajach.

Podstawowe parametry kruszarki WKDC-700, która mając na względzie uziarnienie produktu rozdrabniania, może być traktowana jako młyn to: średnica stożka zewnętrznego 700 mm, wydajność 15÷30 Mg/h, moc silnika 60 kW, masa 6 Mg, częstotliwość drgań 23 Hz, uziarnienie nadawy do 14 mm, uziarnienie produktu kruszenia 47÷53% poniżej 1 mm, w tym 24÷27% poniżej 71 μ m, wymiary gabarytowe: wysokość 1500 mm, długość 2500 mm, szerokość 2000 mm [18].

W ostatnich latach oferowana jest wibracyjna kruszarka stożkowa w pięciu wielkościach, o wydajności od 10 do 240 Mg/h [19]. Jest to kruszarka z napędem stożka zewnętrznego (rys. 5.11 b) ale za pomocą czterech synchronizowanych wibratorów. Schemat układu napędowego tej kruszarki o handlowej nazwie Rhodax [19] zamieszczono na rysunku 5.15, widok dużej kruszarki na rysunku 5.16, a podstawowe parametry podano w tabeli 5.4.



Rys. 5.15. Schemat napędu kruszarki Rhodax: 1 – stożek wewnętrzny, 2 – stożek zewnętrzny, 3 – wibrator, F – siła wibratora, F_c – całkowita siła kruszenia



Rys. 5.16. Wibracyjna kruszarka stożkowa Rhodax w linii technologicznej [19]

Podstawowe parametry wybranych kruszarek Rhodax [19]

Tabela 5.4.

Parametry Typ	Średnica stożka [mm]	Maks. wymiar nadawy [mm]	Moc [kW]	Wydajność [Mg/h]	Szczelina [mm]
Rhodax®300 HP	300	30	30	10	12
Rhodax®450 HP	450	60	55	30	18
Rhodax®600 HP	600	90	132	60	24
Rhodax® 1000 LP	1000	150	200	180	40
Rhodax® 1000 HP/MP	1000	150	400/320	240	40

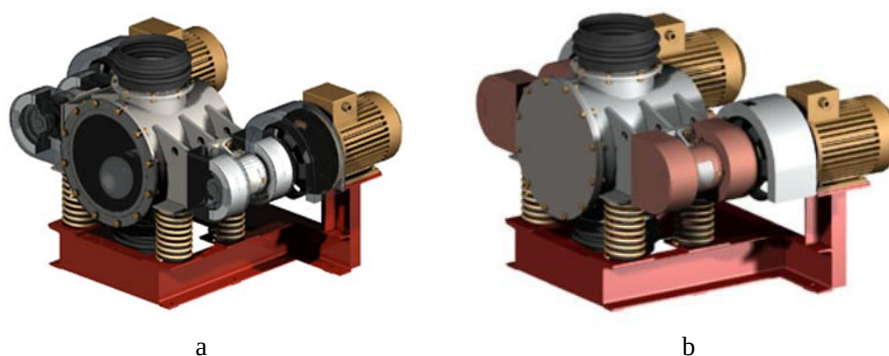
Wydajność kruszarki dotyczy kruszenia materiału w cyklu zamkniętym materiału suchego, czystego o gęstości nasypowej 1,6 Mg/m³.

Kruszarki Rhodax w mniejszych maszynach wyposażane są w dwa zsynchronizowane wibratory jednomasowe. Wyniki badań procesu kruszenia przeprowadzonych w tej kruszarce wskazują na jej bardzo dobre parametry technologiczne, to jest wytworzenie produktu kruszenia o uziarnieniu zawierającym 55÷63% p.n.s. 1 mm, przy uziarnieniu nadawy do 30 mm oraz jednostkowym poborze energii w zakresie 2,8÷3,2 kWh/Mg [19]. Tak korzystne wyniki uziarnienia uzyskano przy pracy kruszarki w układzie zamkniętym z przesiewaczem.

5.4. Wibracyjne kruszarki rurowe i inne

Wśród kruszarek wibracyjnych wyróżnić można jeszcze dwa ich rozwiązania konstrukcyjne, to jest kruszarki rurowe oraz kruszarki stosowane w regeneracji form odlewniczych.

Wibracyjne kruszarki rurowe są najnowszymi z prezentowanych rozwiązań kruszarek wibracyjnych. Na rysunku 5.17 przedstawiono wibracyjne kruszarki rurowe serii MWR oferowane przez rosyjską firmę Vibrocentr-KT [21].



Rys. 5.17. Wibracyjna kruszarka rurowa Vibrocon serii MWR:
a – kruszarka MWR-3 z otwartą komorą, b – kruszarka MWR-4 [21].

Rozwiązanie konstrukcyjne wibracyjnej kruszarki rurowej stanowi modyfikację młyna wibracyjnego, w którym swobodne mielniki (kule, pręty) zastąpiono jednym elementem roboczym w kształcie walca. Dwa jednomasowe elektrowibratory bezwładnościowe przymocowane do rurowej komory kruszarki po obu jej stronach, przy czym osie geometrycznej walcowej komory oraz obu wibratorów położone są w jednej płaszczyźnie. Elektrowibratory powodują jej ruch drgający przekazywany na walec umieszczony w środku, przy czym brak jest informacji o trajektorii drgań komory, można jednak przypuszczać, że przy wielkiej odległości osi geometrycznych elektrowibratorów, zachodzi ich samosynchronizacja, a dzięki temu komora wykonuje ruch drgający o zbliżonej do kołowej trajektorii drgań. Kruszony materiał podawany jest grawitacyjnie do rurowej komory, produkt kruszenia odprowadzany jest również grawitacyjnie przez przegrodę sitową wbudowaną w komorę w jej dolnej strefie. Drgania komory powodują rozdrabnianie materiału o wewnętrzne ściany komory przez walec o dużej masie. Oferowane są dwa typy wibracyjnej kruszarki rurowej: MWR-0,3 – o średnicy komory 0,3 m oraz MWR-0,4 o średnicy komory 0,4 m. Kruszarka MWR-0,3 ma wydajność około 1 Mg/h, przy maksymalnym uziarnieniu nadawy 5 mm. Częstotliwość drgań kruszarki wynosi 16 Hz, amplituda drgań 7 mm, moc silnika 6 kW, a masa kruszarki wynosi 390 kg [21]. Niestety brak jest informacji o uziarnieniu produktu kruszenia.

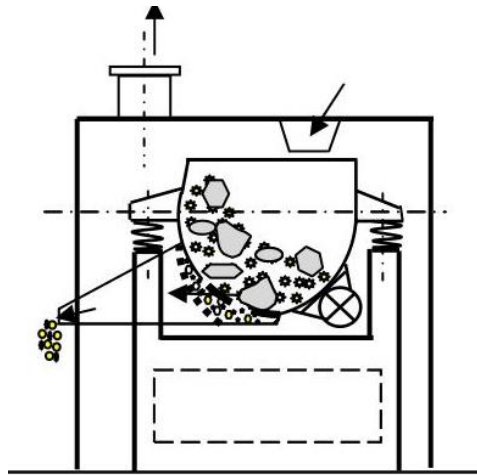
Na rysunku 5.18 przedstawiono kruszarkę amerykańskiej firmy GeneralKinematics o odmiennej budowie i działaniu [22]. Kruszarka wyposażona jest w jednomasowy elektrowibrator usytuowany pod komorą w kształcie rury, przy czym osie geometryczne komory i wibratora znajdują się w płaszczyźnie pionowej. Nadawa do rozdrabniania wprowadzana jest

grawitacyjnie wprost do komory, a produkt rozdrabniania wydostaje się przez otwór komory. Proces rozdrabniania w tej kruszarce zachodzi przez dynamiczne oddziaływanie wewnętrznej komory na znajdujące się w niej ziarna materiału.



Rys. 5.18. Wibracyjna kruszarka rurowa firmy GeneralKinematics [22]

Całkowicie inną budowę ma kruszarka wibracyjna stosowana w przemyśle odlewniczym do regeneracji form odlewniczych [23]. Schemat budowy tej kruszarki zamieszczono na rysunku 5.19.



Rys. 5.19. Wibracyjna kruszarka korytowa [23]

Ze względu na kształt komory nazwano ją korytową, a jej budowa zbliżona jest do budowy młyna wibracyjnego opracowanego przez firmę Siebtechnik, różni się budową komory oraz miejscem usytuowania wibratora. Jedyną informacją o tej kruszarce dotyczy jej wydajności uzyskiwanej przy rozdrabnianiu zużytych form odlewniczych, która wynosi około 10 Mg/h.

Specjalistyczne kruszarki wibracyjne dla przemysłu odlewniczego oferuje firma FAT, niestety brak jest informacji o tych kruszarkach [24].

Przykłady budowy i zastosowania przemysłowego kruszarek wibracyjnych stosowanych w przemyśle odlewniczym do regeneracji osnowy zużytych mas formierskich podano w pracy [25].

5.5. Kruszarki specjalne

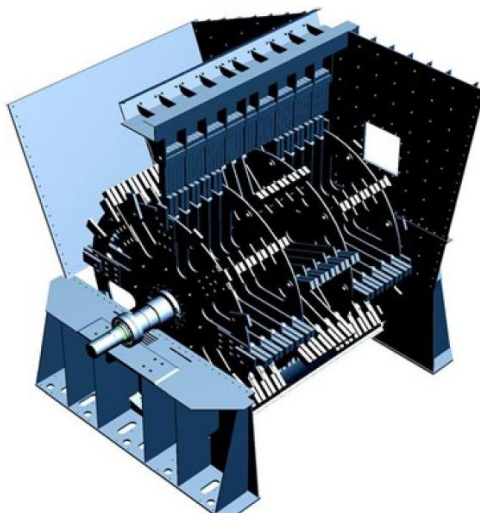
Wśród kruszarek specjalnych stosowanych do materiałów kruchych wymienić można dwa inne zastosowania kruszarek, to jest do kruszenia z jednoczesnym suszeniem oraz do kruszenia na mokro w środowisku wody. Są to:

- kruszarko-suszarka udarowa, bijakowa i młotkowa. W tych kruszarkach podczas rozdrabniania zachodzi jednocześnie proces suszenia [26, 27, 28], stąd ich nazwy kruszarko-suszarka, lub suszarko-kruszarka,
- kruszarka stożkowa, w której proces rozdrabniania przeprowadza się mokrą technologią [29].

Pierwsza grupa kruszarek stosowana jest głównie w przemyśle cementowym do rozdrabniania i wstępnego suszenia surowców, druga w przemyśle górnym ze względu na znaną właściwość surowców mineralnych, które pod wpływem wilgoci zmniejszają swoją wytrzymałość na ściskanie. Dzięki temu zostaje obniżony jednostkowy pobór energii, co skutkuje obniżeniem jej kosztów eksploatacyjnych.

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych zamieszczono na rysunkach 5.15 i 5.16.

Suszarko-kruszarka młotkowa firmy MJM Sp. z o.o przeznaczona jest do rozdrabniania kredy, kamienia wapiennego i innych surowców do produkcji klinkieru cementowego [26], w szczególności surowców miękkich i średniotwardych małoabrazyjnych o wilgotności przekraczającej 14%.



Rys. 5.15. Strefy kruszenia i suszenia suszarko-krusarki młotkowej firmy MJM Sp. z o.o [26]



Rys. 5.16. Suszarko-krusarka młotkowa firmy FLSmidth [27]:
 wlot nadawy, 2 - śluza obrotowa, 3 - wlot gorących gazów,
 4 - rura mieszania, 5 - dysza, 6 - wirnik, 7 - kanał odprowadzający,
 8 - odbiór produktu rozdrabniania, 9 - napęd

Podobne zastosowanie mają kruszarko-suszarki firm FLSmidth [27], Wiliam Crusher [28] i innych firm. Kruszarko suszarki firmy Wiliam Crusher w wielu przypadkach stosowane są jako młyny. Firma FLSmidth oferuje osiem wielkości kruszarko-suszarek pracujących w cyklu zamkniętym z separatorem statycznym - przepływowym, o wydajności od 40 do 250 Mg/h. Rozdrabnia się w nich materiały o wilgotności od 14 do 26%, a pewnych przypadkach do 40%, przy uziarnieniu do 150 mm, wilgotności produktu kruszenia poniżej 1%, oraz zainstalowanej mocy od 1080 kW do 2200 kW.

W tabeli 5.5 podano podstawowe parametry kruszarko-suszarek firmy FLSmidth [27].

Podstawowe parametry kruszarko-suszarek firmy FLSmidth [27]

Tabela 5.5.

Parametry → Typ – (wymiary wornika [cm])	Wysokość		Moc, [kW]	Wydajność [Mg/h] dla wilgotności	
	Wlotu nadawcy [mm]	Wylotu produktu [mm]		26%	14%
250x175	9000	8100	1080	40	60
250x225	9300	8100	1080	50	75
355x200	11600	10100	1570	60	95
355x250	11700	10100	1570	75	125
355x300	11800	10100	1570	85	145
450x275	13000	11700	2200	110	175
450x330	13100	11700	2200	125	200
450x400	13200	11700	2200	130	240
450x450	13300	11700	2200	150	260

Zaletą kruszarko-suszarek jest możliwość rozdrabniania z jednoczesnym suszeniem materiałów o wilgotności powyżej 14%, które nie mogą być rozdrabniane w żadnej maszynie przeróbczej (kruszarce, młynie) bez wstępnego podsuszenia. Jest to szczególnie ważne w przypadku surowców o dużej wilgotności złożowej stosowanych do produkcji cementu. Dlatego największe zastosowanie kruszarki te znalazły w przemyśle cementowym. Ma to szczególne znaczenie przy surowcach o niewielkiej abrazyjności.

Technologię rozdrabniania Water Flush Crushing, czyli rozdrabniania materiału w środowisku wody przeprowadzaną w kruszarce stożkowej

Nordberg WF800 zamieściła w swoich materiałach firma Metso [29]. Niestety w tym źródle brak jest więcej informacji o tej technologii.

5.6. Specjalne technologie kruszenia

Wśród specjalnych technologii kruszenia, zwanych również technologiami innowacyjnymi lub niekonwencjonalnymi wymienić należy technologie, w których energia na realizację procesu kruszenia przekazywana jest w sposób inny niż mechaniczny. Ponadto w tych technologiach proces kruszenia przeprowadzany jest z zastosowaniem urządzeń pozbawionych struktury mechanicznej, czyli bez użycia klasycznej maszyny.

Do tych technologii należy zaliczyć:

- rozdrabnianie elektrohydrauliczne [30, 31, 32, 33],
- technologię mikrofalową [34],
- inne technologie [32].

Technologia elektrohydrauliczna polega na wykorzystaniu eksplozji przewodu, przez który przepływa prąd elektryczny jako inicjatora fali uderzeniowej, powodującej dezintegrację ziarna materiału. Model matematyczny tego procesu oraz możliwości jego zastosowania praktycznego podano w pracach [32, 33], natomiast wyniki badań eksperymentalnych z zastosowaniem tej metody w pracy [34].

Wyniki badań [34] wskazują, że metoda ta jest szczególnie przydatna do wstępnego rozdrabniania nadwymiarowych brył surowców mineralnych oraz betonowych. Podczas rozdrabniania elektrohydraulicznego nie występuje wysoki poziom ciśnienia akustycznego, nie ma rozrzutu odłamków oraz gazów jakie towarzyszą rozdrabnianiu tego rodzaju brył metodą wybuchową.

Ważnym osiągnięciem w tym opracowaniu jest pozytywna weryfikacja tej metody w warunkach przemysłowych w kopalni surowców skalnych.

Technologia mikrofalowa [34] polega na impulsowym oddziaływaniu mikrofal na wstępnie rozdrobnione ziarna rudy (poniżej 150 mm), które stanowią agregaty pożądanego minerału i różnego rodzaju skały płonnej. Oddziaływanie zachodzi z mocą powyżej 1 kW, a czas trwania impulsu mikrofal powinien być krótszy niż 0,1 sekundy, a najkorzystniej poniżej 0,001 sekundy. Mikrofały powodują oprócz rozdrabniania również zmiany strukturalne różne dla poszczególnych składników agregatu, czego skutkiem większa podatność materiału na rozdrobnienia w kolejnym etapie. Zmiany te są rezultatem różnic rozszerzalności cieplnej poszczególnych składników w zagregowanych ziarnach rudy, generując obszary o zróżnicowanych

naprężeniach powodujących mikropęknięcia lub inne zmiany fizyczne w agregatach rudy. Rozdrabnianie lub zwiększenie podatności na rozdrabnianie ziaren rudy ma charakter selektywny przez działanie mikrofal na określone materiały będące składnikami zagregowanego ziarna rudy. Zaletą tego rozdrabniania jest przygotowanie rudy do ługowania w hałdzie.

Przykłady innych niż mechaniczne technologii rozdrabniania materiałów kruchych podano w pracach [30, 31, 32, 35]. Są to:

- rozdrabnianie przez skutki towarzyszące przepływowi prądu o wysokim napięciu – głównie wzrost temperatury,
- rozdrabnianie przez promieniowanie podczerwone.

Obie w/w technologie nie znalazły praktycznego zastosowania.

Literatura

1. Sidor J.: Rozwój konstrukcji kruszarek wibracyjnych. Maszyny Górnicze, 1997, vol. 77, s. 30-37
2. Sidor J.: Badania wizualizacyjne procesu kruszenia w wibracyjnej kruszarce szczękowej. Kraków 1995 (praca własna niepublikowana)
3. Sidor J., Mazur M.: Badania eksperymentalne procesu rozdrabniania kamienia wapiennego w kruszarkach szczękowych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna. - 2013 R. 52 nr 3, s. 235–237
4. Sidor J.: Niektóre wyniki badań procesu bardzo drobnego kruszenia w kruszarce wibracyjnej, VIII Konf. Naukowa „Problemy w Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Hutniczych i Ceramicznych” Zakopane 22-26.01.1996. Wyd. AGH, Kraków, z. 3, s.169-176
5. Sidor J., Mazur M.: Wpływ wybranych parametrów kruszarki wibracyjnej na proces kruszenia kwarcytu i diabazu. Górnictwo Odkrywkowe - 2012 R. 53 nr 5–6, s. 31–40
6. Sidor J., Mazur M.: Badania procesu rozdrabniania kryształu górskiego w wibracyjnej kruszarce szczękowej Materiały Ceramiczne/Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków. - 2014 R. 66 nr 1, s. 32–36
7. Sidor J.: Sposoby rozdrabniania przemysłowych odpadów i poużytkowych wyrobów ceramicznych w kruszarkach wibracyjnych Powder & Bulk - 2013 nr 6, s. 42–47
8. Sidor J.: Preliminary investigations of industrial line of mechanical processing of ceramic wastes for recycling. Polish Journal of Environmental Studies. 2008 vol. 17, s. 507–510

9. Andrejcev S.E., Zwierevič W.W., Pierov W. A.: Droblenije izmielčenie i grohočenie poleśnych iskopajemych. Gosudarstvennoje Naučno-Tekničeskoe Izdatielstvo Literatury po Gornomy Dielu Moskva 1961
10. Smirnov G.N., Berszadskij D. L.: Techniczno-ekonomiczne aspekty zastosowania kruszarek inercyjnych w projektach nowych zmodernizowanych zakładów. Rosyjsko-Polskie Seminarium Naukowo-Techniczne nt. "Współczesne technologie kruszenia surowców mineralnych" Lubin 1993
11. Mazur M.: Badania efektywności procesu kruszenia w wibracyjnych kruszarkach szczękowych. Rozprawa doktorska AGH Kraków 2016
12. <http://en.mtspb.com/drobnoborudovanie/drobnoborudovanie.html>
13. http://www.automatika.ru/kid-238_rus.html
14. <http://www.spbspurt.com/p62/index.html>
15. Materiały informacyjne firmy Eagle Crusher Company
16. Banaszewski T., Kobiałka R., Blaszkę J.: Badania nad możliwością wykorzystania wibracyjnej kruszarki szczękowej do celów przemysłowych. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo nr 63, Kraków 1974.
17. Kobiałka R., Turkiewicz W.: Kuszarki wibracyjne jako przykład intensyfikacji procesu rozdrabniania. Zesz. Nauk. AGH Górnictwo nr 81, Kraków 1975.
18. Sapozhnikov A. I., Krasnov A.A.: О целесообразности создания виброконусных дробилок и мельниц, измельчающих материал в слое. www.ntds.ru/dogovora/Vibrodrobilki_i_melnici.pdf
19. Rhodax Inertial Cone Crusher. www.oretec.com.br/pdf/britagem/rhodax.pdf
20. Taylor J.C.: Rhodax inertial cone grinder. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy. October 1998 pp. 277-280
21. <http://www.vibrocom.ru>
22. <https://www.generalkinematics.com/product/tube-crusher/>
23. Izdebska-Szanda I., Maniowski Z., Pezarski F.: Zagadnienia regeneracji piasków z zużytych mas formiersko-rdzeniowych w działalności Instytutu Odlewnictwa. Archives of Foundry Engineering. ISSN (1897-3310) Volume 10, Special Issue 2/2010 s. 71-76
24. www.hplusj.pl/userfiles/IFEpdf/fat_regeneracja_masy_pl.pdf?pdfjs
25. Dańko J., Dańko R., Łucarz M.: Procesy i urządzenia do regeneracji zużytych mas formierskich. Wydawnictwo Naukowe Akapit Kraków 2007
26. www.mjm.chelm.pl
27. Dreyer Crusher C 10-10-300-3-eng-V2. www.smidth.com
28. <https://www.williamscrusher.com/impact-dryer-mills>

29. Water Flush Crushing: mokra <https://books.google.pl/books?id=qp0hWKleKwcC&pg=PA108&lpg=PA108&dq=nordberg+WF800+water+crushing&source=bl&ots=JDplWBJ4v1&sig=qoKF5JXSdOxHsMm8nzX60CQXfRY&hl=pl&sa=X&ved=0ahUKEwjF4rHRt53UAhVBb5oKHXCnCFYQ6AEIJjAA#v=onepage&q=nordberg%20WF800%20water%20crushing&f=false>
30. Klich A., Reś J.: Innovative Mining Method –Crushing Rocks. Mine Planing and Equipment Selection 1996. Preceedings of the Fifth International Symposium on Mine Planing and Equipment. Sap Pablo (Brasil)
31. Klich A.: Niekonwencjonalne techniki urabiania skał. Wydawnictwo Śląsk Katowice 1998
32. Reś J.: Rozdrabnianie ponadwymiarowych brył metodą elektrohydrauliczną. Rozprawy Monografie 75. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 1998
33. Reś J.: Ekologiczne techniki urabiania skał. Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice, 2002
34. Kobusheshe J.: Microwave Enhanced Processing of Ores. The University of Nottingham June 2010
35. Ziętkowski L.: Badania rozpajania bloków skalnych metodą elektrohydrauliczną. Praca doktorska AGH 2007

6. Młyny grawitacyjne

6.1. Problematyka młynów grawitacyjnych

Młyny grawitacyjne należą do grupy młynów z mielnikami swobodnymi, ruchomą komorą z przekazywaniem energii przez komorę, a proces rozdrabniania mielenia zachodzi w nich dzięki działaniu siły grawitacji. Nazwa „młyny grawitacyjne” jest mniej używana, ale znana w literaturze [1].

Najczęściej używane nazwy tych maszyn to młyny: bębnowe, rurowe, stożkowe (cylindrowo-stożkowe) [2], są pochodnymi kształtu ich głównego elementu roboczego, w którym zachodzi proces rozdrabniania, czyli komory [3], a także jako pochodne stosowanych w nich swobodnych elementów roboczych - najczęściej kul, ale także prętów oraz większych ziaren mielonego materiału. Stąd ich nazwy: kulowe, prętowe, autogeniczne (samomielące) - AG oraz autogeniczne z niewielkim udziałem mielników - kul, czyli semiautogeniczne SAG. Występują również nazwy uwzględniające połączenia obu tych elementów roboczych, czyli młyny rurowo-kulowe [4] oraz uwzględniające elementy ich budowy i działania np.: młyny sitowe, susząco-mielące [1, 2, 3].

W języku angielskim funkcjonują nazwy: *ball mill*, *rod mill*, *pebble mill*, *tumbling mill*, *autogenous mill*, *semiautogenous mill*, a w języku niemieckim: *Kugelmühle*, *Rohrmühle*, *Rohrkugelmühle*, *Trommelmühle*, *Sturzmühle*, *Autogenmühle* i inne.

Obecnie na świecie w młynach grawitacyjnych rozdrabnia się kilka miliardów Mg rud, około 7 miliardów Mg surowców do produkcji spoiw mineralnych, ponad 4 miliardy Mg cementu jako produktu finalnego, miliardy Mg pozostałych spoiw (wapna, gipsu, anhydrytu i innych) oraz kilkaset milionów Mg materiałów dla potrzeb przemysłów chemicznego, ceramicznego, nawozów mineralnych oraz kilka miliardów Mg węgla energetycznego.

W Polsce tylko w przemyśle spoiw mineralnych w młynach grawitacyjnych miele się rocznie ponad 70 mln Mg surowców, rud, cementów, wapna, gipsu i węgla jako paliwa, a także kilkadziesiąt mln Mg rud miedzi, cynku i ołowiu, żelaza i wielu innych materiałów.

Z uwagi na ich powszechne zastosowanie literatura techniczna dotycząca problematyki tych młynów jest bardzo obszerna i dotyczy zarówno badań podstawowych jak również badań stosowanych. W zakresie badań podstawowych są to monografie, rozprawy doktorskie, habilitacyjne oraz artykuły dotyczące modelowania procesu rozdrabniania w tych młynach, badań eksperymentalnych przeprowadzanych w skali laboratoryjnej, ułamkowo-

technicznej i przemysłowej, konstrukcji mechanicznej młyna, jego zespołów (walczaka, dennic, czopów, wykładzin, przegród sitowych, mielników, węzłów łożyskowych, napędów) oraz kompletnych układów mielenia tych młynów.

Zasadnicze rozwiązanie młyna grawitacyjnego wynaleziono w Niemczech w 1870 roku. W katalogu Bergakademie Freiberg z lat 1879-1927 znajduje się informacja o uzyskaniu patentu na młyn kulowy w 1877 roku [5]. Prawdopodobnie młyn ten był znany wcześniej, ponieważ w Szczecinie już w roku 1858 powstała cementownia, w której mielono cement. Głównym elementem roboczym tego młyna była rura (bęben) zwana również walczakiem, wprawiana w ruch obrotowy o określonej prędkości obrotowej względem głównej osi geometrycznej. Rura wypełniona była niewielkimi swobodnymi elementami roboczymi - mielnikami (kamieniami lub kulami metalowymi) oraz uziarnionym materiałem, który był mielony. Podczas obrotu komory mielniki wraz z materiałem podnoszone są w górne położenie, dzięki siłom: odśrodkowej i tarcia. Z tego położenia siła grawitacji przemieszcza je w dół powodując rozdrabnianie znajdującego się w niej materiału. Jego odmianę - młyn sitowy wynaleziono 6 lat później [6]. Inne źródła [7] dowodzą, że twórcą tego młyna jest duński inżynier M. Davidsen, który na przełomie XIX i XX w. opatentował go jako obrotowy walcowy zbiornik wypełniony metalowymi kulami. Było to prawdopodobnie inne rozwiązanie konstrukcyjne znanego młyna kulowego. Patent zakupił F.L. Smidth, który w firmie F.L. Smidth & Co zaczął go wytwarzać i sprzedawać na całym świecie. Należy dodać, że firma F.L. Smidth ma znaczący wpływ na rozwój przemysłu spoiw mineralnych, głównie cementu na ziemiach polskich [8], a także w całym świecie.

Młyny grawitacyjne stosuje się do wszystkich rodzajów mielenia: grubego, drobnego i bardzo drobnego, rzadko koloidalnego materiałów miękkich ($2 \div 8$ w skali Mohsa), średnio-twardych ($5 \div 6$ w skali Mohsa) i twardych ($7 \div 9,5$ w skali Mohsa). Proces mielenia w większości młynów zachodzi na sucho w środowisku powietrza, a w wielu technologiach z jednoczesnym suszeniem, czyli w środowisku gazów suszących oraz na mokro – najczęściej w środowisku wody. W tej dominującej grupie młynów przemysłowych proces mielenia zachodzi w sposób ciągły, ale w wielu technologiach o mniejszej wydajności poniżej kilku Mg/h, także w sposób okresowy.

Młyny grawitacyjne stosuje się w następujących przemysłach:

- górnictwem - mielenie rud i innych surowców mineralnych,
- spoiw mineralnych - mielenie mączki surowcowej, cementów, wapna, gipsu,

- chemicznym - mielenie surowców, półproduktów i produktów finalnych przemysłu chemicznego, nawozów mineralnych, środków pirotechnicznych, farb,
- ceramicznym - mielenie surowców do produkcji ceramiki sanitarnej, porcelany stołowej, technicznej, specjalnej, fajansu, porcelitu, płytek ceramicznych, a także półproduktów: szkliw, emalii oraz produktów finalnych wielu uziarnionych materiałów budowlanych,
- farmaceutycznym - mielenie surowców, półproduktów i produktów finalnych,
- energetyce - przygotowanie paliwa - mielenie pyłu węglowego z węgla kamiennych i brunatnych.

Ponadto młyny grawitacyjne używa się w praktyce laboratoryjnej – głównie do otrzymywania próbek materiałów uziarnionych, w wielu laboratoriach wyższych uczelni, instytutów badawczych oraz laboratoriach przemysłowych.

Uziarnienie nadawy, czyli materiału wprowadzanego do młyna uzależnione jest od rodzaju procesu mielenia i wynosi:

- przy mieleniu grubym (w młynach autogenicznych) do 500 mm,
- przy mieleniu na sucho (drobnym i bardzo drobnym) $10 \div 80$ mm – do młynów kulowych,
- przy mieleniu na mokro (drobnym i bardzo drobnym) $5 \div 40$ mm - do młynów kulowych i prętowych.

W przemyśle górnictwym przy mieleniu rud miedzi stosuje się młyny grawitacyjne kulowe i prętowe do mielenia na mokro, a zmielona ruda powinna mieć uziarnienie o p.n.s. (pozostałość na sicie) $75 \mu\text{m}$ poniżej 15% [9]. W procesach rozdrabniania i wzbogacania rud miedzi największą część kosztów (około 50%) stanowią koszty mielenia [10]. Na świecie, rudy innych metali (cynku, ołowiu i innych) miele się znacznie drobnej - do uziarnienia o $d_{90}=20 \mu\text{m}$ [11]. Wówczas młyny kulowe zastępowane są często młynami mieszadłowymi.

Rosnące zapotrzebowanie na tak drobno uziarnione materiały, wzrost cen energii, konieczność redukcji kosztów pracy są podstawową przesłanką postępu technicznego w zakresie opracowania nowych młynów grawitacyjnych kulowych o niższych kosztach eksploatacyjnych. Jednym z kierunków tego postępu jest wzrost wydajności młynów, który osiąga się głównie przez zwiększanie wymiarów ich komór, w szczególności średnicy. Skutkiem tego jest wzrost mocy silników oraz wzrost wymagań ich układów napędowych (silników, przekładni, sprzęgieł, węzłów łożyskowania) oraz układów zasilania i sterowania.

Największymi producenci młynów kulowych dużych wydajności (powyżej 100 Mg/h) są firmy: F. L. Smidth, Metso Minerals, Citic Heavy Industries Co., Ltd, GEBR. Pfeiffer, HB Fuller, KHD, Kawasaki, Liming Heavy Industry, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Outokumpu, Raymond, Shenyang Mining Machinery Group Co, ThyssenKrupp AG, Ube Industries Ltd [12]. W Polsce młyny kulowe o średnicy do 4 m produkuje firma Makrum w Bydgoszczy, a mniejsze młyny (kulowe i prętowe) o średnicy komory 1,7 m produkuje firma Goster. W Polsce kilka firm produkuje młyny kulowe o działaniu okresowym dla potrzeb przemysłów ceramicznego, chemicznego i farmaceutycznego.

Główne wady młynów grawitacyjnych, to:

- znaczny jednostkowy pobór energii - znacząco większy od młynów vibracyjnych oraz mieszadłowych – zwłaszcza przy wytwarzaniu produktu mielenia o uziarnieniu poniżej 50 μm ,
- duże wymiary i duża masa,
- duża powierzchnia zabudowy oraz kubatura młynowni,
- długi czas retencji – nawet do ponad 20 minut, co utrudnia jego sterowanie,
- znaczna szkodliwość oddziaływania na otoczenie (emisja ciśnienia akustycznego od ponad 90 dB dla młynów małych do ponad 125 dB dla młynów dużych).

Pomimo tych wad prostota budowy oraz duża ich trwałość powoduje, że są dalej eksploatowane i produkowane, przy czym projektuje się je na okres eksploatacji minimum 35 lat.

6.2. Młyny bębnowe, rurowe, kulowe i prętowe

Młyny te są najpowszechniej stosowane. Cechuje je duże zróżnicowanie pod względem budowy, działania, zastosowania, warunków technologicznych procesu mielenia, napędów młynów grawitacyjnych, a także ich układów mielenia. Stąd literatura wyróżnia ich rozległą systematykę [13], którą wraz z ich rozwojem jest stale uaktualniana.

Główny podział młynów grawitacyjnych dotyczy sposobu ich działania i dzieli je na:

- o działaniu okresowym – problematykę tych młynów pominięto w opracowaniu, ponieważ występuje tylko jedno rozwiązanie komory,
- o działaniu ciągłym.

Podział drugi związany jest z rodzajem środowiska mielenia i wyróżnia:

- młyny do mielenia na sucho - w środowisku powietrza, gazów suszących, rzadko gazów obojętnych,
- młyny do mielenia na mokro - w zdecydowanej większości w wodzie.

Podział trzeci dotyczy rodzaju stosowanych elementów roboczych mielników. Stąd wyróżnia się młyny:

- kulowe - z mielnikami w kształcie kul lub cylpepsów,
- prętowe z mielnikami w postaci prętów,
- prętowo-kulowe, w których w pierwszej komorze są pręty a w drugiej kule lub cylpepsy,
- autogeniczne, w których mielnikami są większe ziarna rozdrabnianego materiału,
- semiautogeniczne, w których oprócz ziaren o większych wymiarach pełniących rolę mielników używa się dodatkowo kul stalowych w ilości $4\div 12\%$.

Czwarty podział dotyczy budowy strefy mielenia młynów kulowych i prętowych i wyróżnia młyny:

- jednokomorowe,
- jednokomorowe z wstępną komorą suszenia,
- dwukomorowe,
- dwukomorowe z wstępną komorą suszenia,
- trzy komorowe ze środkowym rozładunkiem,
- trzy komorowe z końcowym rozładunkiem jeszcze używane, ale nie produkowane.

Kolejny podział młynów grawitacyjnych związany jest ze sposobem rozładunku – odprowadzania zmielonego materiału z młyna o działaniu ciągłym. Kryterium to wyróżnia następujące rodzaje młynów do mielenia na sucho:

- z końcowym jednostronnym rozładunkiem (grawitacyjnym lub pneumatycznym),
- z obustronnym rozładunkiem (grawitacyjnym lub pneumatycznym),
- ze środkowym rozładunkiem – najczęściej grawitacyjnym,
- z peryferyjnym wyładowaniem – grawitacyjnym,
- z rozładunkiem przez pobocznice walczaka – sitowe.

Przy mieleniu na mokro wyróżnia się podstawowe młyny:

- jednokomorowy o działaniu okresowym,
- jednokomorowy ciągły przelewowy,

- jednokomorowy ciągły z przegrodą sitową,
- dwukomorowy ciągły z jedną lub dwoma przegrodami sitowymi.

Inne podziały związane są z rodzajem elementów roboczych będących podzespołami walczaka komory, wlotem, wylotem, wykładzinami (I i II komory) oraz przegrodami sitowymi.

Ważny podział dotyczy sposobu łożyskowania młyna i wiąże się z rozmiarami komór i wyróżnia młyny:

- z łożyskowaniem drążonych czopów usytuowanych na dennicach walczaka na dwóch łożyskach ślizgowych,
- z łożyskowaniem drążonych czopów usytuowanych na dennicach walczaka na dwóch łożyskach tocznych – mniejsze jednostki,
- z bezpośrednim podparciem walczaków na kołach samochodowych, lub innych, w których dennice nie mają czopów tylko nie obciążone rury – mniejsze młyny,
- z łożyskowaniem walczaków na czterech łożyskach hydrostatycznych – największe młyny.

Inny podział związany jest z budową układu napędowego młynów i wyróżnia napędy:

- obwodowy – pojedynczy, lub podwójny – każdy z jednym czynnym kołem zębatym,
- obwodowy pojedynczy z dwoma czynnymi kołami zębatymi,
- centralny,
- bezprzekładniowy – wieńcowy.

Inny podział młynów wyróżnia maszyny przemysłowe i laboratoryjne.

Parametry młynów uwarunkowane są ich zastosowaniem i budową młyna. Dla młynów przemysłowych o działaniu okresowym – przy mieleniu na mokro i sucho są to:

1. Pojemności komór od 50 dm³ do 35 m³.
2. Wymiary komór: średnica 3,2 m, długość 4 m.
3. Zainstalowana moc - od 2 do 140 kW.
4. Masa młyna z ładunkiem i wykładziną komory od 80 kg do 110 Mg.
5. Masa ładunku (mielniców, mielonego materiału i wody) do 55 Mg.
6. Wymiary gabarytowe największych młynów: długość do 10,0 m, szerokość do 4,5 m, wysokość do 4,0 m.

Natomiast młynów przemysłowych - o działaniu ciągłym:

1. Wymiary komór (wewnątrz) - średnice od 2÷9,1 m, długości 8÷17 m.
2. Zainstalowana moc - od 200 kW do 20 MW.

3. Masa młyna z ładunkiem i wykładziną komory od 20 Mg do 2000 Mg.
4. Masa mielników do 30 do 1100 Mg.
5. Standardowe wydajności młynów wynoszą:
 - przy mieleniu węgla jako paliwa 20÷200 Mg/h,
 - przy mieleniu rud 20÷350 Mg/h,
 - przy mieleniu surowców na sucho i rud na mokro 50÷500 Mg/h,
 - przy mieleniu cementu 50÷300 Mg/h.

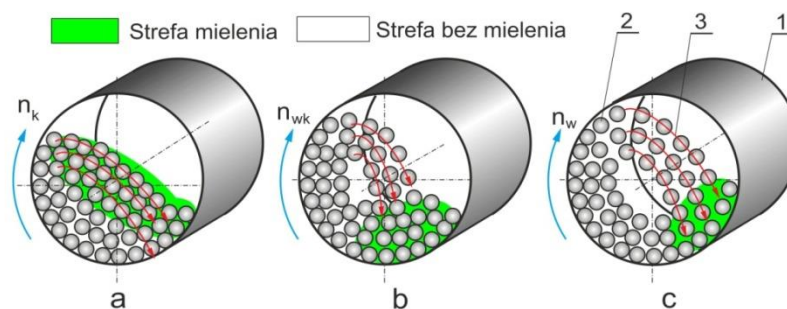
Sposoby pracy grawitacyjnego młyna rurowego

W młynie grawitacyjnym występują trzy podstawowe sposoby pracy - przedstawione na rysunku 6.1. Są to: kaskadowy, wodospadowo-kaskadowy i wodospadowy (kataraktowy). Każdy ze sposobów stosowany jest do odpowiedniego wariantu mielenia. Sposób kaskadowy (rys. 6.1 a), w którym dominuje ścieranie mielonego materiału stosuje się przy mieleniu drobnym, w którym podawana do młyna nadawa powinna mieć jak najdrobniejsze uziarnienie. Sposób wodospadowy (rys. 6.1.c) z dominującym udziałem udarowego rozdrabniania materiału przez uderzanie mielników z wysokości – najkorzystniej około 0,75 średnicy komory, stosuje się przy mieleniu nadawy o największych wymiarach ziaren. Sposób trzeci jest pewnym kompromisem dwóch wcześniej wymienionych sposobów. O wystąpieniu jednego z w/w sposobu działania młyna decyduje w największym stopniu prędkość obrotowa komory. Prędkość ta jest najmniejsza przy kaskadowym sposobie pracy $(0,5\div0,6) n_{kr}$, średnia przy wodospadowo-kaskadowym $(0,6\div0,7) n_{kr}$, a największa przy wodospadowym sposobie $(0,7\div0,8) n_{kr}$ [13]. W niektórych rozwiązaniach młynów autogenicznych, zwłaszcza przy mieleniu na sucho, prędkość obrotowa może być bliska prędkości obrotowej krytycznej [14].

Krytyczna prędkość obrotowa n_{kr} (obr/min) jest to prędkość, przy której zachodzi równowaga sił: ciężkości i siły odśrodkowej działających na mielnik znajdujący się w najwyższym górnym położeniu dla konkretnej średnicy komory młyna [13] obliczana jest z wyrażenia:

$$n_{kr} = \frac{30\sqrt{2g}}{\pi\sqrt{D}} \sqrt{\cos \alpha}$$

gdzie: D – wewnętrzna średnica komory, m,
 g – przyspieszenie ziemskie $9,81 \text{ m/s}^2$,
 α – kąt oderwania się mielników od komory – 90° .



Rys. 6.1. Sposoby działania – pracy młyna grawitacyjnego:
 a - kaskadowy, b - wodospadowo-kaskadowy, c - wodospadowy,
 1 - komora młyna, 2 - ładunek (mielniki z mielonym materiałem),
 3 - trajektorie ruchu mielników, n_k - prędkość obrotowa przy kaskadowym sposobie pracy, n_{wk} - prędkość obrotowa przy wodospadowo-kaskadowym sposobie pracy, n_w - prędkość obrotowa przy wodospadowym sposobie pracy

Na prędkość obrotową mają również wpływ inne czynniki, to jest kształt wykładziny komory, rozwiązania przegród sitowych, środowisko mielenia (woda, powietrze oraz wariant mielenia z jednoczesnym suszeniem mielonego materiału). Literatura [14] rozróżnia trzy wartości prędkości obrotowej, przy których kolejne warstwy mielników przestają być odrywane siłą grawitacji od górnego położenia. Są to: pierwsza, druga i n -ta prędkość krytyczna. Praktycznie prędkości te nie mają znaczenia, ponieważ młyny przy tych prędkościach nie pracują. Obecnie, dzięki postępowi techniki napędów dużych mocy, najkorzystniejszą prędkość obrotową komory przy mieleniu konkretnego materiału w określonych warunkach technologicznych, można dobierać dzięki zastosowaniu do zasilania silników młynów przetworników częstotliwości podczas pracy młyna. Wiąże się to jednak z dużymi nakładami finansowymi. Ma to jednak duże znaczenie praktyczne, ponieważ podczas pracy młyna zmienia się (maleje) stopień napełnienia – przez zużywanie się mielników. Mielniki uzupełnia się zwykle co pewien czas, ale korekta prędkości obrotowej zmniejsza jednostkowy pobór mocy, co zmniejsza koszty poboru energii. W niektórych młynach mielniki uzupełnia się w sposób ciągły podczas pracy młyna. Dokładne obliczenia prędkości obrotowej młynów; kulowego, AG i SAG podano w pracy [15].

Najkorzystniejszą prędkość obrotową komory przy mieleniu materiału o określonym uziarnieniu nadawy i produktu mielenia, warunkach mielenia, cyklu pracy - przy której młyn uzyskuje największą wydajność przy najmniejszym jednostkowym poborze energii, można wyznaczyć tylko empirycznie na obiekcie rzeczywistym.

Aspekty energetyczne młynów grawitacyjnych

Młyny grawitacyjne ze względu na niewielką, a zarazem bardzo trudną do określenia sprawność, pobierają znaczne ilości energii [16, 17, 18]. Zainstalowane maksymalne moce tych młynów są największe spośród niemal wszystkich maszyn technologicznych i wynoszą: dla młynów kulowych 20 MW, a młynów AG i SAG 35 MW. Koszty energii pobieranej na procesy mielenia stanowią: w przemyśle rud około 50% wszystkich kosztów przeróbki i wzbogacania [19], a w przemyśle spoiw mineralnych przekraczają 80% [20]. Stąd wiele prac z zakresu tych młynów dotyczy dokładnych metod określania poboru mocy oraz możliwości obniżenia jednostkowego poboru energii, czyli ilości energii przypadającej na 1 Mg wytworzonego produktu mielenia.

Do wyznaczania poboru mocy projektowanych młynów grawitacyjnych stosuje się szereg metod. Są to metody:

- technologiczne – wynikające z pobierania mocy na proces mielenia,
- teoretyczne – wynikające ze sposobu działania młynów od strony mechanicznej,
- eksperymentalne – wynikające z pomiarów poboru mocy młynów eksploatowanych lub eksperymentalnych,
- wykorzystujące modele teoretyczne opracowane na podstawie analizy wymiarowej,
- wykorzystujące modele empiryczne – inżynierskie.

Firmy produkujące młyny grawitacyjne posiadają własne, zwykle niepublikowane metody wyznaczania mocy produkowanych młynów. W kontrakcie na dostawę młyna jednostkowy pobór energii określany jest szczegółowo i często jest gwarantowany. W kontrakcie przewiduje się kary umowne w przypadku nie uzyskania przyjętego poziomu tego wskaźnika - w dokładnie określonych warunkach technologicznych.

Najpowszechniej stosowanymi metodami technologicznymi wyznaczania poboru mocy młyna, to metody wykorzystujące indeks pracy: Bonda, Hardgrove'a oraz Zeisela i Schillera.

Z hipotezy Bonda moc młyna oblicza się z wyrażenia:

$$P_m = Q W_B \quad [\text{kW}]$$

gdzie: P_m – moc młyna bez uwzględnienia sprawności napędu, kW,

Q – projektowa wydajność młyna, Mg/h,

W_B – jednostkowy pobór mocy dla określonych parametrów uziarnienia nadawy i zmielonego produktu, kWh/Mg.

Jednostkowy pobór mocy W_B oblicza się z wyrażenia:

$$W_B = 10 WI \left(\frac{1}{\sqrt{d_{p80}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{n80}}} \right) \quad [\text{kWh/Mg}]$$

gdzie: WI – indeks pracy Bonda, kWh/Mg,

d_{p80} – wymiar ziarna kontrolnego produktu mielenia - d_{80} , μm ,

D_{n80} – wymiar ziarna kontrolnego nadawy - d_{80} , μm .

Moc obliczona z tego wyrażenia nie uwzględnia wpływu kilku ważnych czynników, to jest: wymiarów, budowy komory, warunków technologicznych procesu mielenia. Dlatego moc wyznaczoną z tego wyrażenia należy traktować jako moc przybliżoną, niemniej jednak bardzo przydatną przy wstępnym doborze zainstalowanej mocy projektowanego młyna.

Przy wyznaczaniu teoretycznego poboru mocy uwzględnia się sposób działania młyna (wodospadowy, kaskadowy) i odpowiadający sposobowi modelu ułożenia ładunku (mielników z materiałem mielonym) w komorze, prędkość obrotową komory, gęstości nasypowe mielników i mielonego materiału oraz sprawność układu napędowego [21]. Niestety, metoda ta nie uwzględnia aspektu technologicznego, czy zmiany uziarnienia materiału podczas mielenia.

Metody pozostałych trzech grup [1, 2, 13, 22], z których najbardziej znanymi są metody inżynierskie, określane nazwiskami badaczy, którzy je opracowali. Są to metody: Andrejeva, Tovarova, Blanca, Rose-Sullivan [4, 13, 23] i inne. Z uwagi na specjalizację młynów, metody wyznaczania poboru mocy dostosowywano do technologii, w której młyn ma zastosowanie. Taką metodą obliczeń mocy młynów do mielenia rud na mokro podano w pracy [24]. Natomiast inna uproszczona metoda inżynierska [25] zalecana jest do wyznaczania mocy młynów stosowanych przy mieleniu na sucho surowców cementowych, cementu i węgla. Metody te są bardzo przydatne do celów projektowych.

Dla młyna do mielenia na sucho moc młyna pracującego w cyklu otwartym (bez urządzeń pomocniczych) oblicza się z wyrażenia [25]:

$$P = c m_k D n \quad [\text{kW}]$$

gdzie: P – moc młyna, kW,

D – średnia średnica wewnętrzna komór młyna, m,

m_k – masa kul, Mg,

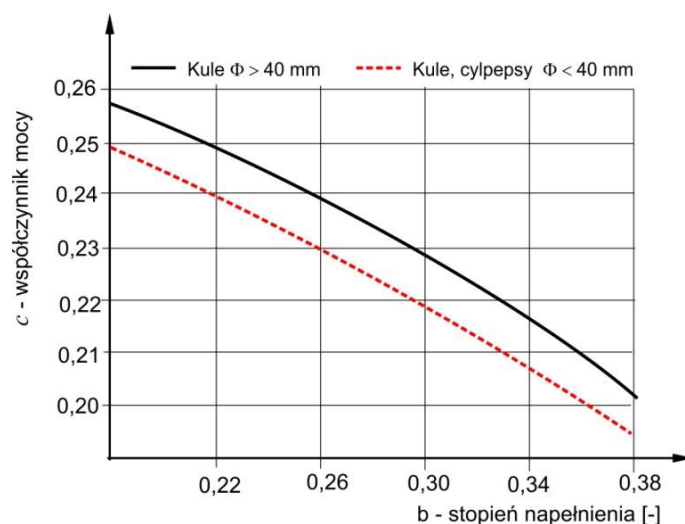
n – prędkość obrotowa komory, obr/min.

Współczynnik c – dla odpowiedniego zestawu kul lub cylpepsów wyznacza się z nomogramu podanego na rysunku 6.2.

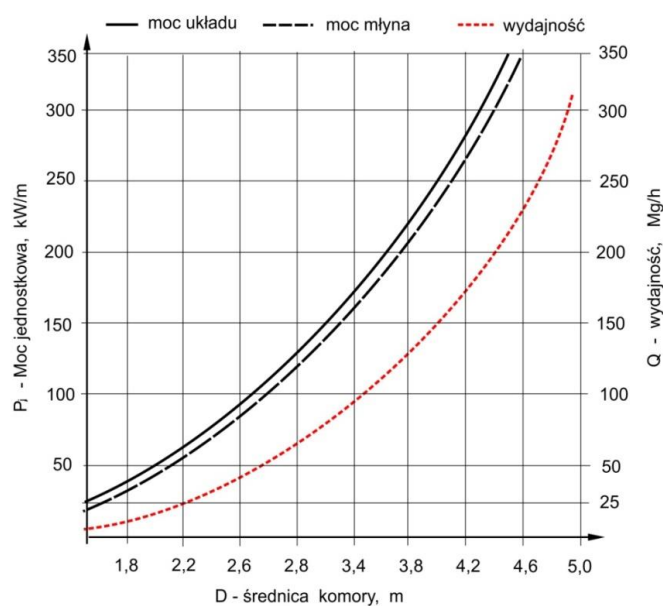
Dla młyna grawitacyjnego pracującego w cyklu zamkniętym z obiegiem mechanicznym, czyli z separatorem oraz z przenośnikiem kubełkowym, moc jednostkową samego młyna, czyli moc przypadającą na 1 m długości roboczej komory, a także moc jednostkową młyna wraz z urządzeniami pomocniczymi (zasilania, transportu produktu mielenia do separatora) w sposób przybliżony wyznacza się z nomogramu zamieszczonego na rysunku 6.3 [25].

Moc jednostkową wyznacza się dla każdej z komór młyna odrębnie i oblicza się jako iloczyn mocy jednostkowej oraz długości czynnej komory. Moc młyna jest sumą mocy pobieranej przez każdą z komór. Na przykład przy mieleniu surowca do produkcji klinkieru cementowego młyn ze środkowym wyładunkiem może mieć trzy komory.

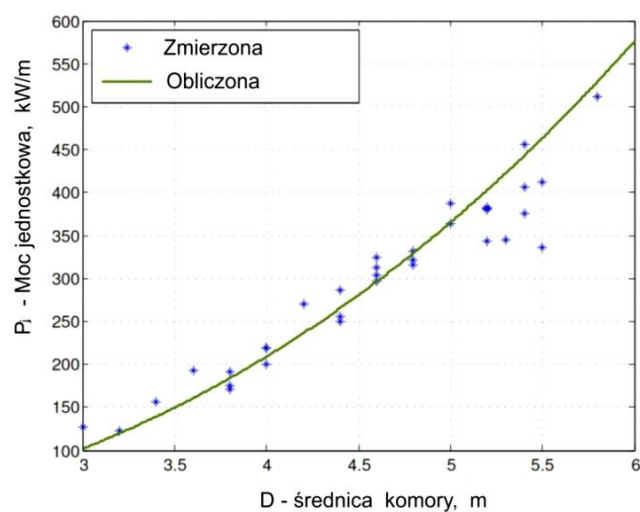
Moce jednostkowe współczesnych młynów kulowych (wyznaczoną teoretycznie) oraz wyznaczone dla młynów eksploatowanych podano na rysunku 6.4 [26].



Rys. 6.2. Nomogram do wyznaczania współczynnika mocy c [25]



Rys. 6.3. Nomogram do wyznaczania mocy jednostkowej samego młyna pracującego na sucho z obiegiem mechanicznym oraz układu mielenia, opracowany na podstawie pracy [25]



Rys. 6.4. Wpływ średnicy komory młyna na moce jednostkowe (wyznaczoną teoretycznie i zmierzone na współczesnych młynach) [26]

Użytkownicy układów mielenia z młynami grawitacyjnymi zainteresowani są obniżeniem kosztów eksploatacyjnych młynów. Koszty eksploatacji są sumą poszczególnych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych młynowni i można je określić wyrażeniem opracowanym na podstawie pracy [27]:

$$K_j = \frac{1}{Q} (a P + b Z_m + K_m + K_u + e KI) \quad [\text{PLN/Mg}]$$

gdzie: K_j – koszty jednostkowe, JW/Mg, (JW – jednostka walutowa, np. PLN)

Q – wydajność układu mielenia, Mg/h,

a – współczynnik kosztów energii, PLN/kWh,

b – współczynnik zużycia jednostkowego mielników, PLN/Mg,

Z_m – zużycie mielników, Mg,

K_m – pozostałe koszty eksploatacyjne młyna (zużycia wykładzin, przegród sitowych, zużycia łożysk, chłodzenia łożysk, monitoringu, sterowania), PLN/h,

K_u – pozostałe koszty eksploatacyjne układu mielenia (separatora, układu: zasilania, odbioru, sterowania oraz personelu i inne), PLN/h,

e – współczynnik amortyzacji kosztów inwestycyjnych, [-],

KI – koszty inwestycyjne, PLN/h.

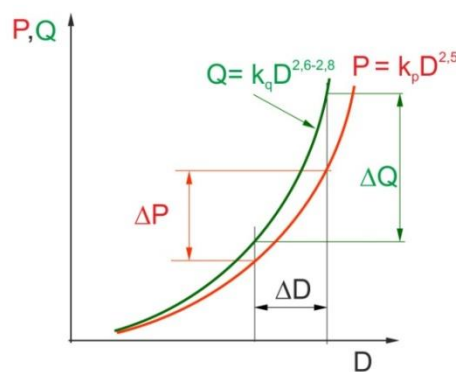
Największy wpływ na koszty jednostkowe mielenia mają koszty energii, które zwykle stanowią ponad połowę wszystkich kosztów, mniejszy, ale znaczący wpływ mają koszty obsługi. Oba rodzaje tych kosztów zmniejszają się wraz ze wzrostem wydajności układów mielenia. Koszty zużycia mielników nieznacznie rosną wraz ze wzrostem średnicy komory, zwłaszcza przy mieleniu rud, a koszty inwestycyjne maleją przy zmniejszaniu się liczby układów mielenia i np. przy wydajności młynowni 200 Mg/h, koszty te są mniejsze dla jednego młyna niż dla dwóch młynów o wydajności 100 Mg/h. Sposób działania młynów grawitacyjnych powoduje, że duże wydajności uzyskiwane są przez zwiększanie ich wymiarów - głównie średnicy komory. Wzrost ten spowodowany jest głównie przez trzy czynniki:

- wzrost sprawności młyna wynikający ze zróżnicowanego wpływu średnicy komory młyna na wydajność i pobór mocy (rys. 6.5). Wykazała to analiza kilkudziesięciu młynów pracujących w układach zamkniętych z obiegiem pneumatycznym i mechanicznym. Jej wyniki wykazały, że na pobór mocy średnica komory ma wpływ w potęgę 2,5, a na wydajność w potęgę 2,6÷2,8, czyli wyraźnie silniej [27, 28]. Realnym skutkiem różnicy wykładników potęgowych jest wzrost wydajności jednostkowej - z jednostki objętości komory młyna, a tym

samym spadek jednostkowego poboru energii (rys. 6.5) wraz ze wzrostem średnicy,

- obniżenie kosztów eksploatacyjnych młynowni - mniejsza liczba układów mielenia,
- zmniejszenie kosztów personelu (mniejsza ilość obsługi) układów mielenia w zakładzie.

Analiza wpływu średnicy komory przeprowadzona w 1971 roku [27] wykazała, że najkorzystniejszy wymiar komory powinien wynosić około 6 m. Ograniczeniem wówczas była jakość mielników, które w komorach o średnicach powyżej 5 m szybciej się zużywały. Obecnie, dzięki postępowi w inżynierii materiałowej w produkcji mielników o wyższej jakości, umożliwiły budowę młynów kulowych o średnicach przekraczających 7 m [16, 18].

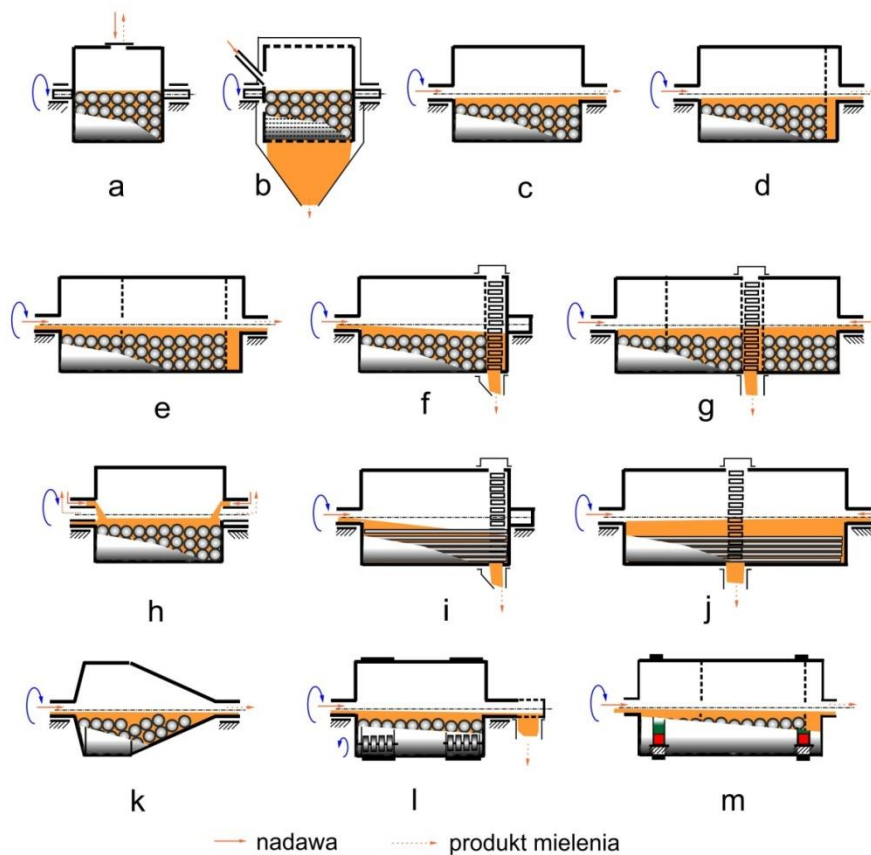


Rys. 6.5. Wpływ średnicy komory młyna kulowego na zmianę wydajności i pobór mocy: D – średnica komory, P – moc, k_q – współczynnik zmiany wydajności, k_p – współczynnik zmiany mocy, ΔQ – zakres zmiany wydajności, ΔP – zakres zmiany mocy, ΔD – zakres zmiany średnicy komory [28]

Firma Thyssen Krupp [29] oferuje młyn kulowy o wymiarach ϕ 7,3x12,5 m o mocy 13,3 MW, firma FLSmidth młyn o wymiarach ϕ 5,8x17,0 m o mocy 13,6 MW [30]. Największy młyn kulowy oferuje firma Metso [21] o wymiarach: ϕ 9,1 x 14 m o mocy 26,8 MW.

Budowa młynów grawitacyjnych – kulowych i prętowych

Budowę typowych młynów grawitacyjnych stosowanych obecnie przedstawiono na rysunku 6.6.



Rys. 6.6. Budowa współczesnych młynów kulowych bębnowych ($L/D < 2$) i rurowych ($L/D > 2$): a - bębnowy - okresowy, b - bębnowy sitowy, c - jednokomorowy przelewowy, d - jednokomorowy z przegrodą sitową, e - dwukomorowy z rozładunkiem końcowym, f - jednokomorowy z rozładunkiem peryferyjnym końcowym, g - trzykomorowy z rozładunkiem peryferyjnym środkowym, h - z obustronnym dozowaniem nadawy i odbiorem produktu mielenia (tylko do mielenia węgla), i - prętowy z końcowym rozładunkiem, j - prętowy ze środkowym rozładunkiem, k - walcowo-stożkowy, l - bębnowy z walczakiem napędzanym na obwodnicy, m - dwukomorowy z łożyskowaniem hydrostatycznym walczaka (największe młyny), L - długość komory (komór), D - średnica komory

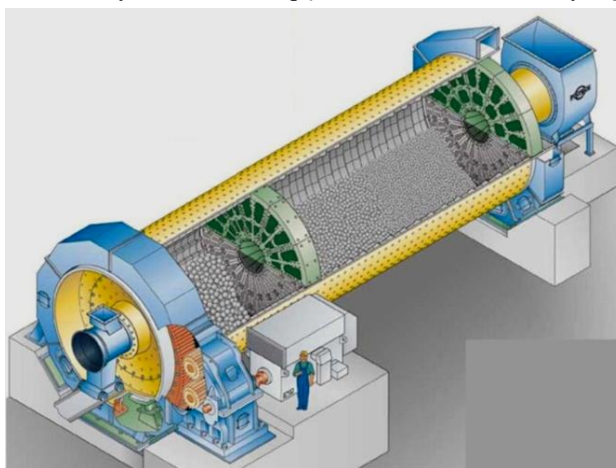
Rozwiązania konstrukcyjne dużych młynów kulowych produkowanych przez wiodące firmy światowe zamieszczono na rysunkach 6.7÷6.10.



Rys. 6.7. Młyn kulowy z podwójnym napędem obwodowym – dwoma silnikami wolnoobrotowymi do mielenia rud [31]

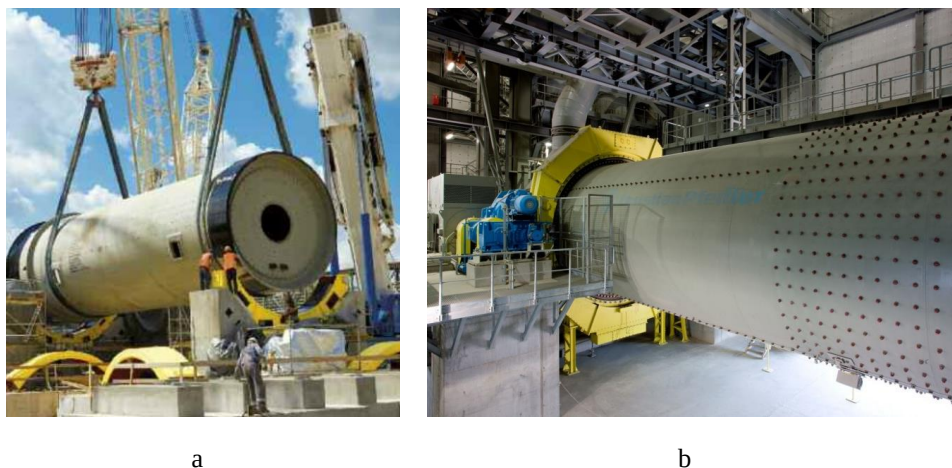


Rys. 6.8. Młyny kulowe firmy FLSmidth do mielenia rud na mokro - $\phi 7,9 \times 12,3$ m o mocy 16,4 MW z napędem silnikiem wieńcowym [32]



Rys. 6.9. Dwukomorowy młyn kulowy firmy Thyssen-Krupp [33] do mielenia na sucho – z oryginalnym napędem obwodowym z jednego silnika niskobrotowego, jedną przekładnią z dwoma czynnymi kołami zębatymi oraz łożyskowaniem hydrostatycznym

W 2012 roku największy wówczas młyn kulowy w Europie zainstalowano w Cementowni „GóraŹdze”. Młyn ma komorę o średnicy ϕ 5,2 m, długości 16,75 m, moc 2x4,2 MW, masę mielników 500 Mg, wydajność 200 Mg/h - przy mieleniu cementu (rys. 6.10) [34]. Cementownia ta jest największą cementownią w Europie.



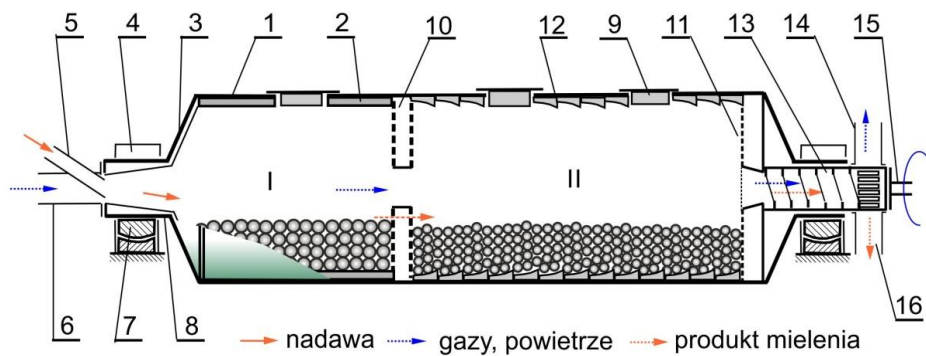
Rys. 6.10. Dwukomorowy młyn kulowy do mielenia cementu z napędem obwodowym z łożyskowaniem walczaka na czterech hydrostatycznych łożyskach ślizgowych [34]:
a – montaż młyna, b – młyn w linii technologicznej

Budowa i elementy robocze młynów grawitacyjnych

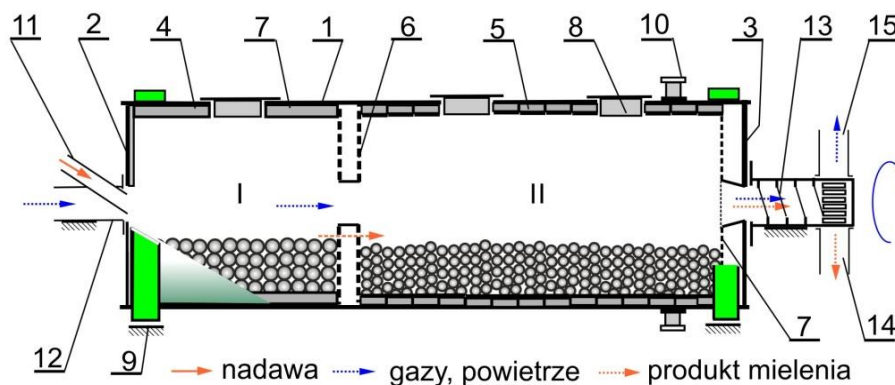
Typowy młyn grawitacyjny (jego część mechaniczna) stosowany do mielenia w sposób ciągły zbudowany jest z następujących podzespołów:

- walczaka z włazami,
- dwóch dennic (jednej z czopem wlotowym - załadowniczym, drugiej z czopem wylotowym – rozładowniczym),
- przegród sitowych,
- wykładzin (I i II komory),
- dwóch węzłów łożyskowania,
- napędu.

Na rysunku 6.11 zamieszczono ogólne rozwiązanie typowego młyna grawitacyjnego, a na rysunku 6.12 nowe rozwiązanie młyna stosowane w budowie dużych młynów.



Rys. 6.11. Ogólna budowa typowego młyna grawitacyjnego: 1 – walczak, 2 – wykładzina I-szej komory – progowa, 3 – dennica, 4 – osłona łożyska, 5 – wlot nadawy, 6 – wlot gazów lub powietrza, 7 – łożysko ślizgowe - wahliwe, 8 – czop wlotowy, 9 – właz, 10 – przegroda sitowa międzykomorowa, 11 przegroda sitowa – wylotowa, 12 – wykładzina II-giej komory - samosortująca, 13 – czop wylotowy z wewnętrzną powierzchnią śrubową, 14 – wylot gazów lub powietrza, 15 – wał napędowy 16 – wylot produktu mielenia



Rys. 6.12. Budowa nowoczesnego młyna grawitacyjnego o obniżonej masie oraz dużej wydajności: 1 – walczak, 2 – pokrywa walczaka od strony wlotu, 3 – pokrywa walczaka od strony wylotu, 4 – wykładzina I-szej komory, 5 – wykładzina II komory, 6 – przegroda sitowa międzykomorowa, 7 - przegroda sitowa wylotowa, 8 – właz, 9 - łożysko hydrostatyczne, 10 – koło napędu, 11 – wlot nadawy, 12 - wlot gazów lub powietrza, 13 – czop wylotowy z wewnętrzną powierzchnią śrubową, 14 – wylot produktu mielenia, 15 – wylot gazów lub powietrza

W nowym rozwiązaniu młyna grawitacyjnego zmieniono znacząco jego budowę. Wyeliminowano dwa jego podzespoły - dennice, które przenosiły duże obciążenia statyczne i dynamiczne i miały dużą masę. Zastąpiono je pokrywami o znacznie mniejszej masie, z których tylko pokrywa wlotowa obciążona jest masą wykładziny bocznej i niewielkimi obciążeniami ładunku. Wyeliminowano również przenoszące znaczne obciążenia drążone czopy mocowane w dennicach. Wlot nadawy i wylot produktu mielenia przestały obciążać młyn, ponieważ są połączone z pokrywami. Łożyska ślizgowe czopów drążonych zastąpiono łożyskami hydrostatycznymi o ponad trzykrotnie większej średnicy, podpierającymi walczak na obu jego końcach, co znacząco zmniejszyło długość kompletnej komory młyna. Mniejsza masa młyna oraz mniejszy rozstaw łożysk spowodowały zmniejszenie obciążeń gnących, dzięki temu umożliwiły zmniejszenie masy młyna o około 12÷16% oraz znacząco poprawiły stan obciążenia walczaka zwiększając jego niezawodność.

Podstawowymi elementami roboczymi młynów kulowych są:

- wykładziny komór,
- mielniki (kule, cylpepsy, pręty, a w młynach AG i SAG większe ziarna mielonego materiału),
- przegrody sitowe,
- wlot mielonego materiału znajdujący się w czopie drążonym wlotowym, przez który również doprowadza się powietrze lub gazy suszące, a przy mieleniu na mokro wodę,
- wylot produktu mielenia usytuowany najczęściej w czopie wylotowym, przez który odprowadza się zmielony materiał wspólnie lub odrębnie z medium gazowym, a przy mieleniu na mokro wspólnie z cieczą jako zawiesina fazy stałej. Niektóre rozwiązania młynów stosowane do mielenia na sucho mają inaczej usytuowany wylot zmielonego materiału. Jest to tzw. wylot peryferyjny - usytuowany w środku walczaka, lub po przeciwnej stronie wlotu. Wówczas zmielony materiał odprowadzany jest z młyna przez otwory wykonane w walczaku, przy czym materiał zmielony odbierany jest grawitacyjnie, natomiast zapyłona faza stała przez otwory, ale znajdujące się w górnym położeniu. Przy mieleniu na mokro zawiesina odprowadzana jest grawitacyjnie przez otwory znajdujące się w dolnym położeniu.

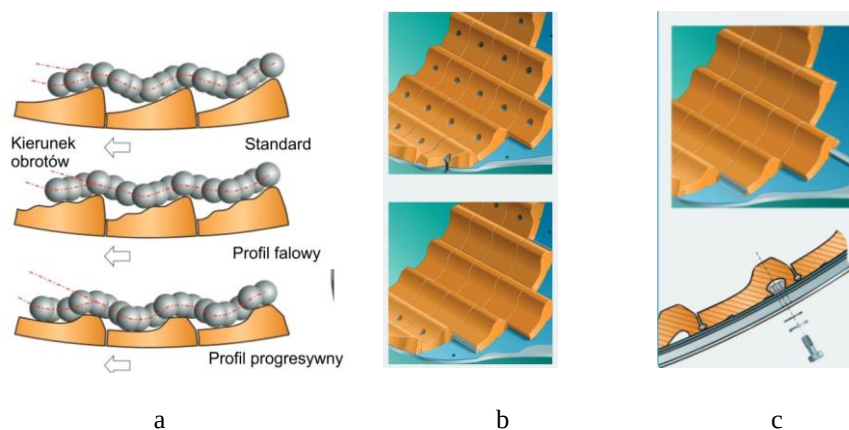
Budowa wykładzin komór uwarunkowana jest rodzajem sposobu działania (pracy) młyna, uziarnieniem nadawy, produktu mielenia, środowiskiem mielenia (na sucho lub na mokro) oraz względami ekonomicznymi.

Przy mieleniu na sucho stosuje się głównie wykładziny metalowe, żeliwne lub stalowe, a przy mieleniu na mokro stosowane są wykładziny metalowe, gumowe, a w mniejszych młynach – przy mieleniu surowców i produktów ceramicznych, chemicznych i farmaceutycznych wykładziny ceramiczne (korundowe, sileksowe, bazaltowe i inne). Do młynów mielących na mokro oferowane są również wykładziny z tworzyw polimerowych (poliuretanu, poliamidu i innych) oraz hybrydowe - gumowo-stalowe-magnetyczne.

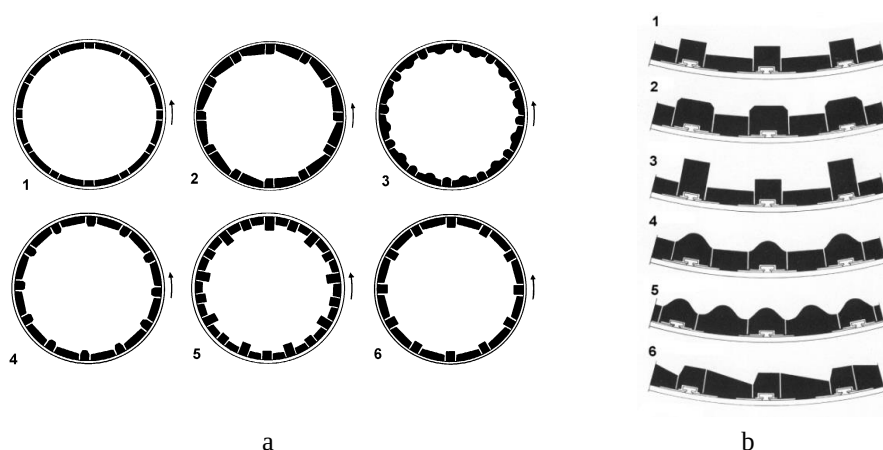
W młynach dwukomorowych o wydajności powyżej 50 Mg/h - przy mieleniu na sucho w pierwszej komorze młyna mielącego stosuje się wykładziny profilowane lub progowe, w drugiej profilowane o mniejszych wystęgach oraz wykładziny samosortujące.

Budowa wykładzin uwarunkowana jest również rodzajem i wymiarami stosowanych mielników, czyli kul, cylpepsów, prętów, a także własnościami fizycznymi mielonego materiału zwłaszcza jego abrazyjnością związaną głównie z udziałem krzemionki krystalicznej.

Szereg rozwiązań konstrukcyjnych wykładzin młynów grawitacyjnych podano w pracy [35]. Przykłady rozwiązań wykładzin komór młynów do mielenia na sucho i mokro przedstawiono na rysunkach 6.13 i 6.14.



Rys. 6.13. Przykład rozwiązań nowoczesnych wykładzin metalowych:
a – profile wykładzin, b – płyty z otworami przelotowymi,
c – płyty z otworami nieprzelotowymi [36]



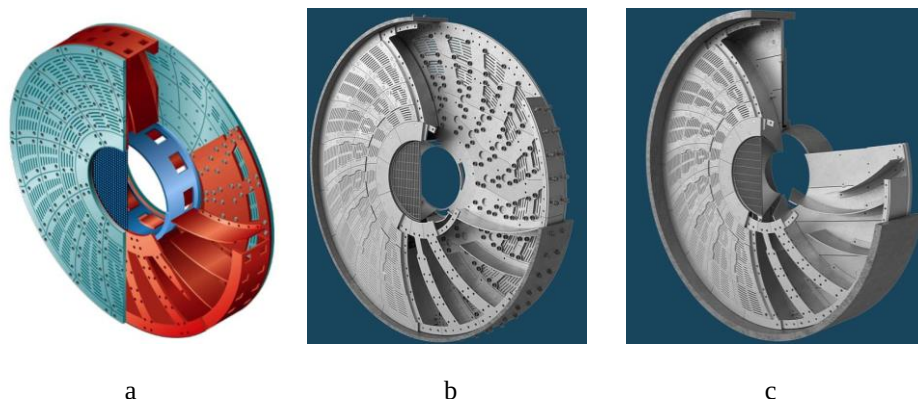
Rys. 6.14. Przykład rozwiązań wykładzin gumowych firmy Trelleborg [37]:

- a – typowe rodzaje wykładzin: 1 – gładka, 2 – zachodząca,
 3 – falista-podnosząca, 4 – progowa z niskimi progami, 5 – typu Hi-Lo,
 6 – profil prostokątny, b – inne rozwiązania wykładzin

Mielniki (kule, pręty cylpepsy) oferuje szereg producentów – hut oraz producentów młynów. Ich jakość zależy od twardości oraz składu chemicznego, głównie zawartości chromu, manganu i innych dodatków stopowych.

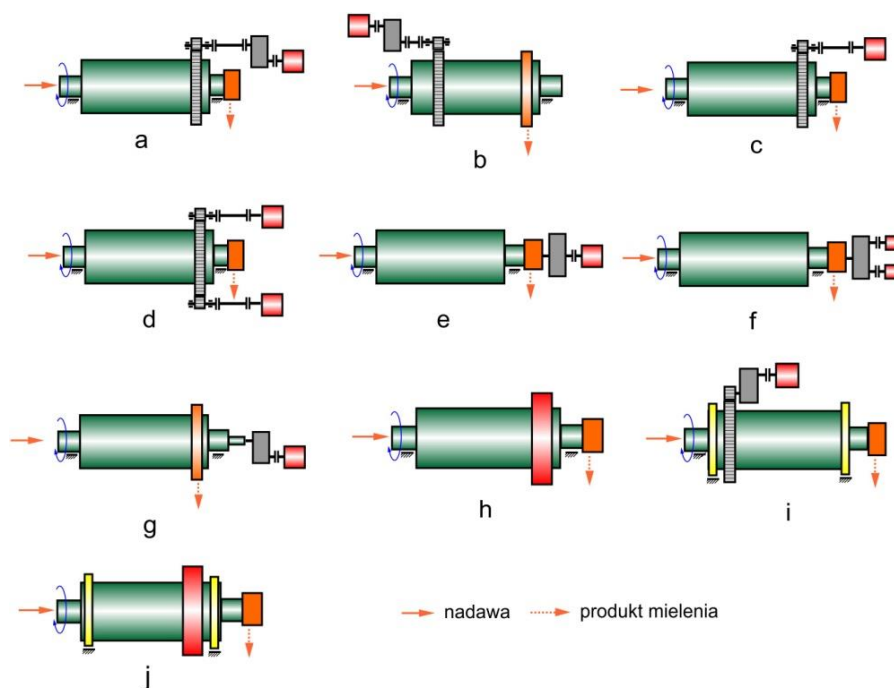
Istotne znaczenie dla procesu mielenia mają przegrody sitowe, stosowane głównie przy mieleniu kulami lub cylpepsami. Przegrody zatrzymują mielniki w komorze a przepuszczają zmielony materiał oraz powietrze (gazy) lub zawiesinę. W młynach dwukomorowych, pierwsza przegroda umieszczana jest pomiędzy pierwszą i drugą komorą, a druga zamykająca drugą komorę na wyjściu materiału zmielonego. Przegrody te różnią się budową. Na rysunku 6.15 zamieszczono rozwiązania konstrukcyjne przegród oferowanych przez firmę Chrystian Pfeiffer [38].

Rozwój konstrukcji młynów kulowych obejmuje również rozwój ich układów napędowych, części mechanicznych napędów, czyli przekładni, sprzęgieł, a w szczególności silników młynów, układów ich zasilania, monitoringu istotnych parametrów młyna, przekładni, silników oraz wszystkich układów pomocniczych. W zakresie przekładni przenoszących moce powyżej 5 MW stosowane są zabezpieczenia mechaniczne chroniące przekładnię przed uszkodzeniem. W celu obniżenia kosztów napędu obwodowego dużej mocy wyposażonego w dwa silniki i dwie przekładnie, zastosowano jednostronny napęd z jednego silnika, wyposażony w przekładnię z dwoma czynnymi kołami zębatymi napędzającymi jedno koło bierne usytuowane na walczaku młyna [33]. Rozwiązanie to obniżyło masę napędu, poprawiło jego sprawność oraz zmniejszyło powierzchnię zabudowy i kubaturę młynowni.



Rys. 6.15. Przegrody sitowe młyna kulowego: a – przegroda wylotowa z rurą perforowaną [38], b – przegroda międzykomorowa [39], c – przegroda wylotowa bez rury [39]

Na rysunku 6.16 przedstawiono najczęściej stosowane napędy młynów.



Rys. 6.16. Układy napędowe młynów kulowych: a, b – obwodowe pojedyncze z przekładnią, c – obwodowy pojedynczy bezpośrednio z silnika wolnoobrotowego, d – obwodowy podwójny z silników wolnoobrotowych, e – centralny z przekładnią planetarną, f – centralny z przekładnią walcową napędzany dwoma silnikami, g – centralny z jednym silnikiem, h – bezprzekładniowy (wieńcowy), i – obwodowy z dwoma kołami zębatymi czynnymi z walczykiem podpartym na łożyskach hydrostatycznych, j – bezprzekładniowy (wieńcowy z walczykiem podpartym na łożyskach hydrostatycznych)

Zmniejszenie kosztów części mechanicznej oraz powierzchni zabudowy i kubatury młynowni zapewnia napęd bezprzekładniowy z łatwą regulacją prędkości obrotowej młyna, ponieważ silnik zasilany jest zawsze z przetwornika częstotliwości. Napędy wieńcowe zdecydowanie dominują przy największych mocach młynów – powyżej 10 MW.

Podstawowe parametry młynów produkowanych przez firmę Polysius z koncernu ThyssenKrupp [33] podano w tabeli 6.1. W tabeli 6.2 zamieszczono podstawowe parametry młynów produkowanych przez firmę FLSmidth [30], w tabeli 6.3 młynów produkowanych przez firmę Metso [21], natomiast w tabeli 6.4 młynów produkowanych przez polską firmę Makrum [40].

Podstawowe parametry młynów produkowanych przez firmę ThyssenKrupp (Polysius) [33]

Tabela 6.1.

Średnica komory Φ [m]	Długość komory [m]	Moc silników [kW]
4,3	6,1÷7,6	1600÷2100
4,6	6,4÷8,0	2000÷2600
4,9	6,7÷8,6	2500÷3300
5,2	7,3÷8,9	3200÷3900
5,5	7,6÷9,5	3800÷4800
5,8	8,0÷10,1	4600÷5900
6,1	8,3÷10,4	5500÷6900
6,4	8,9÷11,0	6700÷8300
6,7	9,2÷11,6	7700÷9900
7,0	9,5÷12,2	9000÷11600
7,3	10,1÷12,5	10000÷13300

Podstawowe parametry młynów produkowanych przez firmę FLSmidth [30]

Tabela 6.2.

Typ Parametry → Wymiary komory, $\Phi \times L$, [m]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Moc napędu [kW]
3,8x13	16,86	2570
4,2x12,5	16,03	3130
4,2x14,5	16,03	3660
4,6x13,5	15,33	4205
4,6x14,5	15,33	4535
4,6x15,5	15,33	4870
5,0x14	14,69	5345
5,0x15	14,69	5750
5,0x16,5	14,69	6355
5,4x15	14,13	6985
5,4x16,5	14,13	7725
5,8x15,5	13,62	8680
5,8x17	13,62	9560

Podstawowe parametry dużych młynów produkowanych przez firmę Metso [21]

Tabela 6.3.

Typ napędu	Wymiary komory [m]	Pobór mocy [kW]	Moc silnika [kW]
Przekładniowy	6x10,2	6617	6711
Przekładniowy	6,4x10,2	7726	8203
Przekładniowy	6,7x11,1	9215	9694
Przekładniowy	6,7x12,3	9970	10813
Przekładniowy	7,3x12,3	12628	13273
Przekładniowy/wieńcowy	7,9x12,8	16273	17151
Przekładniowy/wieńcowy	7,9x13,4	17058	17897
Przekładniowy/wieńcowy	8,2x13,7	19211	20134
Wieńcowy	8,5x14	21549	22371
Wieńcowy	8,8x14,3	24079	25354
Wieńcowy	9,1x14	25683	26845

Podstawowe parametry młynów produkowanych przez firmę Makrum [40]

Tabela 6.4.

Typ	Wymiary walczaka [m]		Wydajność [Mg/h]		Moc silnika [kW]	Masa młyna bez mielników [Mg]	Masa mielników [Mg]
	Średnica Φ	Długość	Na sucho	Na mokro			
41.39	1,5	5,7	3÷4,5	4÷6	132	28,0	12,25
41.12	1,8	8,0	7÷8	10÷11	250	53,0	24,5
41.31	2,0	8,8	9÷10	12÷14	320	67,0	28,0
41.30	2,0	10,0	13÷15	13÷21	400	78,0	37,0
41.32	2,2	10,0	18÷20	25÷28	630	94,0	52,0
41.53	2,3	6,5	13÷20	-	350	89,0	31,0
41.66	2,6	12,3	-	40÷45	1000	181,0	82,0
49.65	2,6	13,5	30÷32	-	1000	193,0	82,0
41.52	3,0	7,5	38÷40	-	1000	151,0	61,0
41.63	3,4	13,5	-	80÷90	2000	310,0	153,0
41.48	3,4	13,5	60÷65	-	2000	325,0	153,0
49.86	4,0	12,0	90÷100	-	2x1000	284,0	120,0

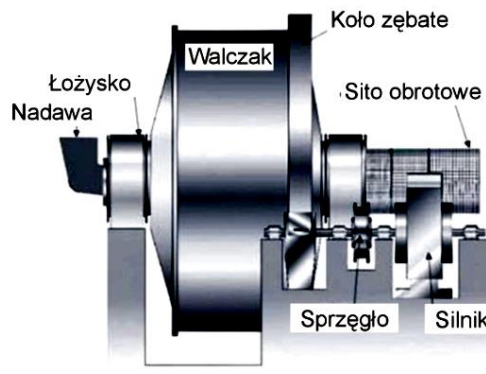
Duże młyny grawitacyjne kulowe i prętowe eksploatowane są tylko w układach mielenia pracujących w cyklu zamkniętym. Klasyfikatorami ziarnowymi są: hydrocyklony, multihydrocyklony, sita łukowe, klasyfikatory spiralne i inne - przy mieleniu na mokro. Przy mieleniu na sucho klasyfikatorami są separatory pneumatyczne - przy „najgrubszym” uziarnieniu produktu mielenia – grawitacyjne (statyczne, inercyjne), przy drobniejszym – cyrkulacyjne i spiralne, a najnowsze młyny stosowane do mielenia na sucho wyposaża się w separatory turbinowe.

6.3. Młyny autogeniczne i semiautogeniczne

Młyny autogeniczne AG i semiautogeniczne SAG stosowane są w układach mielenia jako młyny wstępne, w pewnych przypadkach eliminują węzeł kruszenia, a finalnymi młynami są młyny kulowe, prętowe i mieszadłowe. Średnice komór tych młynów przekraczają 13 m, zainstalowane moce dochodzą do 35 MW [31]. Wydajność młynów AG i SAG w procesach wynosi od 150 do 700 Mg/h.

Budowa młynów AG i SAG jest bardzo zbliżona. Różnicą jest niewielki udział mielników – w przypadku młyna SAG oraz większy (powyżej 1)

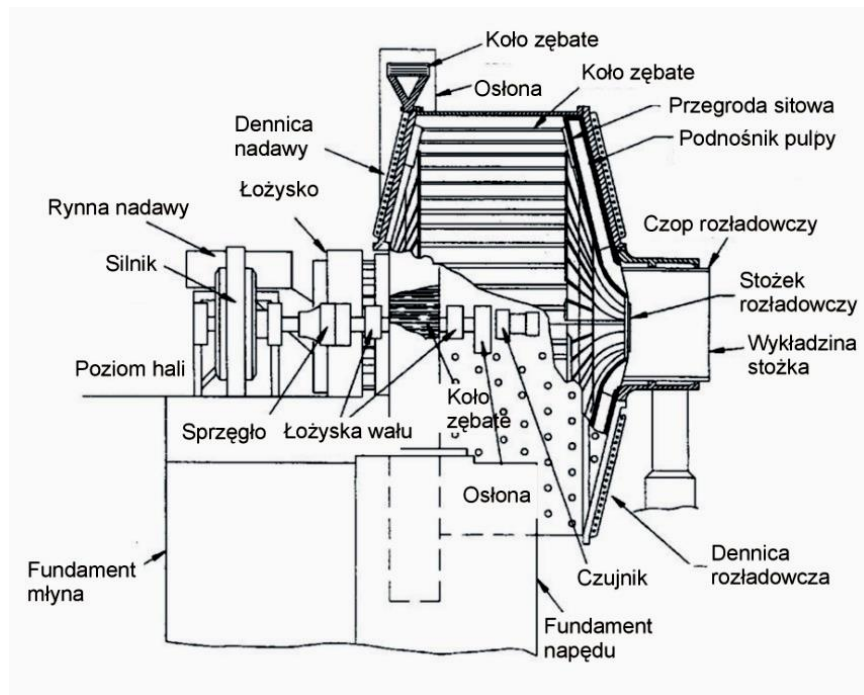
stosunek długości do średnicy komory w młynach AG. Typowy młyn AG lub SAG zbudowany jest z walczaka zamkniętego z obu stron dennicami z usytuowanymi w ich osiach geometrycznych otworami, przy czym od strony wlotu nadawy znajduje się czop drążony załadowniczy, a od strony wylotu produktu mielenia jest czop rozładowniczy zakończony sitem obrotowym. Młyn najczęściej posiada napęd obwodowy z silnika przez jednostopniową przekładnię zębatą. Na rysunku 6.17 zamieszczono uproszczony rysunek młynów AG i SAG z sitem obrotowym – stosowanych do mielenia na mokro. Na rysunku 6.18 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne młynów AG i SAG bez sita obrotowego – stosowany również do mielenia na mokro.



Rys. 6.17. Budowa typowego młyna AG i SAG z sitem obrotowym [42]

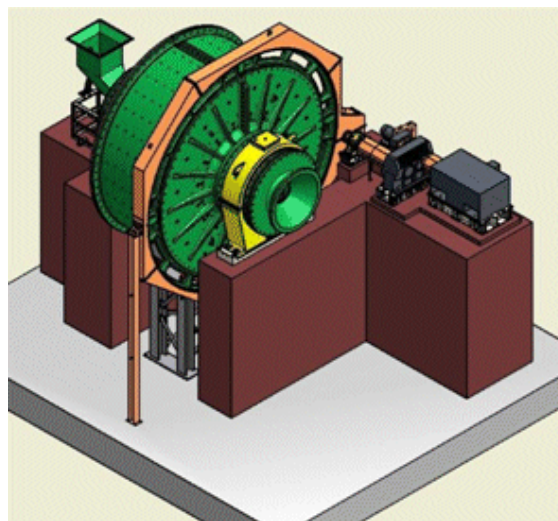
Sposób pracy młynów AG i SAG jest zbliżony do sposobu pracy typowego młyna kulowego. Najczęściej młyny te pracują w wodospadowym sposobie pracy, jednak niektóre z nich użytkowane są w kaskadowym sposobie pracy. Stąd w literaturze funkcjonują inne nazwy tych młynów: *cascade mill* - w języku angielskim, *Kaskadenmühle* - w języku niemieckim.

Elementami roboczymi tych młynów są wykładziny: komory mielącej, dennice, stożek rozładowniczy, czop zasilający, czop rozładowniczy, przesiewacz obrotowy oraz swobodne mielniki stalowe - kule o średnicy od 100 do 120 mm, zwykle w ilości 4÷12%, sporadycznie 20% tylko w młynach SAG. Przy mieleniu na mokro stosowane są najczęściej trzy rodzaje wykładzin: stalowe o profilach podanych na rysunku 6.21 a, gumowe (rys 6.21 b) oraz złożone stalowo-gumowe z magnesami trwałymi - zwanymi magnetycznymi (rys. 6.21 c). Każda z firm produkujących młyny AG i SAG stosuje własne rozwiązania wykładzin.

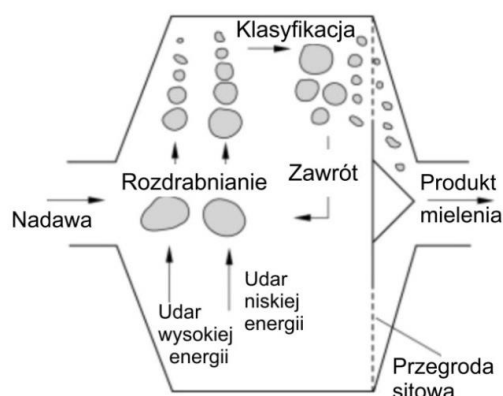


Rys. 6.18. Budowa typowego młyna AG i SAG bez sita obrotowego [43]

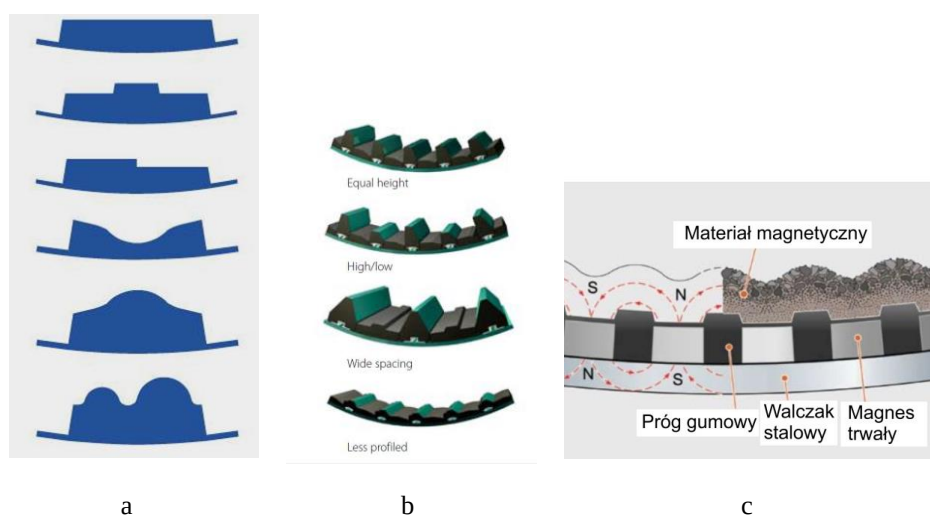
Wirtualny model młyna AG zamieszczono na rysunku 6.19, a model technologiczny procesu rozdrabniania przedstawiono na rysunku 6.20 [44].



Rys. 6.19. Model wirtualny młyna SAG [44] z napędem obwodowym pojedynczym



Rys. 6.20. Model technologiczny młynów AG i SAG [44]

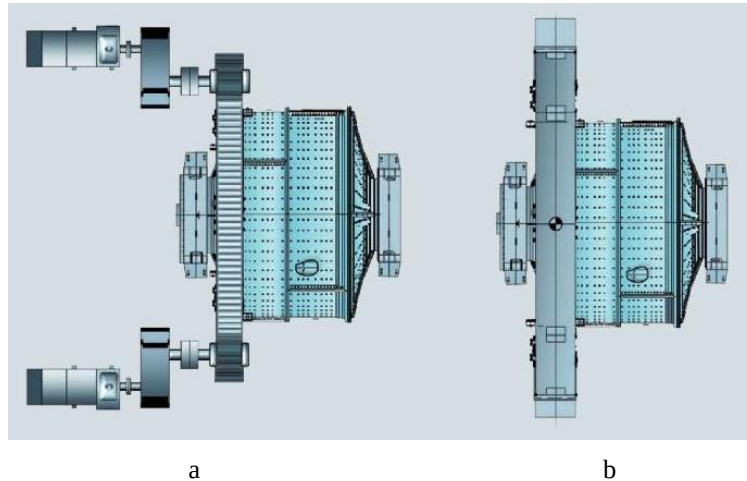


Rys. 6.21. Profile wykładzin: a - stalowych [45], b - gumowych [46], c - magnetycznych [46]

W młynach AG i SAG stosuje się cztery rodzaje układów napędowych (rys. 6.22):

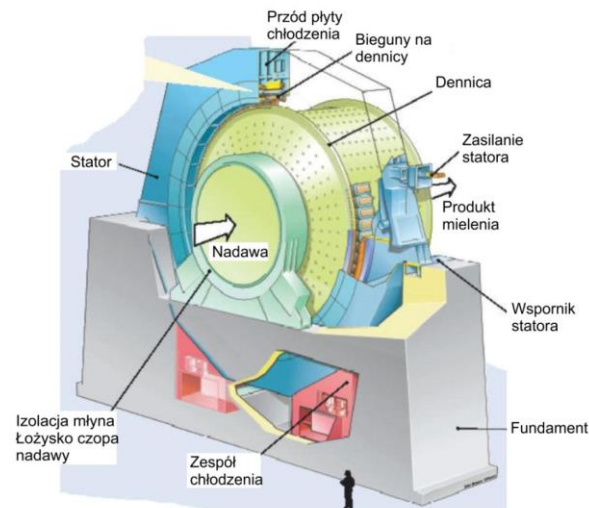
- obwodowy pojedynczy,
- obwodowy podwójny,
- centralny głównie w starszych egzemplarzach,
- napęd bezprzekładniowy - wieńcowy.

Napęd obwodowy pojedynczy stosuje się w mniejszych młynach o mocach do 7,5 MW, obwodowy podwójny o mocy powyżej 15 MW ($2 \times 7,5$ MW), natomiast napęd bezprzekładniowy dla mocy $6\div 30$ MW [13]. Na rysunku 6.22 przedstawiono dwa najczęściej stosowane układy napędowe dużych młynów [47]. W mniejszych młynach stosuje się pojedyncze układy napędowe, przy czym koło czynne przekładni zębatej napędzane jest bezpośrednio z wolnoobrotowego silnika oraz pośredniego reduktora (rys. 6.22 b).



Rys. 6.22. Napędy młynów: a - obwodowy podwójny, b – bezprzekładniowy [47]

Napęd bezprzekładniowy młyna AG zaprezentowano na rysunku 6.23 [47].



Rys. 6.23. Napęd bezprzekładniowy (wieńcowy) młyna AG [47]

Podstawowe obliczenia młynów AG i SAG

Metody obliczeń podstawowych parametrów młynów AG i SAG, w szczególności jednostkowego poboru energii na proces mielenia podano w pracy [48]. Symulacje komputerowe wyznaczania parametrów technologicznych tych młynów podano w pracy [49].

Metodę wyznaczania zapotrzebowania mocy i wydajności młyna przemysłowego na podstawie wyników badań przeprowadzonych w młynie wzorcowym, zwanym również jednostkowym podano w pracy [50]. Moc młyna przemysłowego oblicza się z wyrażenia:

$$P = P_m \left(\frac{nbL}{n_m b_m L_m} \right) \left(\frac{D}{D_m} \right)^{2,5 \div 2,6}$$

gdzie: P - pobór mocy przez młyn AG, SAG, kW,

P_m - pobór mocy przez młyn wzorcowy, kW,

n - prędkość obrotowa młyna AG, SAG, obr/min,

n_m - prędkość obrotowa młyna, obr/min,

b - stopień napełnienia młyna wzorcowego, [-],

b_m - stopień napełnienia młyna AG, SAG, [-],

L - długość komory młyna AG, SAG, m,

L_m - długość komory młyna wzorcowego, m,

D - średnica komory młyna AG, SAG, m,

D_m - średnica komory młyna wzorcowego, m.

Wydajność młynów AG i SAG określa wyrażenie:

$$Q = Q_m \left(\frac{D}{D_m} \right)^{2,6} \left(\frac{L}{L_m} \right)^{0,85}$$

gdzie: Q - wydajność młyna AG, SAG, Mg/h,

Q_m - wydajność młyna wzorcowego, Mg/h.

Rozwiązania konstrukcyjne i podstawowe parametry młynów AG i SAG

Na rysunkach 6.24÷6.29 zamieszczono fotografie młynów SAG i AG zastosowanych w przemyśle z podstawowymi danymi technicznymi dostępnymi w materiałach informacyjnych poszczególnych firm.



Rys. 6.24. Młyn AG firmy Metso, komora ϕ 11,6x 13,7 m, moc 22,5 MW [51]



Rys. 6.25. Młyn SAG –firmy Metso z napędem bezprzekładniowym [52]



Rys. 6.26. Młyn AG firmy E&MJ, średnica komory 12,2 m, moc 23,5 MW [53]



Rys. 6.27. Młyn SAG z napędem firmy ABB, moc 35 MW, średnica komory 13,4 m [54]



Rys. 6.28. Młyn SAG firmy FLSmidth, komora średnica 12,2 m, długość 7,9 m, moc 28 MW, wydajność 3425 Mg/h, napęd centralny [55]



Rys. 6.29. Młyny SAG firmy Thyssen Krupp Polysius, komora: średnica 7,9 m, długość 11,7 m [56]

W tabelach 6.5÷6.7 podano wybrane podstawowe parametry techniczne młynów SAG i AG produkowanych obecnie przez czołowych producentów tych młynów.

Podstawowymi parametrami podawanymi w materiałach firmowych są najczęściej tylko średnica i długość komory oraz moc napędu. Przy czym w przypadku wymiarów wewnętrznych komór należy zwrócić uwagę, czy są to wymiary komór z wykładzinami czy bez wykładzin, ponieważ firmy mogą oferować młyn z wykładzinami (walczaka, dennic i przegród sitowych lub tylko sam walczak, a inwestor sam dobiera wykładziny (produkowane przez specjalistyczne firmy) na podstawie własnych doświadczeń.

Firmy amerykańskie (Metso, Tenova) oferują młyny z tańszymi napędami obwodowymi o większej mocy niż firmy europejskie (ThyssenKrupp Polysius, FLSmidth i inne). Do napędu młynów firmy amerykańskie stosują silniki elektryczne wytwarzane na rynku amerykańskim. W Europie silniki do młynów dużej mocy produkują wyspecjalizowane firmy: ABB, Siemens oraz Brown Boveri.

Podstawowe parametry młynów SAG firmy ThyssenKrupp Polysius [56]

Tabela 6.5.

Średnica komory Φ [m]	Długość komory [m]	Moc [kW]
8,0	3,9	3800
8,6	4,2	5000
9,2	4,5	6400
9,8	4,8	8400
10,4	5,1	9900
11,0	5,4	12100
11,6	5,7	14700
12,2	6,0	17600
12,8	6,4	21300
13,4	6,8	25400

Podstawowe parametry standardowych młynów SAG firmy Tenova [57]

Tabela 6.6.

Rodzaj napędu obwodowego	Średnica komory Φ [m]	Długość komory [m]	Moc [kW]
Pojedynczy	3,66	1,52	190
Pojedynczy	4,27	1,83	375
Pojedynczy	4,88	2,13	600
Pojedynczy	5,49	2,44	950
Pojedynczy	6,10	2,44	1300
Pojedynczy	6,71	3,05	2250
Pojedynczy	7,32	3,05	2600
Pojedynczy	7,92	3,05	3350
Pojedynczy	8,53	3,05	4100
Pojedynczy	8,53	4,27	5600
Pojedynczy	9,14	3,66	5600
Pojedynczy	9,75	4,27	6700
Podwójny	9,75	4,27	8200
Podwójny	9,75	4,88	9700
Podwójny	10,36	4,57	10450
Podwójny	10,36	5,18	11950
Podwójny	10,97	4,57	11950
Podwójny	10,97	5,79	14900

Należy dodać, że podawane dane dotyczą najczęściej standardowych młynów. Inwestor może zamówić młyn o innych wymiarach – długości komory oraz mocy. Pozostałe istotne informacje takie jak: rodzaj mielonego materiału, udział wody, uziarnienie nadawy i produktu mielenia, gwarantowana wydajność przeliczana na suchą masę, budowa układu mielenia, system sterowania automatycznego procesem mielenia i młynem producenci podają tylko po przeprowadzeniu testów technologicznych mielenia konkretnego materiału w swoich laboratoriach. Metody wyznaczania wydajności i mocy młynów są pilnie strzeżone przez „kontrwywiad” firmowy.

Podstawowe parametry standardowych młynów SAG firmy Metso [21]

Tabela 6.7.

Rodzaj napędu	Wymiary komory $\Phi \times L$ [m]	Prędkość obr. [% n_{kr}]	Moc napędu [kW]
Obwodowy	3,7x1,5	75	110÷185
Obwodowy	4,2 x1,8	75	220÷370
Obwodowy	4,8x2,1	75	400÷630
Obwodowy	5,5x2,4	75	670÷970
Obwodowy	6,0x2,4	75	745÷1300
Obwodowy	6,7x3,0	75	1490÷2240
Obwodowy	7,3x3,0	75	1860÷2610
Obwodowy	7,9x3,0	75	2240÷3350
Obwodowy	8,5x4,3	75	3730÷5960
Obwodowy	9,1 x3,7	75	3730÷5960
Obwodowy	9,8x4,8	75	6000÷8950
Obwodowy	10,3x5,8	75	8000÷12680
Obw./Wieńcowy	11,0x4,6	Regulowana	9000÷11930
Obw./ Wieńcowy	11,0x5,8	Regulowana	9000÷14900
Obw./ Wieńcowy	11,6x6,0	Regulowana	11000÷17800
Wieńcowy	12,0x6,7	Regulowana	14000÷22370
Wieńcowy	12,8x7,6	Regulowana	17000÷26850

Z uwagi na znaczne wymagania i trudności technologiczne dotyczące wytwarzania młynów o tak dużych rozmiarach, nastąpiła koncentracja ich produkcji w kilkunastu firmach w świecie. Koncentracja wystąpiła również w zakresie wytwarzania elementów roboczych tych młynów, czyli mielników, wykładzin, przegród sitowych. Również producentów silników dużej mocy do tych młynów jest zaledwie kilku. W przypadku mielenia na mokro rud w wielu przypadkach stosowane są wykładziny metalowe (żeliwne i stalowe), gumowe i metalowo-gumowe magnetyczne.

W tym rozdziale pominięto problematykę młynów grawitacyjnych o działaniu okresowym, ze względu na prostotę ich budowy, niewielką wydajność oraz ograniczone zastosowanie głównie do mielenia na mokro surowców i syntetycznych, materiałów ceramicznych, chemicznych i farmaceutycznych.

Literatura

1. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
2. Stefan B., Mirecki E., Mikoś. M.: Maszyny przemysłu ceramicznego. PWN Łódź, Kraków 1956
3. Poradnik Górnika t. 5, Wydawnictwo Śląsk 1976
4. Kurdowski W.: Poradnik technologa przemysłu cementowego. Arkady, Warszawa 1981.
5. https://tu-freiberg.de/ze/ub/el-bibl/kataloge/nachtrag_1879_bis_1927.pdf
6. Lynch A. J., Rowland Ch., A.: History of Grinding. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 8307 Shaffer Parkway Littleton, Colorado. Copyright © 2005 Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Inc.
7. Barak T., Pichniarczyk P.: Badania cementów portlandzkich produkowanych w różnych systemach mielenia. Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Nr 8 Warszawa-Opole 2011
8. Szeląg H.: Udział firmy FLSmidth w rozwoju przemysłu cementowego w Polsce w okresie 1900-1939. Cement Wapno Beton. Nr 9-10, 2007 s. 227
9. Łuszczkiewicz A.: Kierunki poprawy efektywności technologicznej, technicznej i ekonomicznej przeróbki rudy miedzi. Wykład w AGH, Kraków, 7.10. 2011
10. Trybalski K., Krawczykowski D.: Energetyczne wskaźniki oceny procesu mielenia rudy miedzi i ich modelowanie. Górnictwo i Geoinżynieria, z. 4, 2005 s. 183-193
11. Pease, J.D., Young M. F., Curry D.C.: Fine Grinding as Enabling Technology - The IsaMill. Xstrata Technology, Xstrata, www.isa.mill.com 1-02-2013
12. www.prnewswire.com/news-releases/global-ball-mill-industry-report
13. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, Leipzig. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
14. <http://www.pauloabbe.com/size-reduction/resources/mill-speed-critical-speed>
15. Kinng R. P.: Technical Notes Grinding © R.P king 2000 www.mineraltech.com/MODSIM/ModsimTraining/.../Grinding.pd...
16. Sidor J., Tomach T.: Postęp techniczny w budowie grawitacyjnych młynów rurowych Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie, Monografia, red. nauk. K Krauze; Centrum Badań i Dozoru

- Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o. w Łędzinach, Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie. — Łędziny-Kraków, Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego, 2015. s. 92–102
17. Sidor J.: Rozwój konstrukcji młynów autogenicznych i semiautogenicznych w przemyśle górnictwie. Problemy Transportu i Przeróbki w Górnictwie, Modelowanie Procesów: Monografia, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie - Kraków, Department of Mining, Dressing and Transporting Machines Faculty of Mechanical Engineering and Robotics. AGH, 2015. S. 89–101
 18. Sidor J.: Kierunki rozwoju młynów do mielenia surowców i spoiw mineralnych Materiały Ceramiczne / Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków - 2016 t. 68 nr 1, s. 61–69
 19. Trybalski K., Krawczykowski D.: Energetyczne wskaźniki oceny procesu mielenia rudy miedzi i ich modelowanie. Górnictwo i Geoinżynieria, Z. 4, 2005 s. 183–193
 20. Mokrzycki E., Uliasz-Bocheńczyk A.: Wybrane problemy zużycia energii w przemyśle cementowym. Polityka Energetyczna Tom 9, Z. 1 2006. PL ISSN 1429-6675
 21. Basics in mineral processing. Edition 10.2015 Metso. www.metso.com
 22. Andrejev S.E., Zvierevič W.W., Pierov W.A.: Droblenije, izmielčenie i grochočenie poleznych iskopajemych. Gosudarstvennoje Naučno-techničeskoje izdatielstvo Literatury po Gornomy Dielu. Moskva 1961
 23. Feige F.: Betrachtungen zur Berechnung des Leistungsbedarfs von Rohrmühlen Silikatechnik 24 1973, H.2 S. 58-62
 24. Spravočnik po obogaščeniu rud – Tom 1 Podgotovitielnoje processy. Izdatielstvo Nedra Moskva 1972
 25. Labahn O., Kaminsky W.A.: Ratgeber für Zementingenieure. Wiesbaden Berlin Bauverlag 1974
 26. Tichy R.: Beitrag zur numerischen Untersuchung der Bewegungs- und Beanspruchungsprofilen in einer Kugelmühle unter Verwendung von physikalisch begründeten Stoßparametern, Dissertation. Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2010
 27. Nakajima Y., Tamura K., Tanaka T.: Wo liegt die Grenzen beim Bau grosser Rohrmühlen, Zement Kalk Gips 1971 H.9 S. 420-424
 28. Sidor J.: Wpływ średnicy komory na wydajność młynów z mielnikami swobodnymi, II Konf. „Problemy w Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Hutniczych i Ceramicznych”, Kraków-Mogilany 1984, Wyd. AGH, Kraków 1984, s. 135-144
 29. Autogenous mills, semi-autogenous mills and ball mills for wet grinding - ThyssenKrupp, www.polysius.com
 30. www.flsmidth.com
 31. www.metso.com
 32. <https://www.amking.com/en/ball-mills-e669>
 33. www.polysius.fr

34. www.mostostal.com.pl
35. Malcolm Powell M., Smit J., Radziszewski P., Clear P., Rattray B., Erickson K., Schaeffer N.: The Selection and Design of Mill Liners [https://www.milltraj.com/.../ the_selection_and_design_of_mill_lin\](https://www.milltraj.com/.../the_selection_and_design_of_mill_lin\)
36. <https://www.slideshare.net/eslam128/mill-shell-lining-presentation>
37. www.trelleborg.com/.../Linners/Sheet--Rubber--Lining
38. Chrystian Pfeiffer Energy consideration in cement grinding, www.ficem.org/.../5_Energy%20considerationChristian%20Pfeiff...
39. <https://www.christianpfeiffer.com/grinding/mill-equipment/>
40. http://makrum.4b.pl/39_1054_0_34339/mlyn-rurowy/mlyn-rurowy.aspx
41. Toromocho – A giant in high-altitude mining <https://library.e.abb.com>
42. <http://slideplayer.com/slide/3441000/>
43. http://ffden-2.phys.uaf.edu/211_fall2002.web.dir/keith_palchikoff/grinding_mill
44. <http://www.harcliff.co.za/grinding-mills>
45. www.weirminerals.com
46. www.metso.com/miningandconstruction
47. <http://www.industry.siemens.com/verticals/global/en/mining-industry>
48. Sundström T.: An Autogenous Mill Application in the Mining Industry, www.spminstrument.com
49. Salazar J. L., Valdés-González H., Cubillos F.: Advanced Simulation for Semi-Autogenous Mill Systems: A Simplified Models Approach. Source: Dynamic Modelling, Book edited by: Alisson V. Brito, ISBN 978-953-7619-68-8, pp. 290, January 2010, INTECH, Croatia, downloaded from SCIYO.com
50. <http://slideplayer.com/slide/3441000/>
51. Horizontal mills. www.metso.com
52. <http://www.e-mj.com/departments/processing-solutions>
53. Tichy R.: Beitrag zur numerischen Untersuchung der Bewegungs - und Beanspruchungsprofilen in einer Kugelmühle unter Verwendung von physikalisch begründeten Stoßparametern, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg 2010
54. <http://www.kazminerals.com>
55. <http://www.marthinusen.co.za>
56. Autogenous Mills, Semi-Autogenous Mills and Ball Mills for Wet Grinding. www.thyssenkrupp.polysius.com
57. www.tenovagroup.com

7. Młyny mieszadłowe

7.1. Problematyka młynów mieszadłowych

W polskiej literaturze technicznej młyn mieszadłowy ma kilka nazw, to jest: atritor, młyn kulkowy, kuleczkowy, perełkowy, mieszalnikowy, mieszadłowo-kulkowy, ciśnieniowo-kulkowy, a także koszowy (o specjalnej konstrukcji wirnika). W literaturze anglojęzycznej występuje pod nazwami: *attritor*, *stirred mill*, *agitator mill*, *agitated mill*, *stirrer-beat mill*, *pearl mill*, *Sandmill*, a w niemieckojęzycznej: *Rührwerksmühle* oraz *Rührwerkskugelmühle* (nazwa rzadziej używana). Młyn ten należy do grupy młynów z mielnikami swobodnymi z nieruchomą komorą oraz przekazywaniem energii przez obrotowy wirnik. Brak ruchu komory jest ważną zaletą tego młyna, ponieważ ułatwia dozowanie nadawy, odbiór produktu mielenia, a co jest najważniejsze eliminuje oddziaływanie dynamiczne na podłoże.

Wynalazcą młyna mieszadłowego jest dr Andrew Szegvari, który w 1920 roku uzyskał w USA na niego patent. Rozwiązanie komercyjne młyna zastosowano około dwadzieścia lat później. Była to udoskonalona przez jego wynalazcę konstrukcja młyna z dobranymi parametrami technologicznymi procesu mielenia.

Wyróżnić można trzy główne rozwiązania elementów roboczych wirnika (rys. 7.1), które bezpośrednio wprawiają w ruch swobodne mielniki – w dominującej większości kulki. Są to:

- trzpienie,
- tarcze,
- powierzchnia (powierzchnie śrubowe i inne).

Niewielka liczba tych młynów wyposażona jest w wirniki o innych kształtach.

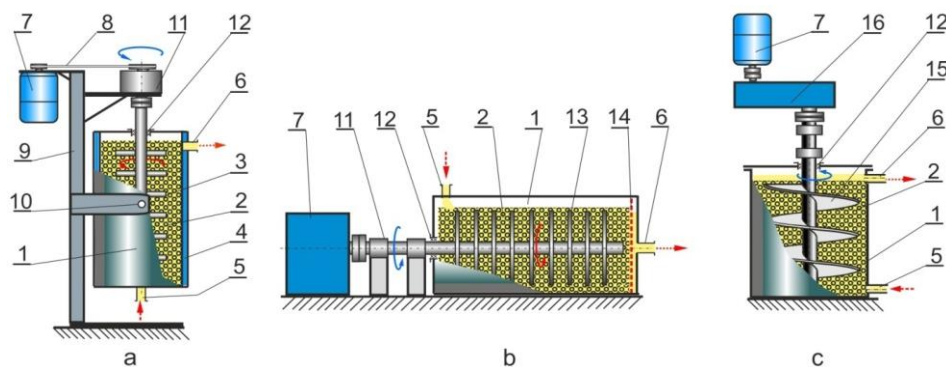
Ogólną budowę typowych młynów mieszadłowych zamieszczono na rysunku 7.1. Są to: młyn o niewielkiej i średniej wydajności z wirnikiem trzpieniowym pionowym (rys. 7.1 a), młyn o niewielkiej, średniej i dużej wydajności z wirnikiem tarczowym poziomym (rys. 7.1 b) oraz młyn o średniej i dużej wydajności z wirnikiem ślimakowym pojedynczym (rys. 7.1 c).

Mechanizmy procesu rozdrabniania w tych młynach uwarunkowane są rodzajem elementu roboczego wirnika. Stąd w młynach z wirnikami trzpieniowymi występuje uderzanie trzpieni w mielniki oraz ścieranie pomiędzy mielnikami i pomiędzy mielnikami i wykładziną komory. Natomiast w młynach z wirnikami tarczowymi i ślimakowymi dominuje udział ścierania materiału pomiędzy tarczami oraz powierzchniami śrubowymi a mielnikami oraz pomiędzy mielnikami a wykładziną komory. W młynach z komorami

pionowymi dodatkowe działanie ma nacisk kulek związany z ciśnieniem hydrostatycznym wielu warstw mielników oraz zawiesziny mielonego materiału, tworzących słup o wysokości nawet kilku metrów. Mielnikami w tych młynach są tylko kulki o średnicy od 0,5 do 10 mm (rzadko większych) wykonane z odpornych na ścieranie staliw, żeliw, węglików, tlenków, a nawet z piasku kwarcowego.

Większość tych młynów znalazła zastosowanie przy mieleniu na mokro [1, 2, 3], ale znane są także konstrukcje do mielenia na sucho [4, 5]. Elementami roboczymi są swobodne mielniki, które otrzymują energię kinetyczną od obracającego się wirnika nazywanego też mieszadłem, stąd ich najczęściej używana nazwa młyny mieszadłowe.

Młyny te występują w dwóch podstawowych rozwiązaniach konstrukcyjnych pionowym i poziomym uwarunkowanych położeniem osi geometrycznej mieszadła [1, 2], z kilkudziesięcioma rodzajami rozwiązań komory i wirnika. W dominującej większości młynów osie geometryczne wirnika i walcowej komory pokrywają się.



Rys. 7.1. Rozwiązania konstrukcyjne typowych młynów mieszadłowych:
 a – z wirnikiem trzpieniowym pionowym z komorą z płaszczem wodnym,
 b – z wirnikiem tarczowym poziomym, c – z wirnikiem ślimakowym, 1 – komora,
 2 – ładunek (mielniki z materiałem i cieczą), 3 – wirnik trzpieniowy, 4 – płaszcz wodny,
 5 – wlot nadawcy, 6 – wylot produktu mielenia, 7 – silnik, 8 – przekładnia cięgnowa,
 9 – konstrukcja wsporcza, 10 – przegub, 11 – łożyskowanie wału wirnika,
 12 – uszczelnienie wału wirnika, 13 – wirnik tarczowy, 14 – separator mielników,
 15 – wirnik ślimakowy, 16 – przekładnia zębata

Ważną zaletą tych młynów jest wysoki stopień napełnienia komory dochodzący do 0,90, większy niż w młynach wibracyjnych, w których parametr

ten osiąga maksymalnie 0,80, a w młynach grawitacyjnych tylko od 0,35 do 0,45 [1, 2, 3]. Wysoki stopień napełnienia skutkuje mniejszymi wymiarami komory i całego młyna oraz mniejszą jego masą.

Młyny mieszadłowe stosuje się głównie do mielenia bardzo drobnego, koloidalnego i subkoloidalnego, a także w skali nano, głównie materiałów: miękkich ($2 \div 4$ w skali Mohsa), średnio-twardych ($5 \div 6$ w skali Mohsa), a bardzo rzadko do materiałów twardych i bardzo twardych ($7 \div 9,5$ w skali Mohsa).

Uziarnienie nadawy (maksymalny wymiar ziaren) do tego młyna uwarunkowane jest rodzajem procesu mielenia i wynosi:

- $0,2 \div 1$ mm przy mieleniu bardzo drobnym - poniżej $10 \mu\text{m}$,
- $0,1 \div 0,3$ mm - przy mieleniu koloidalnym - poniżej $2 \mu\text{m}$,
- $0,010 \div 0,1$ mm - przy mieleniu w skali nano - poniżej 200 nm .

Stosunkowo rzadko używa się tych młynów do mielenia drobnego – poniżej $200 \mu\text{m}$. Wówczas maksymalny wymiar ziaren nadawy mieści się w zakresie $2 \div 5$, a maksymalnie może wynosi 10 mm .

Młyny mieszadłowe stosuje się w przemysłach: ceramicznym, chemicznym, elektronicznym, farmaceutycznym, biotechnologiach, górnictwym, papierniczym, materiałów budowlanych i metalurgicznym.

Największe młyny zastosowano w ostatnim dziesięcioleciu do mielenia węgla i rud w przemyśle górnictwym [6, 7]. Mielnikami w tych młynach są tylko kulki o średnicy od $0,5$ do 10 mm , rzadko większe, wykonane z odpornych na ścieranie staliw, żeliw, węglików, tlenków (glinu, cyrkonu), szkła, a nawet z piasku kwarcowego.

Młyny te stosuje się również jako młyny laboratoryjne do przygotowania próbek do celów analitycznych (analiz fizycznych, chemicznych, mineralogicznych), a także próbek do badań mikrobiologicznych, spektroskopowych oraz genetycznych.

Wydajność większości produkowanych młynów mieszadłowych wynosi:

- $0,050 \div 350 \text{ Mg/h}$ – w procesach ciągłego mielenia w środowisku wody,
- $0,050 \div 100 \text{ Mg/h}$ – w procesach ciągłego mielenia w środowisku powietrza,
- $0,01 \div 0,5 \text{ Mg/h}$ - w procesach okresowego mielenia w środowisku powietrza i cieczy – najczęściej wody.

Zaletami technologicznymi technologii mielenia w młynach mieszadłowych jest bardzo krótki czas mielenia od kilkudziesięciu sekund do kilku minut oraz bardzo intensywne mieszanie mielonego materiału.

Młyny mieszadłowe mają mniej zróżnicowaną budowę niż młyny wibracyjne oraz mniejszy zakres zastosowania. Podstawowym parametrem charakteryzującym młyn mieszadłowy jest tak, jak w przypadku młynów grawitacyjnych i wibracyjnych objętość komory, a ten młyn ma ją tylko jedną. Młyny o najmniejszej objętości komory od 0,5 do 5 dm³ stosuje się jako młyny laboratoryjne. Objętość komór młynów przemysłowych uwarunkowana jest ich wydajnością i zastosowaniem. Stąd w przemysłach ceramicznym, chemicznym, farmaceutycznym objętości komory mieszczą się w zakresie od 20 do 500 dm³ [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], przy czym objętość komór największej liczby młynów wynosi od 50 do 200 dm³, natomiast w przemyśle górnym, w którym zaczynają być coraz szerzej stosowane, zakres objętości komór wynosi od 1 do 46 m³, przy czym objętość największej liczby zastosowanych jednostek ma objętość komór od 3 do 10 m³ [15, 16, 17, 18, 19].

Rozwój młynów mieszadłowych znacznie przyspieszył pod koniec ubiegłego wieku oraz na początku XXI wieku. Przyczyniły się do tego prace podstawowe i rozwojowe prowadzone w ośrodkach badawczych firm produkujących te młyny. Duże znaczenie miał również postęp techniczny w zakresie:

- nowych tworzyw konstrukcyjnych na elementy robocze tych młynów (mielniki, wykładziny komór i wirniki),
- nowych napędów dużej mocy, w szczególności specjalnych silników elektrycznych o dużym momencie rozruchowym (4,5 razy większym od momentu znamionowego) oraz dwóch prędkościach obrotowych: większej roboczej i obniżonej do ułatwienia załadunku mielników oraz operacji oczyszczania komory,
- technologii klasyfikacji ziarnowej ziaren o wymiarach 3÷10 µm,
- sterowania i monitoringu głównych parametrów technologicznych i eksploatacyjnych młynów i ich instalacji.

W niewielkiej i średniej wielkości młynach komora często jest ruchoma, co zapewnia umieszczenie jej w dwóch trzpieniach (rys. 7.1 a), usytuowanych po obu stronach środkowej części pobocznicy zewnętrznej walczaka komory, tworzących oś obrotu komory. Rozwiązanie to umożliwia, po rozłączeniu napędu wirnika, zmianę położenia komory z położenia w pionie do położenia w poziomie, co ułatwia rozładunek mielników oraz przegląd komory i wirnika. W małych młynach komora może być umieszczona na płycie z czterema

rolkami, które po rozłączeniu napędu umożliwiają wysunięcie (wyjechanie) komory wraz z całym ładunkiem z instalacji młyna. W młynach laboratoryjnych i młynach o pojemności komory do kilku dm³ komora z ładunkiem i wirnikiem z młyna może być wyjmowana z konstrukcji młyna bez płaszcza wodnego lub razem z nim.

Komory młynów mieszadłowych, ze względu na powstawanie podczas mielenia dużych ilości ciepła, wyposażone są w układ chłodzenia - najczęściej płaszcz wodny z kontrolą temperatury. W niektórych młynach chłodzony jest również wirnik, którego wał wykonany jest z rury przez którą przepływa woda. W specjalistycznych technologiach stosuje się ogrzewanie komory ze stabilizacją temperatury.

Proces mielenia w młynach mieszadłowych jest zbliżony do procesu mielenia występującego w młynach wibracyjnych, z dwoma istotnymi różnicami:

- wprowadzane w ruch przez elementy obracającego się wirnika swobodne mielniki mają znacznie mniejsze swobodne drogi – głównie w strefie górnej komory,
- w procesie rozdrabniania dominuje udział naprężeń stycznych dezintegrujących ziarno, przy znacząco mniejszym udziale naprężeń normalnych, co skutkuje rozdrabnianiem ziaren przez ścieranie ich zewnętrznych powierzchni, a nie całych struktur ziaren - co ma miejsce w młynach wibracyjnych, a zwłaszcza w grawitacyjnych przy wodosпадowym sposobie pracy.

Główny podział młynów mieszadłowych przeprowadza się ze względu na usytuowanie osi geometrycznych ich elementów roboczych (komory i wirnika) i dzieli je na młyny poziome i pionowe. Podział drugi uwzględnia środowisko mielenia i wyróżnia młyny do mielenia: na mokro oraz na sucho [20, 21, 23].

Podział trzeci dotyczy zastosowania młyna, z czym związana jest jego budowa, działanie, a przede wszystkim objętość komory, wydajność i zainstalowana moc. Według tego kryterium młyny mieszadłowe można podzielić na trzy grupy:

- niewielkiej wydajności (do 50 kg/h) o działaniu okresowym, lub pracującymi z cyrkulacją zawiesiny o specjalnych wymaganiach, np. GMP (Good Manufacturing Practice), GHP (Good Hygienic Practice), FDA (Food and Drug Administration) znajdujące zastosowanie głównie w przemyśle farmaceutycznym, spożywczym a także ceramicznym - zwłaszcza dla potrzeb ceramiki specjalnej i elektronicznej oraz chemicznym,

- niewielkiej i średniej wydajności ($20 \div 10\,000$ kg/h) o działaniu ciągłym stosowane w przemyśle ceramicznym (np. ceramice sanitarnej, budowlanej), chemicznym (wytwarzanie farb, lakierów, pigmentów, wypełniaczy tworzyw polimerowych i innych drobno uziarnionych komponentów), budowlanym,
- dużej wydajności $10 \div 350$ Mg/h stosowane głównie przy wzbogacaniu rud,
- laboratoryjne – do przygotowania niewielkich próbek materiałów uziarnionych.

Wydajność młynów wiąże się ściśle z budową młyna, objętością komory i zainstalowaną mocą.

Ważny podział czwarty dotyczy prędkości obwodowej zewnętrznych elementów wirnika i dzieli młyny na:

- wolnobieżne, o prędkości obwodowej wirnika $0,5 \div 3,0$ m/s,
- średnobieżne, o prędkości obwodowej wirnika $3 \div 8$ m/s,
- szybkobieżne, o prędkości obwodowej wirnika $8 \div 12$ m/s,
- wysokiej energii, o prędkości do $21 \div 23$ m/s.

Wirniki młynów mają kilkadziesiąt rozwiązań konstrukcyjnych różniących się kształtem elementów poruszających mielniki oraz budową, stąd wyróżnia się wirniki:

- trzpieniowe,
- tarczowe zwykłe z tarczami umieszczonymi na wale współosiowo, które mogą być pełne lub z otworami,
- tarczowe zwykłe z tarczami umieszczonymi na wale mimośrodowo, które mogą być pełne lub z otworami,
- tarczowe z tarczami kształtowymi, pełnymi, z otworami, wycięciami lub nadlewami,
- ślimakowe: z powierzchnią ślimakową ciągłą, lub z przerwami, z powierzchnią pojedynczą lub podwójną,
- kształtowe, na przykład walcowo-stożkowe,
- kształcie torusa o przekroju trójkąta (*coball-mill*),
- kielichowe,
- turbinowe.

Kształt komory dostosowany jest do rozwiązań wirnika. Stąd wyróżnić można komory walcowe gładkie, z trzpieniami, z tarczami, walcowo-stożkowe, toroidalne i kształtowe.

Kolejny podział dotyczy napędu młyna. Ze względu na duży moment rozruchowy wymagany jest napęd, który spełnia te wymagania. Stąd do napędu tych młynów stosuje się specjalne silniki elektryczne, o około dwukrotnie powiększonym momencie rozruchowym, w stosunku do standardowych silników, a w starszych konstrukcjach do napędu największych młynów stosowano również silniki hydrauliczne.

Dominująca ilość młynów charakteryzuje się wspólną osią geometryczną komory i wirnika. Jedną z firm oferuje młyny o osi geometrycznej wirnika tarczowego przesuniętej równolegle do osi geometrycznej komory. Produkowana jest także wersja młyna wyposażona w dwa wirniki trzpieniowe lub tarczowe o osiach geometrycznych równoległych do osi geometrycznej komory. W tych młynach zawieszina nadawcy wprowadzana jest do komory mielenia rurą o przekroju prostokątnym umieszczoną przy poboczniczy komory [8].

Ze względu na zastosowanie: przemysłowe (najczęściej o działaniu ciągłym) i laboratoryjne - zwykle okresowe.

Zróżnicowanie występuje również w budowie układów (instalacji) mielących tych młynów. Najprostszym układem jest układ z młynem o działaniu okresowym, który po wypełnieniu mielnikami, mielonym materiałem i cieczą pracuje okresowo, aż do uzyskania odpowiedniego uziarnienia mielonego materiału. W większych młynach występują dwa warianty rozładunku. Przy komorze wychylnej komora jest przechylana z pozycji pionowej do poziomej, w której zawieszina zmielonego materiału wypływa do zbiornika. Przy nieruchomej komorze, po otwarciu zaworu spustowego odprowadza się zawieszinę grawitacyjnie lub za pomocą pompy do zbiornika, a mielniki i wirnik pozostają w komorze.

Kształt komory młyna dostosowany jest do rozwiązań wirnika. Stąd wyróżnić można komory walcowe gładkie lub z trzpieniami, walcowo-stożkowe, toroidalne i kształtowe.

Przy mieleniu w sposób ciągły stosuje się cztery rozwiązania konstrukcyjne układu mielenia. Wariant pierwszy, jako typowy układ otwarty, do którego dozowane są: materiał (jeden lub kilka) oraz ciecz. Po „przejściu” zawiesziny materiału lub samego materiału przez młyn, czyli po zmieleniu, zawieszina zmielonego materiału lub suchy materiał odprowadzane są do zbiornika gotowego produktu mielenia. Wariant drugi, bez klasyfikatora ziarnowego z cyrkulacją zawiesziny, często w odmianie z dodatkowym zbiornikiem, którego pojemność może być od 2 do 10 razy większa od pojemności komory młyna mieszadłowego. W tym zbiorniku zachodzi dodatkowe mieszanie i chłodzenie mielonego materiału. Wariant trzeci to młyn

z wbudowanym separatorem, pracujący jako młyn separujący. Wariant czwarty, pracujący jako klasyczny układ zamknięty, czyli z klasyfikacją ziarnową na zewnątrz młyna. Oprócz tych podstawowych czterech wariantów występują jeszcze inne odmiany układów mielących.

Młyny mieszadłowe, w stosunku do często stosowanych młynów grawitacyjnych o tych samych wskaźnikach technologicznych, charakteryzują się [2]:

- znacznie większymi możliwościami technologicznymi, w szczególności możliwością uzyskania produktu mielenia o znacznie drobniejszym uziarnieniu o d_{80} dochodzącym w dużych młynach w przemyśle górniczym do $8\ \mu\text{m}$ oraz węższej klasie ziarnowej,
- mniejszym maksymalnym wymiarem ziaren nadawy o około $4\div 10$ razy,
- niższym o około $2\div 3$ razy zapotrzebowaniem energii na proces mielenia przy wytwarzaniu produktu mielenia o uziarnieniu poniżej $20\ \mu\text{m}$,
- niższą o około $2\div 3$ razy masą młyna,
- mniejszą powierzchnię pod zabudowę młyna $2\div 4$ razy oraz kubaturą młynowni,
- prostotą łączenia komór młyna z dozownikiem nadawy i urządzeniem odbierającym produkt mielenia,
- niższym poziomem ciśnienia akustycznego,
- brak oddziaływań dynamicznych na podłoże.

Wydajność młynów mieszadłowych uwarunkowana jest wymiarami (objętością komory), konstrukcją wirnika, prędkością obrotową wirnika, której odpowiada prędkość obwodowa wirnika, parametrami technologicznymi procesu mielenia i mielonego materiału i może dla tego samego młyna wahać się w znacznie mniejszym zakresie, niż w przypadku młynów wibracyjnych, czy grawitacyjnych. W literaturze brak jest informacji odnośnie metod wyznaczania wydajności młynów mieszadłowych. Nieco więcej informacji dotyczy wyznaczania poboru mocy przez ten młyn. Dwie zależności do wyznaczania mocy P_m tych młynów podano w pracy [1]. Są to:

$$P_{m1} = K_m D^5 n_s^3 \rho_l, \quad P_{m2} = K_v^{1,67} n_s^3 \rho_l$$

gdzie: P_{m1} – moc młyna wyznaczono z wyrażenia używanego do wyznaczenia mocy mieszalników, kW,

K_m – liczba mocy mieszadła, $\text{kW/m}^5\ 1/\text{s}^3\ \text{m}^3/\text{kg}$,

D – średnica zewnętrzna mieszadła, m,

n_s – prędkość obrotowa mieszadła, 1/s,

ρ_l – gęstość mlewa (ładunku), kg/m^3 .

KV – moc jednostkowa przypadająca na jednostkę objętości komory młyna, kW/m^3 ,

P_{m2} – moc młyna wyznaczona z wyrażenia empirycznego, kW.

Znacznie większa szybkość procesu mielenia w młynie mieszadłowym okupiona jest znacząco większym jednostkowym zapotrzebowaniem na energię, nawet do 10 razy [1, 19].

Wynika to ze sposobu działania młyna oraz związanej z nim wartości wskaźnika koncentracji mocy, czyli mocy przypadającej na 1 m^3 komory. W młynach grawitacyjnych kulowych wskaźnik ten wynosi od 15 do 17 kW/m^3 , w młynach wibracyjnych od 45 do 70 kW/m^3 , obrotowo-wibracyjnych od 50 do 62 kW/m^3 , a w mieszadłowych od 150 do 300 kW/m^3 .

Naprężenia jednostkowe oddziałujące na ziarna mielonego materiału, które generują i intensyfikują proces mielenia w młynie mieszadłowym, oblicza się z wyrażenia [24]:

$$SI_m = d^3(\rho_k - \rho_z) v^2$$

gdzie: SI_m – naprężenia jednostkowe przypadające na jednostkę objętości kulki, Nm,

d – średnica kulki, m,

ρ_k – gęstość materiału kulki, kg/m^3 ,

ρ_z – gęstość zawiesiny, kg/m^3 ,

v – prędkość kulki, m/s.

Jednostkowy pobór energii jest w tych młynach stosunkowo duży i bardzo zróżnicowany. Według [20] w zakresie uziarnienia produktu mielenia $10\div 100 \mu\text{m}$, wskaźnik ten jest największy spośród wszystkich młynów i zbliżony do młynów strumieniowych i jest ponad 10 razy większy od wartości tego wskaźnika dla młynów wibracyjnych i innych młynów z mielnikami swobodnymi. Natomiast dla uziarnienia produktu mielenia w zakresie $2\div 8 \mu\text{m}$ według [25] jest najniższy z pośród wszystkich młynów, a przy zakresie tego wskaźnika $100\div 400 \text{ kWh/Mg}$ umożliwia uzyskanie produktu mielenia o średnim wymiarze ziaren około połowę mniejszym niż w młynach grawitacyjnych.

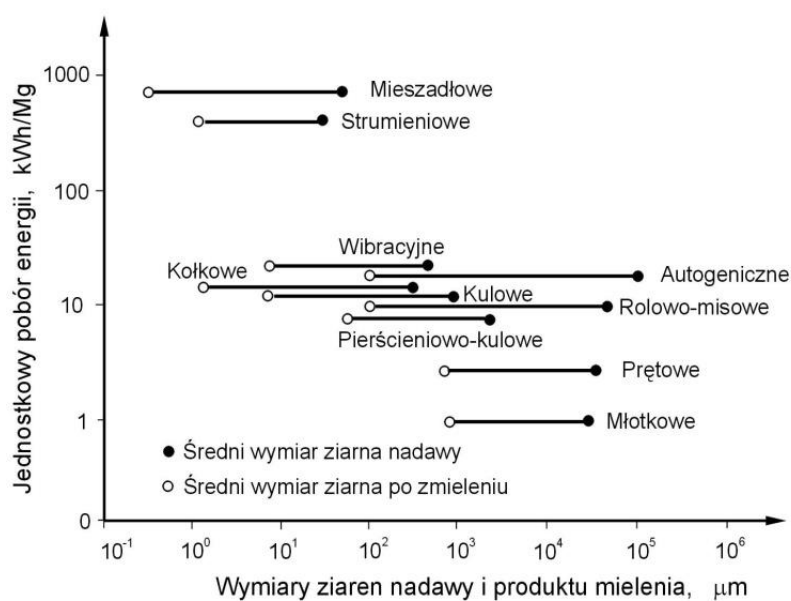
Podstawowe parametry młynów mieszadłowych podano w tabeli 7.1.

Podstawowe parametry techniczne współczesnych młynów mieszadłowych

Tabela 7.1.

Parametry	Zakres
Pojemność komory [dm ³]	10÷46 000
Wydajność młyna [Mg/h]	0,1÷350
Prędkość obwodowa wirnika [m/s]	3÷23
Moc silnika [kW]	5÷8 000
Masa młyna [Mg]	0,2÷750
Masa układu mielącego [Mg]	0,3÷1100

Na rysunku 7.2 zamieszczono porównanie jednostkowego poboru mocy najczęściej stosowanych obecnie standardowych młynów opracowany w 2007 przez Y. Wanga i E. Forssberga [20].



Rys. 7.2. Porównanie jednostkowego poboru mocy w poszczególnych rodzajach młynów [19]

Jednak, w wielu przypadkach jednostkowy pobór mocy w młynach grawitacyjnych, wibracyjnych czy mieszadłowych uzyskuje się w całkowicie innych warunkach technologicznych - głównie przy całkowicie różnym uziarnieniu nadawy porównuje się niedokładnie. Na przykład maksymalny wymiar ziaren nadawy podawanej do młyna grawitacyjnego mieści się w zakresie 10÷60 mm, do młyna wibracyjnego w zakresie 5÷40 mm, a młyna mieszadłowego, w którym najczęściej materiał jest domielany w zakresie 0,5÷3 mm i zwykle pomija się jednostkowy pobór energii wydatkowany na wstępne rozdrobnienie nadawy do tego młyna. Dlatego ten ważny wskaźnik powinien być określany przy tym samym uziarnieniu nadawy i produktu mielenia, z uwzględnieniem poboru energii przez wszystkie maszyny przerobcze oraz pomocnicze instalacji rozdrabniającej.

W świecie jest kilkudziesięciu producentów młynów mieszadłowych. Najbardziej znane firmy to: Union-Process, Eirich, Netsch, Atritor, Metso, Ecertec, Chemco Equipment Company, Alpine, Desvik, ANI-Metprotech, Buhler AG, FLSchmidt, Kubota, Mirodur, Grieser Maschinenbau 198nd Service GmbH, Fryma, Koruma AG, Ginzel, s. r. o, Pro-Chema, Willy A. Bachofen Maschinenfabrik AG. Młyny te produkują również firmy chińskie, koreańskie, hinduskie, rosyjskie oraz z innych krajów. W Polsce produkuje je firma Ichemad-Profarb, Przedsiębiorstwo Techniczno-Handlowe EUROTOM Sp. z o.o., Elcal Machne&Technology.

Elementy robocze tych młynów (kulki, wykładziny komór, elementy wirników, uszczelnienia) produkowane są przez specjalistyczne firmy.

7.2. Młyny z wirnikami pionowymi

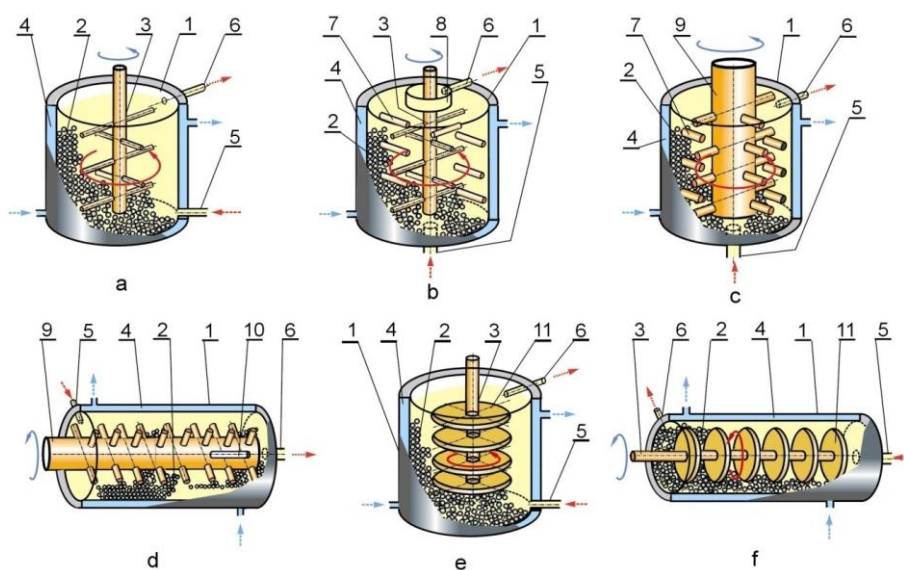
Największe zróżnicowanie budowy mają młyny o niewielkiej (od 20 do 500 kg/h) oraz średniej wydajności (od 0,5 do 10 Mg/h). Sytuacja ta spowodowana jest następującymi względami:

- największym zapotrzebowaniem na młyny o w/w wydajności,
- największym zróżnicowaniem technologii mielenia materiałów w tych technologiach oraz zróżnicowaniem wymagań technologicznych w tych technologiach,
- największą liczbą producentów młynów oraz największą konkurencją rynku producentów,
- najniższymi kosztami inwestycyjnymi zastosowania technologii bazującej na tych młynach,

- najszybszym wprowadzaniem innowacji technicznych w zakresie nowych młynów, modernizacji młynów eksploatowanych oraz ich instalacji.

Schematy budowy i działania współczesnych młynów mieszadłowych o niewielkiej i średniej wydajności – do 10 Mg/h zamieszczono na rysunkach 7.3 ÷ 7.5.

Największe zastosowanie znalazły młyny z wirnikami trzpieniowymi i tarczowymi (rys. 7.3).

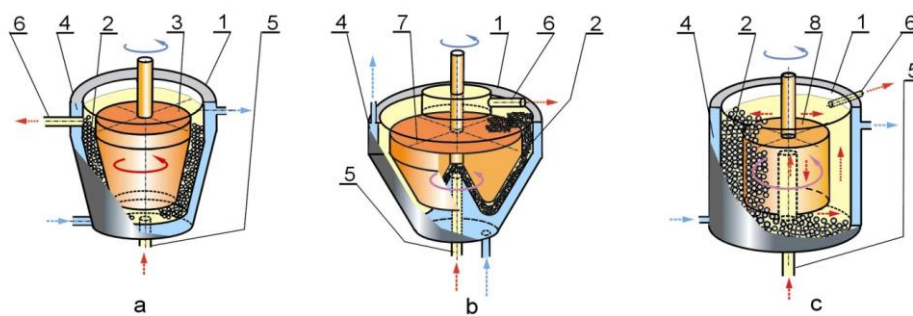


Rys. 7.3. Schematy budowy i działania młynów mieszadłowych z wirnikami trzpieniowymi (kołkowymi) i tarczowymi pełnymi: a – pionowy z wirnikiem trzpieniowym i gładką komorą, b – pionowy z wirnikiem trzpieniowym z komorą z nieruchomymi trzpieniami, c – pionowy z wirnikiem trzpieniowym w kształcie rury z komorą z nieruchomymi trzpieniami, d – poziomy z wirnikiem trzpieniowym w kształcie rury z podłużnymi otworami i gładką komorą, e – pionowy z wirnikiem tarczowym z tarczami pełnymi i gładką komorą, f – poziomy z wirnikiem tarczowym z tarczami pełnymi i gładką komorą, 1 – komora, 2 – mielniki z materiałem, 3 – wirnik pełny z trzpieniami, 4 – płaszcz wodny, 5 – wlot zawiesiny, 6 – wylot produktu mielenia, 7 – trzpień nieruchomy w komorze, 8 – kolektor, 9 – wał z rury, 10 – otwory podłużne w wale rurowym, 11 – tarcze

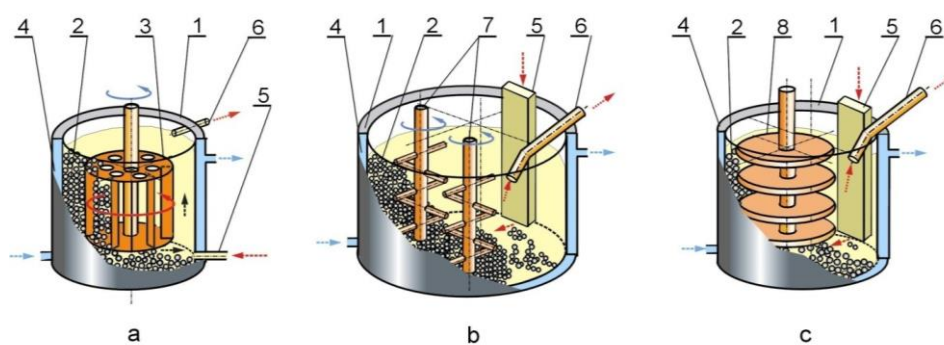
Na rysunku 7.4 przedstawiono schematy młynów o wydajności poniżej 1000 kg/h wyposażonych w wirniki kształtowe, z których największe zastosowanie ma młyn wąskoszczelinowy z wirnikiem w kształcie okrągłej pryzmy (7.4 b) (Coball-Mill) [26], młyn wyposażony w wirnik walcowo-stożkowy to starsza konstrukcja, a młyn wyposażony w wirnik kielichowy opracowano w Politechnice Łódzkiej [27].

Na rysunku 7.5 a zamieszczono schemat młyna z wirnikiem turbinowym przeznaczonym do bardzo drobnego i koloidalnego mielenia, a na rysunkach 7.5 b i c młyny firmy Erich przeznaczone głównie do przemysłu ceramicznego, a także farmaceutycznego – wyposażone w wirniki (trzępieniowe i tarczowe) oraz wykładziny komór wykonanych z korundu, z mielnikami korundowymi.

Rozwiązania konstrukcyjne wybranych młynów mieszadłowych, których schematy budowy przedstawiono na rysunkach: 7.3÷7.5, zaprezentowano na rysunkach 7.6÷7.10.



Rys. 7.4. Schematy budowy i działania młynów mieszadłowych z wirnikami kształtowymi: a - pionowy z wirnikiem walcowo-stożkowym, b - pionowy z wirnikiem w kształcie okrągłej pryzmy - wąskoszczelinowy, c - pionowy z wirnikiem kielichowym, 1 - komora, 2 - mielniki z materiałem, 3 - wirnik walcowo-stożkowy, 4 - płaszcz wodny, 5 - wlot zawiesiny, 6 - wylot produktu mielenia, 7 - wirnik w kształcie okrągłej pryzmy, 8 - wirnik kielichowy



Rys. 7.5. Schematy budowy i działania młynów mieszadłowych z wirnikami kształtowymi: a – pionowy z wirnikiem turbinowym, b – pionowy z dwoma wirnikami trzpieniowymi, c – pionowy z wirnikiem tarczowym, 1 – komora, 2 – mielniki z materiałem, 3 – wirnik turbinowy, 4 – płaszcz wodny, 5 – wlot zawiesiny, 6 – wylot produktu mienienia, 7 – dwa wirniki trzpieniowe, 8 – wirnik tarczowy



a



b

Rys. 7.6. Rozwiązania konstrukcyjne młynów firmy Union Process: a – typ S-50/SD-50 - do mienienia na mokro i sucho, b – typ C60 [28]

W tabeli 7.2 podano podstawowe parametry młynów mieszadłowych firmy Union Process serii C/H [28].

Podstawowe parametrów młynów Union Process serii C/H [28]

Tabela 7.2.

Typ	C-3/ H-3	C-5/ H-5	C-10/ H-10	C-20/ H-20	C-40/ H-40	C-60/ H-60	C-100/ H-100
Objętość komory [dm ³]	14,0	22,8	53,2	102,6	186,2	300	505
Objętość mielników [dm ³]	12,5	20,9	41,8	83,6	167,2	251	418
Moc [kW]	2,2÷4	4÷5,5	7,4÷11	15÷22	29÷44	44÷74	74÷110
Masa bez mielników [kg]	726	863	1634	1816	2951	4313	6322
Wysokość [m]	2,23	2,23	2,64	2,90	3,28	3,78	4,22
Długość [m]	1,02	1,22	1,27	1,32	1,52	1,57	1,66
Szerokość [m]	0,51	0,74	1,02	1,32	1,47	1,57	1,66

Każdy z młynów posiada płaszcz wodny z układem kontroli i stabilizacji temperatury. Na rysunku 7.7 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne młynów pionowych firmy Alpine [29]. Proces mielenia w młynie zamieszczonym na rysunku 7.7 a o handlowej nazwie ATR Vertical Dry Media Mill zachodzi na sucho. Produkt mielenia z tego młyna ma uziarnienie poniżej 10 μm . Do mielenia używa się mielniki o średnicy od 0,2 do 5 mm. Jego standardowe zastosowanie to wytwarzanie proszków wypełniaczy mineralnych, szklivi emalierskich, surowców, suchych proszków gaśniczych, kamienia wapiennego, kwarcu, cyrkonu, talku, pigmentów ceramicznych, dwutlenku tytanu oraz innych materiałów. Przy zastosowaniu klasyfikacji ziarnowej można w nim wytwarzać proszki o uziarnieniu d_{90} poniżej 2 μm , w tym proszki bez zanieczyszczeń metalicznych.

Młyn zamieszczony na rysunku 7.7 b. to młyn o nazwie ANR Vertical Wet Media Mill pracujący na mokro, przeznaczony do ultra drobnego mielenia materiałów średnio twardych, zwłaszcza w przemyśle mineralnym głównie najdrobniej uziarnionych wypełniaczy wapiennych. Firma Alpine oferuje kilka typów maszyn o objętości komory mielenia w przedziale od 10 do 200 dm³, ale jest przygotowana do wyprodukowania młynów o mocy od 45 do 1000 kW.



Rys. 7.7. Rozwiązania konstrukcyjne młynów firmy Alpine:
a – typ ATR do mielenia na sucho, b – typ ANR – do mielenia na mokro bez
zanieczyszczeń metalicznych (z udziałem ceramicznych elementów roboczych
mielników, elementów wirników i wykładzin komory) [29]

Niektóre młyny mieszadłowe mają specjalistyczne zastosowanie, a budowę i działanie dobrane odpowiednio do własności mielonego materiału oraz zachodzącego w nim procesu mielenia (o najkorzystniejszych parametrach budowy i działania młyna). Przykładem takich młynów są młyny amerykańskiej firmy RSG [30] – seria ufg młynów przeznaczonych do mielenia na sucho pyłów energetycznych – fazy stałej UPS pochodzących z elektrowni na paliwo stałe oraz polskiej firmy Ichemad-Profarb produkującej młyny serii PS (na licencji firmy Mirodur) przeznaczone do mielenia na mokro farb i ich komponentów [31] oraz młyny Maxxmill firmy Eirich do mielenia mas ceramicznych.

W tabeli 7.3 podano podstawowe parametry techniczne młynów oferowanych przez amerykańską firmę RSG [30], a na rysunku 7.8 wizualizację młyna serii ufg. Młyny te zastosowano głównie do mielenia na sucho surowców mineralnych, spoiw i popiołów. Ich instalacje standardowo posiadają zewnętrzny klasyfikator ziarnowy. Produkt mielenia ma uziarnienie w zakresie $1\div 40\text{ }\mu\text{m}$, nadawa do 2 mm, a wilgotność poniżej 1%. Informacje firmowe nie zawierają danych o wydajności młynów oraz jednostkowym poborze energii.

Młyny firmy RSG serii ufg różnią się od pozostałych młynów z wirnikiem pionowym usytuowaniem napędu, mianowicie od dołu komory, a w większości znanych młynach napęd usytuowany jest od góry. Napęd wirnika od dołu wymaga specjalnego uszczelnienia, ponieważ popioły zawierają do 30% Al_2O_3 o twardości 9 w skali Mohsa oraz do 40% SiO_2 o twardości 7 w skali Mohsa.

W tabeli 7.4 zawarto podstawowe parametry techniczne młynów oferowanych przez polską firmę Ichemad-Profarb [31], a na rysunku 7.9 standardowy młyn serii PS.

Podstawowe parametry młynów serii UFG – firmy RSG [30]

Tabela 7.3.

Typ	Moc silnika [kW]	Objętość komory [dm ³]	Wymiary [mm]		
			Szerokość	Długość	Wysokość
UFG-10	7,5	15,2	380	760	760
UFG-25	18	42	510	1020	1070
UFG-75	55	192	890	1780	1830
UFG-150	125	251	1070	2110	2030
UFG-300	225	513	1420	2790	2130
UFG-500	375	897	1630	3050	2290
UFG-1000	750	1780	w budowie		
UFG-2000	1500	3380	w budowie		

Podstawowe parametry młynów serii PS firmy Ichemad-Profarb [31]

Tabela 7.4.

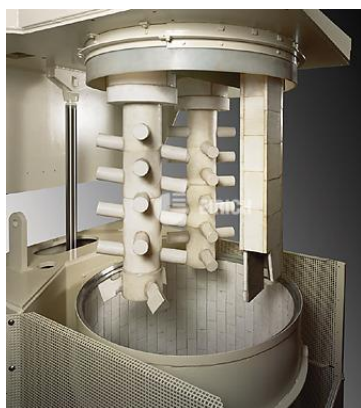
Typ	Moc silnika [kW]	Pojemność komory [dm ³]	Wymiary: dl. x szer. x wys. [mm]	Masa młyna [kg]
PS-1/1,5/2	3	1; 1,5; 2	1100x570x500	150
PS-20	22	20	1400x890x1450	720
PS-50	45	44	2050x1170x1650	1260
PS-100	55	113	2270x1250x1780	1900
PS-200	90	195	2400x1940x1800	2880
PS-500	200	500	5600x1110x1600	4800



Rys. 7.8. Wizualizacja młyna z wirnikiem pionowym serii ufg firmy RSG [30]



Rys. 7.9. Standardowy młyn z wirnikiem poziomym serii firmy Ichemad-Profarb [31]



a

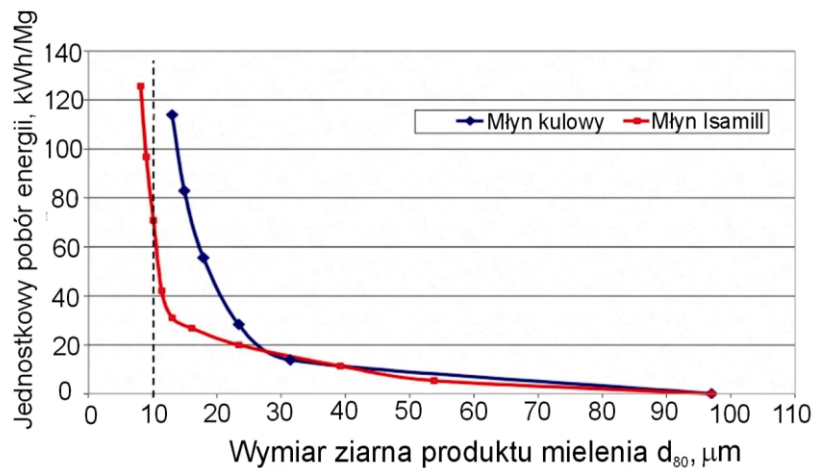


b

Rys. 7.10. Młyny mieszadłowe z dwoma wirnikami firmy Eirich [32]:
a – trzpieniowymi, b – tarczowymi

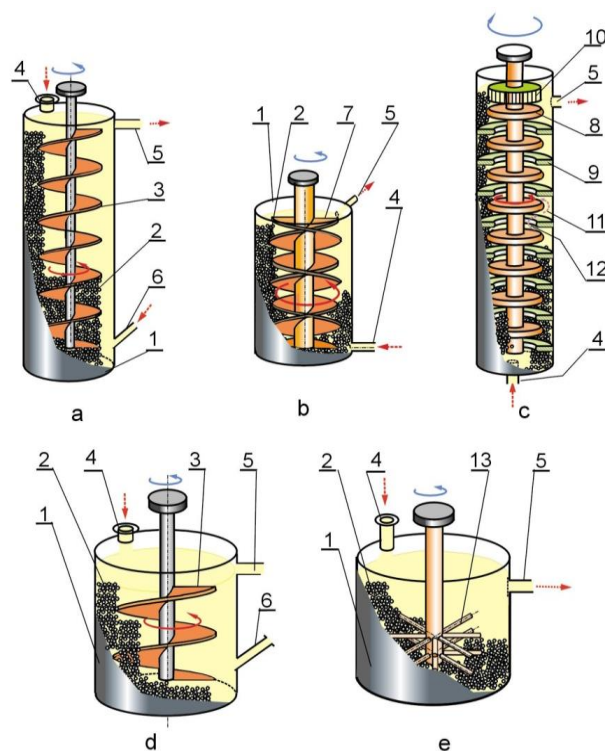
7.3. Młyny o dużej wydajności

Za młyny mieszadłowe o dużej wydajności uważa się młyny o wydajności powyżej 50 Mg/h i zainstalowanej mocy ponad 1 MW. Takie młyny stosuje się głównie w przemyśle górnictwym do bardzo drobnego mielenia, a właściwie do domielania rud. Domielanie występuje wówczas, jeśli uziarnienie nadawy – jej większy udział jest poniżej 1 mm, a wcześniejszym procesem rozdrabniania był proces mielenia, przeprowadzany praktycznie tylko w młynie grawitacyjnym (kulowym, prętowym, AG czy SAG). Według danych literaturowych młyn mieszadłowy jest szczególnie przydatny do tego rodzaju procesu, który oprócz korzystnego rezultatu technologicznego – w zakresie uziarnienia poniżej 25 μm charakteryzuje się niższym niż w młynie kulowym jednostkowym poborem energii (rys. 7. 11) [33].

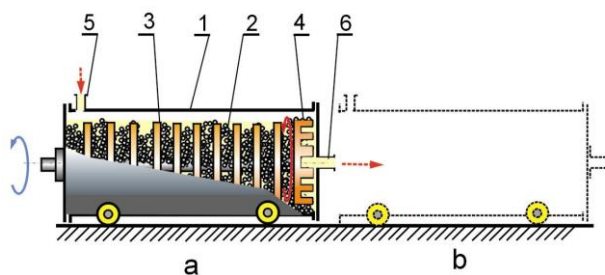


Rys. 7.11. Porównanie jednostkowego poboru energii przy mieleniu koncentratu pirytu w młynie kulowym (mielniki kulki $\varnothing$ 9 mm) z młynem mieszadłowym Isa-Mill (mielniki – ziarna piasku kwarcowego o wymiarze poniżej 2 mm) [33]

Schematy budowy i działania młynów mieszadłowych dużej wydajności zamieszczono na rysunkach: 7.12 – z wirnikami pionowymi i 7.13 – z wirnikami poziomymi.



Rys. 7.12. Schematy budowy i działania dużych młynów mieszadłowych z komorami pionowymi: a – z wirnikiem ślimakowym długim – wieżowy, b – z wirnikiem ślimakowym podwójnym, c – z wirnikiem tarczowym długim i pierścieniami kierującymi, d – z wirnikiem ślimakowym krótkim, e – z wirnikiem trzpieniowym dwu warstwowym, 1 – komora, 2 – mielniki z materiałem, 3 – wirnik ślimakowy, 4 – wlot zawiesiny, 5 – wylot produktu mielenia, 6 – zawrót nadziarna, 7 – wirnik ślimakowy podwójny, 8 – tarcza, 9 – pierścień, 10 – separator, 11 – strefa intensywnego mielenia, 12 – strefa transportu materiału, 13 – trzpień



Rys. 7.13. Schemat budowy i działania dużego młyna mieszadłowego z komorami z wirnikiem tarczowym poziomym: a – położenie komory roboczej, b – z wysuniętą komorą, 1 – komora, 2 – mielniki z materiałem, 3 – wirnik tarczowy, 4 – separator mielników, 5 – wlot zawiesiny, 6 – wylot produktu mielenia

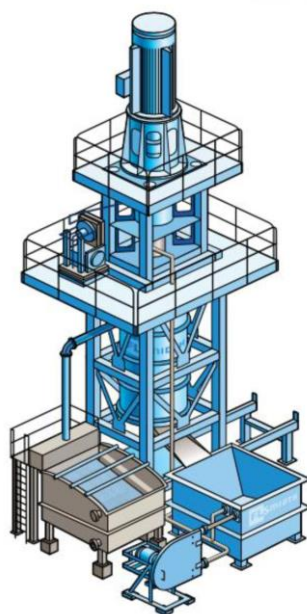
Duże młyny mieszadłowe produkuje kilka firm. Są to: Eirich (Tower Mill), Metso (Vetimili i SMD), FLSchmidt (VXPmill), ISAmill i Japan Tower Mill – współpracująca z firmą Eirich, Outotec, a prace badawcze dotyczące tych młynów prowadzi firma RSG.

Młyny mieszadłowe wieżowe typoszeregu produkowanego przez firmę Eirich [34] wyposażone są w pojedyncze pionowe wirniki ślimakowe (rys. 7.12 a oraz 7.14). Starsze konstrukcje tych młynów wyposażone są w wirniki ślimakowe podwójne (rys. 7.12 b), z których część jednostek stosowana jest do mielenia na sucho [1]. Typoszereg tych młynów zawiera młyny o mocy od 0,4 kW do 1120 kW, o wydajności do 65 Mg/h (suchej masy), przy uziarnieniu nadawy do 10 mm. Młyny te zastosowano do mielenia następujących materiałów: wapienia, rud: żelaza, miedzi, koncentratu miedzi, ołowiu, cynku, odpadów po flotacyjnych cynku, a także cyrkonu, żużla niklu, środków spożywczych (dżemów) oraz wielu związków chemicznych.

Firma FLSmidt oferuje typoszereg młynów mieszadłowych oznaczony symbolem VXP o pojemności komory od 100 do 10 000 dm³ (tab. 7.5) [35]. Są to młyny z wirnikiem pionowym tarczowym różniącym się od młynów z wirnikami tarczowymi zamieszczonych na rysunku 7.12 c. brakiem stałych nieruchomych pierścieni (rys. 7.12 poz. 9). Rysunek aksonometryczny młyna VXP wraz z urządzeniami pomocniczymi zamieszczono na rysunku 7.15, a podstawowe parametry młynów tej serii podano w tabeli 7.5.



Rys. 7.14. Młyn mieszadłowy firmy Eirich [34] z otwartą komorą



Rys. 7.15. Młyn mieszadłowy firmy FLSmidth [35]

Podstawowe parametry młynów mieszadłowych firmy FLSmidth [36]

Tabela 7.5.

Typ	Objętość komory [dm ³]	Prędkość obrotowa wirnika [209ob/min]	Moc silnika [kW]
VXP100	110	764	110/148
VXP250	290	509	132/177
VXP500	480	432	224/300
VXP1000	910	304	337/452
VXP2500	2425	241	699/937
VXP5000	5026	180	1475/1978
VXP10000	10273	140	3000/4023

Typoszereg typowych młynów mieszadłowych to młyny o mocy od 485 do 3355 kW o pojemności komory od 2,47 m³ (VTM-650-WB) do 17,1 m³ (VTM10000-C) [36]. Rozwiązanie konstrukcyjne młyna typoszeregu VTM zamieszczono na rysunkach 7.12 d – schemat oraz 7.16 – uproszczony rysunek z instalacją [37], a podstawowe parametry w tabeli 7.6. Młyn typu VERTIMILL przeznaczony jest do mielenia materiału o uziarnieniu nadawy do 6 mm, do

uziarnienia produktu mielenia poniżej 20 μm . Firma Metso produkuje jeszcze trzy typoszeregi młynów typu Vertimill. Jeden oznaczony pomocniczym symbolem LS – przeznaczony do mielenia CaO, składający się z 9 modeli o mocy od 7,5 do 224 kW o wydajności od 1,4 do 30 Mg/h, drugi oznaczony również pomocniczym symbolem LS – przeznaczony do mielenia żużli i innych materiałów, trzeci symbolem WB – do mielenia na mokro zawiera 12 modeli o mocy od 11 do 375 kW.

Podstawowe parametry młynów mieszadłowych typoszeregu VTM firmy Metso z wirnikiem ślimakowym [36]

Tabela 7.6.

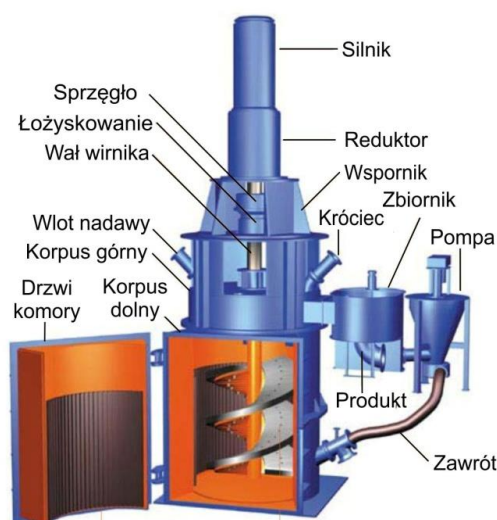
Typ	Wysokość [mm]	Szerokość [mm]	Długość [mm]	Moc silnika [kW]	Masa młyn. Bez mielników [Mg]
VTM-650-WB	12 270	3 250	3 860	485	82,6
VTM-800-WB	13460	3 560	4 060	597	100,4
VTM-1000-WB	13 460	3 660	4 270	746	116,1
VTM-1250-WB	13 460	4 090	4 520	932	125,4
VTM-1500-WB	14 220	4 370	4 570	1118	167,0
VTM-3000-WB	17 590	6 820	6 880	2 237	343,0
VTM-4500-C	18600	6 820	6 880	3355	367,0

Inny typoszereg młynów mieszadłowych typu SMD zawierający cztery modele przeznaczony jest głównie do domielania materiałów o uziarnieniu nadawy do 100 μm do uziarnienia produktu mielenia poniżej 5 μm . Podstawowe parametry młynów tego typoszeregu podano w tabeli 7.7, schemat budowy zamieszczono na rysunku 7.12 e, a rozwiązanie konstrukcyjne na rysunku 7.17.

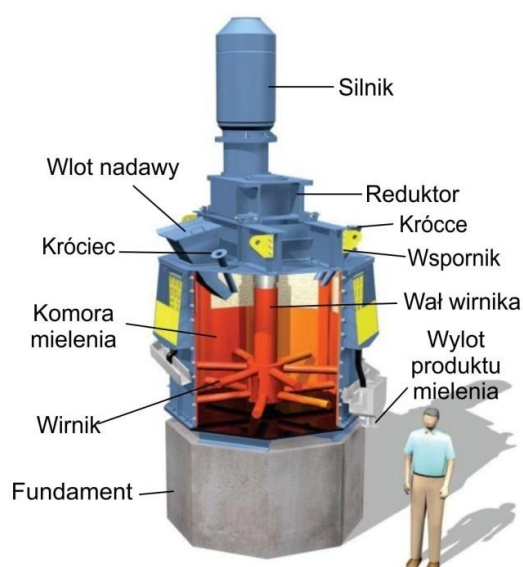
Podstawowe parametry młynów mieszadłowych typoszeregu SMD firmy Metso z wirnikiem trzpieniowym dwuwarstwowym [37]

Tabela 7.7.

Typ	Wysokość [mm]	Szerokość [mm]	Długość [mm]	Moc silnika [kW]	Masa młyn. Bez mielników [Mg]
SMD-90	4215	2130	2130	90	4,02
5MD185	4350	2 275	2 275	185	7,20
SMD355	5 990	2 800	2 800	355	13,45
SMD1100	4 825	4 220	4 220	1 100	27,50



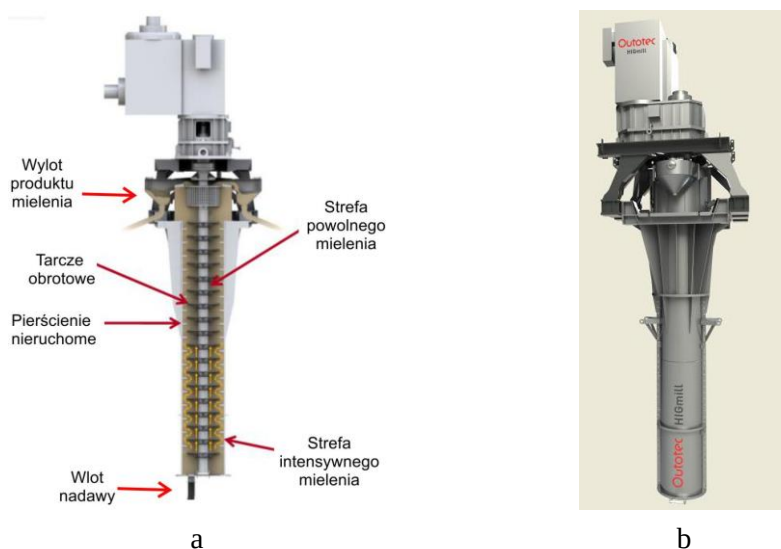
Rys. 7.16. Młyn mieszadłowy serii VTM firmy Metso [37]



Rys. 7.17. Młyn mieszadłowy serii SMD firmy Metso [37]

Młyn o innej budowie wirnika (rys. 7.12 c), czyli wyposażony w tarcze, pomiędzy którymi umieszczono nieruchome – przymocowane do komory pierścienie, których celem jest zmniejszenie prędkości przepływu zawiesiny

przez młyn produkuje firma Outotec pod nazwą HIGmill (High Intensity Grinding Mill). Typoszereg oferowanych młynów HIG podano w tabeli 7.8, przykłady zastosowań w tabeli 7.9, a rozwiązanie konstrukcyjne na rysunku 7.18 [38, 39, 40]. W tabeli 7.8 podano dostępne w publikowanych materiałach firmy Outotec parametry młynów HIG.



Rys. 7.18. Młyn mieszadłowy typu HIG firmy Outotec [38, 39]:
a - schemat działania, b - młyn

Podstawowe parametry młynów mieszadłowych firmy Outotec [38, 39, 40]

Tabela 7.8.

Typ Parametry	HIG 130	HIG 200	HIG 500	HIG 700	HIG 1100	HIG 1600	HIG 2300	HIG 3000	HIG 3500	HIG 4000	HIG 5000
Moc [kW]	130	200	500	700	1100	1600	2300	3000	3500	4000	5000
Wysokość [m]							9,0				12,9
Objętość komory [m ³]	0,4										20
Średnica wirnika [m]							1,3				1,6

Uwaga: Tabela zawiera parametry podane przez firmę Outotec

Podstawowe parametry młynów mieszadłowych firmy Outotec [38, 39, 40]

Tabela 7.9.

Parametry	Typ	HIG1600	HIG900	HIG5000	HIG3500	HIG500
Moc silnika [kW]		1,600	700	5.000 kW	3,500 kW	300 kW
Mielony materiał		Ruda miedzi	Ruda miedzi	Ruda miedzi	Ruda miedzi	Ruda molibdenu
Wydajność [Mg/h]		118	51	brak danych	287	34
Nadawa D_{80} [μm]		212	50	brak danych	75	50
Produkt mielenia d_{80} [μm]		35	20	brak danych	30÷40	40
Rok budowy		2014	2014	2016	2017	2017

Największe zastosowanie w przemyśle górnictwem – przy mieleniu rud znalazł młyn o handlowej nazwie IsaMill – z wirnikiem poziomym tarczowym, którego schemat budowy przedstawiono na rysunkach 7.1 b i 7.13. Podstawowe parametry młynów IsaMill podano w tabeli 7.10. [41] Sposób pracy tego młyna zamieszczono na rysunku 7.19 [42], a rozwiązania konstrukcyjne na rysunkach 7.20 i 7.21.

Młyn M50 000 jest największym młynem mieszadłowym, jaki dotychczas zbudowano. Pojemność jego komory wynosi 46 m³, a moc 8 MW. Młyn kulowy o tej samej mocy ma komorę o średnicy 5,6 m, długości 16,5 m i pojemność komory 406 m³ [43], czyli około 9 razy większą.

Podstawowe parametry młynów mieszadłowych firmy IsaMill [41]

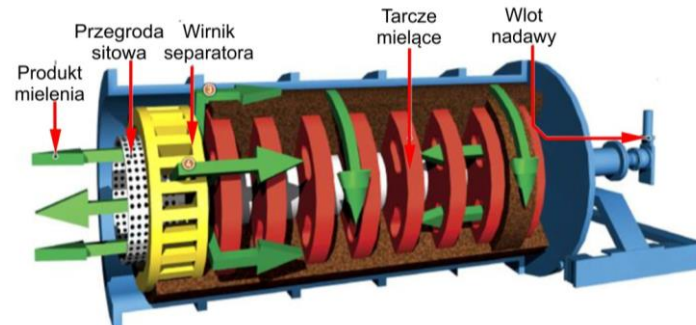
Tabela 7.10.

Parametry	Typ	M1000	M3000	M5000	M10.000	M50.000
Objętość komory [dm ³]		1 000	3 000	5 000	10 000	46 000
Moc silnika [kW]		500	1 120	1 500	3 000	8 000
Masa młyna ¹ [Mg]		13,5	25	30	62	126
Długość [m]		10	16	18	22	34
Szerokość ² [m]		1,4	3,5	3,5	3,5	4,7
Wysokość ² [m]		1,2	2,7	2,7	3,4	5,4

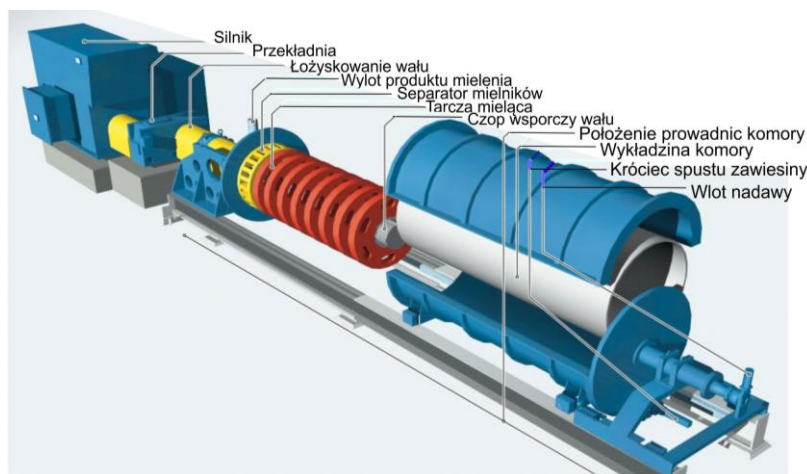
¹ – bez silnika i mielników, ² – z silnikiem TBC

Do 2011 roku w Afryce w przemyśle górnictwym przy mieleniu rud [44] zastosowano 21 młynów IsaMill M10 000, dwa młyny IsaMill M3 000, sześć młynów firmy Metso SMD 355, pięć młynów Metso SMD 185/18,5, dwa młyny Deswik-2000, oraz po jednym młynie Deswik-1000, oraz Deswik-500. Młynów IsaMill zastosowano najwięcej, a ich łączna zainstalowana moc wynosi 66 MW, natomiast moc młynów, które wszystkie zastosowano jako młyny domielające wynosi 3 MW, a młynów Deswik 2,86 MW.

Młyny IsaMill charakteryzuje największa moc jednostkowa spośród wszystkich młynów mieszadłowych – dochodząca do 300 kW/m^3 . W młynach typu Vertimill moc ta wynosi około 40 kW/m^3 , a w młynach HIG osiąga 250 kW/m^3 . Jednocześnie młyn ten posiada największą prędkość obwodową elementów roboczych – tarcz. Istotną nowością tego młyna jest podwójna separacja mielników. Pierwszy stopień separacji zachodzi na obrotowym wirniku separatora, a drugi na nieruchomej przegrodzie sitowej (rys. 7.19). Zaletami tego młyna są: niewielka wysokość, łatwa wymiana tarcz rozdrabniających i wykładziny komory.



Rys. 7. 19. Sposób pracy – działania młyna mieszadłowego typu IsaMill [42]



Rys. 7. 20. Budowa młyna mieszadłowego typu IsaMill [42]

Na rysunku 7.21 zamieszczono rozwiązania konstrukcyjne młynów mieszadłowych IsaMill M1000 oraz M 3000.



Rys. 7.21. Budowa młyna mieszadłowego typu IsaMill [45]:
a – młyn M1000, b – młyn M3000

7.4. Młyny specjalne i laboratoryjne

Do mieszadłowych młynów specjalnych zalicza się młyny stosowane do wytwarzania nanoproszków farmaceutyków. Producentem takich młynów jest firma Netsch, która oferuje kilka ich typów specjalizowanych jednostek dla przemysłu ceramicznego, chemicznego – zwłaszcza mielenia pigmentów i farb, spożywczego (mielenia czekolady) i wielu innych materiałów. Firma ta oferuje młyn Zeta RS – zwany młynem manometrycznym, który przeznaczony jest do mielenia na mokro z użyciem mielników o średnicy od 50 do 300 μm [46]. Na rysunku 7.22 zamieszczono młyny firmy Netsch „nanometryczny” i farmaceutyczny spełniający wymagania GMP.

Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych laboratoryjnych młynów mieszadłowych zamieszczono na rysunku 7.23.

Młyn laboratoryjny firmy Netsch (rys. 7.23 a) posiada komory o pojemności od 70 do 500 cm^3 . Produkowany jest w trzech wielkościach tylko do mielenia materiałów bez zanieczyszczeń metalicznych.

Natomiast młyn MM-C-2 - opracowany w 2000 roku przez J. Sidora dla Politechniki Śląskiej, posiada możliwość mielenia materiałów metalicznych oraz innych bez zanieczyszczeń metalicznych (rys. 7.23 b). Umożliwia to wyposażenie go w dwa zestawy elementów roboczych: metalowy - do mielenia proszków metalicznych oraz niemetalowy do mielenia materiałów bez zanieczyszczeń metalicznych. W zestawie metalowym znajdują się wszystkie robocze elementy wykonane ze stali odpornej na ścieranie oraz korozję, czyli komora o pojemności 2 dm^3 , wirnik trzpieniowy oraz kulki. Drugi zestaw

elementów roboczych składa się z komory wykonanej z odpornego na ścieranie tworzywa polimerowego, wirnika trzpieniowego oraz kulek ceramicznych.

Wymienne wirniki trzpieniowe mocowane są w samozaciskowym uchwycie umieszczonym na wale biernym przekładni pasowej. Uchwyt ten zapewnia szybkie odłączenie wirnika od napędu podczas operacji wyjmowania komory z młyna.



a



b

Rys. 7.22. Budowa młynów mieszadłowych firmy Netsch [47]:

- a – typ Zeta RS – do mielenia materiałów do skali nano,
b – Delta Vita – do mielenia środków farmaceutycznych.



a



b

Rys. 7.23. Laboratoryjne młyny mieszadłowe: a – firmy Netsch Mikroseries [47], b – młyn MM-C-2 do mielenia materiałów metalicznych w atmosferze gazu obojętnego w komorze metalowej - z lewej strony oraz tworzyw ceramicznych i chemicznych w komorze z prawej strony (opracowany przez J.Sidora w 2000 roku dla Politechniki Śląskiej) (Foto J. Sidor)

W młynie MM-C-2 do mielenia proszków metalicznych i metaloceramicznych używa się metalicznych elementów roboczych wirnika, komory oraz kulek o średnicy od 0,3 do 5 mm. Aby zapobiec procesowi utleniania proszku podczas mielenia na sucho komora przewietrzana jest gazem obojętnym - argonem. Separator proszku umieszczony w pokrywie komory stalowej eliminuje możliwość wydostawania się proszku podczas jej przewietrzania.

Mielenie materiałów bez zanieczyszczeń metalicznych umożliwia drugi zestaw elementów roboczych. Komora polimerowa umieszczana jest w płaszczu wodnym - tym samym co komora stalowa. Do napędu wirników tego młyna zastosowano napęd o bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej. Młyn ten przystosowany jest do pracy w sposób okresowy.

Literatura

1. Höfl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985.
2. Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1989
3. Pasher C.I. Crushing and Grinding Process Handbook Ed. J. Wiley, Chichester 1987
4. Jankovic A., Walery W.: Cement Grinding Optimization, www.metso.com
5. <https://www.hmicronpowder.com/products/product/alpine-atr-vertical-dry-media-mill>
6. Tamblyn R.J.: Analysis of Energy Requirements in Stirred Media Mills, School of Chemical Engineering. The University of Birmingham 2009
7. www.groshea.com
8. www.eirich.com
9. www.netzsch-grinding.com
10. www.unionprocess.com
11. www.atritor.com
12. www.ecertec.com
13. www.buhlergroup.com
14. www.frymakoruma.com
15. Rule C. M.: Stirred milling – new comminution technology in PGM industry. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, Vol. 111, pp. 101-107
16. Basics in Mineral Processing, Edition 7, 2015, www.metso.com

17. Isa Mill Breaking the Boundaries. High intensity energy efficient grinding providing versatile solutions to the mineral industry. © Copyright 2012 Xstrata Technology XTT 2005A 06/12
18. TowerMill – Agitated media mill for wet grinding of ores and minerals. <http://www.eirich.com/en/tower-mill>
19. Outotec HIG Mills. © Copyright 2012 Outotec Oyj, www.outotec.com
20. Wang Y., Forssberg E. : Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution. *China Particuology*, 2007, 5 (3) pp. 193-201
21. Sidor J.: Postęp techniczny w konstrukcji młynów stosowanych w procesach bardzo drobnego mielenia Powder & Bulk. 2012 nr 6, s. 26–34
22. Sidor J.: Młyny mieszadłowe do mielenia rud. *Nowoczesne Metody Eksploatacji Węgla i Skał Zwięzłych: Monografia*, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie. Faculty of Mechanical Engineering and Robotics. Department of Mining, Dressing and Transporting Machines, 2013. s. 426–437
23. Sidor J.: Zastosowanie młynów mieszadłowych w procesach bardzo drobnego mielenia. *Materiały Ceramiczne*. Kraków 2013. t. 65 nr 2, s. 239–244
24. Kwade A., Blecher L., Schwedes J.: Motion and stress intensity of grinding beads in a stirred media mill. Part 2 Stress intensity and its effect in comminution. *Powder Technology*, 1986 (1) 69-76
25. Szegvari A., Yang M.: Attritor Grinding and Dispersing Equipment. Union Press Inc. Akron Ohio, As presented Seminar on “Dispersion of Pigments and Resins in Fluid Media, Kent State University, April 29, 1999
26. www.frymakoruma.com
27. Heim A.: Monodispersyjność układów mielonych w młynach perełkowych. *Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii*, 26 (1992) s.49-55
28. <http://www.unionprocess.com/news2009-05.html>
29. <https://www.hmicronpowder.com/products/product/alpine-atr-vertical-dry-media-mill>
30. http://www.airclassify.com/dry_media_mill.htm
31. www.ichemad-profarb.com
32. <http://www.eirichusa.com/products/eirich/maxxmill-agitated-media-mill>
33. Paese J.D., Young M.F., Curry D.C.: Fine Grinding as Enabling Technology – The IsaMill 2011
34. <http://www.eirich.com/en/tower-mill>

35. FLSmidth VXPmill. www.flsmidth.com Rev10/20/2014-al-us
36. Basics in mineral processing. Edition 10.2015 Metso. www.metso.com
37. Stirred milling & Pressure Filtration Technology at work for you. www.metso.com
38. Outotec HIGmills; www.outotec.com
39. 3/18/2015, Presentation © Outotec, www.outotec.com
40. Lehto H., Paz H. A., Roitto I., Åstholm M.: Outotec HIGmills; A Fine Grinding Technology 23rd International Mining Congress & Exhibition of Turkey • 16-19 April 2013 Antalya. pp. 245-250
41. IsaMill™ Breaking the boundaries high intensity, energy efficient grinding providing versatile solutions to the minerals industry. XTT 2005A 06/12. www.isamill.com
42. Rasmussen G., Tommy Do, Larson M., Barns K.: Evolution of The Isamill Into Magnetite Processing. www.isamill.com
43. FLSmidth ball mill for cement grinding. C 11-10 300-1-ENG, www.flsmidth.com
44. Rule C.M.: The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, Vol. 111, pp. 101-107
45. Stirred Mill Technology www.isamill.com/www.xstratatech.com
46. Mielenie i dyspersja, G&D Katalog produktów Netzsch /28 –PL 01/13, www.netzsch.com
47. <http://www.weblande.com/wet-micronnano-grinding-equipment/?lang=en>

8. Młyny wibracyjne

8.1. Problematyka młynów wibracyjnych

Młyny wibracyjne w literaturze technicznej anglojęzycznej nazywane są: *vibratory mill*, *vibration mill*, *vibrational mill* oraz *vibrating mill*, a w języku niemieckim *Schwingmühle*. Pierwszy patent chroniący rozwiązanie techniczne młyna wibracyjnego zgłoszono w Niemczech w roku 1911 (DRP-233164) [1]. Jednak praktyczne zastosowanie młyna wibracyjnego według Lowrisona [2] zrealizowano dopiero w połowie lat trzydziestych ubiegłego wieku w Niemczech, a producentem pierwszego młyna wibracyjnego była firma Siebtechnik, która młyny wibracyjne produkuje do chwili obecnej [3].

Młyny wibracyjne powstały jako pewna alternatywa młynów grawitacyjnych, w których liczba oddziaływań mielników na mielony materiał oraz energia kinetyczna swobodnych mielników (niezbędna do rozdrabniania) ograniczone są przez przyspieszenie ziemskie oraz wymiary komory młyna. Takiego ograniczenia nie mają młyny wibracyjne, ponieważ w nich na ilość oddziaływań mielników oraz na ich energię, zasadniczy wpływ mają parametry ruchu drgającego komory, czyli częstotliwość, amplituda drgań oraz jej trajektoria, a na te parametry mają wpływ projektant i użytkownik młyna. Dominująca ilość młynów wibracyjnych to nadrezonansowe maszyny wibracyjne wyposażone w zespoły robocze (drgające) utworzone przez jedną lub więcej komór (2; 3; 4; 6) zintegrowanych w konstrukcji wsporczej z jednym lub dwoma zsynchronizowanymi wibratorami bezwładnościowymi. Zespoły te podparte są na elementach sprężystych zapewniających możliwość ruchu drgającego zespołu roboczego – dzięki akumulacji energii. Stosunek częstotliwości roboczej zespołu roboczego młyna do częstotliwości rezonansowej mieści się najczęściej w zakresie 4÷5.

Młyny wibracyjne znalazły zastosowanie w większości technologii wytwarzania proszków o bardzo zróżnicowanych własnościach fizycznych. Stosuje się je we wszystkich rodzajach procesu mielenia, to jest:

- wstępnego do uziarnienia produktu mielenia poniżej 0,5 mm,
- drobnego – poniżej 100 μm ,
- bardzo drobnego – poniżej 10 μm ,
- koloidalnego – poniżej 2 μm ,
- w skali nano – poniżej 200 nm,
- do aktywacji powierzchniowej proszków,

- jako reaktory mechano-chemiczne, chemiczne, metalurgiczne (do wytwarzania stopów i czystych metali o najwyższej czystości),
- do uszlachetniania powierzchni ziaren proszków (otoczkowanie),
- intensywnego mieszania kilku komponentów o zróżnicowanych ilościach,
- jako laboratoryjne młyny wibracyjne stosowane są powszechnie do przygotowania próbek do celów analitycznych (analiz fizycznych, chemicznych, mineralogicznych), a także próbek do badań mikrobiologicznych, spektroskopowych oraz genetycznych (DNA).

Wydajność większości produkowanych młynów w poszczególnych technologiach wynosi:

- $0,02 \div 60$ Mg/h - w procesach ciągłego mielenia w środowisku powietrza i wody,
- $0,02 \div 2$ Mg/h, w procesach okresowego mielenia w środowisku powietrza i wody,
- $0,1 \div 100$ kg/h w technologiach specjalnych, w procesach mielenia w sposób ciągły lub okresowy, w specjalnych warunkach (ze stabilizacją temperatury mielenia w zakresie od 200°C do -60°C (czyli jako mielenia kriogeniczne), w atmosferze gazu obojętnego (argonu, CO_2 i innych), w środowisku cieczy innych niż woda.

Maksymalny wymiar ziaren nadawy podawanej do większości młynów wibracyjnych uwarunkowany jest rodzajem mielonego materiału, jego własnościami fizycznymi, w szczególności podatnością na mielenie, technologią mielenia oraz wymaganiami uziarnienia produktu mielenia i wynosi dla dominującej większości młynów:

- do 40 mm – przy mieleniu wstępnym i drobnym,
- do 10 mm – przy mieleniu bardzo drobnym,
- do 3 mm – przy mieleniu koloidalnym,
- do 0,5 mm – przy mieleniu w skali nano.
- wyjątek stanowią duże młyny chińskie, do których nadawa powinna mieć maksymalny wymiar ziaren poniżej 1 mm [4].

Młyny wibracyjne cechuje bardzo zróżnicowana budowa oraz zastosowanie. Użytkuje się je jako młyny laboratoryjne o pojemnościach komór od kilku cm^3 do 5 dm^3 . Dominująca większość przemysłowych młynów wibracyjnych oferowanych przez firmy europejskie, amerykańskie i azjatyckie

ma pojemność komór mielących od 20 dm³ do 2,8 m³. Moc napędów tych młynów nie przekracza 200 kW, a największe zainstalowane moce silników 200÷2000 kW mają młyny chińskie. Są to młyny o dużej jak na młyny wibracyjne pojemności komór od 10 do 100 m³ [4]. Średnice komór większości młynów wibracyjnych mieszczą się w zakresie 0,2÷0,8 m, a młynów chińskich 1,5÷3,5 m. Długości komór, uwarunkowane ich średnicą, wynoszą od 0,5 do 4 m, a młynów chińskich od 1,5 do 15 m [4].

Częstotliwości drgań młynów wibracyjnych mieszczą się w zakresie 16÷25 Hz, przy czym większość młynów ma częstotliwość drgań około 16 Hz. Amplituda drgań większości młynów mieści się w zakresie 3÷12 mm, a największych młynów około 4 mm.

Szybki rozwój młynów wibracyjnych rozpoczął się w drugiej połowie dwudziestego wieku. Przyczyniły się do tego prace: Bachmanna, Kießkalta, Linke'go, Batela, Rose'a. W latach siedemdziesiątych ubiegłego wieku młyny wibracyjne znajdowały się w programach produkcyjnych firm niemieckich: (Gämmerler, Humboldt, Siebtechnik, Salzgitter, Aubema, czeskiej (PSP Engineering), angielskiej (Boulton), amerykańskich (Metso, GeneralKinematics, Sweco) oraz kilku rosyjskich. Pod koniec dwudziestego wieku młyny wibracyjne pojawiły się w programach produkcyjnych firm japońskich, chińskich, hinduskich, tureckich, koreańskich, rosyjskich. Były to znane konstrukcje licencyjne, ale pojawiły się także nowe. Na przykład szereg nowych konstrukcji młynów oferują trzy firmy z Kazachstanu.

Obecnie oferowane są nowe rozwiązania młynów o eliptycznej trajektorii amplitudy drgań [3, 4, 5]. Na rynku oferowanych jest również kilka nowych konstrukcji o kołowej trajektorii amplitudy drgań i kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego przeznaczonych do bardzo drobnego mielenia przy wydajności poniżej 5 Mg/h. W Polsce nie produkuje się ich seryjnie, ale zastosowano praktycznie kilka takich młynów. Są to najczęściej prototypowe młyny opracowane przez J. Sidora w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie.

Nowe rozwiązania konstrukcyjne młynów wibracyjnych są przedmiotem prac badawczych i rozwojowych technologii mielenia wibracyjnego realizowanych w wielu ośrodkach, na przykład: Technische Universität (TU) w Claushal [6], University of Western Australia [7], w Rosji [8, 9], w USA [10] a także w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie [11, 12 13, 14, 15] oraz w wielu ośrodkach badawczych firm produkujących młyny.

W Technische Universität w Claushal prowadzi się prace nad młynami: o eliptycznej trajektorii drgań, do mielenia w ciekłym azocie oraz o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego.

W Rosji w firmie Vibrocom pracuje się nad młynami o trójpłaszczyznowej trajektorii drgań, a w firmie Activator nad młynami o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego.

W Akademii Górniczo-Hutniczej prace nad nowymi konstrukcjami młynów wibracyjnych prowadzone są od 1970 roku. Cele tych prac obejmują:

- badania eksperymentalne procesu mielenia wibracyjnego,
- opracowanie modeli procesowych i mechanicznych młynów wibracyjnych,
- symulacje komputerowe procesu mielenia wibracyjnego i młynów wibracyjnych,
- opracowanie konstrukcji młynów o niskiej szkodliwości oddziaływania na otoczenie przy zachowaniu dobrych parametrów technologicznych.

Rezultatem tych prac są: trzy prace doktorskie, rozprawa habilitacyjna [12], książka [16], 6 patentów, 168 publikacji krajowych i zagranicznych oraz zastosowanie w przemyśle 8 prototypowych przemysłowych młynów obrotowo-wibracyjnych, 5 prototypowych młynów wibracyjnych o niskiej częstotliwości drgań o pojemności komór: 80 dm³, 150 dm³, 200 dm³ oraz 350 dm³ oraz w praktyce laboratoryjnej: 33 młyny obrotowo-wibracyjne i wibracyjne o zróżnicowanych specjalizowanych konstrukcjach, w tym młyny do wytwarzania mikro i nanoproszków. Pojemności komór młynów laboratoryjnych wynoszą: od 0,1 dm³ do 5 dm³. Można w nich prowadzić proces mielenia na mokro na sucho, w komorach z wykładziną metalową, polimerową, korundową oraz w atmosferze gazu obojętnego.

Młyny wibracyjne, w stosunku do często stosowanych młynów grawitacyjnych o tych samych wskaźnikach technologicznych, charakteryzują się [2]:

- znacznie większymi możliwościami technologicznymi, w szczególności możliwością uzyskania produktu mielenia o znacznie drobniejszym uziarnieniu, węższej klasie ziarnowej, ostrych krawędziach ziaren oraz możliwością mielenia materiałów o ziarnach płytkowych i (np. miki) oraz igiełkowych (włókna szklanego, azbestu),
- niższym o około 4÷10 razy zapotrzebowaniem energii na proces mielenia,
- niższą o około 4÷5 razy masą młyna i niższym kosztem mielników 6÷8 razy,

- mniejszą powierzchnię zabudowy młyna 3÷4 razy oraz kubaturę młynowni 4÷20 razy,
- prostotą łączenia komór młyna z zasilaczem i urządzeniem odbierającym produkt mielenia.

W stosunku do młynów mieszadłowych młyny wibracyjne charakteryzują się:

- niższym poborem energii na proces mielenia o około 3÷10 razy,
- większym maksymalnym wymiarem ziaren nadawy o około 4÷10 razy,
- mniej skomplikowanym układem mielenia i łatwiejszą obsługą.

W stosunku do młynów strumieniowych młyny wibracyjne cechują się:

- niższym poborem energii na proces mielenia o około 6÷10 razy,
- większym maksymalnym wymiarem ziaren nadawy o około 4÷8 razy,
- możliwością mielenia materiałów tworzących z powietrzem mieszanek wybuchowe.

Starsze konstrukcje młynów wibracyjnych cechowała duża szkodliwość oddziaływania na otoczenie: ciśnienie akustyczne 95÷120 dB oraz duże obciążenia dynamiczne przenoszone na podłoże. Postęp techniczny w zakresie układów wibroizolacji, obudów dźwiękochłonna-izolacyjnych w znacznym stopniu wyeliminował te wady. Opracowanie nowych łożysk specjalnych do maszyn wibracyjnych, w tym łożysk z elementami ceramicznymi, mogących pracować bez chłodzenia w temperaturach do 400°C, znacznie zwiększyło możliwości budowy większych młynów. Nastąpił również znaczny postęp oraz obniżenie kosztów aparatury monitorującej temperaturę łożysk młynów.

Podstawowy podział przemysłowych młynów wibracyjnych uwzględnia kształt komory mielącej i wyróżnia młyny: rurowe, toroidalne i korytowe – rzadko stosowane.

Podział drugi wyróżnia młyny ze względu na rodzaj wymuszenia ruchu drgającego i budowę wibratora, czyli:

- z wymuszeniem bezwładnościowym wibratorem jednomasowym,
- z wymuszeniem bezwładnościowym wibratorem dwumasowym synchronizowanym przekładnią pasową z pasem zębatym,
- z wymuszeniem bezwładnościowym wibratorem dwumasowym wibratorem synchronicznym,
- z wibratorem kinematycznym.

Ważny podział związany jest z trajektorią drgań i wyróżnia młyny o trajektorii:

- qusikołowej,
- eliptycznej,
- kołowej,
- trójpłaszczyznowej.

Inny podział dzieli je ze względu na charakterystykę ich pracy i wyróżnia młyny:

- nadrezonansowe,
- podrezonansowe,
- pracujące w pobliżu rezonansu.

Pozostały podział uwzględnia zastosowane w nich środowisko mielenia. Stąd wyróżnia się młyny mielące na mokro lub sucho (z aeracją lub bez aeracji) oraz w atmosferze gazu obojętnego. Podział młynów wibracyjnych ze względu na rodzaj stosowanych mielników, jaki ma miejsce w młynach grawitacyjnych (kulowe, cylpepsowe, prętowe, przy czym pręty stosowane są tylko w młynach rurowych) nie jest stosowany.

Zdecydowanie największa ilość tych młynów to młyny rurowe. Wśród tych młynów wyróżnić można młyny jednokomorowe lub wielokomorowe z liczbą komór: 2, 3, 4 i 6.

Młyny te mają najczęściej qusikołową trajektorię drgań, a w ruch drgający wprowadzane są przez bezwładnościowy wibrator jedno lub dwu masowy.

Kołową trajektorię drgań mają młyny z wymuszeniem kinematycznym, a trajektorię eliptyczną młyny, z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym, który mogą tworzyć jeden, dwa lub trzy moduły połączone wałami. Młyny te mają poziome osie geometryczne wałów wibratora i usytuowane w płaszczyźnie poziomej.

Trójpłaszczyznową (przestrzenną) trajektorię drgań mają młyny toroidalne, w których jednomasowy wibrator bezwładnościowy o pionowej osi geometrycznej usytuowany jest w środku ciężkości toroidalnej lub kształcie zbliżonym do toroidu, komory młyna.

Zespół roboczy młyna wibracyjnego wprowadzany jest w ruch drgający przez wibrator. Siłę wibracyjną F wibratora bezwładnościowego, którego schemat budowy zamieszczono na rysunku 8.1 oblicza się z wyrażenia:

$$F = m_o e \omega^2$$

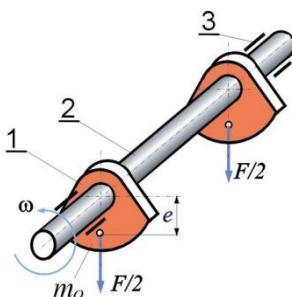
gdzie : F – siła wymuszająca ruch drgający [N],

m_o – masa zespołu obciążników na jednym wale lub na dwóch wałach, [kg],

e – odległość środka ciężkości obciążników od osi obrotu wału, [m],

ω – prędkość kątowna wału wibratora, [rad/s].

Wydajność młynów wibracyjnych uwarunkowana jest głównie parametrami technologicznymi mielonego materiału oraz warunkami mielenia i może dla tego samego młyna wahać się w bardzo szerokim zakresie, wielokrotnie większym niż w przypadku młynów grawitacyjnych. W tabeli 8.1 podano wpływ rodzaju mielonego materiału oraz parametrów uziarnienia nadawy i produktu mielenia kilku materiałów na wydajność tego samego młyna o tych samych parametrach ruchu drgającego komory [21].



Rys. 8.1. Schemat budowy jednomasowego wibratora bezwładnościowego:

1 – obciążnik, 2 – wał, 3 – łożysko

Parametry procesu mielenia wibracyjnego w młynie ESM-656 [17, 18]

Tabela 8.1.

Parametry technologiczne	Rodzaj mielonego materiału					
	Węglik krzemu	Proszek metalu 10% wolframu	Tlenek cyrkonu ^a	Żużel tantalu z niobem	Kwarc	Żużel wielkopiecowy
Uziarnienie nadawy	100% <16 μm	100% <30 mm	100% <10 mm	100% <2 mm	100% <0,1mm	100% <20 mm
Uziarnienie produktu mielenia	100% <8 μm	100% < 500 μm	100% <11 μm	100% <100 μm	100% <40 μm	100% <3 mm
Wydajność [Mg/h]	0,30	1,00	0,017	0,40	2,00	3,00
Jednostkowy pobór energii [kWh/Mg]	180	33	1500	112	27	15

^a – wykładzina komory i mielniki ceramiczne – 1 moduł młyna

Przy mieleniu materiałów, oprócz tlenku cyrkonu, młyn miał wykładzinę i mielniki stalowe oraz dwa moduły czyli dwukrotnie większą objętość komory. Przy mieleniu tlenku cyrkonu młyn miał jeden moduł, dlatego wydajność młyna dla tej samej objętości komory będzie dla tego materiału w przybliżeniu dwukrotnie większa, a jednostkowy pobór energii około dwukrotnie mniejszy. Niemniej jednak wydajność będzie około 88 razy mniejsza od wydajności młyna przy mieleniu żużla wielkopiecowego, a jednostkowy pobór energii około 50 razy większy. Literatura zaleca wyznaczanie wydajności młynów wibracyjnych tylko na podstawie testów przeprowadzanych w młynach doświadczalnych.

Na wydajność rurowych młynów wibracyjnych największy wpływ mają nie tylko parametry ruchu drgającego, ale również względy technologiczne związane z materiałem mielonym oraz wymaganiami technologicznymi związanymi z uziarnieniem nadawy i produktu mielenia. Niewątpliwie istotny wpływ ma objętość komory, lub komór młyna, a w szczególności ich średnice – analogicznie jak we wszystkich młynach z komorami w kształcie rur (grawitacyjnych, mieszadłowych, planetarnych i innych). W przypadku rurowego młyna wibracyjnego wzrost średnicy komory ma wpływ niekorzystny w młynach przemysłowych, co wykazały wyniki analizy tych młynów [19], a nawet w przypadku młynów laboratoryjnych [12, 20, 21]. Zjawisko to jest rezultatem spadku energii kinetycznej warstw mielników, w kierunku od wykładziny komory do jej środka geometrycznego. Energię kinetyczną przekazuje warstwie mielników wewnętrzna część komory, która się z nią styka. Model dyssypacji energii, w komorze rurowego młyna wibracyjnego podano w pracy [22].

Uogólniony model matematyczny wpływu średnicy komory na efekt mielenia (powierzchnię właściwą, lub przyjęty wymiar ziarna kontrolnego) opisuje wyrażenie [12, 19]:

$$Q_{mw} = k_{wt} D^c$$

gdzie: Q_{mw} – wydajność młyna – przy określonych warunkach technologicznych, Mg/h,

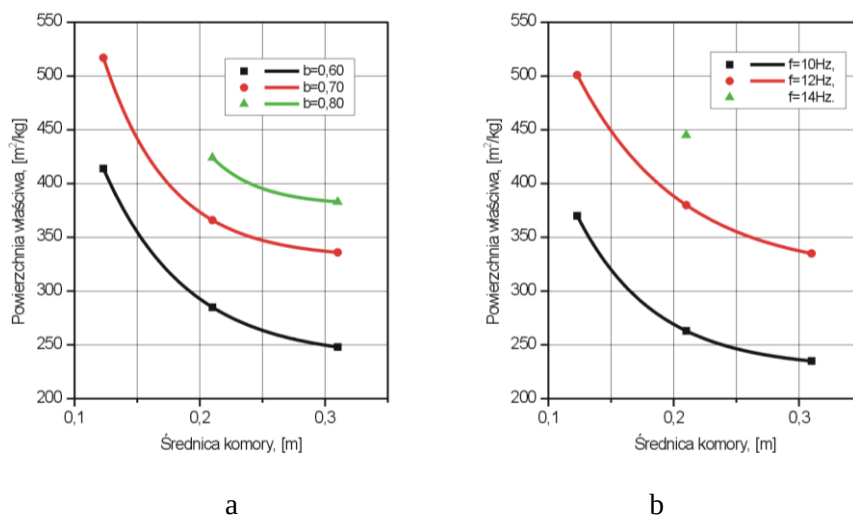
k_{wt} – stała uwarunkowana warunkami technologicznymi młyna, Mg m/h,

D – średnica komory, m

c – stała (bezwymiarowa) uwarunkowana i parametrami procesu mielenia (0,1÷0,3).

Wpływ średnicy komory na rezultat technologiczny wyznaczony eksperymentalnie przedstawiono na rysunku 8.2 [12]. Badania przeprowadzono w młynie laboratoryjnym o działaniu okresowym, o amplitudzie kołowej, przy mieleniu na sucho piasku kwarcowego. W badaniach użyto komory

z wykładziną stalową gładką, a mielnikami były kulki stalowe. Mając na względzie fakt, że średnica komór przemysłowych młynów wibracyjnych zaczyna się od 0,2 m wyniki te można wykorzystać w projektowaniu młynów.



Rys. 8.2. Wpływ średnicy komory na powierzchnię właściwą produktu mielenia, amplituda drgań 14 mm, czas mielenia 10 minut:

- a – przy częstotliwość drgań 14 Hz i stopniach napęnlienia: 0,60; 0,70 i 0,80,
 b – przy częstotliwościach drgań: 10; 12 i 14 Hz i stopniu napęnlienia 0,70

W projektowaniu młynów wibracyjnych szkodliwy efekt wpływu średnicy można osłabiać znacząco kilkoma sposobami:

- budową młynów wielokomorowych o średnicy do 0,6 m i większej ich liczbie, najczęściej z dwoma identycznymi komorami, trzema, a w starszych konstrukcjach czterema i sześcioma,
- umieszczenie w komorze dodatkowych elementów połączonych z komorą [23] lub swobodnych [24]. Wyniki wstępnych badań eksperymentalnych korzystnego wpływu walcowego elementu zwiększającego energię mielników w środku komory podano w pracach [23, 25], a wyniki szczegółowych badań w pracy [15],
- zmianą trajektorii amplitudy drgań z kołowej na eliptyczną, co coraz częściej jest stosowane w nowych młynach [3, 4, 5, 11, 13, 26],
- wprowadzenie komory w dodatkowy ruch obrotowy, co ma miejsce w młynach obrotowo-wibracyjnych [12, 13, 27].

Wibratory bezwładnościowe młynów wibracyjnych napędzane są przez wały kardana bezpośrednio z silnika. Stąd częstotliwość drgań w Europie

wynosi około 16 Hz – przy dużych młynach oraz około 24 Hz - przy mniejszych jednostkach. Drugi parametr ruchu drgającego, to jest amplituda drgań, mieści się w zakresie 3÷12 mm, jest łatwiejszy do regulacji (przez zmianę ilości lub kształtu oraz wzajemnego położenia obciążników na wałach wibratora), wpływa liniowo na przyspieszenie ruchu drgającego zespołu roboczego. Wskaźnikiem porównawczym parametrów pracy młynów wibracyjnych, tak jak w przypadku wszystkich maszyn wibracyjnych jest liczba Froude’a, której zakres wynosi 5÷30. W dużych młynach liczba ta nie przekracza 10.

Amplitudę drgań młyna o trajektorii ąusikołowej w przybliżeniu oblicza się z wyrażenia [28, 29]:

$$A = \frac{m_o e}{m_{izd}} \quad [\text{m}]$$

gdzie : A – amplituda drgań, m,
 m_o – masa obciążnika, kg,
 e – środek masy obciążnika, m,
 m_{izd} – masa inercyjna zespołu drgającego, kg.

Masę inercyjną m_{izd} oblicza się w sposób przybliżony z wyrażenia [28, 29]:

$$m_{izd} = m_{zr} + k_i(m_m + m_s + m_c) \quad [\text{kg}]$$

gdzie : A – amplituda drgań, m,
 m_{zr} – masa zespołu roboczego (komór, wibratora i konstrukcji wsporczej), kg,
 m_m – masa mielników, kg,
 m_s – masa mielonego materiału w komorze, kg,
 m_w – masa cieczy (jeśli młyn miele na mokro), kg,
 k_i – współczynnik oddziaływania inercyjnego ładunku: 0,25÷0,30, [-].

W literaturze funkcjonuje szereg zależności na wyznaczenie mocy projektowanego młyna wibracyjnego. Od strony technologicznej moc młyna można wstępnie wyznaczyć z hipotezy Bonda, czyli tak jak dla młynów grawitacyjnych (rozdz. 5.2). Natomiast traktując młyn jako nadrezonansową maszynę wibracyjną, średni pobór mocy można wyznaczyć z zależności wyznaczonej do obliczania mocy dla maszyn wibracyjnych, z uwzględnieniem oddziaływania inercyjnego swobodnego ładunku [30].

$$P = \frac{F^2 \omega}{4m_{izd}(\omega^2 - \omega_o^2)\eta} \quad [W]$$

gdzie: F – siła dynamiczna generowana przez wibrator, N,
 ω – częstość drgań zespołu roboczego młyna, rad/s,
 ω_o – częstość drgań własnych zespołu roboczego młyna, rad/s,
 η – sprawność napędu młyna.

Bardziej dokładnie moc dwukomorowego młyna rurowego wibracyjnego można wyznaczyć z wyrażenia uwzględniającego przybliżony pobór mocy na proces mielenia oraz na straty mechaniczne w łożyskach wibratora z wyrażenia [29]:

$$P_{2k} = P_M + P_T \quad [W]$$

gdzie: P_{2k} – moc młyna dwukomorowego, W,
 P_M – moc pobierana na ruch ładunku – mielenie, W,
 P_T – moc pobierana na pokonanie oporów tarcia w łożyskach, W.

$$P_M = k_H (m_m + m_s) g A \omega \quad [W]$$

$$P_T = m_o \omega^3 r_t \mu \quad [W]$$

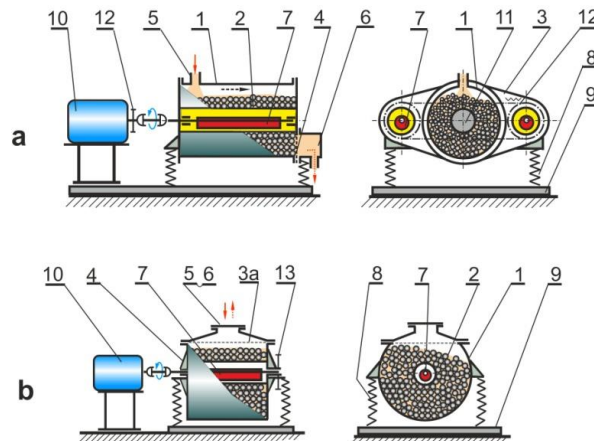
gdzie: k_H – stała Höffla (15 – dla młynów dwukomorowych mielących na sucho),
 g – przyspieszenie ziemskie 9,81 m/s²,
 r_t – promień tarcia w łożyskach wibratora, m,
 μ – współczynnik tarcia w łożyskach wibratora.

Szereg innych zależności teoretyczno-empirycznych do wyznaczania mocy młyna wibracyjnego podano w pracach [29, 31, 32].

Nowe znacznie bardziej dokładne analityczne sposoby wyznaczania mocy młyna obrotowo-wibracyjnego z modeli: warstwowego oraz cyfrowego podano w pracach [12, 33, 34]. Model cyfrowy zapewnia dokładność wyznaczenia a priori mocy młyna poniżej 10%, czego nie umożliwia żadna z klasycznych metod wyznaczania mocy młyna. Dokładność wyznaczania mocy z modelu cyfrowego została określona na podstawie weryfikacji przeprowadzonych na obiektach rzeczywistych, czyli młynach laboratoryjnych i przemysłowych.

8.2. Młyny rurowe

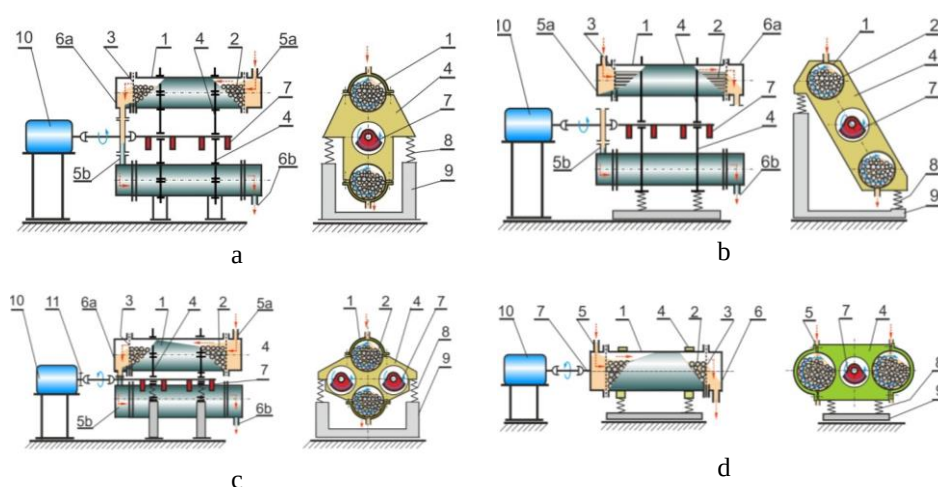
Najstarsze konstrukcje młynów wibracyjnych, to młyny o quasi kołowej trajektorii drgań. Wśród nich są jednokomorowe młyny rurowe produkowane również obecnie (rys. 8.3). Są to: młyny o działaniu ciągłym (dwa typy), z zespołem roboczym napędzanym synchronizowanym wibratorem dwumasowym - opracowane przez firmę Allis Chalmers, a produkowane kilkadziesiąt lat przez firmę Metso (rys. 8.3 a) oraz młyn o działaniu okresowym opracowany przez firmę Siebtechnik (trzy typy) (rys. 8.3 b).



Rys. 8.3. Schemat budowy jednokomorowych młynów wibracyjnych:
 a - o działaniu ciągłym z dwumasowym wibratorem bezwładnościowym i przekładnią synchronizacyjną, b - o działaniu okresowym z jednomasowym wibratorem:
 1 - komora, 2 – ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa,
 3a - przegroda sitowa do rozładunku, 4 – konstrukcja wsporcza, 5 - wlot materiału,
 6 - wylot produktu mielenia, 7 - wibrator, 8 - podparcie sprężyste, 9 - rama,
 10 - silnik, 11 - element walcowy w środku komory, 12 - przekładnia pasowa - synchronizacyjna, 13 - przekładnia zębata do rozładunku komory

Najwięcej młynów oferowanych jest jako dwukomorowe o quasikołowej trajektorii drgań, różnym usytuowaniem komór oraz wibratorów bezwładnościowych (rys. 8.4). Większość z nich to młyny produkowane w wersji przedstawionej na rysunku 8.4 a, to jest z komorami usytuowanymi jedna nad drugą w płaszczyźnie pionowej, z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym umieszczonym pomiędzy nimi - w środku masy zespołu roboczego.

W tej wersji młyna komory są zespołami wymiennymi mocowanymi w zespole roboczym obejmami oraz specjalnymi złączami śrubowymi. Komory przystosowane są do pracy szeregowej, jednak młyn posiada możliwość przystosowania pokryw komór do pracy równoległej, lub nawet z zasilaniem w środku komory i odbiorem zmielonego materiału po obu stronach komory. Wersja młyna dwukomorowego zamieszczona na rysunku 8.4b posiada komory usytuowane w płaszczyźnie pochylonej do pionu, co ułatwia połączenie wlotów z dozownikami nadawcy - przy równoległej pracy komór. W tej wersji komory są integralną częścią zespołu roboczego – wstawiane do płyt z wspornikami podpartymi na elementach sprężystych. Mielnikami w tej wersji, jak również w każdej innej, mogą być pręty.



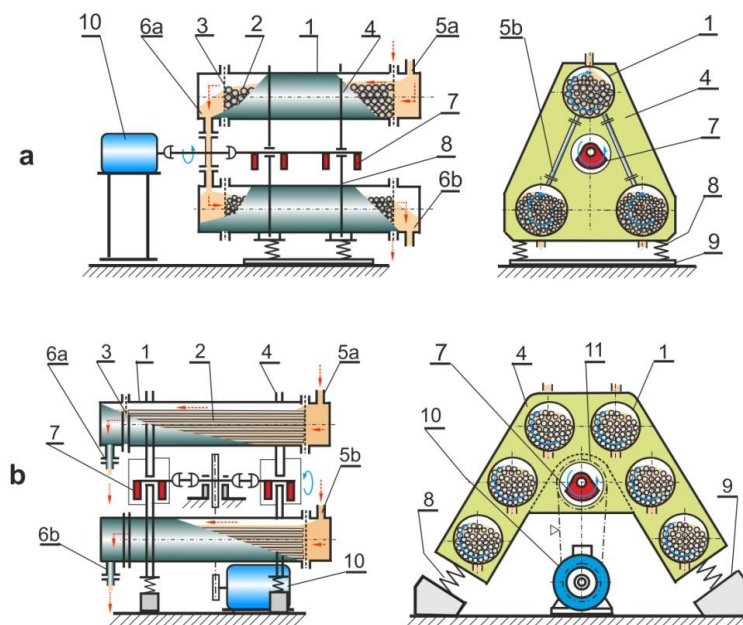
Rys. 8.4. Schematy budowy typowych dwukomorowych młynów wibracyjnych:
 a - z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym i komorami usytuowanymi w płaszczyźnie pionowej, b - z jednomasowym wibratorem i komorami usytuowanymi w płaszczyźnie pochylonej do pionu, c - z dwumassowym wibratorem bezwładnościowym i komorami usytuowanymi w płaszczyźnie pionowej, d - z jednomasowym wibratorem bezwładnościowym i komorami usytuowanymi w płaszczyźnie poziomej, 1 - komora (I - górna, II - dolna), 2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa, 4 - konstrukcja wsporcza, 5a - wlot materiału do I komory, 5b - wlot materiału do II komory, 6a - wylot materiału z I komory, 6b - wylot materiału z II komory, 7 - wibrator, 8 - podparcie sprężyste, 9 - rama, 10 - silnik, 11 - przekładnia synchronizacyjna

Wersja tego młyna przedstawiona na rysunku 8.4c posiada dwumassowy wibrator synchronizowany przekładnią pasową z pasem zębatym. Młyn wówczas ma mniejszą wysokość, większą szerokość, ale także większą masę.

Dwumasowy wibrator jest znacznie mniej obciążony od wibratora jednomasowego.

Przedstawiona na rysunku 8.4d wersja młyna ma niewielką wysokość, największą szerokość i może być użytkowana tylko przy równoległej pracy komór. Może to być bardzo przydatne przy jednoczesnym mieleniu dwóch materiałów lub tego samego materiału przy zróżnicowanych wymaganiach uziarnienia produktu mielenia, stosując tylko inny zestaw mielników.

W większości młynów wibracyjnych o łausikołowej trajektorii drgań zwiększenie wydajności przy obniżeniu kosztów ich wykonania oraz standaryzacji uzyskuje się przez budowę młynów wielokomorowych wyposażonych w trzy, cztery a nawet sześć jednakowych komór. Do napędu tych młynów stosowano tylko jednomasowy wibrator bezwładnościowy. Przykłady budowy takich młynów przedstawiono na rysunku 8.5.



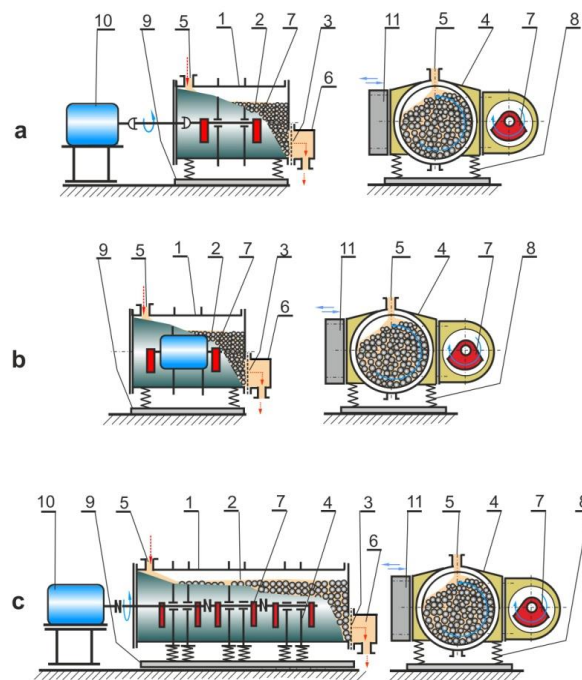
Rys. 8.5. Schematy budowy wielokomorowych młynów wibracyjnych:
a - trzykomorowego, b - sześciokomorowego, 1 - komora (I – górna, II – dolna),
2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa, 4 - konstrukcja
wsporcza, 5a - wlot materiału do I komory, 5b - wlot materiału do II komory,
6a - wylot materiału z I komory, 6b - wylot materiału z II komory, 7 - wibrator,
8 - podparcie sprężyste, 9 - rama, 10 - silnik, 11 - przekładnia pasowa

Młyn sześciokomorowy posiada oryginalne rozwiązanie napędu jednomasowego wibratora składające się z dwóch jednakowych modułów, usytuowanych w środkowej strefie młyna. W tym rozwiązaniu oba moduły wibratora napędzane są z biernego koła przekładni pasowej, której koło czynne znajduje się na wale znacznie tańszego wysokoobrotowego silnika. To rozwiązanie jest najbardziej zwartą konstrukcją przy dużej wydajności ($40\div 60$ Mg/h) [35].

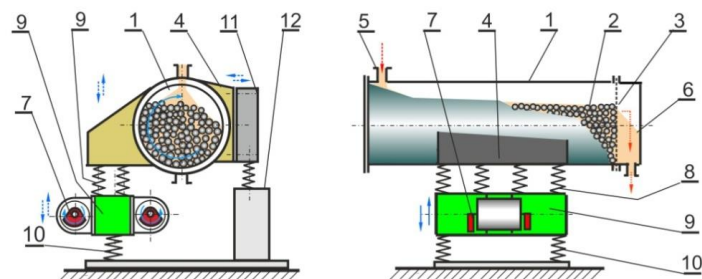
W Niemczech firma Siebtechnik opracowała nowe rozwiązanie rurowego młyna wibracyjnego o eliptycznej trajektorii drgań, opatentowane w USA w 1996 roku [36]. Jego budowa znacząco różni się od w/w rozwiązań młynów i skutkuje innym jego działaniem. Nowością działania jest eliptyczna trajektoria amplitudy drgań, uzyskana przez usytuowanie jednomasowego wibratora bezwładnościowego z boku komory o osi geometrycznej umieszczonej w płaszczyźnie poziomej wspólnie z osią geometryczną komory. Eliptyczną trajektorię drgań zapewnia masa inercyjna przymocowana do komory po przeciwnej stronie wibratora. Schemat i działania tego młyna produkowanego obecnie przez firmę Siebtechnik [3] zamieszczono na rysunku 8.6 a i b. Firma Siebtechnik, jest pierwszym producentem komercyjnego młyna wibracyjnego, który wyprodukowała w latach dwudziestych ubiegłego wieku.

W taki sam sposób działają młyny wibracyjne produkowane obecnie przez firmę Lyvenus w Chinach i różniące się układem napędowym [4] (rys. 8.6 c). Porównanie możliwości technologicznych młynów o eliptycznej trajektorii drgań z młynami o quasikołowej trajektorii drgań podano w pracach [26, 37].

Eliptyczną trajektorię amplitudy drgań ma również młyn Vibra-Drum amerykańskiej firmy General Kinematics przy całkowicie różnej budowie [38]. W tym młynie ruch drgający zespołu roboczego młyna generują dwa typowe silniki wibracyjne (elektrowibratory) - samosynchronizujące się, zamocowane do dodatkowej masy drgającej – wspornika napędowego, który w górnej części ma układ sprężyn napędzających komorę, natomiast od dołu drugi układ sprężyn o znacznie mniejszej sztywności posadowiony na fundamencie młyna. Schemat budowy i działania tego młyna zaprezentowano na rysunku 8.7.



Rys. 8.6. Schematy budowy jednokomorowych młynów wibracyjnych o eliptycznej trajektorii drgań: a - firmy Siebtechnik z typowym napędem wibratora, czyli silnikiem, b - firmy Siebtechnik z napędem elektrowibratora, c - firmy Lyvenus z trzymodułowym wibratorem napędzanym silnikiem: 1 - komora, 2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa, 4 - konstrukcja wsporcza, 5 - wlot materiału, 6 - wylot zmielonego materiału, 7 - wibrator, 8 - podparcie sprężyste, 9 - rama, 10 - silnik, 11 - obciążnik (masa inercyjna)



Rys. 8.7. Schemat budowy jednokomorowych młynów wibracyjnych o eliptycznej trajektorii drgań firmy GeneralKinematics: 1 - komora, 2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa, 4 - konstrukcja wsporcza, 5 - wlot materiału, 6 - wylot zmielonego materiału, 7 - wibrator, 8 - łącznik sprężysty wibratora z zespołem roboczym, 9 - obciążnik (masa inercyjna) napędu, 10 - podparcie sprężyste młyna, 11 - obciążnik (masa inercyjna) zespołu roboczego, 12 - rama

Szereg rozwiązań konstrukcyjnych tych młynów oraz ich parametry technologiczne młynów firmy GeneralKinematics zamieszczono w pracy [39]. Należy dodać, że młyn ten po pewnych modyfikacjach ma szereg innych zastosowań jako: maszyna do obróbki odlewów i części maszyn luźnym ścierniwem, przetwarzania i aglomeracji włókna szklanego, mieszarka, w przygotowaniu minerałów do wzbogacania oraz reaktor w wielu procesach przemysłu chemicznego. Rozwiązania konstrukcyjne wybranych młynów wibracyjnych zamieszczono na rysunkach 8.8÷8.15.



Rys. 8.8. Młyn jednokomorowy o działaniu ciągłym typ MW-400 do mielenia na sucho do mielenia wysokiej jakości cementów [40]



Rys. 8.9. Młyn jednokomorowy o działaniu ciągłym typ MWO-50 do mielenia na sucho i na mokro mas i szkliw ceramicznych [41]

Podstawowe parametry młyna MW-400 [40]:

- objętość komory 400 dm³,
- wydajność przy mieleniu materiałów o dużej ścieralności (cementu, piasku kwarcowego i innych): 1,5 Mg/h o powierzchni właściwej 4500÷5500 cm²/g – wg Blaine’a,
- prędkość obrotowa wału wibratora 2600 obr/min,
- amplituda drgań do 5 mm,
- wilgotność nadawy – poniżej 2%,
- moc silnika 45 kW, masa bez mielników 1,6 Mg,
- wymiary: długość: 2,5 m, szerokość: 1,1 m, wysokość 1,6 m.



a

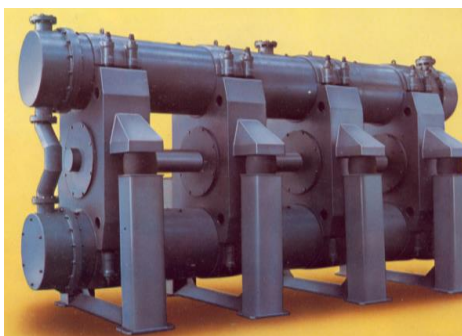


b

Rys. 8.10. Duże młyny wibracyjne z dwumasowym wibratorem z synchronizowanym przekładnią z pasem zębatym produkcji japońskiej firmy Matsubo [42]:
a - jednokomorowy, b - dwukomorowy



a



b

Rys. 8.11. Dwukomorowe młyny wibracyjne z jednomasowym wibratorem serii Palla produkcji firmy KHD Humbold Wedag [43], a obecnie firmy MBE Coal & Minerals Technology GmbH [44]: a - typ Pall 35U, b - Palla 65U

Podstawowe parametry młynów (rys. 8.11) podano w tabeli 8.2.

Podstawowe parametry młynów serii Palla U [44]

Tabela 8.2.

Typ	Wymiary komory, DxL [mm]	Wydajność [Mg/h]	Moc przy mieleniu: [kW]	
			sucho	mokro
20U	ø200x1249	0,02÷0,5	5,5	-
35U	ø350x2306	0,05÷3,0	22	-
50U	ø500x3400	0,20÷10,0	75	90
65U	ø650x4525	0,40÷20,0	160	200

Przykłady zastosowań tych młynów w technologiach bardzo drobnego mielenia zamieszczono w pracy [45].

Na rysunku 8.12 przedstawiono dwa młyny wibracyjne - nowej generacji o eliptycznej trajektorii drgań. Są to jednokomorowe młyny firmy Siebtechnik [3], które w porównaniu z klasycznymi młynami o quasikołowej trajektorii drgań, charakteryzują się dwoma zaletami. Pierwsza zaleta to możliwość budowy młynów o większej średnicy - w przypadku młynów firmy Siebtechnik dochodzącej do 0,82 m, a młynów firmy Lyvenus do 3,5 m dzięki eliptycznej trajektorii, która znacząco zmieniła ruch ładunku w komorze młyna, poprzez zmniejszenie obszaru strefy najmniejszej aktywności mielników. Druga równie ważna zaleta młynów firmy Siebtechnik to modułowa budowa. Modułowość polega na możliwości łączenia szeregowego komór za pomocą prostego złącza kołnierzonego, po demontażu pokryw wlotowej (pierwszego modułu) i wylotowej (drugiego takiego samego modułu), czyli zespołu roboczego, składającego się z komory, do której mocowany jest jednomasowy wibrator bezwładnościowy oraz obciążnik. Wały obu wibratorów łączy się wałem kardana, a następnie wymienia silnik napędu jednego modułu na silnik o dwukrotnie większej mocy.

Dzięki temu rozwiązaniu konstrukcyjnemu można w prosty sposób dwukrotnie zwiększyć wydajność młyna, lub przy tej samej wydajności zmniejszyć uziarnienie produktu mielenia, bez zmiany zasobu części zamiennych (wykładzin komory, przegrody sitowej i innych).

W tabeli 8.3 podano podstawowe parametry młynów ESM firmy Siebtechnik [3, 46].

Eliptyczną trajektorię drgań mają największe młyny wibracyjne różniące się od młynów ESM układem napędowym i produkowane obecnie przez firmę



Rys. 8.13. Młyny wibracyjne firmy Lyvenus z trójmodułowym wibratorem:
a - widok młyna od strony wylotu zmielonego materiału,
b - widok młyna MZD1200X8000 od strony napędu [47]

Parametry techniczne młynów firmy Lyvenus, wielkość oznacza średnicę komory w mm, symbol wymiary komory: średnica x długość komory w m [47]

Tabela 8.4.

Typ	Wielkość, (wymiar komory $\Phi \times L$ [m])						
	1500	1800	2100	1400	2700	3000	3500
MZD	1,5x8	1,8x10	2,1x11	2,4x11	2,7x13	3x13	3,5x15
MPW	1,5x6	1,8x10	2,1x11	2,4x11	2,7x13	3x13	3,5x15
MZDS	1,5x2,5	14x3	2-1x3,8	2,4x4	2,7x4,4	3x9	3,5x6
MWS	1,5x2,5	14x3	2,1x3,8	2,4x4	2,7x4,4	3x5	3,5x6
MPWP	1,5x2,5	14x3	2,1x3,6	2,4x4	2,7x4,4	3x5	3,5x6
MPDP	1,5x2,5	14x3	2,1x3,4	2,4x4	2,7x4,4	3x5	3,5x6
Moc [kW]	75÷320	110÷400	160÷500	200÷800	320÷1000	400÷1600	500÷2000

Na rysunku 8.14 zamieszczono „najmłodsze” rozwiązania konstrukcyjne młynów wibracyjnych o eliptycznej trajektorii drgań pracujących w pobliżu rezonansu, a w tabeli 8.5 podano parametry ich.



Rys. 8.14. Młyny wibracyjne firmy General Kinematics: a - w linii technologicznej w przemyśle górnictwa, b - jeden z prototypów młyna [38, 48]

Parametry techniczne młynów wibracyjnych firmy Vibra-Drum [48]

Tabela 8.5.

Typ	Wymiary komory $\Phi \times L$ [m]	Moc [kW]	Wymiary młyn $A \times S \times H$ [m]	Objętość komory [m ³]	Objętość materiału [m ³]
MD 2 x 6	0,61x1,83	7,4	2,21 x 1,60 x 1,37	0,53	0,085
MD 3 x 10	0,91x3,05	11,0	3,43 x 2,13 x 1,98	2,00	0,311
MD 4 x 15	1,73x4,57	22,1	4,70 x 3,18 x 3,66	10,71	0,849
MD 6 x 18	2,59x5,49	74,0	6,63 x 3,56 x 3,51	28,67	2,292

Moc silnika przy prędkości obrotowej 1200 obr/min, D - średnica komory, L - długość komory, A - długość, S - szerokość, H - wysokość

Kilka prototypowych konstrukcji opracowano w Akademii Górniczo-Hutniczej. W 2000 roku zastosowano dwa prototypowe młyny wibracyjne do mielenia tlenku chromu w sposób ciągły w Zakładach Chemicznych „Alwernia”. Młyny te zastąpiły używane tam młyny kulowe o działaniu okresowym. Porównanie parametrów młynów wibracyjnych z młynami kulowymi podano w tabeli 8.6. [12].

W młynowni tlenku chromu cztery młyny kulowe zastąpiono dwoma prototypowymi młynami wibracyjnymi, z których pierwszy jednokomorowy o objętości komory 80 dm³, pracował na sucho, a drugi dwukomorowy o objętości komory 150 dm³ z szeregową pracą komór, pracował na mokro.

Podstawowe parametry młynów wibracyjnych i kulowych -grawitacyjnych do mielenia tlenku chromu w Zakładach Chemicznych ALWERNIA w Alwerni

Tabela 8.6.

Parametry	Młyny kulowe, PZBM MAKRUM do 2000 roku	Młyny wibracyjne opracowane w AGH od 2000 roku
Liczba młynów, sztuk	4	1 + 1 = 2
Łączna pojemność komór [m ³]	4 × 2,6 = 10,4	0,15 + 0,08 = 0,23
Moc silników młynów [kW]	4 × 11 = 44	15 + 5,5 = 20,5
Łączna masa mielników [Mg]	2,8	0,36
Łączna masa młynów [Mg]	4 × 4,0 = 16,0	2,6 + 1,7 = 4,3
Wydajność młynowni [Mg/h]	0,20	0,20
Sposób pracy	okresowy	ciągły
Poziom ciśnienia akustycznego hałasu emitowanego przez młyn [dB]	95 ÷ 105	83 ÷ 84

Mielony materiał tlenek chromu ma twardość 8 w skali Mohsa, uziarnienie nadawy do 0,5 mm, a po zmieleniu - z jednoczesną redukcją chromu sześciowartościowego, uziarnienie poniżej 0,05% p.n.s. 63 μm, przy średnim ziarnie $d_{50} = 8,1 \mu\text{m}$. Młyny wibracyjne oprócz dobrych parametrów technologicznych znacząco poprawiły warunki pracy obsługi, w tym warunki BHP.

Na rysunku 8.15 zamieszczono nowe konstrukcje prototypowych młynów wibracyjnych, których założenia projektowe i koncepcje rozwiązań konstrukcyjnych opracował J. Sidor. Dwa z nich zastosowano w przemyśle ceramicznym - do mielenia na mokro masy ceramicznej, a jeden w przemyśle chemicznym do mielenia na sucho materiału o silnych własnościach ścierających.



Rys. 8.15. Prototypowe młyny wibracyjne w liniach technologicznych: a – dwukomorowe VM-C-175x2 do mielenia mas ceramicznych zastosowane w 2008 roku, b – jednokomorowy VM-D-200 do mielenia związku chemicznego w przemyśle chemicznym – zastosowany w 2011 roku (foto J. Sidor)

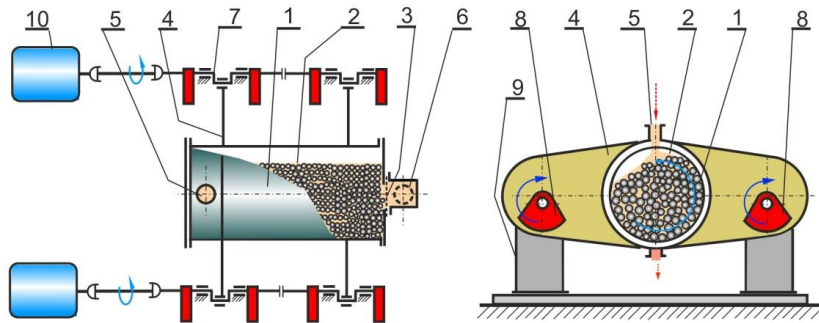
Wydajność młynów przy mieleniu mas ceramicznych wynosiła $0,6 \div 0,8$ Mg/h, przy uziarnieniu nadawy do 0,5 mm, a produktu mielenia $1 \div 3\%$ p.n.s. $63 \mu\text{m}$, a przy mieleniu związku chemicznego przy uziarnieniu nadawy do 25 mm, a produktu mielenia $3 \div 5\%$ p.n.s. 0,5 mm. Każdy z tych młynów wyposażony jest w dwa napędy, z których jeden jest używany podczas pracy, a drugi (wibrator) pełni rolę obciążnika, co z jednej strony zapewnia eliptyczną trajektorię drgań, a z drugiej zwiększa pewność działania, ponieważ wydłuża czas użytkowania młyna przy dwóch wibratorach.

W ostatnich latach podejmowane są również prace nad młynami o kołowej trajektorii drgań, w których do napędu młyna stosuje się wibrator kinematyczny. Pierwsze rozwiązanie tego młyna opatentowano w USA w 1934 roku. W latach 70÷90. ubiegłego wieku prowadzono szereg prac dotyczących tych młynów. Schemat budowy i działania młyna o kołowej trajektorii drgań zamieszczono na rysunku 8.16.

Młyny te charakteryzują się dużymi obciążeniami dynamicznymi elementów roboczych. W latach 60÷90. były zastępowane przez młyny o quasikołowej trajektorii drgań, ale ich zalety technologiczne i postęp w inżynierii materiałowej w zakresie nowych materiałów spowodował ponowne zainteresowanie nimi, zwłaszcza w technologiach o wydajności poniżej 12 Mg/h oraz bardzo wysokich wymaganiach uziarnienia zmielonego materiału. W literaturze angielskiej młyny te noszą nazwę *centrifugal mill*, w niemieckojęzycznej *Zentrifugalrohrmühle*, *Zentrifugalmühle* lub *Fliehkraft-Rohrmühle* [49]. Nazwa *centrifugal mill* odnosi się również do młynów

o całkowicie innej budowie i działaniu, to jest do młynów, znanych w polskiej literaturze pod nazwami młyny odśrodkowe oraz planetarne (satelitowe).

Młyny te cechuje większa liczba Froude'a osiągająca nawet 50. Liczbę uzyskuje się przy niższej niż w klasycznych młynach częstotliwości drgań $5\div 12$ Hz, ale większej amplitudzie drgań dochodzącej nawet do 50 mm.



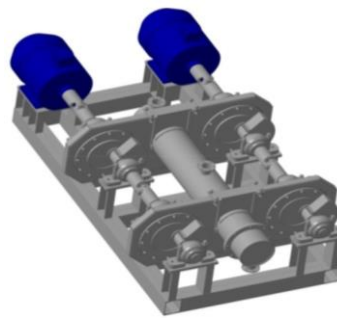
Rys. 8.16. Schemat budowy jednokomorowych młynów wibracyjnych o kołowej trajektorii drgań z napędem podwójnym wibratorem kinematycznym:

- 1 - komora, 2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przeграда sitowa,
4 - konstrukcja wsporcza, 5 - wlot materiału, 6 - wylot zmielonego materiału,
7 - wibrator, 8 - obciążnik, 9 - rama, 10 - silnik

Na rysunku 8.17 przedstawiono przykłady rozwiązań konstrukcyjnych młynów o kołowej trajektorii drgań, a w tabeli 8.7 podstawowe parametry młynów oferowanych przez rosyjską firmę ООО Npp Osnova [50].



a



b

Rys. 8.17. Młyny wibracyjne o kołowej trajektorii drgań:

- a - eksperymentalny młyn badany w Technische Universität Clausthal [49],
b - młyn HORS z typoszeregu 5 młynów oferowany przez firmę ООО Npp Osnova [50]

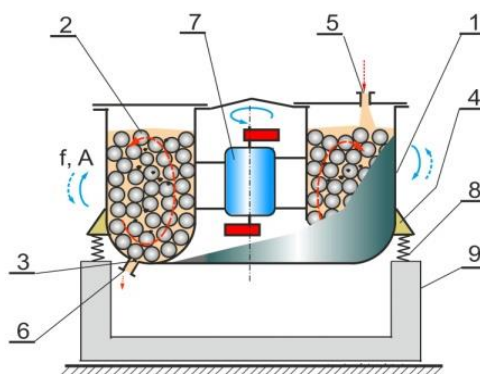
**Podstawowe parametry techniczne jednokomorowych młynów
firmy OOO NPP Osnova [50]**

Tabela 8.7.

Parametry	Typ				
	CEH-20	CEH -25	CEH -35	CEH -45	CEH -55
Wydajność [Mg/h]	0,5÷0,6	0,8÷1,2	2,8÷3,2	5,0÷6,0	10÷12
Prędkość. obr. Wibratora [obr/min]	360÷750				
Uziarnienie nadawy [mm]	poniżej 10				
Uziarnienie produktu [μm]	poniżej 10				
Masa młyna [kg]	1 239	1 881	2 654	3 305	4 349
Moc silników [kW]	15 (2×7,5)	37 (2×18,5)	74 (2×37)	150 (2×75)	320 (2×160)
Wymiary, bez napędu [m]	1,5×1,7×1,2	2,1×1,8×1,2	2,5×2,2×1,4	3,2×2,5×1,5	4,2×2,7×1,7

8.3. Młyny toroidalne i specjalne

Młyny toroidalne to młyny wibracyjne z komorą w kształcie zbliżonym do toroidu o trójpłaszczyznowej trajektorii drgań. Wydajność tych młynów nie przekracza 2 Mg/h. Schemat budowy i działania młyna toroidalnego zamieszczono na rysunku 8.18. Natomiast na rysunkach 8.19 i 8.20 zamieszczono rozwiązania konstrukcyjne produkowanych obecnie toroidalnych młynów wibracyjnych.



Rys. 8.18. Schemat budowy młynów wibracyjnych o trójpłaszczyznowej trajektorii z wibratorem jednomasowym: 1 - komora, 2 - ładunek (mielniki z materiałem mielonym), 3 - przegroda sitowa, 4 - konstrukcja wsporcza, 5 - wlot materiału, 6 - wylot zmielonego materiału, 7 - wibrator, 8 - podparcie sprężyste młyna, 9 - rama



a

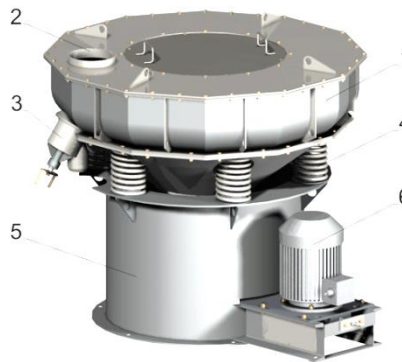


b

Rys. 8.19. Młyny wibracyjne o trójpłaszczyznowej trajektorii drgań firmy Boulton:
a - dla przemysłu chemicznego, b - dla przemysłu farmaceutycznego [51]



a



b

Rys. 8.20. Młyny wibracyjne o trójpłaszczyznowej trajektorii drgań: a – młyn firmy Sweco [52], b - młyn firmy Vibrotechcentr KT [53], 1 - komora, 2 - wlot nadawcy, 3 - wylot produktu mielenia, 4 - podparcie sprężyste, 5 - rama, 6 - silnik

Podstawowe parametry młyna firmy Vibrotechcentr KT typ MW-03:

- objętość komory 300 dm³,
- moc silnika 15 kW,
- wymiary: długość 1615 mm, szerokość 2120 mm, wysokość 1750 mm,
- masa (bez mielników) 1460 kg.

W tych młynach dominujący udział w procesie mielenia ma ścieranie. Stąd w młynach tych oprócz mielników w kształcie kul lub cylpepsów używa się mielników w kształcie sześciąt lub graniastosłupów o podstawie trójkąta równobocznego. Młyny te stosowane są głównie w przemysłach: chemicznym,

ceramicznym, zwłaszcza w produkcji ceramiki specjalnej oraz farmaceutycznym. Proces mielenia w nich przeprowadzany najczęściej jest na sucho w sposób okresowy lub ciągły. Podawana do nich nadawa ma uziarnienie poniżej 2 mm. Produkuje je kilka firm Boulton, Sweco oraz firmy rosyjskie.

Specjalne młyny wibracyjne to młyny, w których proces mielenia zachodzi w niestandardowych warunkach, to jest w niskiej temperaturze – poniżej 0°C, w wysokiej temperaturze powyżej 100°C, w atmosferze gazu obojętnego, lub innych specjalnych warunkach. Duże doświadczenia w tego rodzaju technologiach ma firma Siebtechnik, która jedną z takich instalacji mielona jest siarka z proszkiem metalicznym w atmosferze argonu przedstawia w swoich materiałach [46].

8.4. Młyny obrotowo-wibracyjne

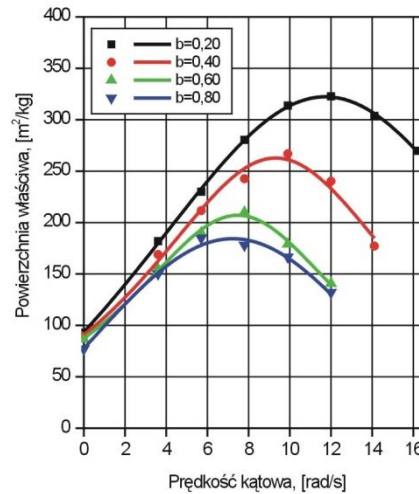
Młyny obrotowo-wibracyjne jest to nowa grupa rozwijana w Polsce w Akademii Górniczo-Hutniczej [12, 13] przez J. Sidora oraz w Federacji Rosyjskiej [54]. Są to młyny o niskiej częstotliwości drgań – poniżej 16 Hz, w których jedna lub więcej komór oprócz ruchu drgającego o odcinkowej trajektorii drgań wykonują ruch obrotowy o odpowiedniej prędkości obrotowej. Młyny obrotowo-wibracyjne mają dwie ważne zalety:

- duże możliwości technologiczne w zakresie programowania składu ziarnowego mielonego materiału, przez odpowiedni dobór parametrów ruchu drgającego, stopnia napełnienia i zestawu mielników praktycznie nie możliwe w innych młynach,
- korzystny wpływ wzrostu średnicy komory na wydajność młyna, a w szczególności jakość uziarnienia produktu mielenia określanego powierzchnią właściwą (rys. 8.21) oraz syntetyczny wskaźnik skuteczności jednostkowej procesu mielenia (rys. 8.22). Wpływ ten ma całkowicie inny charakter niż w młynach wibracyjnych i jest bardziej zbliżony do wpływu występującego w młynie grawitacyjnym [12, 20, 55].

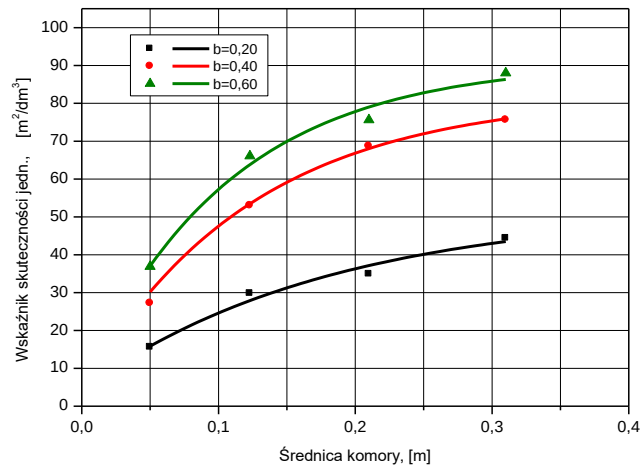
Wskaźnik skuteczności jednostkowej procesu mielenia jest syntetycznym wskaźnikiem porównawczym, który służy do porównań rezultatu technologicznego (przyrostu powierzchni właściwej mielonego materiału) oraz masy tego materiału (iloczynu tych parametrów) w odniesieniu do jednostki objętości komory, w której zachodzi proces mielenia, przy czym im większą wartość osiąga, tym bardziej jest korzystny. Wskaźnik ten opisany jest wyrażeniem [12]:

$$w_{sow} = \frac{\Delta S m_s}{V_k}$$

gdzie: w_{sow} - wskaźnik skuteczności jednostkowej, m^2/dm^3 ,
 ΔS - przyrost powierzchni właściwej podczas procesu mielenia, m^2/kg ,
 m_s - masa próby mielonego materiału, kg ,
 V_k - objętość komory, dm^3 .



Rys. 8.21. Wpływ prędkości kątowej, stopnia napełnienia komory o średnicy 0,210 m, częstotliwość drgań 10 Hz - na powierzchnię właściwą produktu mielenia przy amplitudzie drgań 10,0 mm [12]



Rys. 8.22. Wpływ średnicy komory i stopnia napełnienia na wskaźnik skuteczności procesu mielenia, częstotliwość drgań 14 Hz, amplituda drgań 7,5 mm - przy najkorzystniejszej wartości wskaźnika skuteczności jednostkowej [12]

Największą zaletą technologiczną młyna obrotowo-wibracyjnego jest znacznie większa niż w innych młynach wibracyjnych, możliwość wpływu na rodzaj obciążeń rozdrabniających ziarna mielonego materiału, to jest działania uderowego oraz ściernego przez odpowiedni dobór parametrów kinematycznych młyna (częstotliwości, amplitudy drgań oraz prędkości obrotowej komory). Dzięki temu można eksperymentalnie „programować” parametry składu ziarnowego - bardzo ważne w wielu technologiach przemysłu ceramicznego, chemicznego, elektronicznego oraz farmaceutycznego.

Pierwsze zastosowanie młyna obrotowo-wibracyjnego chronionego patentem miało miejsce w 1982 roku w części produkcyjnej Instytutu Szkła i Ceramiki Filia w Krakowie. W latach 1981-88 pracowały tam trzy młyny obrotowo-wibracyjne typu MOW-A-28/14, w których rocznie produkowano 35,6 Mg szkliwa stosowanego w produkcji licencyjnych kineskopów tvc w Zakładach Polkolor w Piasecznie - jako znacznie tańszego zamiennika szkliwa importowanego z USA.

Kolejny młyn obrotowo-wibracyjny zastosowano w 1983 roku w Zakładach Sprzętu Grzejnego PREDOM-WROMET we Wronkach, (obecnie Zakłady AMICA). Był to młyn dwukomorowy oznaczony symbolem MOW-B-52/26, chroniony innym patentem. W tym młynie produkowano (mielono, mieszano z pigmentem i substancją otoczkującą), około 0,25 Mg na dobę wysokiej jakości szkliwa stosowanego w emaliowaniu proszkowym – zamiennika szkliwa importowanego z Niemiec. Wszystkie w/w młyny użytkowano bez fundamentu.

Następny znacznie większy młyn obrotowo wibracyjny typu MOW-E-125 o pojemności komory 125 dm³ opracowany według kolejnego patentu zastosowano do mielenia dolomitu specjalnego w 1986 roku w Górniczych Zakładach Dolomitowych w Bytomiu. Był to młyn jednokomorowy o działaniu ciągłym. Wydajność tego młyna przy mieleniu dolomitu o uziarnieniu nadawy do 3 mm i produktu mielenia o zawartości klasy 0÷45 µm ponad 90% wynosiła 0,2 Mg/h. Młyn ten charakteryzował się bardzo niskim jednostkowym zapotrzebowaniem energii na proces mielenia, które wynosiło średnio 42 kW h/Mg.

W tabeli 8.8 podano podstawowe parametry młynów obrotowo-wibracyjnych zastosowanych ww. wymienionych technologiach.

Kolejny młyn typu MOW-G-50 chroniony patentem przeznaczony do mielenia koloidalnego węgla krzemu opracowano dla Centrum Badań Wysokociśnieniowych PAN w Warszawie w 1988 roku.

Wybrane parametry przemysłowych młynów obrotowo-wibracyjnych [12]

Tabela 8.8.

Parametry	Typ			
	MOW-B-52/26	MOW-E-125	MOW-G-50	MOW-H-200
Częstotliwość drgań [Hz]	12	12	14	14
Pojemność komory [dm ³]	2 × 26	125	50	200
Moc silników młyna [kW]	5,5	7,5	6,0	12,6
Masa młyna [Mg]	0,50	1,2	1,7	2,5
Uziarnienie produktu mielenia [μm]	20% p.n.s. 40	d ₉₀ = 45,0 d ₅₀ = 18,0	d ₉₀ = 6,0 d ₅₀ = 2,5	d ₉₀ = 8,0 d ₅₀ = 3,5
Materiał mielony	szkliwo	dolomit	krzem	tlenek glinu
Środowisko mielenia	powietrze	powietrze	woda	woda
Wydajność [kg/h]	11	250	4	10
Sposób pracy	okresowy	ciągły	okresowy	okresowy
Wymiary: dł. × szer. × wys. [m]	1,35×1,28×20	2,2×2,0×1,35	1,8×1,6×1,5	2,2×2,0×1,4

Największy młyn obrotowo-wibracyjny typu MOW-H-200 chroniony patentem [56], uruchomiono w 1990 roku w Zakładach ZWLE POLAM w Warszawie. W młynie mielono wysokiej jakości tlenek glinu o twardości 9 w skali Mohsa. Komora młyna miała wykładzinę wykonaną z poliuretanu, a mielnikami były kulki z tlenku glinu. Poziom ciśnienia akustycznego hałasu emitowanego przez młyn wynosił 83,7 dB, a wydajność młyna była 18 razy większa od wydajności młyna kulowego o tej samej objętości komory.

Podstawowe parametry technologiczne i konstrukcyjne wszystkich w/w młynów opracował J. Sidor, który je uruchamiał i przekazywał do eksploatacji.

Największe zastosowanie znalazły młyny obrotowo-wibracyjne jako urządzenia laboratoryjne o bardzo szerokich możliwościach technologicznych, stabilnych parametrach kinematycznych oraz niezawodnym działaniu. W Akademii Górniczo-Hutniczej znajduje się 11 sztuk tych młynów o różnej budowie oraz pojemności komór oraz 2 młyny badawcze, w Politechnice Śląskiej 3 sztuki oraz w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie 3 sztuki, z których jeden jest młynem produkcyjnym. W tych młynach przy mieleniu na mokro lub na sucho, a w niektórych w atmosferze gazu obojętnego, uzyskuje się proszki materiałów nieplastycznych o wysokich

wymaganiach technologicznych (uziarnieniu i czystości), w tym uziarnieniu w skali nano.

Na rysunku 8.23 zaprezentowano dwa młyny wibracyjne o działaniu okresowym, z których jeden zastosowano w przemyśle chemicznym, a drugi ceramicznym do produkcji materiałów stosowanych w branży stomatologicznej. Na rysunku 8.24 trzy laboratoryjne młyny obrotowo-wibracyjne o dużych możliwościach technologicznych. Wszystkie w/w młyny zostały wykonane wg projektów J. Sidora.



a



b

Rys. 8.23. Laboratoryjne młyny wibracyjne do wytwarzania wysokiej jakości proszków: a - MOW I - 20 do wytwarzania suspensji wodnej, b - MOW-M-7,5x2 w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych Warszawa (2001), (foto J. Sidor)



a



b



c

Rys. 8.24. Laboratoryjne młyny wibracyjne do wytwarzania wysokiej jakości proszków: a - LMOW-L-2x1 - Politechnika Śląska, Katedra Nauki o Materiałach (1999), b - LMOW-R-2x2 - w ICiMB Warszawa, c - LMOW S2n2x2 Uniwersytet Technologiczno Przyrodniczy Bydgoszcz (2014) (foto J. Sidor)

Literatura

1. Ružek J.: Vibračni mletí. Silikáty 1963 nr 7, 60-62
2. Lowrison G.Ch.: Crushing and Grinding, London, Butterworths 1974
3. www.siebtechnik-gmbh.de
4. www.chinamillrols.com
5. www.generalkinematics.com
6. Forschungsscherpunkt Apparateentwicklung: Exzenter-Schwingmühle <http://ifa.tu-clausthal.de/aufbereitungs/apparate.htm>, 2007-09-17
7. Huang H., Pan J., McCormick P. G.: An Investigation of Chaotic Phenomena in a Vibratory Ball Milling System. <http://journal-csse.monash.au/ci/vol102/han/han/html>
8. Гаврунов А. Ю.: Вибровращательная мельница с продольно-поперечным движением мелющих тел. Белгородский Государственный Технологический Университет Им. В.Г. Шухова. Белгород 2014
9. Тюпиков В. Г.: Моделирование и оптимизация процессов измельчения в вибрационных мельницах: Москва, 2000
<http://tekhnosfera.com/modelirovanie-i-optimizatsiya-protseessov-izmelcheniya-v-vibratsionnyh-melnitsah>
10. Drozd J. J.: Computer Simulation of Granular Matter: A Study of An Industrial Grinding Mill, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada 2004
11. Sidor J.: Rozwój technologii wytwarzania proszków z zastosowaniem młynów wibracyjnych Powder & Bulk. 2011 wyd. spec. [wydanie targowe SyMas 2011], s. 19-23
12. Sidor J.: Badania, modele i metody projektowania młynów wibracyjnych, Rozprawy Monografie nr 150, UWND AGH, Kraków 2005
13. Sidor J.: Projecting of vibrating mills, Advanced Grinding: 25th Anniversary of the Comminution in Bydgoszcz, Wyd. Fundacji Rozwoju Mechatroniki, Bydgoszcz 2011
14. Sidor J.: Metoda wizualizacji wyznaczania parametrów ruchu mielników w młynie wibracyjnym. Inżynieria i Aparatura Chemiczna. — 2013 R. 52 nr 3, s. 232–234
15. Tomach P.: Możliwość intensyfikacji procesu mielenia w rurowych młynach wibracyjnych przez zmianę konstrukcji komory. Praca doktorska AGH Kraków 2016
16. Drzymała Z., Dzik T., Guzik J., Kaczmarczyk S., Kurek B., Sidor J.: Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych. Warszawa, PWN 1992
17. Kurrer K. E., Gock E.: Exzenter-Schwingmühlen für die Feistzerkleinerung – eine kinematische Analyse. Zement Kalk Gips. Vol 50 1997, No 7 S. 362-373

18. Gock E., Vogt V., Florescu R: Neue Entwicklungen rotationsschwingender Feistzerkleinerungsmaschinen. TU Contact Forschung 2001, No 8 S. 45-50
19. Sidor J.: Wpływ średnicy komory na wydajność młynów z mielnikami swobodnymi, II Konferencja „Problemy w Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn Hutniczych i Ceramicznych”, Kraków-Mogilany 1984, Wyd. AGH, Kraków 1984, s. 135-144
20. Sidor J.: Niektóre wyniki badań wpływu średnicy i stopnia napełnienia komory młyna wibracyjnego o niskiej częstotliwości drgań na efektywność procesu mielenia. Wybrane Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Hutniczych i Ceramicznych Kraków, Monografia nr 6, 2002, s. 271–278, ISBN 83-916516-0-6
21. Kaczmarczyk S.: Analiza eksperymentalna wpływu wybranych parametrów technologicznych i konstrukcyjnych na prace młyna wibracyjnego. Kraków, AGH 1977, praca doktorska
22. Kurrer K. E.: Zur inneren Kinematik und Kinetik von Rohrschwingmühlen. Berlin,. Technische Universität 1986, D83. Doktor-Ingenieur genehmigte Dissertation
23. Sidor J.: Możliwości intensyfikacji procesu mielenia w młynie wibracyjnym przez zmianę kształtu wnętrza komory. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 2003, nr 3, s. 138–140
24. Kurrer K. E., Gock E., Michaelis S.: The rotary chamber vibration mill, a further development of the customary tube vibration mill. VI International Mineral Processing Congress. Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V. 1988, s. 221–230
25. Sidor J., Tomach P.: Wstępne badania eksperymentalne intensyfikacji procesu mielenia w młynie wibracyjnym za pomocą dodatkowego elementu roboczego umieszczonego w komorze Materiały Ceramiczne/ Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków. — 2013 t. 65 nr 2, s. 140–144
26. Sidor J., Piekaj P.: Nowe młyny wibracyjne o obniżonym zapotrzebowaniu mocy. Problemy Transportu i Przeróbki w Górnictwie. Modelowanie Procesów, Monografia, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie. Kraków: Department of Mining, Dressing and Transporting Machines Faculty of Mechanical Engineering and Robotics. University of Science and Technology AGH, 2015. S. 115–126
27. Sidor J.: Otrzymywanie proszków twardych materiałów w młynach obrotowo-wibracyjnych, CERAMICS 54, 1997. Polish Ceramic Bulletin 16, Kraków 1997, s. 347-353
28. Bauman V.A., Klušancev B. V., Martynov V. D.: Mehaničeskoje oborudowanije predpiratij stroitel'nyh matierialov izdelij i konstrukcji. Moskva, Mašinostojenije 1975

29. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985.
30. Bauman V. A., Byhovski I. I., Goldstein B. G.: Vibračionnyje mašiny v stroitelstvie i proizvodstvie stroitelnykh materialov. Izdatielstvo „Mašinostrojenije“ Moskva 1970
31. Bayer M., Höffl K.: Untersuchungen zur Bestimmung des Leistungsbedarfes von Schwingmühlen. Freiberg, Foschungshefte 1978, A 581, s. 41–73
32. Kurrer K. E., Gock E.: Bestimmung des Leistungsbedarfes von Rohrschwingmühlen. Chemie Ingenieur Technik, vol. 62 1990, No 6 S. 510-511
33. Sidor J.: A mechanical layered model of a vibratory mill Mechanics and Control / AGH University of Science and Technology. Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Commission on Applied Mechanics of Polish Academy of Sciences. Cracow Branch. 2010 vol. 29 no. 3, s. 138–148
34. Michalczyk J., Cieplik G., Sidor J.: Numerical simulation model of the rotary-vibrational mill working process. Archives of Metallurgy and Materials 2010 vol. 55 iss. 1, s. 343–353
35. Gämmerler H.: Einrohr- und Sechsrühr-Schwingmühlen als Begrenzungen einer Typenreihe für den Produktionseinsatz. Aufbereitungs-Technik, 1973, nr 3, 173–175
36. Gock E., Beeneken W., Gruschka H.: Eccentric vibration mill, US-Patent No, 08/325,837 01.07.1996 Anm, Siebtechnik GmbH
37. Sidor J.: Współczesne konstrukcje młynów wibracyjnych W: Innowacyjne i Przyjazne Dla Środowiska Techniki i Technologie Przeróbki Surowców Mineralnych: Bezpieczeństwo – Jakość – Efektywność. KOMEKO 2016. Praca Zbiorowa: red. nauk. A. Klich, A. Koziół, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, 2016. s. 161–174
38. <https://www.generalkinematics.com/product/sand-casting-equipment>
39. Sidor J., Piekaj P.: Młyny wibracyjne z samosynchronicznym wibratorem dwumasowym - Vibrating mills with self-synchronization dual mass-vibrator Ref: Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie, V Międzynarodowa Konferencja, Wisła, 21–23.06.2017 - artykuł w druku.
40. <http://www.penostroy.ru/equip-mill/4.html>
41. <http://iskitim.all.biz/vibracionnaya-melnica-mvo-50-g409333#.WXJZ5OipyM8>
42. http://www.matsubo.co.jp/english/product/division/cat04/cat04_02/file060.html
43. Palla Vibrating mills Materiały firmowe KHD Humboldt Wedag 2-172 e
44. Palla Vibrating mills Materiały firmowe MBE Coal & Minerals Technology GmbH 2 Print Run 1500, Kettler Verlag, Bönen 2011

45. Andres K., and F. Haude F.: Application of the Palla vibrating mill in ultra fine grinding circuits. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol. 110 Non-Refereed Paper, March 2010, pp. 125-131
46. Materiały firmowe firmy Siebtechnik WB238e/09.2014
47. <http://www.lyvenus.net/ywwz/untitled29.html>
48. <http://crushersale.xyz/granite-crusher/copper-ore-high-vibratory-grinding-mill-com>
49. <http://www2.ifa.tu-clausthal.de/aufbereitung/apparate-.htm>
50. www.zolcit.ru/equipments1
51. <http://williamboulton.co.uk/grinding-mills/>
52. <http://www.directindustry.com/prod/sweco/product-11603-77747.html>
53. <http://www.vibrocom.ru/device/mills/mv/mv03.htm>
54. Gavrunov A. Ju.: Вибровращательная мельница с продольнопоперечным движением мелющих тел. Dissertacja. Белгородский Государственный Технологический Университет Им. В.Г. Шухова. Bielgorod 2014 <https://www.allbeton.ru/.../d--vibrovrashchatelnaya-melnitsa-s-pr...>
55. Sidor J.: Otrzymywanie proszków twardych materiałów w młynach obrotowo-wibracyjnych, CERAMICS 54, 1997. Polish Ceramic Bulletin 16, Wyd. PAN Oddział w Krakowie, Prace Komisji Nauk Ceramicznych, Kraków 1997, s. 347-353
56. Drzymała Z., Sidor J.: Młyn wibracyjny. Patent RP nr 152 047 Int. Cl5 BO2c 19/16, opublikowany 31.05.1991

9. Młyny planetarne

Młyny planetarne stanowią podgrupę młynów z mielnikami swobodnymi z przekazywaniem energii przez ruchomą komorę [1]. Młyny te mają długą historię – pierwszy tego typu młyn opatentowano w USA w 1896 roku [2]. W literaturze anglojęzycznej nazywane są *centrifugal mill* lub *planetary Mill*. W literaturze niemieckiej *Planetenmühlen*, a w literaturze polskiej nazywane są również młynami satelitowymi.

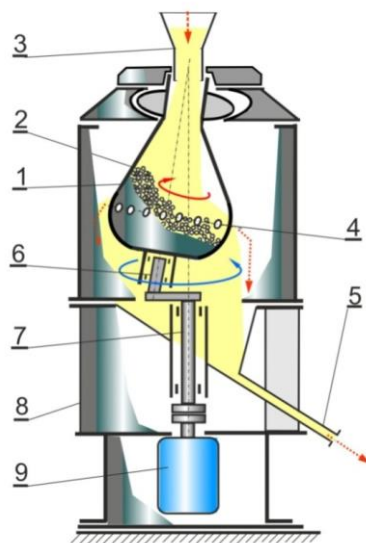
W tych młynach elementami roboczymi są najczęściej kule, ale sposób – mechanizm rozdrabniania – oddziaływania mielników na rozdrabniany materiał, jest znacząco różny od sposobu w młynach mieszałowych. W tych młynach dominujący udział mają obciążenia uderowe normalne, natomiast udział obciążeń stycznych jest znacznie mniejszy. Obciążenia te łatwo można zwiększać przez zwiększanie prędkości obrotowej konstrukcji wsporczej młyna zwanej jarzmem, w którym umieszczane są obrotowe komory i odpowiednio samych komór w innych konstrukcjach młynów [1]. Komory dwie, trzy, lub cztery w jarzmie – dwóch jego segmentach mogą mieć osie geometryczne poziome lub pionowe. Nowe konstrukcje tych młynów wyposażone są w jedną komorę i mechanizm zapewniający ruch złożony komory wokół pionowej osi geometrycznej (rys. 9.1). Elementy podstaw teoretycznych działania i projektowania tych młynów podano w pracy [1]. Największe zastosowanie znalazły jako młyny laboratoryjne. Obecnie prowadzone są prace teoretyczne (symulacje komputerowe ruchu ładunku i procesu mielenia) i eksperymentalne nad bardziej doskonałymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi tych młynów zarówno w uczelniach technicznych [3, 4, 5], jak również w ośrodkach badawczych firm produkujących młyny [6, 7].

Wadą młynów planetarnych jest skomplikowana budowa, wymagająca wyrównoważenia statycznego i dynamicznego minimum dwóch komór usytuowanych na obrotowym jarzmie, obracających się w przeciwnym kierunku niż jarzmo [1, 2]. Kolejne rozwiązanie o znacząco mniej złożonej budowie [8, 9] pozbawionej typowego jarzma – opracowano w latach 80. ubiegłego wieku. Rozwiązanie ma tylko jedną komorę wykonującą ruch złożony zbliżony do ruchu stożka w kruszarce stożkowej o stożku podwieszanym. Młyn ten cechowała znacząco prostsza budowa, ale początkowo do napędu młyna zastosowano skomplikowany silnik hydrauliczny.

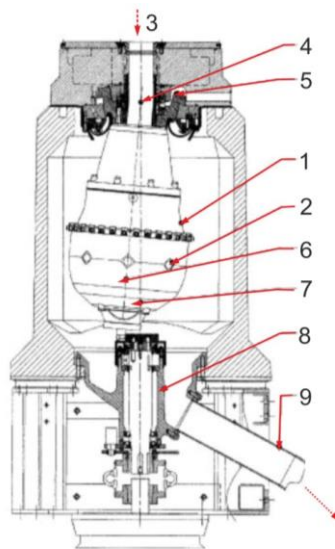
Badania eksperymentalne przeprowadzone w tym młynie wykazały jego doskonałe rezultaty technologiczne. Rozwinięciem tej konstrukcji jest młyn

zamieszczony na rysunkach 9.1 oraz 9.2 młyn o nazwie Hicom sklasyfikowanym jako młyn planetarny. Używane są dwie nazwy tego młyna w języku angielskim *centrifugal mill* oraz znacznie rzadziej *nutating mill*. Ze względu na sposób działania tego młyna - komora wykonuje złożony ruch obrotowy wokół swojej geometrycznej osi nachylonej pod niewielkim kątem (kilku stopni do pionu) oraz ruch precesyjny o niewielkim promieniu ruchu obrotowego jarzma komory. Ze względu na ruch jego komory, młyn powinien nazywać się młynem obrotowo-wibracyjnym, lub wibracyjnym o pionowej osi komory, bowiem nazwa *centrifugal mill* używana jest powszechnie do młynów odśrodkowych oraz wibracyjnych o kinematycznym wymuszeniu ruchu drgającego. Jednak ze względu na powszechnie przyjętą jego nazwę w języku angielskim zachowano jego nazwę w języku polskim.

W tych młynach występuje największa wartość liczby Froude'a, która może osiągnąć nawet 100. W młynach wibracyjnych liczba ta zwykle nie przekracza 10 [1], a w najbardziej obciążonych młynach dochodzi bardzo rzadko maksymalnie do 30 [8, 9].



Rys. 9.1. Schemat budowy i działania młyna HiCom: 1 – komora, 2 – łożadunek, 3 – wlot nadawy, 4 – otwór rozładowniczy, 5 – wylot produktu mielenia, 6 – oś mimośrodowa, 7 – wał, 8 – konstrukcja wsporcza, 9 – silnik



Rys. 9.2. Budowa młyna Hicom: 1 – komora, 2 – otwór rozładowniczy, 3 – wlot nadawy, 4 – punkt precesji, 5 – wahlowa tarcza, 6 – oś komory, 7 – oś precesji, 8 – napęd, 9 – wylot produktu mielenia [7]

Na rysunkach 9.3 i 9.4 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne dwóch o całkowicie różnej budowie młynów planetarnych, to jest klasycznego młyna czterokomorowego o poziomych osiach geometrycznych komór o działaniu ciągłym oraz młyna typu Hicom.

W pracach [1, 9, 10] opisano budowę, działanie oraz wyniki badań młynów planetarnych o działaniu ciągłym oraz pionowych osiach komór, które cechują mniej skomplikowane rozwiązania wprowadzania do nich nadawy i odbioru zmielonego materiału.

Zamieszczony na rysunku 9.3 młyn planetarny posiada wydajność od 1,2 do 3 Mg/h – przy uziarnieniu produktu mielenia poniżej 10 μm . Większy model MP-5 posiada wydajność 3-5 Mg/h [11]. W tym opracowaniu podano informację, że największy oferowany młyn planetarny osiąga wydajność 12 Mg/h – przy w/w tak drobnym uziarnieniu produktu mielenia.

Młyny Hicom, można eksploatować również jako młyny autogeniczne, w których funkcję mielników pełnią większe ziarna mielonego materiału. W tych młynach występuje największa moc jednostkowa, która wynosi od 1500 do 1780 kW/m³, czyli około 6 razy większa niż w typowych młynach mieszadłowych, a jednocześnie około 100 razy ! większa niż w najbardziej

popularnych młynach grawitacyjnych. Opracowano także rozwiązania tych młynów o jeszcze większej jednostkowej mocy – dochodzącej do 2500 kW/m^3 [14]. Przy tak dużej jednostkowej mocy młyn cechuje bardzo duża wydajność jednostkowa, czyli wydajność z jednostki objętości komory. Oznacza to, że młyn jest szczególnie przydatny do bardzo drobnego i koloidalnego mielenia, to jest poniżej $10 \mu\text{m}$. Rezultatem tego jest duża wydajność młyna Hicom 1000, który w komorze o objętości $0,6 \text{ m}^3$ osiąga - przy mieleniu wapienia o uziarnieniu produktu mielenia $d_{97} = 20 \mu\text{m}$ aż 27 Mg/h , a $d_{97} = 5 \mu\text{m}$ – 8 Mg/h .

Aby uzyskać taką samą wydajność młyna grawitacyjnego przy tych samych warunkach technologicznych należałoby zastosować młyn o objętości komory około 100 m^3 i mocy około 1500 kW pracujący w cyklu zamkniętym z separatorem cyrkulacyjnym w układzie mielenia o dodatkowej mocy około 500 kW .



Rys. 9.3. Budowa typowego młyna planetarnego MPP-4 o działaniu ciągłym [12]

Podstawowe parametry techniczne produkowanych młynów Hicom podano w tabeli 9.1.

Młyny satelitarne znalazły zastosowanie w następujących technologiach [12]:

- metalurgii proszków,
- produkcji i recyklingu katalizatorów,
- produkcji farmaceutyków,
- wytwarzaniu pigmentów,
- mieleniu materiałów abrazyjnych,
- aktywacji rud oraz ich koncentratów przed procesami hyro i pyrometalurgii,
- przeróbce mechanicznej odpadów,
- przemysłu ceramicznego,
- chemicznego,
- górniczego,

- mechanicznym stapianiu (mechanical alloying),
- wysokoenergetycznym mieleniu (HEBM) – przy wytwarzaniu metali o największej czystości [16, 17],
- produkcji uziarnionych materiałów budowlanych i suchych zapraw.



Rys. 9.4. Budowa młyna planetarnego jednokomorowego Hicom [13]

Podstawowe parametry techniczne młynów Hicom [14]

Tablica 9.1.

Typ Moc [kW]	Masa [Mg]	Wysokość [m]	Powierzchnia zabudowy [m x m]	Prędkość obrotowa [obr/min]	Pojemność komory [dm ³]
25	2,8	1,60	0,99x1,97	960	11
55	7,5	3,80	1,26 x2,62	815	30
110	8,2	4,05	1,26 x2,62	730	60
350	33,7	4,70	3,97 x5,10	425	200
500	36,5	4,90	3,97 x5,65	350	300
750	74,2	6,40	4,95 x6,40	280	420
1 000	78,0	6,60	4,95 x7,00	250	600

Literatura

1. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985.
2. Bradley A. A., Freemantle A. J., Lloyd P. J. D.: Developments in centrifugal milling. *Journal Of The South African Institute Of Mining And Metallurgy*, 1974 June pp.379-387
3. Tove Anette Haug: Dissolution and carbonation of mechanically activated olivine, Norwegian University of Science and Technology Trondheim, March 2010
4. Lu Sheng-Yong, Mao Qiong-Jing, Peng Zheng, Li Xiao-Dong, and Yan Jian-Hu: Simulation of ball motion and energy transfer in a planetary ball Mill, *Chin. Phys. B* Vol. 21, No. 7 (2012) 078201
5. Kaminsky Yu.D., Lyakhov N.Z. Efficiency of Grinding and Mechanical Activation of Solids in Planetary Ball Mills. *Proceedings of the International Seminar on Mineral Processing Technology - 2006*, Chennai, India. pp. 59 - 64
6. Hicom-High Intensity Comminution Mill <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Classification/Gravity+and+Density+Separation/Hicom+Mills/Hicom+Mills>
7. Braun M R.: Fine dry comminution of calcium carbonate in a Hicom mill with an Inprosys air classifier. *Minerals Engineering*. Vol. 15, Issue 3, March 2002, pp. 123-129
8. Sidor J.: Projecting of vibrating mills, *Advanced Grinding: 25th Anniversary of the Comminution in Bydgoszcz*, Wydawnictwo Fundacji Rozwoju Mechatroniki, Bydgoszcz 2011
9. Sidor J.: Kierunki rozwoju młynów do mielenia surowców i spoiw mineralnych *Materiały Ceramiczne / Polskie Towarzystwo Ceramiczne*, Kraków. — 2016 t. 68 nr 1, s. 61–69
10. Boyes J.M.: Performance Testing of a New High Intensity Centrifugal Mill. *XVI International Mineral Processing Congress*. E. Forsberg Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam pp. 135-146
11. Sidor J.: Rozwój konstrukcji młynów z mielnikami swobodnymi i złożonym ruchem komory, Kraków, *Zesz. Nauk. AGH, Mechanika* t.13, z. 4, 1994. s. 585- 601
12. http://active-nano.com/index.php?option=com_content&view=article&id=29&Itemid=&lang=en
13. <http://www.pennquip.com/hicom.html>
14. www.hicom-mill.com
15. Paul W. Cleary P. W., Sawley M. L.: Three-Dimensional Modelling of Industrial Granular Flows, *Second International Conference on CFD in the*

- Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia 6-8, X 1999, pp. 95÷100
16. Sidor.J.: Mechanical devices used for production of metallic, ceramic-metallic alloys or nanomaterials, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 52, 2007 p.407-414, ISSN 1733-3490
 17. Suryanarayana C.: Mechanical alloying and milling, Progress in Materials Science 46, 2001, pp. 1÷184

10. Młyny rolowo-misowe (toczne)

10.1. Problematyka młynów rolowo-misowych (tocznych)

Młyny rolowo-misowe (toczne) należą do dynamicznie rozwijającej się grupy młynów z mielnikami prowadzonymi. Najczęściej stosuje się je do bardzo drobnego mielenia materiałów: miękkich ($2\div 4$ w skali Mohsa), średnio-twardych ($5\div 6$ w skali Mohsa) w procesach masowych o wydajności od kilku do ponad 900 Mg/h o wilgotności do 14%. Nadawa podawana do mielenia w tych młynach ma uziarnienie poniżej 80 mm. Proces mielenia zachodzi w nich tylko na sucho, przy czym w znacznej części młynów podczas mielenia zachodzi równoczesne suszenie materiału. Stosuje się je głównie do mielenia surowców cementowych, spoiw mineralnych, węgla, nawozów sztucznych, surowców i produktów chemicznych.

Najczęściej używana nazwa tych młynów to młyny rolowo-misowe [1, 2]. W niewielu przypadkach do tej nazwy dodawane jest uzupełnienie „pionowe”. Polska firma Mifama produkująca te młyny nazywa je misowo-rolkowe [3, 4]. Jeszcze inne nazwy tych młynów pojawiają się w polskich pracach np. młyny pionowe [5] oraz pionowe młyny rolkowo-misowe [6]. W klasycznej literaturze niemiecko języcznej [7] nazywane są młynami walcowymi (Walzmühlen) – pomimo, że tylko dwa rozwiązania tego młyna mają rolki w kształcie walca. Podany w pracy [6] podział tych młynów wyróżnia ich ogólne konstrukcje to jest: *Feder lub Fremdkraftmühlen*, *Schwerkraftmühlen*, *Fliehkraftwalzmühlen*. W tym języku używane są jeszcze inne nazwy tych młynów, a mianowicie *Walzenschüsselmühlen* [8], *Vertikalmühle* [8] oraz *Rollenmühlen* [9]. W języku angielskim używa się również praktycznie tylko dwie nazwy tych młynów, to jest: *Vertical Roller Mills* [10], *Roller Mills* [11, 12] a rzadko w USA *Bowl Mill*.

Podana w pracy [7] klasyfikacja tych młynów wymaga korekty, ponieważ z produkcji praktycznie wycofano kołognioty, a na rynku pojawiły się nowe rozwiązania konstrukcyjne tych młynów, np. jednorolkowy (rys. 10.1 d), oraz nowe rozwiązania młynów wielorolowych (wielorolkowych), z rolami (rolkami) o nowych kształtach oraz całkowicie innej budowie młyna.

W większości tych młynów rozdrabnianie materiału zachodzi na obrotowej misie przez toczące się role (rolki) dociskane do niej siłą zewnętrzną. Po zmiążdżeniu – rozdrobnieniu materiału na misie, siła odśrodkowa będącą skutkiem prędkości obrotowej misy odrzuca go na zewnątrz misy, skąd podrzucany jest w górę przez strumień gazu lub powietrza podawany przez pierścień dyszowy usytuowany wokół misy. Ziarna o większych wymiarach

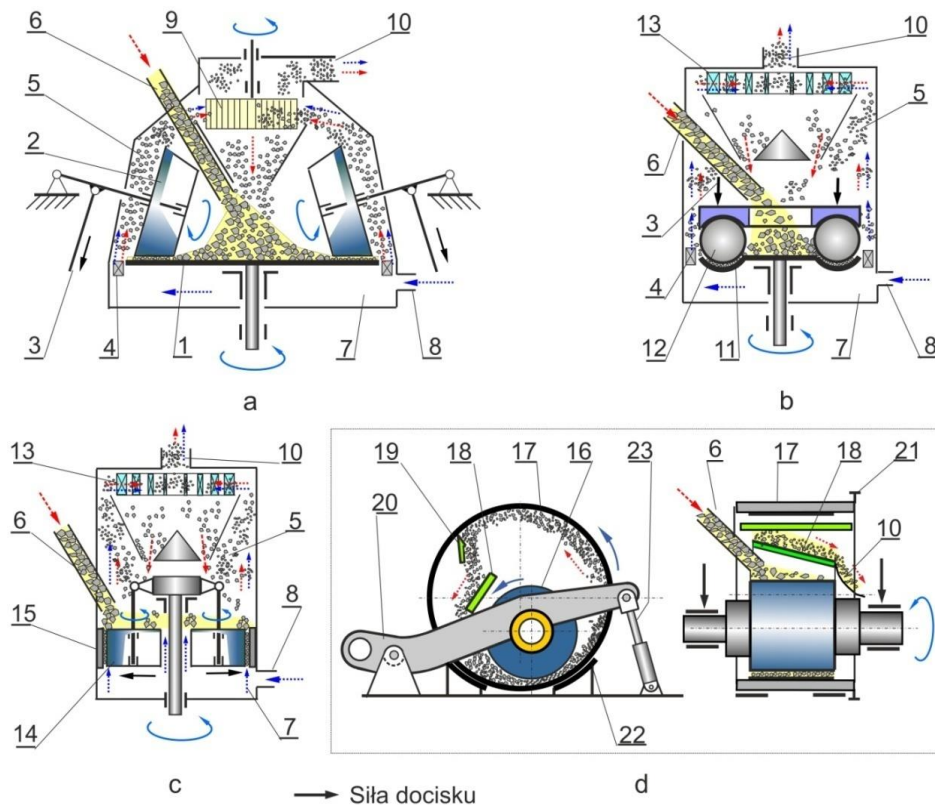
oraz większej wilgotności po wyrzuceniu spadają od razu - pod wpływem siły grawitacji wprost na misę. Natomiast najdrobniejsze i wysuszone ziarna są odprowadzane do górnej strefy młyna do separatora pneumatycznego, który rozdziela je na produkt gotowy (podziarno) oraz materiał niezmielony - czyli nadziarno. Produkt gotowy odbierany jest pneumatycznie w fazie gazowej z młyna, a nadziarno spada grawitacyjnie na misę (rys. 10.1). Inaczej zachodzi ruch rozdrabnianego materiału w innych młynach: pierścieniowo-kulowym (rys. 10.1 b), wahadłowym (rys. 10.1 c) oraz Horomill (rys. 10.1 d).

W tych młynach element roboczy rolka, kula toczą się po misie, pierścieniu lub walcowej komorze. Stąd najbardziej adekwatną ich nazwą - w analogii do łożysk tocznych, wydaje się być młyn toczny. Dlatego taką nazwę przyjęto w dalszej części pracy. Nazwa ta odzwierciedla nie tylko ich sposób działania, ale co jest ważniejsze, odróżnia te młyny od młynów walcowych wysokociśnieniowych (rozdz. 11), również ze względu na prędkości obwodowe elementów roboczych, które w młynach - prasach walcowych są poniżej 1,5 m/s, a w młynach tocznych powyżej 4 m/s. Nazwa młyn toczny w polskojęzycznej literaturze technicznej znana jest od roku 1974 [13].

Młyny te mają najdłuższą historię ze wszystkich młynów. Już około 2 wieku naszej ery w Chinach używano młyn o budowie i działaniu zbliżonym do młyna rolowo-misowego. W Meksyku około 1820 roku używano już tego rodzaju młyn z „napędem konnym”. Kolejny młyn pod nazwą „młyn chilijski” (polskie nazwy: kołogniot, kołotok), a w języku angielskim *Gruson vertical roller mills* pojawił się w roku 1890 [14]. Młyn o nazwie *ring-roller mill* wynalazł F.E. Huntington w 1883 roku. A pierwszy przemysłowy młyn (pierścieniowo-kulowy) zastosowano w roku 1885 [15]. W pracy [15] przedstawiono także pierwsze rozwiązania konstrukcyjne młynów wahadłowych (rys. 10.1 c) i innych nie stosowanych obecnie młynów. Patent nr 453915 na młyn rolowo-misowy uzyskał E.C. Loesche w Berlinie w 1927 roku.

W nazwach tych młynów często podawane są nazwy ich producentów np.: LM-Loesche, MPS-Pfeiffer, FLSmidth Atox, czy Polysius Roller Mills.

Cztery typowe rozwiązania konstrukcyjne młynów tocznych produkowanych obecnie przedstawiono na rysunku 10.1.

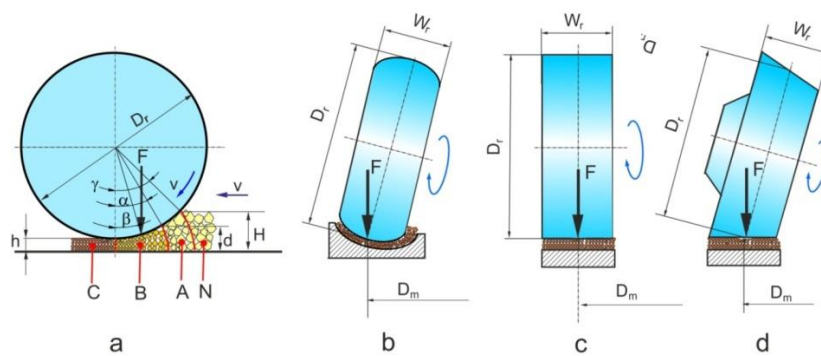


Rys. 10.1. Główne rodzaje młynów tocznych: a - rolowo-misowy, b - pierścieniowo-kulowy, c - wahadłowy, d - jednorolowy - Horomill, 1 - misa, 2 - rolka kształtowa, 3 - siła docisku rolki, 4 - pierścień dyszowy, 5 - strefa unoszenia zmielonego materiału, 6 - wlot nadawy, 7 - kolektor powietrza lub gazów suszących, 8 - wlot powietrza lub gazów, 9 - wirnik separatora turbinowego, 10 - wylot zmielonego produktu, 11 - misa, 12 - kula mieląca, 13 - separator statyczny-inercyjny, 14 - rolka walcowa, 15 - wykładzina mieląca, 16 - rolka walcowa pojedyncza, 17 - obrotowa komora, 18 - płyta (zsuwnia), 19 - zgarniak, 20 - dźwignia, 21 - koło zębate bierne, 22 - łożyskowanie komory, 23 - hydrauliczny układ docisku rolki

Podstawowe obliczenia projektowe i konstrukcyjne młynów rolowo-misowych podano w opracowaniach [7, 12]. Młyny te, których zastosowanie podano wyżej dzięki nowym, odpornym na ścierne zużycie tworzywom konstrukcyjnym na elementy robocze (wykładziny mis i rolek), znalazły nowe zastosowania, do mielenia materiałów abrazyjnych np. przy wytwarzaniu cementu portlandzkiego [5, 6], a prowadzone są prace nad zastosowaniem ich do mielenia rud metali [16]. W ostatnich kilkunastu latach na rynku oferowane są nowe rozwiązania konstrukcyjne znanych i produkowanych od kilkudziesięciu lat młynów przez renomowane firmy. Pojawiło się także nowe

rozwiązanie konstrukcyjne młyna tocznego jednorolowego o nazwie Horomill, który znalazł zastosowanie w mieleniu surowców cementowych i cementu. Starsze konstrukcje młynów rolowo-misowych szeroko omówiono w pracach [7, 14, 16].

Młyny toczne produkują następujące firmy: Loesche GmbH, Gebr Pfeiffer SE, FLSmidth, PSP Engineering a. s., Raymond, Cemtec, Neumann & Esser, EVT, KSG, Fuller Peters, SicaGrind, Broyeurs Poittemill Ingénierie, MCCrusher, Ecotec, Verdes, Manfredini & Schianchi i inne, a w Polsce FPM S.A., a firma Doltech oferuje młyny produkowane przez firmę Chrystian Pfeiffer Becum. Sposób działania młynów rolowo-misowych – największej podgrupy młynów tocznych przedstawiono na rysunku 10.2.



Rys. 10.2. Schemat działania młynów rolowo-misowych [12]: a – schemat procesu rozdrabniania, b – rolka toroidalna, c – rolka walcowa, d – rolka stożkowa, D_r - obliczeniowa średnica rolki, D_m - obliczeniowa średnica misy, W_r - uogólniona wysokość rolki, F - siła rozdrabniająca, v - prędkość obwodowa rolki - zbliżona do prędkości warstwy materiału rozdrabnianego, H - wysokość warstwy nadawy, h - wysokość warstwy rozdrobnionego materiału, d - maksymalny wymiar ziarna nadawy, α - kąt początku kompresji, β - kąt reakcji złoża warstwy, γ - kąt, wprowadzenie warstwy materiału pod rolkę, A - złożo wstępnie zagęszczane, B - przyspieszony ruch warstwy z początkiem rozdrabniania, C - strefa kompresji (rozdrabniania), N - warstwa nadawy luźnego materiału

Podstawowe obliczenia projektowe oraz doświadczenia eksploatacyjne wskazują, że dla młynów rolowo-misowych zachodzi następująca zależność [12]:

$$\frac{d}{D_r} \leq 0,05 \div 0,08$$

gdzie: d – maksymalny wymiar ziarna, mm,
 D_r – średnica rolki, mm.

Podstawowe parametry młynów toczyńnych, to jest: wydajność, moc, siłę nacisku rolek oraz prędkość obrotową misy, w przybliżeniu można wyznaczyć z wyrażeń [12]:

$$Q = \frac{P_M}{q}$$

gdzie: Q – wydajność młyna, Mg/h,
 P_M – moc pobierana przez młyn, kW,
 q – jednostkowy pobór energii, kWh/Mg.

Moc młyna oblicza się z wyrażenia:

$$P_M = i \mu k D_r W_r D_m \pi n_s \quad [\text{kW}]$$

gdzie: P_M – moc pobierana przez młyn, kW,
 i – ilość rolek [-],
 μ – współczynnik tarcia, [-],
 k – nacisk jednostkowy rolki, kN/m²,
 D_r – średnica rolki, m,
 D_m – średnica misy, m,
 W_r – szerokość rolki, m,
 n_s – prędkość obrotowa rolki, 1/s.

Nacisk jednostkowy oblicza się z wyrażenia:

$$k = \frac{F}{D_r W_r} \quad [\text{kN/m}^2]$$

gdzie: F – siła nacisku rolki, kN.

Siła nacisku jest sumą sił, czyli siły generowanej przez układ docisku oraz siły ciężkości:

$$F = F_N + G_r \quad [\text{kN}]$$

Prędkość obrotową misy wyznacza się z wyrażenia:

$$n = \frac{c}{\sqrt{D_m}} \quad [\text{obr/min}]$$

gdzie: n – prędkość obrotowa misy, obr/min,
 c – stała danego rodzaju młyna podawana przez jego producenta, [-].

Najczęściej występujący sposób rozdrabniania w młynach rolowomisowych (rys. 10.1 a), polega na miażdżeniu materiału na obracającej się misie rolkami o kilku rodzajów kształtach: walca, stożka, zbliżonym do toroidu i innych. Siła docisku rolek do misy w tych młynach generowana jest dwoma rodzajami układów generacji siły. W małych młynach jest to układ sprężyn, a większych układ hydrauliczny z akumulatorami ciśnienia.

Ważnym problemem konstrukcyjnym młyna jest ilość rolek - uwarunkowana wymiarami młyna oraz jego wydajnością młyna, która wynosi od 2 do 6.

Inny sposób działania ma miejsce w młynie pierścieniowo-kulowym (rys. 10.1 b), w którym elementami roboczymi są kule toczące się po obracającej się misie po wykładzinie o nieco większym promieniu. Kule od góry dociskane są do misy układem sprężyn (w młynach o mniejszych wydajnościach, a w większych, układem hydraulicznym z akumulatorami ciśnienia). Oba w/w młyny mają ponad elementami roboczymi umieszczany pneumatyczny klasyfikator ziarnowy, który wydziela z produktu mielenia pożądaną technologicznie klasę ziarnową, a nadziarno grawitacyjnie podaje do strefy rozdrabniania. W starszych młynach oraz w młynach wytwarzających materiał o „grubszym” uziarnieniu jako klasyfikatory ziarnowe stosuje się separatory przepływowe zwane też statycznymi. W młynach o większych wymaganiach jakości uziarnienia produktu mielenia instalowane najczęściej są separatory turbinowe.

Całkowicie inny sposób działania ma młyn wahadłowy (rys. 10.1 c), zwany też odśrodkowym, lub pierścieniowo-walcowym [17], ponieważ siła docisku walcowych rolek o pionowych osiach geometrycznych, generowana jest przez siłę odśrodkową spowodowaną przez prędkość obrotową pionowego wału, do którego na wahliwych przegubach mocowane są cztery obrotowe rolki. Prędkość obrotowa wału jest tak dobrana, aby podawana grawitacyjnie do młyna nadawa była rozdrabniania na nieruchomym pierścieniu. Rozdrobniony materiał unoszony jest strumieniem gorącego gazu do góry lub powietrza, gdzie podlega klasyfikacji ziarnowej - zwykle separatorem przepływowym. Podziarno odprowadzane jest z młyna w fazie gazowej, a nadziarno kierowane grawitacyjnie pod rolki do powtórnego zmielenia.

Jeszcze inny sposób działania ma miejsce w młynach Horomill, w których elementami roboczymi są: rolka i walcowa obrotowa komora o poziomych – równoległych osiach geometrycznych (rys 10.1 d). W tych młynach materiał podawany jest rynną do wewnętrznej części komory. Pod wpływem siły odśrodkowej materiał rozkłada się równomiernie na całej długości wewnętrznej

powierzchni komory, tak jak większości młynów tocznych. Rozdrabnianie materiału zachodzi przez poziomą rolkę dociskaną do komory dźwigniami umieszczonymi po obu jej stronach, w których umieszczona jest oś rolki. Dźwignie te połączone są przegubowo z elementami układów hydraulicznych, które dociskają rolkę do powierzchni komory. Rozdrobniony jednokrotnie przez rolkę materiał zgarniany jest z obracającej się komory – podawany na płytę, która jednocześnie stanowi wagę przepływową, umożliwiając monitoring pracy młyna oraz jako element do sterowania automatycznego jego pracą.

Oryginalny młyn toczny zwany rolkowo-pierścieniowym opracowano w Akademii Górniczo-Hutniczej w 1987 roku [18]. Młyn ma poziome osie geometryczne wirnika i czterech rolek umieszczonych na wirniku oraz obrotowej komory. Rolki z obu stron połączone są z wirnikiem łącznikami z przegubami umożliwiającymi ich ruch na zewnątrz wirnika. W tym młynie proces mielenia zachodzi na obracającej się w przeciwnym kierunku komorze wskutek toczenia się po warstwie materiału rolek i siły odśrodkowej działającej na rolki, generowanej przez ruch obrotowy wirnika. Wirnik i komora wyposażone są w odrębne napędy. Wyniki badań tego młyna przeprowadzone w skali laboratoryjnej [1, 2] wskazują na korzystne jego możliwości technologiczne.

W młynach tocznych najczęściej zachodzą jednocześnie cztery procesy technologiczne:

- mielenie,
- suszenie, lub chłodzenie,
- mieszanie,
- klasyfikacja ziarnowa.

Mielenie materiału o wilgotności do 14% o uziarnieniu do 80 mm polega na wielokrotnym miażdżeniu go przez obracające się i dociskane do misy rolki, przy czym po każdorazowym zmiażdżeniu oddzielane są pneumatycznie najdrobniejsze ziarna mielonego materiału jako gotowy produkt mielenia.

Mieszanie mielonego materiału z jednoczesnym suszeniem, polega na uniesieniu go przez strumień gazów suszących podawanych z odrębnego paleniska, a w przemyśle cementowych z wymiennika ciepła pieca obrotowego. Procesy mielenia, mieszania i suszenia materiału zachodzą w tym młynie w czasie kilku minut.

Młyn toczny zbudowany jest z trzech, pełniących różne funkcje zespołów (rys. 10.4 b):

- napędu: silnika elektrycznego, sprzęgła przekładni mechanicznej oraz łożyska misy,
- zespołu mielenia: układu rolek, misy z wykładziną, konstrukcji z pierścieniem dyszowym, podzespołów dźwigni z osiami oraz wspornikami osi, układów hydraulicznych lub sprężynowych docisku rolek,
- separatora pneumatycznego: przepływowego bez napędu oraz turbinowego z własnym napędem.

Separator pneumatyczny rozdziela ziarna zmielonego materiału pod względem ich rozmiarów i gęstości (ziarna o większej wilgotności mają większą gęstość i masę) na dwie klasy ziarnowe. Są to: wymagana technologicznie klasa ziarnowa, czyli produkt mielenia – odprowadzany z młyna jako gotowy produkt oraz klasa ziarnowa zawierająca ziarna o większych rozmiarach i większej wilgotności, które grawitacyjnie odprowadzane są do strefy mielenia. Podczas mielenia materiał podlega cyrkulacji, która w zależności od własności fizycznych nadawy, wymagań uziarnienia produktu mielenia, może wynosić od 15 do 25.

Młyny toczne charakteryzują następujące zalety:

- możliwość rozdrabniania nadawy o dużych wymiarach ziaren oraz dużej wilgotności, co jest trudne do realizacji w innych młynach,
- szybkie odprowadzenie wymaganej technologicznie klasy ziarnowej ze strefy mielenia i wydzieleniu jej z rozdrobnionego materiału,
- bardzo krótki czas retencji od 2 do 4 minut, ułatwiający sterowanie automatyczne młynem i jego instalacją, (w młynach grawitacyjnych czas ten wynosi 20÷25 minut),
- mniejszy jednostkowy pobór energii,
- mniejsza zainstalowana moc i mniejsza masa w porównaniu z młynem grawitacyjnym o tej samej wydajności,
- znacząco niższy poziom ciśnienia akustycznego generowany przez młyn,
- mniejszy koszt fundamentów,
- mniejsza powierzchnia zabudowy,
- wysoka dyspozycyjność, stąd częste ich stosowanie do mielenia węgla energetycznych w elektrowniach cieplnych,
- możliwość wytwarzania produktu mielenia o „płaskiej” krzywej ziarnowej, z którego można wydzielać kilka produktów różniących się składem ziarnowym,

- mniejszym zanieczyszczeniem produktu mielenia materiałem pochodzącym z zużywających się elementów roboczych, co jednak nie zawsze ma znaczenie.

Wady tych młynów, to:

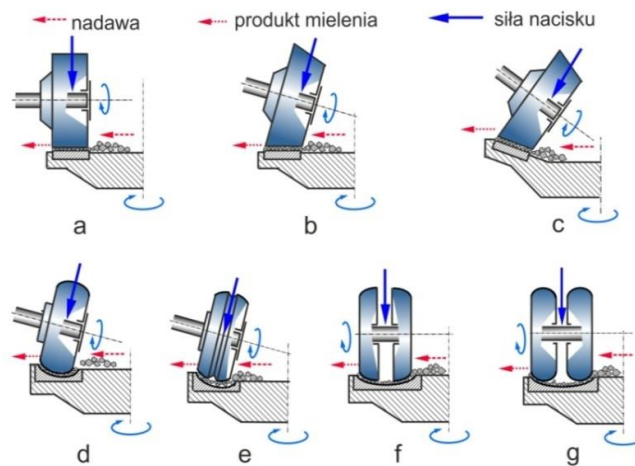
- znacząco większe koszty inwestycyjne,
- bardziej skomplikowana budowa elementów roboczych oraz bardziej pracochłonny sposób ich wymiany,
- wyższe wymaganie odnośnie kwalifikacji i kompetencji obsługi młyna,
- staranna eksploatacja,
- droższy serwis,
- większe koszty eksploatacyjne przy mieleniu materiałów abrazyjnych z większą zawartością krzemionki krystalicznej oraz cementów zwłaszcza cementu hutniczego,
- konieczność podgrzewania śluz obrotowych podających do młyna materiały o dużej wilgotności oraz o właściwościach lepiących.

10.2 Młyny rolowo-misowe

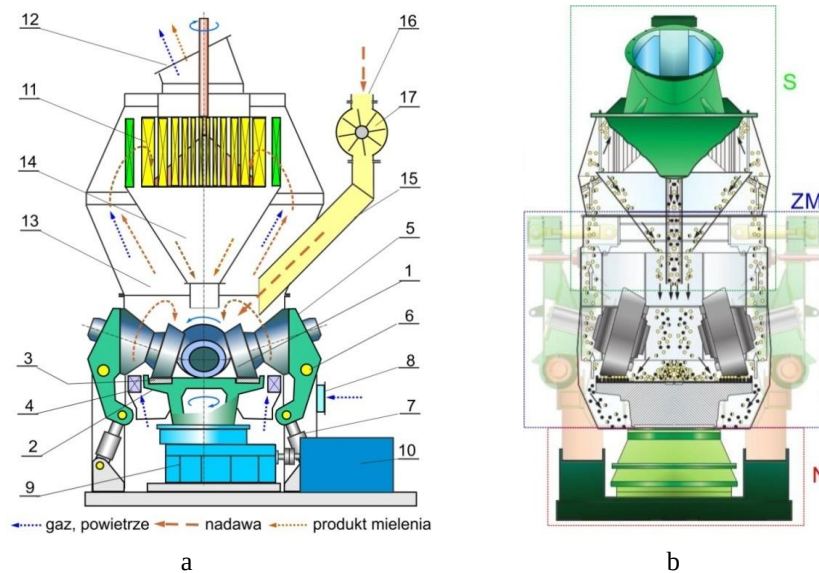
Jest to największa podgrupa młynów tocznych. Opisy budowy, klasyfikacje, także szereg informacji o młynach rolowo-misowych podano w pracach [19, 20]. Na rysunku 10.3 zamieszczono najczęściej stosowane kształty rolek oraz formy ich kontaktów z misą oraz kierunki sił dociskających rolki do misy. Na tym rysunku pominięto rozwiązania konstrukcyjne starszych konstrukcji młynów – obecnie nieprodukowanych, [2, 7] np. jednorolkowo-pierścieniowego, trójrolkowo-pierścieniowego, czy z rolkami bezosiowymi o podwójnych bieżniach, z których jedna jest roboczą a druga prowadzącą oraz innych konstrukcji.

Młyn toczny zbudowany jest z trzech, pełniących różne funkcje zespołów (rys. 10.4 b):

- napędu: silnika elektrycznego, sprzęgła przekładni mechanicznej oraz łożyska misy,
- zespołu mielenia: układu rolek, misy z wykładziną, konstrukcji z pierścieniem dyszowym, podzespołów dźwigni z osiami oraz wspornikami osi, układów: hydraulicznych lub sprężynowych docisku rolek,
- separatora pneumatycznego: przepływowego bez napędu oraz turbinowego z własnym napędem.



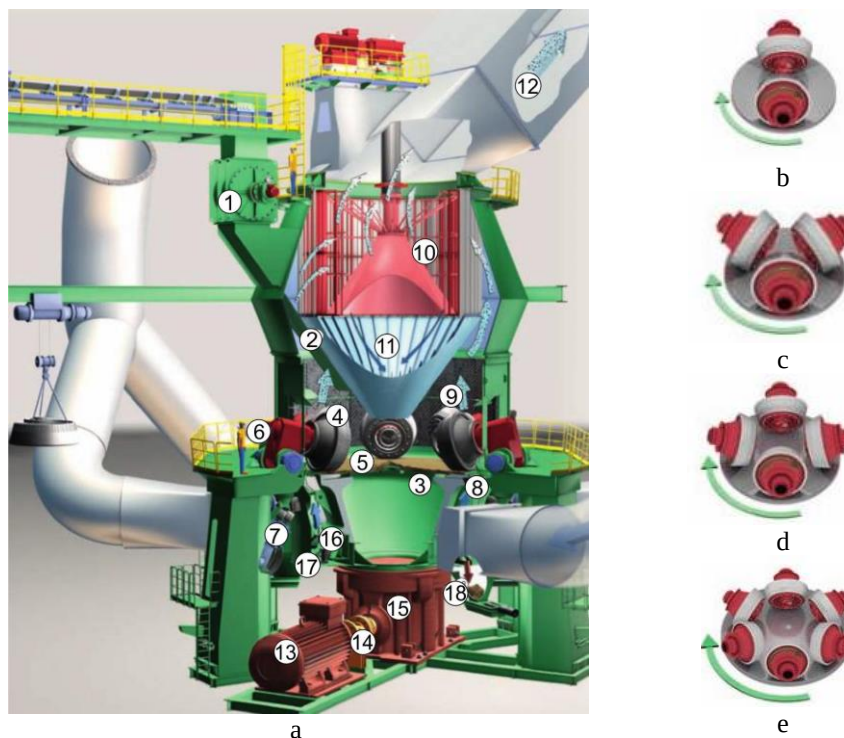
Rys. 10.3. Schematy budowy rolek oraz działania młynów rolowo-misowych:
 a - z rolką walcową, b - rolką stożkową i płaską misą, c - rolką stożkową i misą stożkową, d - z rolką toroidalną, e - z rolką kształtową, f - z dwoma rolekami półtoroidalnymi, g - z podwójnymi rolekami toroidalnymi



Rys. 10.4. Budowa i sposób działania młynów rolowo-misowych LM z rolką stożkową i płaską misą: a - młyn czterorolkowy z dociskiem hydraulicznym, b - dwurolkowy z dociskiem sprężynowym [21], N - napęd, ZM - zespół mielący, S - separator, 1 - rolka, 2 - misa, 3 - wykładzina misy, 4 - pierścień dyszowy, 5 - dźwignia rolki, 6 - oś dźwigni, 7 - siłownik hydrauliczny, 8 - wlot gorących gazów lub powietrza, 9 - przekładnia napędu misy, 10 - silnik, 11 - wirnik separatora turbinowego, 12 - wylot gazowej zawiesziny zmielonego materiału, 13 - strefa wstępnej separacji, 14 - stożek zawrotu nadziarna z separatora, 15 - rura wlotu nadawy, 16 - wlot nadawy, 17 - śluza obrotowa

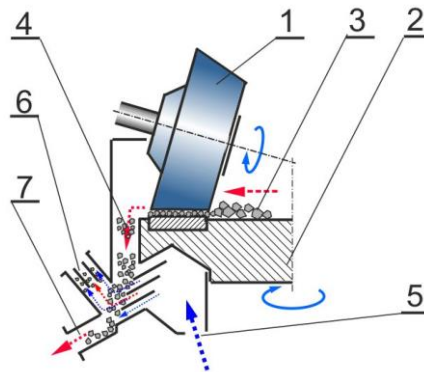
Zespoły tworzą jedną całość i współpracując ze sobą oraz z otoczeniem młyna, to jest układem zasilania, podawania gazów suszących, lub powietrza oraz z układem odbioru zmielonego materiału w fazie gazowej. Każda z firm produkujących te młyny stosuje własne rozwiązania wszystkich w/w zespołów. Wyjątek stanowią silniki elektryczne.

Na rysunku 10.5 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne największego młyna firmy Loesche – sześciorolkowego oraz warianty układów rolek w młynach tej firmy.



Rys. 10.5. Budowa największego młyna wraz z układem mielenia oraz sposobem wymiany rolki oraz układy rolek w młynach LM firmy Loesche [22]: a - młyn wraz z instalacją, b, c, d, e – układy rolek, 1 - śluza obrotowa, 2 - zsuwnia nadawy, 3 - misa, 4 - rolka, 5 - wykładzina misy, 6 - dźwignia rolki, 7 - układ docisku rolki, 8 - pierścień dyszowy, 9 - strumień gazu ze zmielonym materiałem, 10 - wirnik separatora turbinowego, 11 - zawrót nadziarnia, 12 - wylot zmielonego materiału z gazem, 13 - silnik, 14 - sprzęgło, 15 - przekładnia główna, 16 - kanał pierścieniowy, 17 - zgarniaki, 18 - wylot zgarniętego materiału

Na rysunku 10.6 przedstawiono inny sposób odbioru zmielonego materiału z młyna tocznego, stosowany przy mieleniu materiałów bez suszenia oraz materiałów o dużej podatności na mielenie [16].

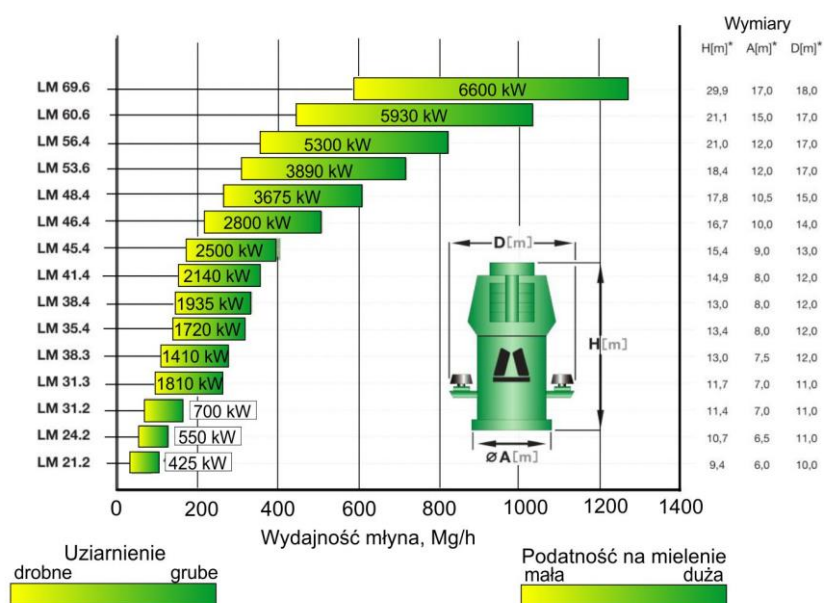


Rys. 10.6. Sposób odbioru zmielonego materiału z młyna z jego wstępną klasyfikacją ziarnową: 1 - rolka, 2 - misa, 3 - nadawa, 4 - zmielony materiał, 5 - wlot powietrza, 6 - odbiór gotowego produktu-klassy drobnej, 7 - odbiór nadziarna, klasy „grubej”

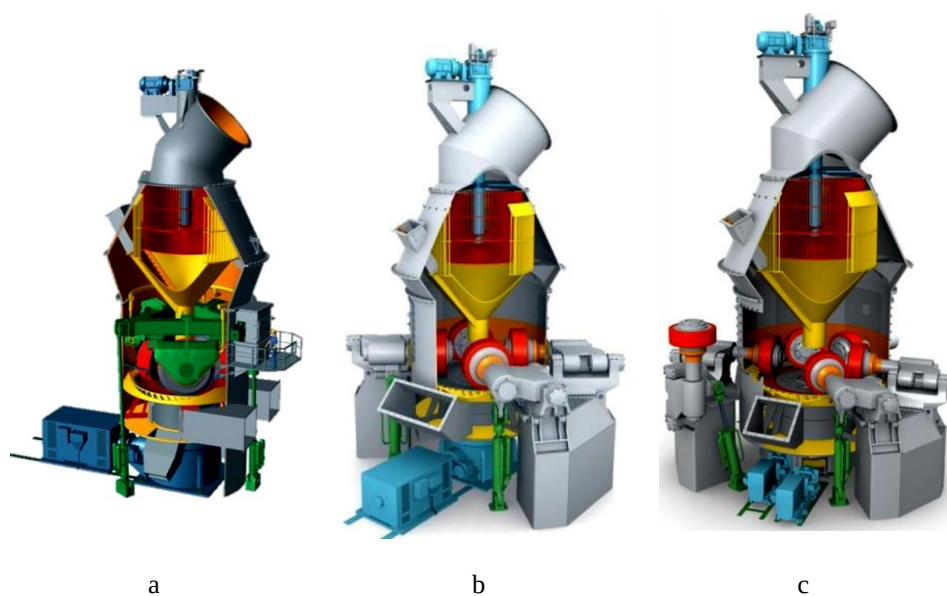
Na rysunku 10.7 zamieszczono aktualny program produkcyjny młynów LM do mielenia surowców firmy Loesche [22] uwzględniający podstawowe parametry tych młynów.

Od kilkunastu lat firma Loesche oferuje również młyny do mielenia abrazyjnych materiałów, takich jak klinkier cementowy, wapno palone czy rudy zawierające znaczną ilość minerałów o twardości 7 w skali Mohsa [23].

Inne rozwiązania konstrukcyjne młynów tocznych oferuje firma Chrystian Pfeiffer, która pierwszy tego typu młyn – MPS wyprodukowała w 1956 roku [24] z rolkami o kształcie przedstawionym na rysunku 10.3d oraz wspólnym dla wszystkich rolek układem hydraulicznym docisku składającym się z trzech jednakowych cylindrów umieszczonych co 120° , połączonych wspólnym pierścieniem (rys. 10.8 a). Najnowszy młyn - MVR z nowymi rozwiązaniami: budowy rolki, to jest w kształcie walca (rys. 10.3 a) oraz indywidualnymi układami docisku rolek zaoferowała w 2006 roku. Młyn ten produkowany jest w dwóch wersjach – standardowej z czterema rolkami z klasycznym układem napędu jednym silnikiem (rys. 10.8 b) oraz w wersji większej z sześcioma rolkami, z nowym napędem kilkoma silnikami tzw. Multidrive (rys. 10.8 c).

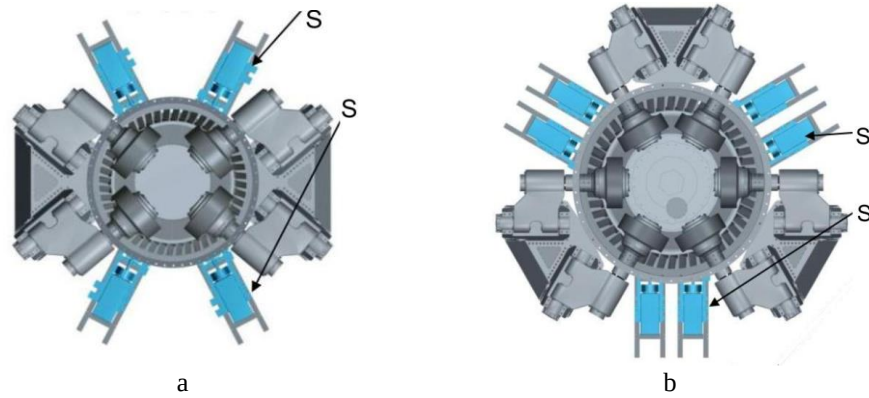


Rys. 10.7. Podstawowe parametry młynów rolowo-misowych LM do mielenia surowców [22]

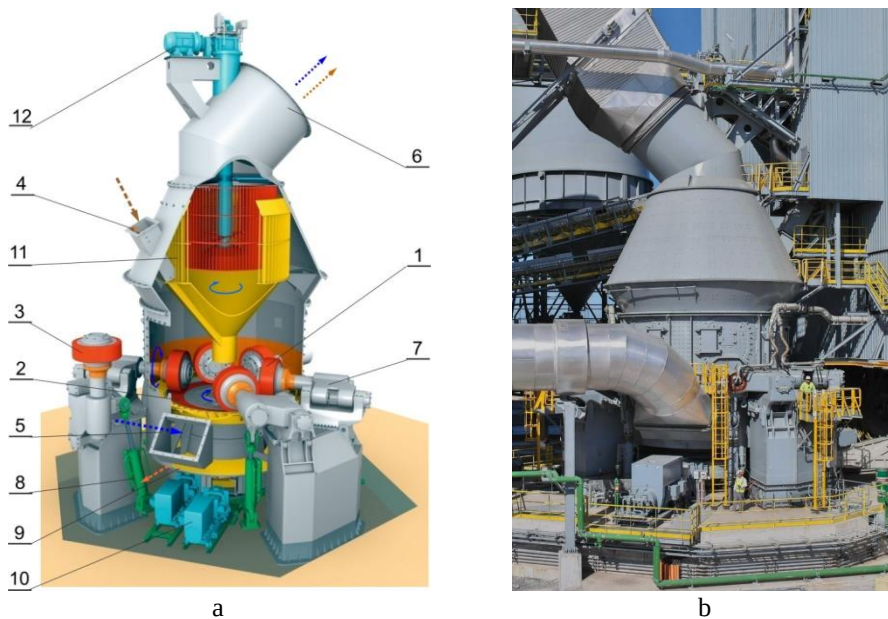


Rys. 10.8. Rozwiązania konstrukcyjne młynów firmy Gebr. Pfeiffer:
a - MPS, b - MVR w wersji Standard, c - MVR w wersji Multidrive [24]

Pewną wadą młynów typu MPS był skomplikowany montaż i serwis rolek. Problemy te firma G. Pfeiffer nie tylko usunęła, ale znacząco poprawiła konstrukcję tego typu młynów. Nowe rozwiązanie znacznie uprościło montaż, przeglądy oraz obsługę młyna. Na rysunku 10.9 przedstawiono nowe rozwiązania napędu młynów MVR, a na rysunku 10.10 budowę i widok młyna [24].



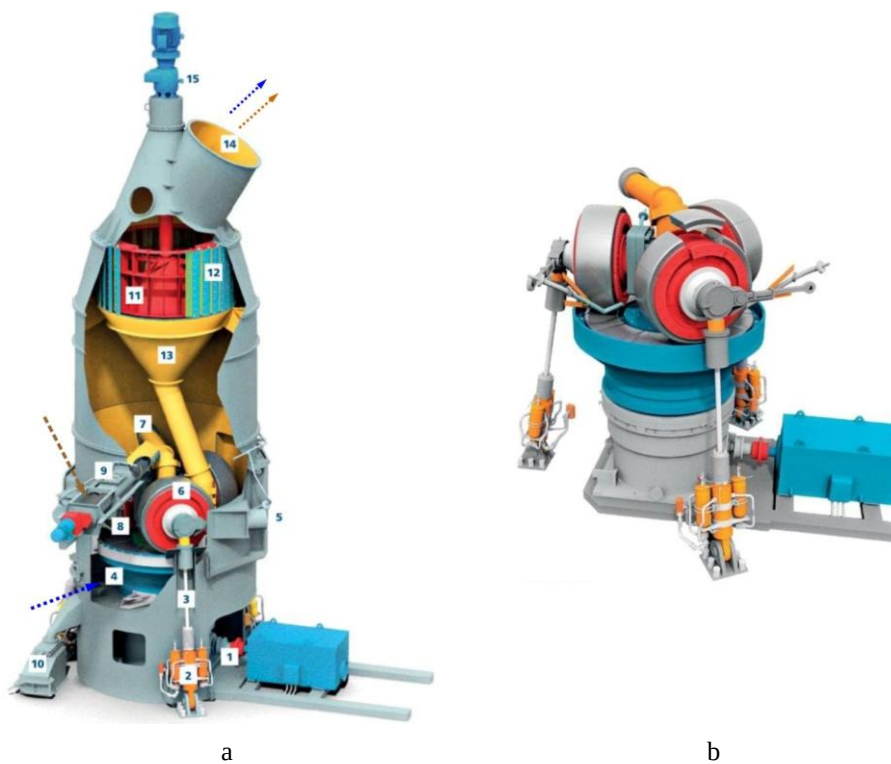
Rys. 10.9. Rozwiązania konstrukcyjne napędów młynów misy młynów MVR firmy G. Pfeiffer [24]: a - wersji Standard (czterorolkowego), b - Mutlidrive (sześciorolkowego)



Rys. 10.10. Budowa młynów MVR firmy Gebr. Pfeiffer: a - MVR w wersji Standard, b - widok młyna MVR w wersji standard [24]: 1 - rolka, 2 - misa, 3 - położenie rolki podczas przeglądu, 4 - wlot nadawcy, 5 - wlot gazów, 6 - wylot zmielonego materiału z gazem 7 - dźwignia rolki, 8 - układ docisku rolki, 9 - odbiór zgarniętego materiału, 10 - silnik, 11 - wirnik separatora turbinowego, 12 - napęd wirnika

Firma Gebr. Pfeiffer w latach 2011-2016 zastosowała 19 młynów MVR do mielenia cementu o mocy od 959 do 11 500 kW i wydajności od 20 do 530 Mg/h. Firma Siemens oferuje napędy do tych młynów o mocy jednego modułu napędowego 2,75 MW. Wówczas kompletny układ napędowy młyna będzie dysponował mocą $6 \times 2,75 \text{ kW}$, czyli 16,5 MW [25]. Jest to największa moc młyna tocznego.

Duże doświadczenia w produkcji tych młynów ma firma FLSmidth, która pierwszy tego typu młyn wyprodukowała w 1922 roku [26]. Firma ta produkuje dwa rozwiązania konstrukcyjne młyna tocznego, to jest Atox w wersjach do mielenia węgla [27] oraz surowców cementowych, chemicznych oraz cementu [28] z rozwiązaniem strefy mielenia podanym na rysunku 10.3 a oraz młyn OK przeznaczony głównie do mielenia cementu [26] ze strefą mielenia podaną na rysunku 10.3 e.

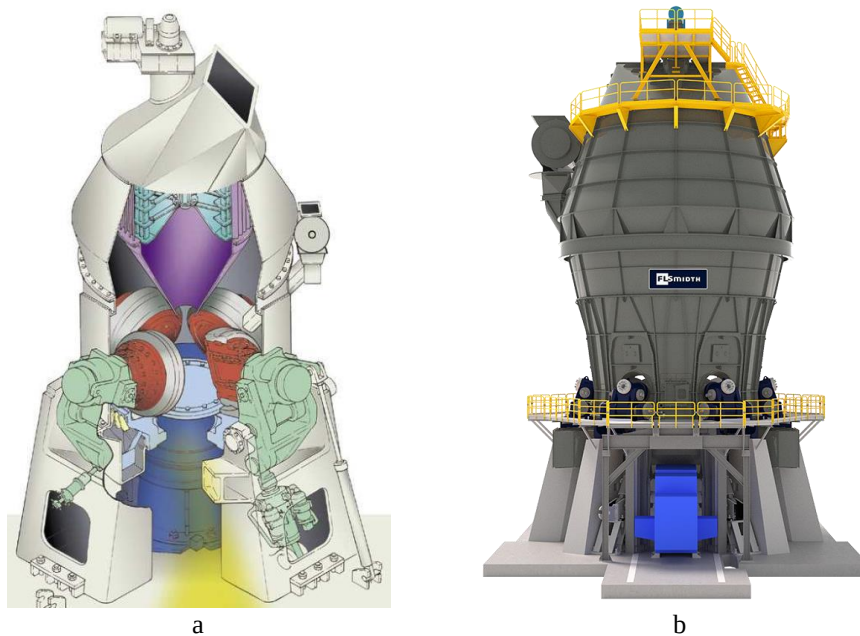


Rys. 10.11. Budowa młyna Atox firmy FLSmidth do mielenia węgla: a - kompletny młyn, b - zespół roboczy (mielący) [27], 1 - napęd, 2 - układ docisku rolki, 3 - misa, 4 - misa, 5 - wspornik dźwigni, 6 - rolka, 7 - uszczelnienia, 8 - dysza wtrysku wody, 9 - dozownik nadawy, 10 - odbiór nie zmielonego materiału, 11 - wirnik separatora turbinowego, 12 - łopatki kierujące, 13 - lej zawrotu nadziarna, 14 - odbiór zmielonego węgla z fazy gazowej, 15 - napęd wirnika

Od 2006 roku firma ta sprzedaje około 70 młynów tego typu rocznie, a w 2014 roku około 40 sztuk z tendencją malejącą. Na rysunku 10.11 zamieszczono rozwiązanie konstrukcyjne młyna Atox przeznaczonego do mielenia węgla z jednoczesnym suszeniem.

Młyny Atox przeznaczone do mielenia surowców różnią się budową [28]. Cechuje je bardziej smukły kształt, mają również inne rozwiązania poszczególnych pomocniczych podzespołów: dozowania nadawy, wprowadzania nadziarna na misę oraz dolnej części młyna, w której umieszczona jest misa.

Na rysunku 10.12 zamieszczono rozwiązanie konstrukcyjne kompletnego młyna OK firmy FLSmidth. Na rysunku 10.13 przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne układów roboczych młynów OK rolka-misa stosowanych przy mieleniu surowców i cementu.



Rys. 10.12. Młyn OK firmy FLSmidth: a – przekrój (czterorolkowy) [26],
b – widok (sześciorolkowy) [29]

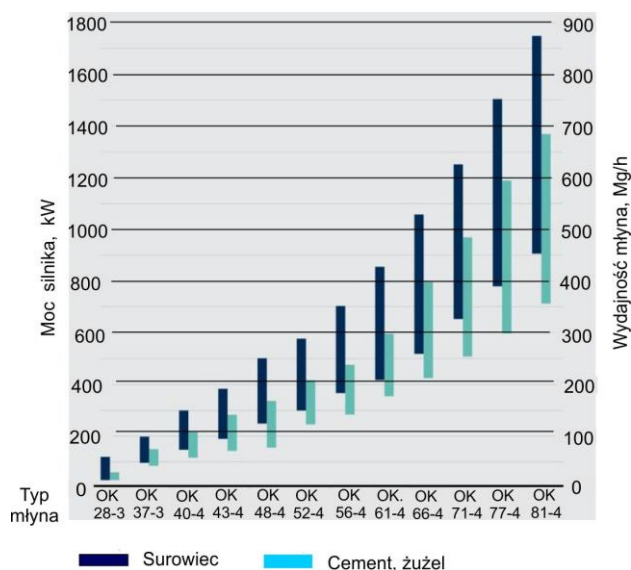
Natomiast na rysunku 9.14 zamieszczono podstawowe parametry typoszeregu młynów OK stosowanych do mielenia surowców i cementu.

Oryginalnym rozwiązaniem rolki zastosowanej w młynach serii OK do mielenia cementu i żużli łączy się z odpowiednim usytuowaniem rolki ze strefą

rozdrabniania misy. Zastosowanie w rolce wyżłobienia na całym obwodzie rolki zwiększa nacisk rolki w miejscach styku z materiałem rozdrabnianym na misie, umożliwia wydostanie się z pod rolki materiału rozdrobnionego oraz zapewnia większą trwałość rolki. Ma to szczególne znaczenie przy rozdrabnianiu materiałów o wysokiej wytrzymałości na ściskanie, zwłaszcza powyżej 150 MPa oraz materiałów abrazyjnych, a takimi są klinkier cementowy, a w szczególności żużle hutnicze.

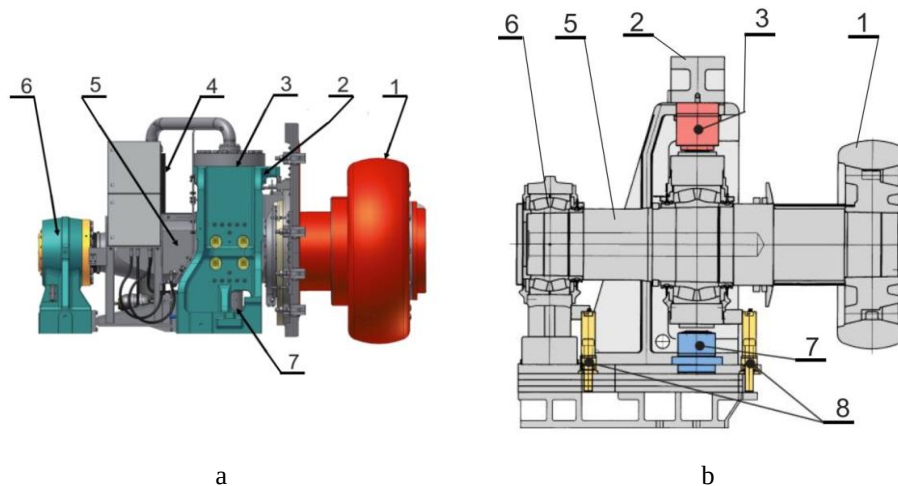


Rys. 10.13. Budowa układu rozdrabniania (rolka-misa) młyna OK firmy FLSmidth: a – czterorolkowy do mielenia surowców, b – sześciorolkowy do mielenia cementu [30]



Rys. 10.14. Podstawowe parametry młynów OK firmy FLSmidth do mielenia surowców, cementu i żużli

Własne konstrukcje młynów tocznych oferuje firma Polysius z koncernu ThyssenKrupp [31]. Starsze konstrukcje tych młynów miały układ roboczy rolek półtoroidalnych przedstawiony na rysunku 10.3. Obecnie produkowane mają układ dwóch rolek toroidalnych dociskanych do misy jedną dźwignią oraz nowe rozwiązanie młyna o nazwie Quadropol z czterema pojedynczymi rolkami toroidalnymi usytuowanymi pod kątem prostym do poziomej misy oraz z oryginalnym układem docisku rolki (rys. 10.15) [32].

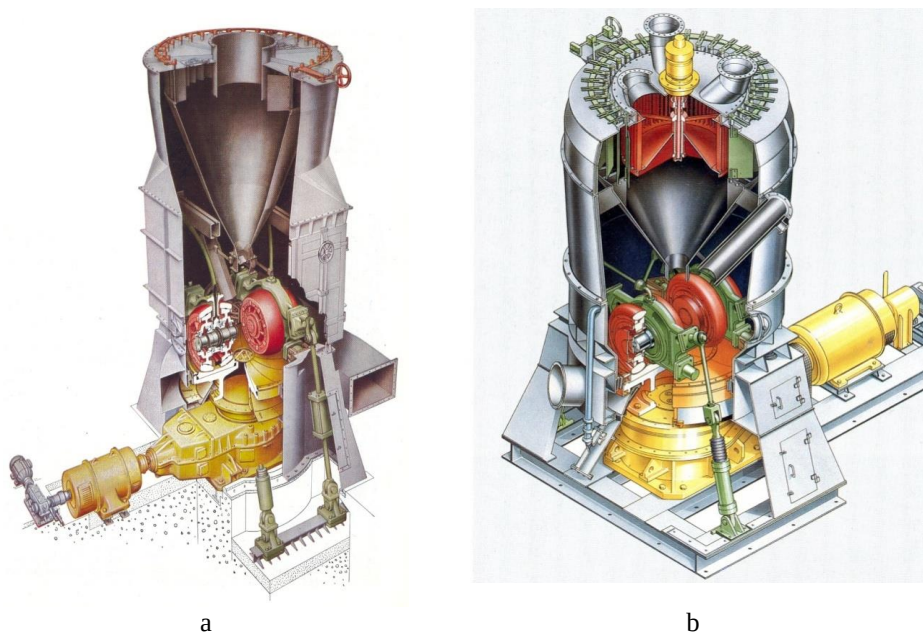


Rys. 10.15. Rolka młyna tocznego Quadropol z nowym układem hydraulicznym docisku rolki [32], a - widok, b - przekrój: 1 - rolka, 2 - rama napinająca, 3 - siłownik hydrauliczny dociskający rolkę, 4 - akumulator ciśnienia, 5 - oś rolki, 6 - łożysko rolki, 7 - siłownik hydrauliczny startowy

Firma Polysius produkuje pięć typoszeregów młynów tocznych [31, 32]:

- RMK – do mielenia węgla (13 wielkości) o mocy od 30 do 1250 kW i wydajności od 2,2 do 96 Mg/h,
- RM – do mielenia surowców (14 wielkości) o mocy od 580 do 4800 kW i wydajności od 90 do 740 Mg/h,
- RMS – do mielenia surowców (13 wielkości) o mocy od 700 do 4450 kW i wydajności od 22 do 139 Mg/h,
- RMC – do mielenia cementu (13 wielkości) o mocy od 502 do 3188 kW i wydajności od 33 do 209 Mg/h,
- Quadropol – do mielenia surowców (20 wielkości) o mocy od 400 do 7400 kW i wydajności od 70 do 990 Mg/h – przy mieleniu surowców o średniej twardości.

Na rysunku 10.16 zamieszczono dwa rozwiązania konstrukcyjne młynów tocznych firmy Polysius.



Rys. 10.16. Młyny toczne firmy Polysius [33]: a - do mielenia surowców z podwójnymi rolkami półtoroidalnymi, b - do mielenia węgla z rolkami toroidalnymi

Czeska firma PSP Engineering produkuje typoszereg młynów o symbolu KTM, których budowa jest zbliżona do młynów firmy Loesche. Typoszereg składa się z 8 młynów o mocy silnika głównego od 15 do 500 kW oraz wydajności od 0,8 do 50 Mg/h – przy mieleniu materiałów o średniej twardości [34].

W Polsce firma FPM S.A. produkuje młyny toczne typu "RP" na podstawie umowy licencyjnej z niemiecką firmą EVT Energie und Verfahrenstechnik GmbH [35]. Są to młyny z rolkami stożkowymi oraz pochyloną misą, o wydajności poniżej 100 Mg/h.

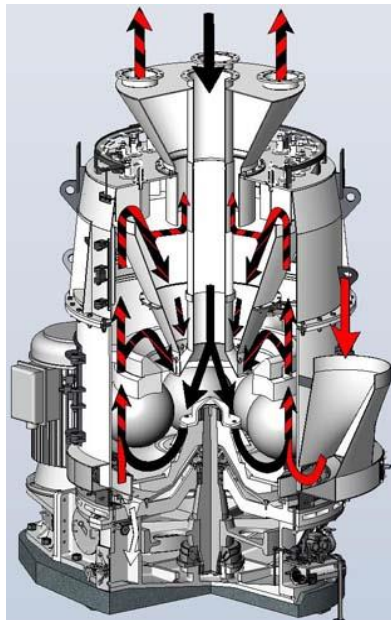
Młyny z rolkami stożkowymi produkowane są również przez amerykańską firmę Raymond [36] oraz firmę Stedman [37]. Młyny te mają mniejsze wydajności – nie przekraczające 100 Mg/h.

Młyny typu MPS z rolkami toroidalnymi pochylonymi produkuje również amerykańska firma Babcock & Wilcox [38].

10.3. Młyny pierścieniowo-kulowe

Młyny pierścieniowo-kulowe produkują firmy Claudius-Peters [39], Stedman [37], Babcock & Wilcox [38], a w Polsce FPM S.A. Istotną różnicą w budowie tych młynów w porównaniu z młynami rolowo-misowymi jest zastąpienie rolek ułożyskowanych w łożyskach tocznych swobodnymi kulami umieszczonymi w półtoroidalnych wyłobieniach dwóch półpierścieni: dolnego i górnego. Ogólną budowę i sposób działania tego młyna zamieszczono na rysunku 10.1 b.

Zastosowanie kul znacząco zmieniło warunki rozdrabniania w tych młynach. W procesie rozdrabniania toczącymi się po obracającym się kształtowym pierścieniu większy udział mają obciążenia styczne, odległości pomiędzy kulami o średnicach do 1 m są znacznie mniejsze niż w przypadku rolek o średnicach do 2,5 m, ponadto kule pozbawione „więzów łożyskowania” dostosowują swoje położenie do warstwy znajdującego się na pierścieniu materiału.



Rys. 10.17. Młyn MKM produkcji firmy FPM z separatorem przepływowym [3]

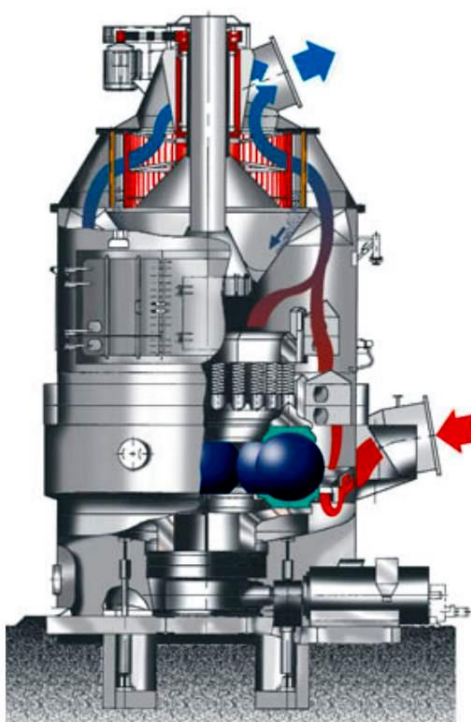
Dzięki zastosowaniu do rozdrabniania kul pozbawionych łożysk, młyny te cechują:

- niższe koszty inwestycyjne, dzięki wyeliminowaniu węzłów chłodzenia,

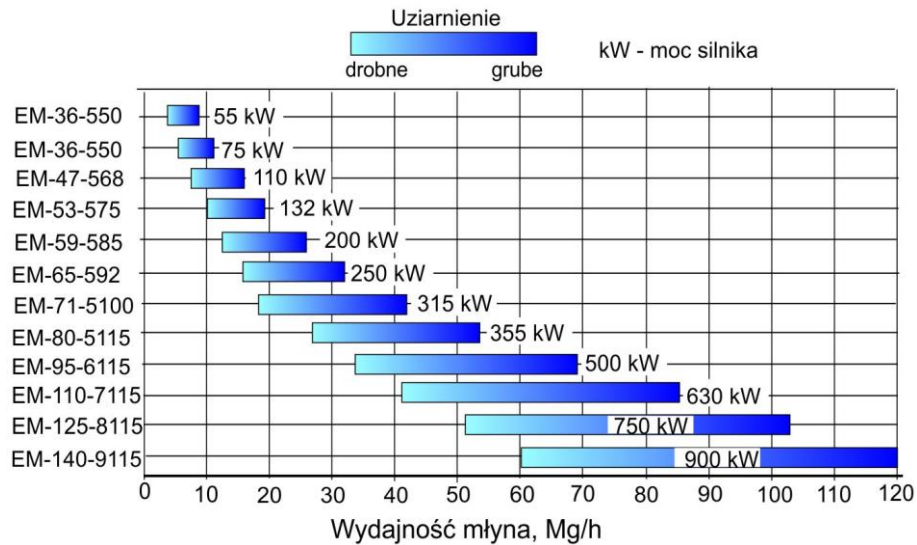
- niższe koszty eksploatacyjne dzięki większej żywotności kul,
- możliwość pracy przy wyższych (do 650°C) gazów suszących bez konieczności stosowania układów chłodzenia rolek i monitorowania ich temperatury,
- łatwiejszy serwis – wymiana kul.

Większość młynów pierścieniowo-kulowych wyposażane jest w separatory przepływowe. W najnowszych konstrukcjach młynów zastosowano separatory turbinowe charakteryzujące się korzystniejszymi parametrami technologicznymi, zwłaszcza dokładnością klasyfikacji ziarnowej.

Rozwiązania konstrukcyjne młynów pierścieniowo-kulowych zamieszczono na rysunkach 10.17 i 10.18. Podstawowe parametry młynów podano na rysunku 10.19.



Rys. 10.18. Młyn EM produkcji firmy Claudius Peters z separatorem turbinowym [39]

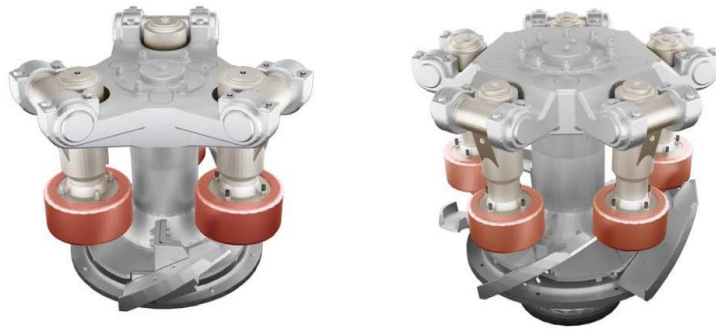


Rys. 10.19. Podstawowe parametry młynów pierścieniowo-kulowych firmy Claudius-Peters [39]

10.4. Młyny wahadłowe

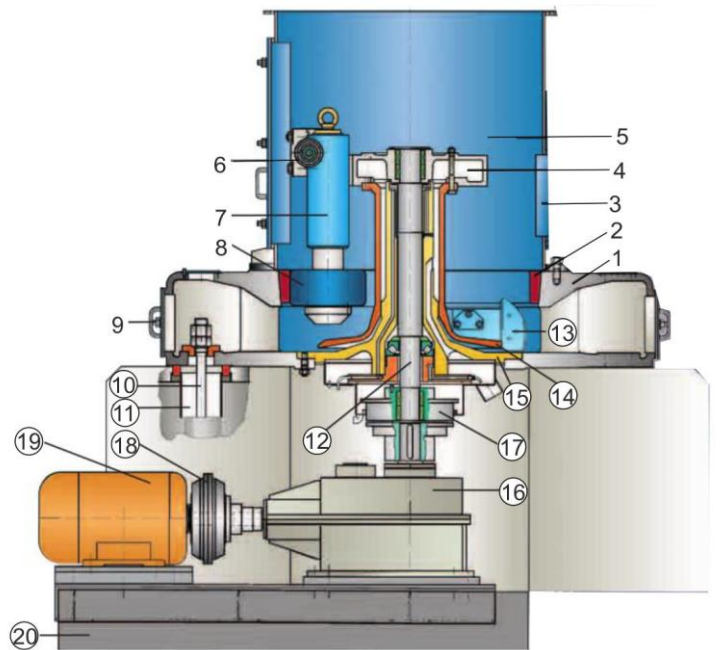
Młyny wahadłowe zwane są w polskiej literaturze młynami pierścieniowo-walcowymi [17]. Siła docisku rolek na nieruchomym pierścieniu pochodzi od siły odśrodkowej działającej na rolki, których osie zamocowane są wahliwie na obrotowym wirniku generowanej przez prędkość obrotową wału pionowego wirnika. Schemat budowy i działania tego młyna zamieszczono na rysunku 10.1c. Wykorzystanie siły odśrodkowej jest rozwiązaniem znacznie mniej skomplikowanym niż kosztowne układy hydrauliczne lub tańsze układy sprężynowe. Ponadto takie rozwiązanie ułatwia rozruch młyna.

Większość tych młynów wyposażano w cztery rolki [14, 17]. Obecnie produkowane tego typu młyny mają zróżnicowaną liczbę rolek od 3 do 7. Firma Verdes produkuje młyny wyposażone w 3 lub 5 rolek [40]. Na rysunku 10.20 zamieszczono rozwiązania konstrukcyjne wirników wyposażonych w 3, 5 lub więcej rolek.

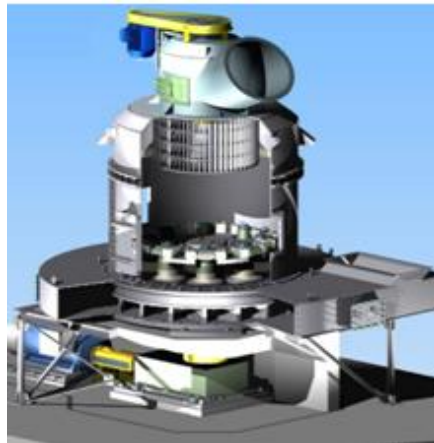


Rys. 10.20. Rozwiązania konstrukcyjne wirników młynów wahadłowych produkowanych przez firmę Verdes [40]

Na rysunku 10.21 przedstawiono rozwiązanie młyna firmy Neuman & Esser [41], rysunku 10.22 schemat budowy młyna wahadłowego typ 120 firmy Raymond [42], a na rysunku 10.23 widok młyna Molomax firmy Manfredini & Schianchi [43].



Rys. 10.21. Młyn wahadłowy firmy Neuman & Esser [41]: 1 - Wspornik pierścienia, 2 - pierścień, 3 - kłapa rewizyjna, 4 - wspornik rolek, 5 - strefa odbioru zmielonego materiału, 6 - oś obsady rolki, 7 - obsada rolki, 8 - rolka, 9 - pokrywa rewizyjna, 10 - łącznik śrubowy, 11 - obsada łącznika, 12 - wał wirnika, 13 - zgarniak, 14 - osłona wału wirnika, 15 - obsada, 16 - przekładnia, 17 - łącznik wału wirnika, 18 - sprzęgło, 19 - silnik, 20 - rama młyna



Rys. 10.22. Młyn wahadłowy – wielorolkowy firmy Raymond typ 120 [42]



Rys. 10.23. Młyn wahadłowy MolotMax firmy Manfredini & Schianchi [43]

W najnowszych konstrukcjach młynów wahadłowych stosuje się najczęściej separatory turbinowe, które umożliwiają dokładniejszą klasyfikację ziarnową oraz umożliwiają szybką zmianę składu ziarnowego produktu mielenia. Zastosowanie separatora turbinowego jednak powiększa zainstalowaną moc młyna od 60÷80% przy młynach o wydajności do kilku Mg/h, do około 15% przy młynach o wydajności 80÷100 Mg/h.

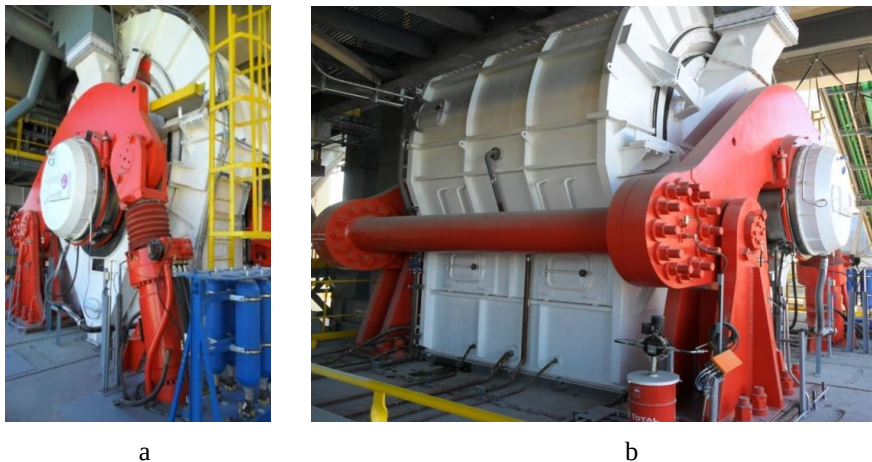
Wydajność młynów wahadłowych nie przekracza 100 Mg/h. Firma Neuman & Esser oferuje młyny o wydajności do 80 Mg/h. Firma Raymond

oferuje młyny o największej zainstalowanej mocy to jest 1200 kW oraz silnikiem separatora o mocy 150 kW [42].

10.5. Młyny jednowalcowe – Horomill

Rozwiązanie konstrukcyjne tego młyna pojawiło się pod koniec ubiegłego wieku i jest oferowane tylko przez jedną firmę francuską [44], przy czym najwięcej zastosowań tego młyna ma miejsce po 2002 roku. Nazwa handlowa Horomill tego młyna w języku angielskim pochodzi od jego pełnej nazwy czyli: *horizontal roller mill* [45]. Proces mielenia materiału w tym młynie zachodzi w walcowej obrotowej komorze, w której wewnątrz znajduje się rolka (walec) (rys. 10.1 d). Rolka ta z obu stron dociskana jest do wewnętrznej powierzchni komory układem hydraulicznym. Materiał podawany jest do strefy mielenia z jednej strony, a po zmieleniu przez rolkę oddzielany od wewnętrznej części komory zgarniakiem na płytę, która odprowadza produkt mielenia na zewnątrz młyna do separatora oraz jednocześnie działa jak waga przepływowa – mierząc natężenie przepływu materiału [46, 47, 48, 49].

Schemat budowy i działania jednorolkowego młyna Horomill przedstawiono na rysunku 10.1d. Natomiast na rysunku 10.24 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne młyna Horomill zastosowane do mielenia cementu [45, 46].

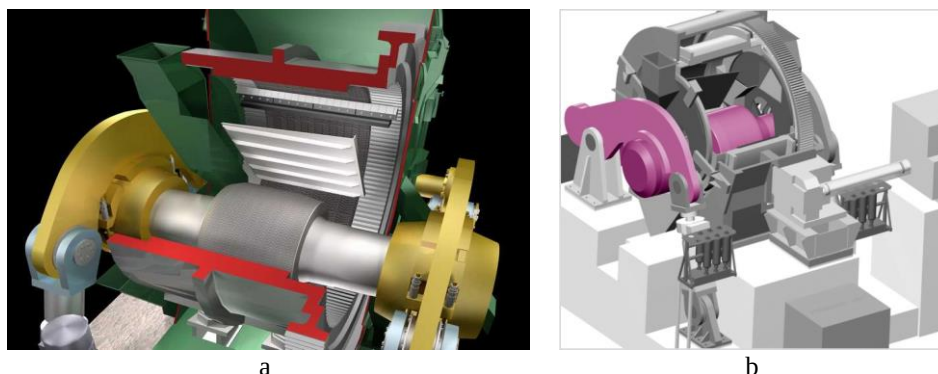


Rys. 10.24. Młyn walcowy HOROMILL - firmy Fives FCB [46]:
a - widok z boku, b - widok od strony łącznika dźwigni

Na rysunku 10.25 zamieszczono uproszczone rysunki młyna Horomill. Rysunek 10.25 a uwidacznia szczegóły rozwiązania strefy rozdrabniania, to jest

rolkę, dźwignie rolki, komorę, koło zębate napędu komory, zgarniak rozdrobnionego materiału z powierzchni komory oraz płytę – zsuwnię do odprowadzania zmielonego materiału z młyna oraz do pomiaru natężenia przepływu tego materiału.

W tabeli 10.1. zamieszczono podstawowe parametry młynów Horomill uzyskane przy mieleniu: cementów (dwóch rodzajów), żużla oraz surowców do produkcji cementu.



Rys. 10.25. Budowa młyna jednorolkowego Horomill:
a - wizualizacja strefy mielenia, b - całego młyna [45, 46]

**Podstawowe parametry techniczne młynów HOROMILL firmy Fives FCB
przy mieleniu cementów, żużla hutniczego i surowca do produkcji cementu,
S – powierzchnia właściwa cementu wg Blaine’a, p.n.s. – pozostałość na sicie [44, 45]**

Tabela 10.1.

Material	Cement I, S, cm ² /g Blaine'a		Cement II/A-L, S, cm ² /g Blaine'a		Żużel, S, cm ² /g Blaine'a		Surowiec Cement., <10% p.n.s. 90 μm
Pow. właściwa	3000	4000	3500	4500	3500	4500	
Typ	Wydajność młyna [Mg/h]						
2000	20	12	26	16	14	10	55
2400	34	20	40	28	24	16	90
2800	50	30	60	42	36	24	135
3600	100	60	120	80	70	48	260
4400	160	95	195	130	115	80	420
Twin 3800	230	140	280	190	160	112	600
Twin 4400	320	190	390	260	230	160	840
Twin 4600	350	220	440	290	260	170	940

Literatura

1. Drzymała Z., Dzik T., Sidor J.: Kombinatoryka w budowie młynów, Cement Wapno Gips 1987, nr 12, s. 267-273
2. Drzymała Z., Dzik T., Guzik J., Kaczmarczyk S., Kurek B., Sidor J.: Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych, PWN Warszawa 1992
3. <http://www.fpmsa.com/portal/pub/view/0xded0f0>
4. Reichardt Y.: Mielenie kamienia wapiennego i wapna palonego w młynach misowo-rolkowych MPS. Cement wapno Beton 2005 Nr 3 s. 138-141
5. Sitkowska J., Duda J., Duczkowska-Kądziel A., Wasilewski M.: Optymalizacja procesu przemiału cementu na przykładzie Cementowni Odra S.A. s. 752-763
6. Mateuszuk S.: Wybrane zagadnienia mielenia materiałów w pionowych młynach rolkowo-misowych.
7. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
8. ZKG-Handbuch Zementanlagenbau 2016/2017 Leitfaden für Einsteiger in die Zementindustrie. 2016 Bauverlag BV GmbH, Gütersloh Geschäftsführer: Karl-Heinz Müller Eingetragen im Amtsgericht Gütersloh HRB 4172
9. Tiggesbäumker, P.; Knobloch, O.: Zementherstellung mit der Rollenmühle - Entwicklung und Aussichten. Zement-Kalk-Gips 32(1979)4, 166/170.
10. <file:///A:/13-MONOGRAF-2017/9-R-MLYNY%20ROL-MIS/9-R%20UZYTA%20literatura/06-Flacher-Holcim-vertical-roller-mills-for-clinker-grinding-with-Holcim.pdf>
11. Raymond® 120" Roller Mill. www.arvos-group.com
12. Cement Seminar Process Technology Roller Mills. Holderbank Process Technology Division CC 9409, 31-01-94
13. Tematyczne Zestawienie Dokumentacyjne nr 1/74 „Młyny Toczne Rolkowe (walcowe misowe)”. Instytut Wiążących Materiałów Budowlanych, Branżowy Ośrodek Informacji Technicznej i Ekonomicznej, Kraków 1974
14. Lynch A. J., Rowland C. A.: The history of grinding. Published by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. 8307 Shaffer Parkway Littleton, Colorado 80127 Copyright © 2005 by the Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. All rights reserved. Electronic edition published 2009
15. Naske C.: Zerkleinerungsvorrichtungen und Mahlanlagen. Leipzig Verlag Von Otto Spamer 1911

16. Reichert M.: Erzmahlung in Wälzmühlen. Dissertation. Technische Universität Bergakademie, Freiberg 2016
17. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
18. Sidor J., Dzik T.: Młyn rolkowy, Nr 136 750, opublikowany 31-03-1987, Int. Cl3, B02C 17/10
19. Brundiek, H.: Die Wälzmühle. Geschichte und heutiger Stand. Teil 1. Aufbereitungs-Technik 30, 1989, Nr 10, S. 609–619
20. Brundiek, H.: Die Wälzmühle. Geschichte und heutiger Stand. Teil 2. Aufbereitungs-Technik 30, 1989, Nr 12, S. 735–745
21. Loesche Technik eine Erfolgsgeschichte. www.loesche.com
22. Loesche Mühlen für Zementrohrmaterial. 1000 03/2009 www.loesche.com
23. Loesche Mühlen für Erz und Mineralien. 500 09/2009 www.loesche.com
24. GEBR. PFEIFFER State-of-the-art technology for cement grinding. VDMA-Symposium Tehran - 2016 May 10/11
25. Innovative FLENDER vertical mill drives for grinding coal, raw meal, slag and clinker. www.siemens.com/drives-contact
26. The FLSmidth OK mill. The high-efficiency and reliable roller mill for cement and slag grinding. www.flsmidth.com
27. Atox coal mill. www.flsmidth.com
28. Atox raw mill. www.flsmidth.com
29. www.flsmidth.com
30. OK mill The most reliable and efficient mill for raw and cement grinding. C05-17-300-3 –Eng. www.flsmidth.com
31. Polysius roller mills for grinding. A Company of ThyssenKrup Technologies.
www.polysiususa.com/minerals/.../1593_gb_roller_mill_04.pdf
32. The Quadropol roller mill.
www.polysiususa.com/minerals/grinding.../1568_GB_02.PDF
33. www.polysiususa.com
34. Vertical roller mills KTM. www.hard.com.pl/kruszarki/ktm.pdf
35. <http://www.fpmsa.com/portal/pub/view/0xded0f0>
36. www.innovativecombustion.com/pdfs/RayBowlMill.pdf
37. <http://www.stedman-machine.com/vertical-roller-mill>
38. <http://www.babcock.com/products/pulverizers-mills#>
39. Grinding Technik. www.claudiuspeters.com
40. Pendulum mills. www.verdes.com
41. www.neuman-esser.de
42. www.arvovs-group.com

43. <http://www.manfredinieschianchi.com>
44. Cordonnier A.: A New Grinding Process Horomill. 8th European Symposium on Comminution, Stockholm, Sweden, Fives FCB, May 1994 page 1-8
45. Genc O., Benzer, A. H.: Horizontal roller mill (HOROMILL application versus hybrid HPGR/ball milling in finishgrinding of cement, Minerals Engineering 22, 2009 pp. 1344-1349
46. The Fives FCB sustainable cement plant FICEM APCAC – XXIX Congreso Técnico – Costa Rica - San José – 05/09/2012
47. www.fivesgroup.com
48. Sidor J.: Kierunki rozwoju młynów do mielenia rud i surowców mineralnych Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie, Monografia: Praca Zbior., Red. nauk. K. Krauze; Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o. w Łędzinach, Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie. Łędziny-Kraków 2014. s. 180–193
49. Sidor J.: Kierunki rozwoju młynów do mielenia surowców i spoiw mineralnych. Materiały Ceramiczne, Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków. 2016 t. 68 nr 1, s. 61–69

11. Młyny - prasy walcowe

11.1. Problematyka młynów - pras wysokociśnieniowych

Młyny walcowe – zwane również przez niektórych producentów prasami walcowymi należą do szybko rozwijającej się, grupy wysokociśnieniowych maszyn rozdrabniających z wolnozmiennymi obciążeniami dezintegrującymi ziarna rozdrabnianego materiału w całej ich strukturze. Największy udział stanowią młyny z dwoma rolkami z osiami geometrycznymi równoległymi usytuowanymi w płaszczyźnie poziomej zwanymi HPGR oraz młyny o handlowych nazwach Beta-Mill i Premill.

Budowa młynów HPGR adaptowana została z brykociarek - pras walcowych, w szczególności odmiany zwanej – kompaktorami [1], dlatego nazywane są również prasami walcowymi. Prace nad tymi młynami rozpoczęto w latach 80. ubiegłego wieku. Podstawy teoretyczne sposobu pracy młynów walcowych oraz ich ogólne rozwiązanie konstrukcyjne opracował prof. Klaus Schönert [2], który jest również autorem ich najbardziej znanej nazwy, w polskim przekładzie to młyn walcowo-złożowy [3, 4, 5].

W literaturze niemieckojęzycznej młyny walcowe nazywane są: *Walzenmühlen* [3], *Gutbett Walzenmühlen* [4, 5], *Hochdruck-Rollenpressen* [6], *Rollenpresse* [7] oraz *Walzenpresse* [8].

W literaturze anglojęzycznej nazywane są najczęściej *high pressure grinding rolls* (HPGR) [9, 10], ale funkcjonują także inne nazwy, to jest *high compression roller mills* [11], *roller presses* [12, 13]. W literaturze polskiej używane są nazwy: młyn walcowy [14, 15], prasa walcowa [16] wysokociśnieniowa prasa walcowa [17, 18].

Najbardziej rozpowszechnione są młyny walcowe wysokociśnieniowe HPGR. Młyny te mają dwa walce o tej samej średnicy, obracające się w przeciwnych kierunkach. Oprawy łożysk jednego z walców są ustalone w konstrukcji młyna, natomiast oprawy łożysk drugiego walca są podparte zwykle siłownikami układu hydraulicznego [1]. Materiał wprowadzony grawitacyjnie pomiędzy obracające się walce jest rozdrabniany w całej strefie roboczej.

W praktyce przemysłowej użytkowane są jeszcze dwie inne konstrukcje tych młynów o nazwach handlowych: BETA-MILL [19, 20] - w dwóch rozwiązaniach konstrukcyjnych oraz PREMILL [21].

Zastosowanie młynów walcowych powodują następujące przesłanki:

- dobre rezultaty ekonomiczne – obniżenie jednostkowych kosztów zapotrzebowania na energię w samym młynie,

- zwiększenie podatności na rozdrabnianie materiału w następnym etapie przez wprowadzenie mikropęknięć do struktury ziaren,
- zwiększenie uzysku technologicznego w procesach przygotowawczych wzbogacania rud,
- obniżenie szkodliwości oddziaływania na otoczenie – mniejsze poziomy ciśnienia akustycznego oraz obciążeń dynamicznych przekazywanych na podłoże, niższy poziom emisji pyłu oraz mniejsza ilość wydzielanego ciepła [22, 23].

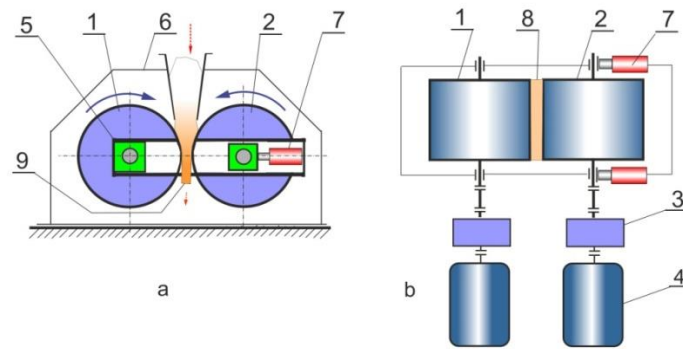
Sposób pracy tych młynów jest tylko zbliżony do pracy kruszarek walcowych. Istotne różnice to znacznie mniejsza prędkość obwodowa walców ($0,5\div 2$ m/s), wielokrotnie większe: naciski na rozdrabniany materiał (dochodzące do 300 MPa), znacznie większe obciążenia walców oraz ich wałów, łożysk oraz konstrukcji wsporczej [24].

Znaczenie problematyki młynów walcowych jest tak ważne, że było przedmiotem badań podstawowych na wielu uczelniach technicznych, czego rezultatem było kilkanaście rozpraw doktorskich. W latach 1987-1996 w Technische Universität Clausthal w Niemczech zakończono 7 prac, w University of California w Berkeley w USA w latach 1992-1995 dwie prace, w 2010 roku dwie prace (w Chile i w Republice Południowej Afryki w Uniwersytecie w Cap Town), w 2013 na Uniwersytecie Columbia w USA, a najnowszą w 2014 roku w Technicznym Uniwersytecie w Irkucku w Federacji Rosyjskiej.

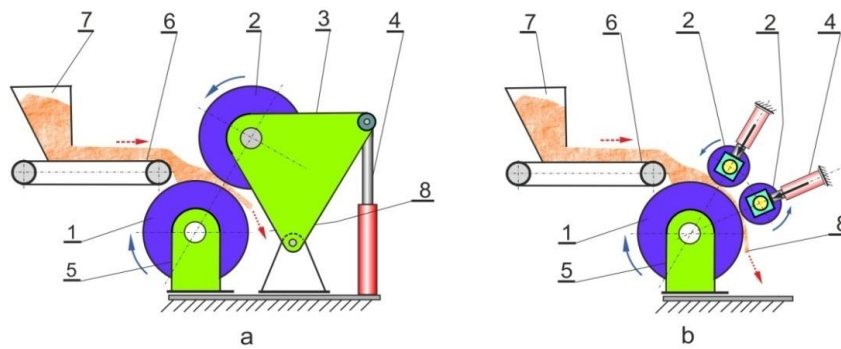
W Polsce zastosowano w przemyśle dwa młyny walcowe. Jeden w cementowni, drugi w zakładach wapienniczych [25].

Występują trzy podstawowe wersje konstrukcyjne tych młynów [26, 27]:

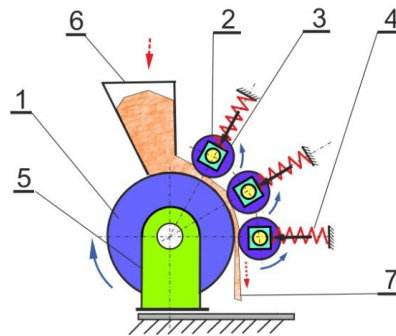
- klasyczny młyn walcowy HPGR – najpowszechniej stosowany z dwoma jednakowymi walcami o osiach geometrycznych usytuowanych w płaszczyźnie poziomej [22, 23, 24] (rys. 11.1),
- młyn z dwoma walcami, o tej samej średnicy o osiach geometrycznych usytuowanych w płaszczyźnie pochylonej do poziomu pod kątem ostrym - BETA-MILL [19, 20] (rys. 11.2), młyn ten produkowany jest w dwóch wersjach, to jest z jednym walcem dociskany oraz w wersji z dwoma walcami dociskanymi o mniejszej średnicy, zwany Multi Roller,
- młyn z jednym głównym walcem roboczym, do którego dociskane są trzy rolki rozdrabniające o osiach geometrycznych równoległych do osi geometrycznej głównego – PREMILL [21] (rys. 11.3).



Rys. 11.1. Schemat budowy i działania młyna walcowego HPGR:
 a - z boku, b - od góry, 1 - wałek z ustalonymi oprawami łożysk,
 2 - wałek z przesuwными oprawami łożysk, 3 - przekładnia mechaniczna,
 4 - silnik, 5 - konstrukcja wsporcza prasy, 6 - obudowa, 7 - układ hydrauliczny podparcia walca, 8 - wlot nadawy, 7 - wylot produktu rozdrabniania



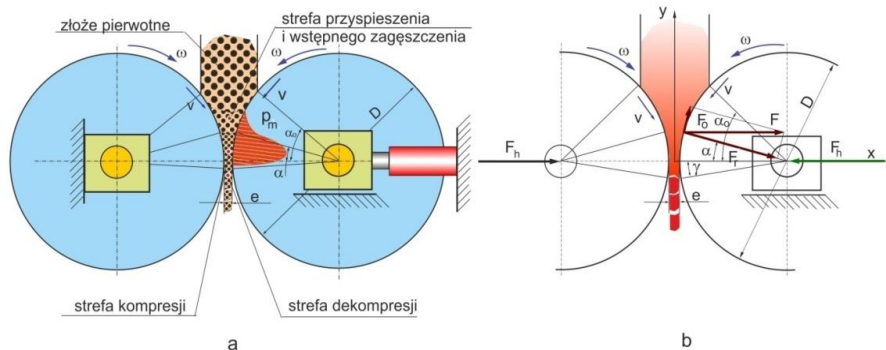
Rys. 11.2. Schemat budowy i działania młynów walcowych Beta-Mill:
 a - standardowego z dwoma walcami o jednakowej średnicy), b - typ MR z trzema walcami o różnych średnicach [19, 20], 1 - wałek dolny z nieruchomymi oprawami łożysk, 2 - wałek górny z ruchomymi oprawami łożysk, 3 - dźwignia,
 4 - układ hydrauliczny, 5 - wspornik walca dolnego,
 6 - dozownik nadawy, 7 - zbiornik nadawy, 8 - produkt mielenia



Rys. 11. 3. Schemat budowy i działania młyna PREMILL [21]:

- 1 - wałek główny dolny ze stałymi oprawami łożysk, 2 - wałce (rolki) małe górne – o mniejszej średnicy od średnicy walca głównego, 3 - oprawy ruchome, 4 - układ sprężynowy docisku rolek, 5 - konstrukcja wsporcza głównego walca, 6 - zbiornik nadawy, 7 - produkt rozdrabniania

Najczęściej stosowany i produkowany jest klasyczny wysokociśnieniowy młyn walcowy HPGR – zwany dalej młynem walcowym. Najważniejsi producenci tych młynów to firmy: Thyssen Krupp - Pilysius, Metso, FLSmidth, Köppern, KHD Humboldt, Outotec, CITRIG oraz w Chinach, Japonii, Indiach. Młyn ten może być samodzielną maszyną przeróbczą [28], lub młynem do wstępnego rozdrabniania, co z korzystnym rezultatem ekonomicznym ma miejsce w przemyśle cementowym [25, 29]. Na rysunku 11.4 umieszczono schemat procesu rozdrabniania zachodzącego w tym młynie oraz modelowy stan obciążenia walców [26].



Rys. 11.4. Schemat procesu rozdrabniania w młynie walcowym:

- a - zblizona do rzeczywistego stanu obciążenia walca, b - uproszczony - modelowy stan obciążenia walca, D - średnica walców, F - siła oddziaływania (rozdrabniania), F_r - składowa promieniowa siły F, F_o - składowa obwodowa siły, e - szczelina pomiędzy walcami, F_h - siła generowana przez układ hydrauliczny, v - prędkość obwodowa walców, ω - prędkość kątowa walców, α_o - kąt chwytu nadawy, α - kąt strefy zgniotu, γ - kąt dekompresji

Oba walce młyna mają takie same wymiary i obracają się z tą samą prędkością kątową, tylko w przeciwnym kierunku. W dużych młynach każdy z walców wyposażony jest w odrębny układ napędowy, składający się z silnika, przekładni zębatej, a ta sama prędkość obrotowa obu walców uzyskiwana jest najczęściej przez zastosowanie dodatkowej synchronizacyjnej przekładni zębatej. Układ sterowania pracą młyna zapewnia stabilizację podstawowych parametrów; to jest: szczeliny pomiędzy walcami, sił rozdrabniania, momentu napędowego, położenia osi geometrycznych walców, wydajności.

W pierwszych konstrukcjach młynów walcowych ciśnienie dezintegracji w latach 80. ubiegłego wieku, nie przekraczało 100 MPa [7]. Dzięki postępowi w inżynierii materiałowej w zakresie nowych tworzyw konstrukcyjnych na walce robocze młynów, obecnie uzyskuje ciśnienia dochodzące do 300 MPa [29], a młynów laboratoryjnych do 1000 MPa [11].

W procesie dezintegracji materiału w prasie walcowej wyróżnia się trzy fazy [16]:

- wstępne zagęszczanie złoża, wtedy ziarna przemieszczają się wzajemnie do momentu ustalenia położenia. Wówczas złoże materiału tworzy stabilne *continuum* ułatwiające propagację obciążeń niszczących strukturę poszczególnych ziaren materiału od powierzchni walców w kierunku wewnętrznym,
- faza odkształcania ziaren, w której kolejne ziarna wskutek obciążeń przekraczających ich wytrzymałość rozdrabniają się wzajemnie,
- faza finalnego prasowania złoża ziaren, które zachodzi w strefie najmniejszej szczeliny pomiędzy walcami. Wówczas proces dezintegracji ziaren, może być znacznie zwolniony, natomiast wysokie ciśnienie powoduje dodatkowo defekty powierzchniowe i wewnętrzne ziaren, co znacząco wpływa na wytrzymałość ziaren i ułatwia ich rozdrabnianie w następnym etapie rozdrabniania.

Wydajność Q młyna walcowego oblicza się wyrażenia [11]:

$$Q = e L v \varepsilon \rho \quad [\text{kg/s}]$$

gdzie: e - szczelina pomiędzy walcami, m,

L - długość walców, m,

v - prędkość obwodowa walców, m/s,

ε - porowatość materiału w strefie szczeliny [-],

ρ - gęstość materiału, kg/m³.

Zapotrzebowanie mocy P na rozdrabnianie złoza materiału oblicza się z wyrażenia:

$$P = 10^{-3} M \omega \quad [\text{kW}]$$

gdzie: M – moment obrotowy niezbędny do obracania walców, Nm,
 ω – prędkość kątowna walców, rad/s.

Przyjmując uproszczony modelowy stan obciążenia walca (rys. 11.4 b), zastępczą siłą F rozłożoną na siłę promieniową F_r oraz obwodową F_o , moment siły wyznaczyć można z wyrażenia:

$$M = 2 F D/2 \sin \alpha \quad [\text{Nm}]$$

Ze względu na fakt, że kąt α jest niewielki (5° – 7°) z zadowalającym przybliżeniem można przyjąć:

$$\sin \alpha \approx \alpha$$

Wówczas moment siły opisuje uproszczone wyrażenie:

$$M = 2 F D/2 \alpha \quad [\text{Nm}]$$

Siła nacisku wywieraną na oprawy łożysk walca przesuwne F_h generowaną przez siłowniki hydrauliczne można obliczyć z wyrażenia:

$$F_h = S p n \quad [\text{MN}]$$

gdzie: S - przekrój nurnika dociskającego rolkę przesuwą, m^2 ,
 p – ciśnienie w cylindrze, MPa,
 n – liczba tłoków dociskających oprawę łożyska walca.

Ze względów technologicznych najważniejszym parametrem pracy młyna jest nacisk jednostkowy p_w wywierany przez walce na rozdrabniany materiał, wyrażony w MPa, a często w N/mm^2 .

$$p_w = \frac{F}{1000 DL} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Parametr p_w nie odzwierciedla jednak rzeczywistych nacisków pomiędzy walcami, ma jednak ważne znaczenie, ponieważ umożliwia porównanie możliwości technologicznych różnych młynów. Charakter ten wynika

z przyjętego uproszczenia jednakowego rozkładu nacisku na całą powierzchnię walców biorących udział w procesie rozdrabniania. Obliczony z powyższego wyrażenia nacisk jednostkowy wynosi $3\div 6$ MPa, co jest znacznie mniej niż wytrzymałość na ściskanie wapieni ($R_c = 40\div 150$ MPa), rud miedzi ($R_c = 45\div 190$ MPa), czy klinkieru ($R_c = 30\div 60$ MPa), a w tych młynach wymienione materiały są rozdrabniane, co oznacza, że rzeczywiste naciski są znacznie większe niż 190 MPa. Stąd, jeśli uwzględni się rzeczywistą powierzchnię oddziaływania walców na rozdrabniany materiał dla kąta α (rys.11.4), która jest kilkakrotnie mniejsza od powierzchni wynikającej z iloczynu $D \times L$, rzeczywiste naciski osiągają wartość 300 MPa, a nawet więcej.

Jednak dla celów porównawczych młynów można z pewnym uproszczeniem przyjąć, że im wyższe wartości przyjmuje uśredniony nacisk jednostkowy p_w dla młyna, tym młyn ma większe siły nacisku, a tym samym większe możliwości technologiczne.

Młyny walcowe stosuje się głównie na wstępnym stopniu rozdrabniania, drugim stopniem jest młyn kulowy, mieszadłowy lub udarowy; przy czym ze względu na dominujący udarowy sposób mielenia szczególnie przydatny jest tu młyn wibracyjny.

W ostatnich trzydziestu latach wzrosło zainteresowanie przemysłu młynami walcowymi, pracującymi przy małych prędkościach rozdrabniania – poniżej 2 m/s oraz przy bardzo wysokich naciskach przekraczających 300 MPa. Głównymi zaletami tych młynów to:

- obniżenie jednostkowych kosztów poboru energii – nawet do 30% przy jednoetapowym rozdrabnianiu oraz przy dwuetapowym rozdrabnianiu – przez wprowadzenie defektów powierzchniowych ziaren, co ułatwia proces domielenia w młynie grawitacyjnym lub innym,
- zwiększenie uzysku technologicznego w procesach wzbogacania rud przez uzyskiwanie ziaren rudy bardziej podatnych na flotację,
- poprawę warunków BHP – dzięki generowaniu hałasu o niższym poziomie ciśnienia akustycznego oraz mniejszych sił dynamicznych przekazywanych na fundament,
- obniżenie kosztów odpylania przez mniejszą emisję pyłu, a także mniejszą ilość przekazywania ciepła do otoczenia.

Postęp w budowie młynów walcowych był możliwy dzięki postępowi w inżynierii materiałowej metalicznych tworzyw o zwiększonej odporności na zużycie abrazyjne przy znacznych naciskach. Firmy produkujące młyny

walcowe oferują bardzo szeroki asortyment o wydajności od kilku do blisko tysiąca Mg/h i zainstalowanej mocy od kilkudziesięciu kW do ponad 10 MW.

W tabeli 11.1 podano zakresy głównych parametrów młynów HPGR produkowanych obecnie w przemyśle górnictwie, ceramicznym (spoiw mineralnych) oraz chemicznym.

Podstawowe parametry techniczne młynów walcowych HPGR

Tabela 11.1.

Parametry	Najmniejsze	Największe
Średnica robocza walca [m]	0,75	3,0
Długość robocza walca [m]	0,25	1,8
Zabudowa młyna: długość x szerokość [m]	3,8 x 3,0	13,65 x 7,75
Wysokość instalacji [m]	2,0	5,2
Wydajność [Mg/h]	10	4200
Moc zainstalowana [kW]	2 x 100	2 x 5700
Masa młyna [Mg]	20	500

Młyny walcowe użytkowane są przy mieleniu materiałów na sucho, przy niewielkiej wilgotności oraz nie mających właściwości lepienia, jako główna maszyna przeróbcza pracująca w cyklu zamkniętym z separatorem turbinowym. Jednak w większości przypadków młyny walcowe stosowane są w układach dwustadialnych, w pierwszym stadium mielenia, a w drugim stadium najczęściej stosowane są młyny grawitacyjne pracujące w cyklu zamkniętym, na sucho najczęściej z separatorem turbinowym, a na mokro z hydrocyklonem.

11.2. Młyny walcowe wysokociśnieniowe HPGR

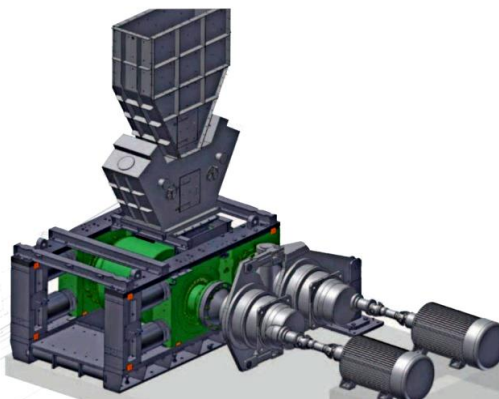
Najczęściej produkowane i stosowanymi są młyny walcowe HPGR. Typowe młyny HPGR zbudowane są z rozbieralnej ramy, w której umieszczone są rolki, przy czym w ramie nieruchome oprawy łożysk rolki przymocowane są na stałe, natomiast przesuwne oprawy łożysk zmocowane są w osłoniętych prowadnicach i podparte są tłoczyskami siłowników hydraulicznych. Strefy

rozdrabniania rolek po ich obu stronach osłonięte są bocznymi płytami, wykonanymi z odpornych na ścieranie tworzyw konstrukcyjnych. Przykłady rozwiązań konstrukcyjnych tego typu młynów walcowych zamieszczono na rysunkach 11.5÷11.8. Są to młyny firm: F.L. Smidth, (rys. 11.5), ThyssenKrupp - Polysius (rys. 11.6), KHD Humboldt (rys. 11.7) oraz Köpern (rys. 11.8).

Wymienione rozwiązania konstrukcyjne młynów różnią się budową ram, oraz budową przekładni zębatych napędów. W wielu przypadkach – zwłaszcza w największych młynach, napędy rolek nie mają przekładni synchronizacyjnych. Różnią się też rozwiązaniami konstrukcyjnymi walców rozdrabniających oraz węzłami łożyskowania walców. Natomiast ich układy dozowania nadawy mają bardzo podobną budowę, a podawanie nadawy do strefy rozdrabniania realizowane jest grawitacyjnie.

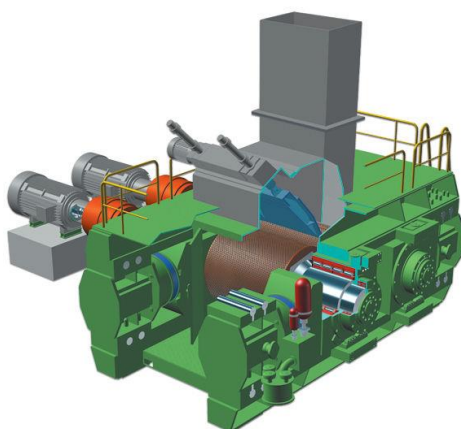


Rys. 11.5. Młyn walcowy firmy FLSmidth [10]



Rys. 11.6. Młyn walcowy Polycom firmy Thyssen-Krupp Polysius [31]

Wadą tego rozwiązania młynów walcowych jest spadek nacisków na obu końcach walców oraz ukosowanie się rolek, czego rezultatem jest spadek efektywności mielenia.



Rys. 11.7. Młyn walcowy – prasa (Walzenpresse) firmy KHD [32]



Rys. 11.8. Młyn walcowy firmy Köpern [8]

Podstawowe parametry typowych młynów walcowych HPGR produkowanych i stosowanych obecnie podano w tabelach 11.2 oraz 11.3.

Podstawowe parametry techniczne młynów Polycom firmy Polysius [31]

Tabela 11.2.

Wielkość	0	2	4	5	7	9
Typ	9/7	11/8	14/8	17/14	20/15	26/18
Średnica walców [mm]	950	1100	1400	1200	2000	2600
Długość walców [m]	650	800	800	1700	1500	1750
Siła rozdrabniana [kN]	2700	3400	4300	8600	13 500	20 000
Moc silnika [kW]	2 x 220	2x450	2x800	2x1600	2x2500	2 x 3400

Podstawowe parametry techniczne młynów firmy KHD Humboldt Wedag [32]

Tabela 11.3.

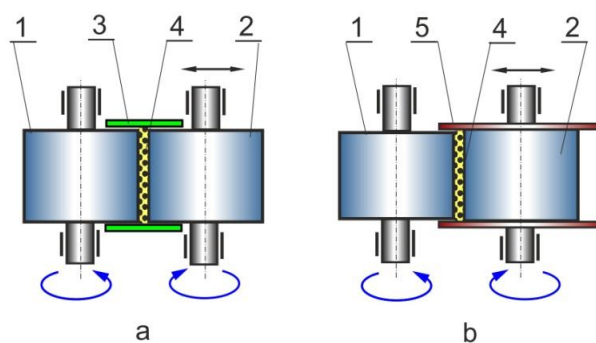
Typ	RP 3,6	RP S 7	RP S 13	RP S 20	RP S 25
Średnica walców [mm]	1200	1400÷1700	1700	2000÷2200	2500
Długość walców [m]	560÷630	800÷1100	1100÷1400	140÷200	2200÷2400
Wydajność [Mg/h]	100÷320	300÷900	500÷1500	900÷2900	1800÷4200

Zupełnie inne rozwiązanie młynów walcowych serii HRC produkuje firma Metso [33]. Rozwiązanie to znacznie różni się budową od budowy w/w młynów walcowych. Różnice obejmują zarówno rozwiązanie strefy rozdrabniania (rys. 11.9), jak również budowę całego młyna. W tych młynach, klasyczną ramę z prowadnicami przesuwanych opraw łożysk jednego z walców, zastąpiono wychylnymi wspornikami usytuowanymi w przegubach mocowanych w podstawie młyna. We wspornikach mocowane są oprawy łożysk obu walców oraz przeguby trzech par tłoczków siłowników hydraulicznych, jednej pary usytuowane za walcami, a dwóch pozostałych po obu stronach walców. Rozwiązanie konstrukcyjne młyna HRC zamieszczono na rysunku 11.10. W mniejszych młynach HRC zastosowano tylko jedną parę siłowników umieszczoną nad walcami.

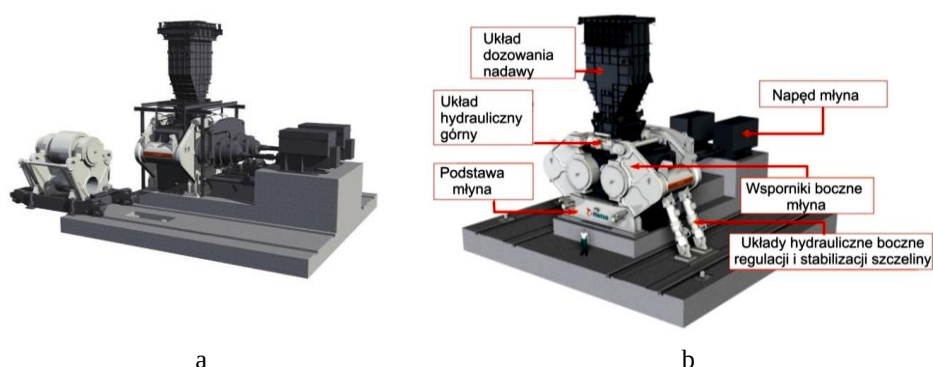
Takie rozwiązanie młyna zmniejszyło znacząco jego masę, w największym stopniu przy mniejszych młynach, w których znajduje się tylko górny układ hydrauliczny, wyeliminowało prowadnice przesuwanych opraw łożysk, a co jest najważniejsze praktycznie wyeliminowało negatywny skutek spadku nacisków w strefach rozdrabniania znajdujących się przy bocznych płytach.

Kolejnymi zaletami tego rozwiązania są: znacznie mniej pracochłonny montaż i wymiana rolek w młynie, obniżenie kosztów łożyskowania walców.

Największe korzyści rozwiązanie to przyniosło w sferze technologicznej, przez zachowanie znacznie bardziej równomiernego nacisku w całej strefie rozdrabniania, czego rezultatem jest również zwiększenie trwałości walców. Podstawowe parametry techniczne młynów firmy Metso podano w tabeli 11.4.



Rys. 11.9. Budowa strefy rozdrabniania: a - klasycznych młynów HPGR, b - młyna typu HRC firmy Metso, 1 - wałek z nieruchomymi oprawami łożysk, 2- wałek z ruchomymi oprawami łożysk, 3 - rozdrabniany materiał, 4 - nieruchoma płyta boczna, 5 - obrotowe obrzeże połączone z wałkiem



Rys. 11.10. Młyn typu HRC firmy Metso [34]:
a- widok od strony napędu z rolką, b - widok z opisem zespołów

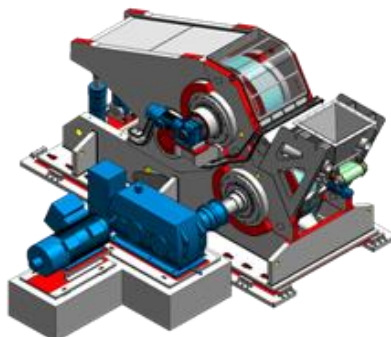
Podstawowe parametry techniczne młynów firmy Metso [33]

Tabela 11.4.

Typ	Wymiary wałców śred. x dł. [mm]	Maksymalna zainstalowana moc [kW]
HRC 800	730 x 500	2 x 132
HRC 1000	1000 x 625	2 x 260
HRC 1200	1200 x 750	2 x 440
HRC 1700	1700 x 1000	2 x 900
HRC 2000	2000 x 1500	2 x 1900
HRC 2600	2600 x 1750	2 x 3700
HRC 3000	3000 x 2000	2 x 5700

11.3. Młyny wysokociśnieniowe - inne konstrukcje

Wśród młynów walcowych znacznie różniące się budową są młyny: BETAMILL firmy Cmpag oraz PREMILL firmy PSP. Rozwiązanie konstrukcyjne młyna BETAMILL zamieszczono na rysunkach 11.11 i 11.12.



Rys. 11.11. Młyn walcowy BETAMILL – firmy Cmpag [19, 20] – budowa



Rys. 11.12. Młyn walcowy BETAMILL firmy Cmpag [19, 20] – widok młyna

W tabeli 11.5 podano podstawowe parametry młynów BETAMILL.

Podstawowe parametry techniczne młynów BETAMILL firmy Cmpag [20]

Tabela 11. 5.

Typ	Średnica górnego walca [mm]	Średnica dolnego walca [mm]	Długość walców [mm]	Masa młyna [kg]	Wydajność [Mg/godz]
BM 250	φ1 250	φ 1 250	250	68 000	90
BM 375	φ 1 250	φ 1 250	375	71 000	135
BM 500	φ 1 800	φ 1 800	500	140 000	180
BM 750	φ 1 800	φ 1 800	750	145 000	270
BM 1000	φ 2 100	φ 2 100	1 000	255 000	360
BM 1250	φ 2 100	φ 2 100	1 250	318 000	450
BM 1500	φ 2 100	φ 2 100	1 500	381 000	540
BM 1750	φ 2 100	φ 2 100	1 750	445 000	630

Znacznie mniejsze wydajności mają młyny PREMILL produkcji czeskiej firmy PSP. W tych młynach stosowane są znacznie tańsze o nieskomplikowanej budowie układy sprężynowe docisku trzech walców (rolek). Przykłady budowy tych młynów zamieszczono na rysunku 11.13.



Rys. 11.13. Przykłady budowy młyna walcowego PREMILL firmy PSP [21]:
a - model, b - widok młyna

W tabeli 11.6 podano podstawowe parametry młynów PREMILL.

Podstawowe parametry techniczne młynów PREMILL firmy PSP [21]

Tabela 11.6

Typ	Średnica walca głównego [mm]	Średnice walców górnych [mm]	Długość walców [mm]	Moc [kW]	Wydajność [Mg/h]	Masa [kg]
PM 370	370	125	60	10	2,0	1000
PM 500	500	175	110	26	5,5	2150
PM 650	650	240	220	70	15,0	5200
PM 800	800	320	350	120	30,0	9650

Należy oczekiwać dalszego postępu w budowie młynów walcowych - wynika to z faktu dużego zainteresowania tymi młynami technicznych ośrodków akademickich. Jednocześnie nie są publikowane wyniki większości prac badawczych dotyczących tych młynów prowadzonych przez ośrodki badawczo-rozwojowe firm produkujących te młyny. Na podstawie oceny dotychczasowych wyników prac badawczych i rozwojowych należy oczekiwać opracowań dotyczących głównie technologii zastosowania tych młynów jako jedynych maszyn rozdrabniających.

Literatura

1. http://www.tessa.eu/Pl/produkt/kompaktory_walcowe
2. Schönert, K.: A First Survey of Grinding with High-Compression Roller Mills. *International Journal of Mineral Processing*, April 1988, 22 (1-4), p. 401-412
3. Feige F.: Untersuchungen zur Feinzerkleinerung von Kalkstein in einer schnellaufenden Walzenmühle Zement-Kalk-Gips, 1980, No 5 S. 223-225
4. Schönert K., Knobloch, O. Mahlen von Zement in der Gutbett-Walzenmühle Zement-Kalk-Gips, 1984, No 11, S. 563-568
5. Schönert K.: Zur Auslegung von Gutbett-Walzenmühlen, Zement-Kalk-Gips, 1985, No 12 S.728-730
6. Kellerwessel H.: Betriebsergebnisse von Hochdruck-Rollenpressen, Aufbereitungs-Technik, 1986, No 10, S. 555-559
7. Plank F.W.: Die Rollenpresse zur Feinmahlung von Kalk im Sichterkreislauf KHD Symposium 1989, S.117-132
8. www.koeppern-international.com
9. www.outotec.com
10. <http://www.flsmidth.com>
11. Schwechten D., Schönert, K.: Wet Operation of High Compression Roller Mills 1. World Congress Particle Technology „PARTEC”, Nürnberg, 16-18 April 1986
12. Rosemann H.: Investigations on the use of a Roller Press for the Fine Grinding of Cement in Lägerdorf works Mill-Seminar, Skövde, 19-22 September 1989
13. Pietsch W.: Roller presses – Versatile equipment for mineral processing, Proceedings of 19th IMPC, San Francisco 1995, S.59-66
14. Drzymała Z., Dzik T., Sidor J.: Kombinatoryka w budowie młynów, Cement Wapno Gips 1987, nr 12, s. 267-273
15. Drzymała Z., Dzik T., Guzik J., Kaczmarczyk S., Kurek B., Sidor J.: Badania i podstawy konstrukcji młynów specjalnych, PWN Warszawa 1992
16. Naziemiec Z., Saramak D.: Analiza zmian obciążenia materiału w strefie zgniotu pras walcowych, *Górnictwo i Geoinżynieria*, 2009, Rok 33, Z. 4, s. 221-234
17. Saramak D.: Analiza efektywności pracy technologicznych układów rozdrabniania surowców z wysokociśnieniowymi prasami walcowymi, *Górnictwo i Geologia*, 2011, T. 6, Z. 2, s. 189-200
18. Saramak D., Tumidajski T., Gawenda T., Naziemiec Z.: Ekologiczne aspekty związane z efektami wysokociśnieniowego rozdrabniania w prasach walcowych, *Annual Set The Environment Protection, Rocznik Ochrona Środowiska* Vol. 15, 2013, s.1580–1593
19. <http://cmpag.com/cmpag/beta-mill.php>

20. Fard A. M.; Schwingel, J.: Operational Experience with the Revolutionary Pressure Grinding Technology – BETA Mill. 11th NCB Seminar on Cement and Building Materials, 17–20 November 2009 Delhi, India
21. Horizontal Roller Mill PREMILL www.pspengineering.cz
22. Morley C.: HPGR in hard rock applications. Mining Magazine. September 2003, pp. 118–127
23. Morrell S., Lim W., Shi F., Tondo L.: Modelling of the HPGR crusher. Comminution Practices (ed. Kawatra K.S.). Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc. (SME), Chapter 17, 1997, p. 117–126
24. Kellerwessel H.: Eine Monografie über Grundlagen und Praxis der Gutbettzerkleinerung mit Rollenpressen KHD Humboldt Wedag AG Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 3, 1989, S. 1–53
25. Harder J.: Grinding trends in the cement industry, ZKG International No. 4-2010, p. 46–58
26. Sidor J.: Młyny walcowe w procesach wstępnego i finalnego rozdrabniania surowców, rud i cementu W: Innowacyjne i Przyjazne dla Środowiska Techniki i Technologie Przeróbki Surowców Mineralnych: Bezpieczeństwo – Jakość – Efektywność. KOMEKO 2015. Praca Zbiorowa. Red. Nauk. A. Klich, A. Kozieł, Instytut Techniki Górniczej. Gliwice. 2015. s. 123–135
27. Sidor J., Foszcz D., Tomach P., Krawczykowski D.: Młyny wysokoenergetyczne do mielenia rud i surowców mineralnych. Cuprum. 2015 nr 2, s. 71–85
28. Burchardt E.: High Pressure Grinding Rolls In Hard Rock Mining HPGR's In Hard Rock Mining Sept. 9th, Neubeckum ThyssenKrupp Resource Technologies ICRA Workshop 2013 Neubeckum 9.9.2013
29. Roller Press or HPGR (High Pressure Grinding Rolls) An Alternative Grinding Circuit, HPGR Familiarization Seminar, quebecmines. mrn.gouv.qc.ca/.../s08_02_christensen 2014
30. Harder J.: Current modernization and maintenance concepts in the cement industry Aktuelle Modernisierungs- und Instandhaltungskonzepte in der Zementindustrie, ZKG International No. 5, 2010, pp. 24–38
31. 307il.thyssenkrupp-industrial-solutions.com
32. 307il.khd.com
33. www.metso.com
34. Herman V.S., Harbold K.A., Mula M.A., Biggs L.J.: Building The World's Largest HPGR – The HRC 3000 At The Morenci Metcalf Concentrator. Metso Minerals 2715 Pleasant Valley Road York, PA, USA 17402, SAG Conference Vancouver 2015

12. Młyny udarowe: młotkowe, bijakowe, dezintegratory

12.1. Problematyka młynów udarowych z rozdrabnianiem przez wirujące elementy robocze

Młyny udarowe są dużą grupą młynów i stosowanych w przemysłach: ceramicznym, chemicznym, górniczym, farmaceutycznym, spożywczym, energetyce oraz w gospodarstwie domowym. Przeznaczone są do mielenia materiałów średnietwardych o twardości do 5 w skali Mohsa i miękkich o twardości w skali Mohsa 2-4. Młyny te mają najbardziej zróżnicowaną budowę ze wszystkich rodzajów młynów spowodowaną ich zastosowaniem, wydajnością, możliwościami technologicznymi oraz polityką praw autorskich ich producentów.

W literaturze technicznej anglojęzycznej młyn udarowy nosi ogólną nazwę *imact mill*. Występuje jednak bardzo duże zróżnicowanie ich konstrukcji, a co za tym idzie szereg nazw często nadawanych przez firmy, niekiedy nie mających związku z ich budową czy działaniem np. *impact hammer mill*, *impact beater mill*, *wing beater mill*, *pin mill*, *blast mill*, *cage mill*, *centrifugal impact mill* i inne, a w języku niemieckim podstawowa nazwa to *Prallmühle*, funkcjonują również nazwy związane z ich budową, to jest: *Hammermühle*, *Schlägmühle*, *Schlägermühle*, *Schlagkreuzmühle*, *Gebläsemühle*, *Stiftmühle*, *Riffelscheibenmühle* i inne, a wersji do mielenia drobnego *Feinprallmühle* oraz bardzo drobnego *Feinstprallmühle*.

Pierwszy patent chroniący rozwiązanie techniczne młyna udarowego zgłoszono w Niemczech w 1877 roku, a ich rozwiązania techniczne obejmuje największa ilość patentów.

Podstawy teoretyczne procesu rozdrabniania w młynach udarowych są takie same jak dla kruszarek udarowych. Podstawowe różnica w działaniu oraz w budowie młynów, wynika z konieczności uzyskania w młynie znacznie większej energii na proces rozdrabniania związanej ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren produktu rozdrabniania [1]. Ponieważ jest to energia kinetyczna, aby ją uzyskać należy nadać znacznie większe prędkości obwodowe elementom roboczym młynów – najczęściej 80÷120 m/s, w wielu rozwiązaniach 200 m/s, a nawet do 220÷260 m/s.

Wymóg ten wpływa znacząco na budowę młyna udarowego, która różni się od budowy kruszarki udarowej. Stąd w młynie udarowym występują:

- mniejsze wymiary i masa pojedynczego elementu roboczego (młotka, bijaka, trzpienia, lub innego elementu),
- mniejsze otwory w ruszcie, jeśli młyn jest w ruszt wyposażony,
- większa ilość elementów roboczych (młotków, bijaków, trzpieni) oraz mniejsze odległości pomiędzy tymi elementami w wirniku oraz pomiędzy tymi roboczymi elementami a rusztem.

Ponadto większa ilość energii w tym młynie ulega rozproszeniu na ciepło, stąd w tych młynach do strefy mielenia wprowadza się większą ilość powietrza,

które służy nie tylko do rozproszenia mielonego materiału w strefie mielenia, lecz także do odprowadzenia ciepła.

Uziarnienie nadawy do młynów uderowych: młotkowych, bijakowych i kołkowych (dezintegratorów) jest znacznie mniejsze od uziarnienia nadawy do kruszarek uderowych. Uziarnienie to wynosi około $1 \div 20$ mm i jest uwarunkowane własnościami fizycznymi materiału nadawy, szczegółową budową i działaniem młyna oraz uziarnieniem produktu mielenia. Wyjątek stanowi uziarnienie nadawy do młynów wentylatorowych i niektórych odśrodkowych – zwłaszcza do młynów o dużej wydajności, którego ziarna nadawy mogą dochodzić do 60 mm.

Młyny do bardzo drobnego mielenia – do uziarnienia poniżej $5 \div 40$ μm , a w wielu przypadkach nawet poniżej 2 μm , wyposażane są w separator pneumatyczny, który jest wbudowany w konstrukcję młyna nad strefą mielenia, lub stanowi integralny podzespół instalacji młyna. Niektóre rozwiązania młynów do bardzo drobnego mielenia wyposażone są w dodatkowy układ chłodzenia młyna, mielonego materiału i elementów roboczych młyna, usytuowany na zewnątrz strefy mielenia, lub wtrysku wody do strefy mielenia, która odparowując pobiera ciepło. Do napędu wirników młynów stosuje się napędy o bezstopniowej regulacji prędkości obrotowej wirnika.

Największe zróżnicowanie budowy młynów uderowych oraz ich działania narażają pewne trudności z ich klasyfikacją, która co kilka lat wraz z pojawianiem się nowych konstrukcji młynów wymaga uaktualnienia. Klasyfikację młynów uderowych uwzględniającą głównie ich budowę podano w pracy [2].

Natomiast główny podział młynów uderowych przeprowadzony według ich działania, czyli na sposób przekazywania energii na proces mielenia jest bardzo podobny do podziału kruszarek uderowych i wyróżnia trzy podgrupy młynów:

- z przekazywaniem energii na mielenie przez ruchome mechaniczne elementy robocze,
- z przekazywaniem energii na mielenie przez obrotowy wirnik i rozdrabnianiem rozpędzonych ziaren materiału na nieruchomej wykładzinie,
- z przekazywaniem energii na mielenie przez inne niż mechaniczne elementy – będące płynem (fazą gazową lub cieczą).

Do pierwszej podgrupy zalicza się młyny z elementami roboczymi zamocowanymi na obrotowym wirniku (sztywno - bijaki i kołki, przegubowo – młotkowe).

W drugiej podgrupie znajdują się młyny wentylatorowe i odśrodkowe, które ze względu na ich znaczenie i zastosowanie przedstawiono odrębnie w następnym rozdziale.

Trzecia podgrupa zawiera młyny strumieniowe z gazowym medium roboczym – które ze względu na ich odmienny sposób działania omówiono w innym rozdziale, oraz młyny, w których ziarna materiału rozdrabniane są w cieczy – młyny te potraktowano jako młyny specjalne i omówiono je w kolejnym rozdziale.

W literaturze znajdują się klasyfikacje tych młynów nawiązujące jedynie do rozwiązań elementów roboczych młynów i wyróżniające młyny [2, 3]:

- młotkowe – z elementami roboczymi zamocowanymi w wirniku przegubowo,
- bijakowe – z elementami roboczymi zamocowanymi w wirniku sztywno,
- kołkowe (palcowe, trzpieniowe, tarczowo-kołkowe),
- odśrodkowe (entoleter),
- wentylatorowe,
- strumieniowe,
- inne.

Ze względu na możliwość wspomagania mielenia przez proces klasyfikacji ziarnowej wyróżnia się młyny:

- bez klasyfikatora ziarnowego,
- z sitem, rusztem,
- młyny z klasyfikatorem ziarnowym – młyny separujące.

W ciągu ostatnich dwudziestu lat nastąpił znaczący rozwój konstrukcji tych młynów i ich układów mielenia. Główne kierunki rozwoju młynów udarowych obejmowały:

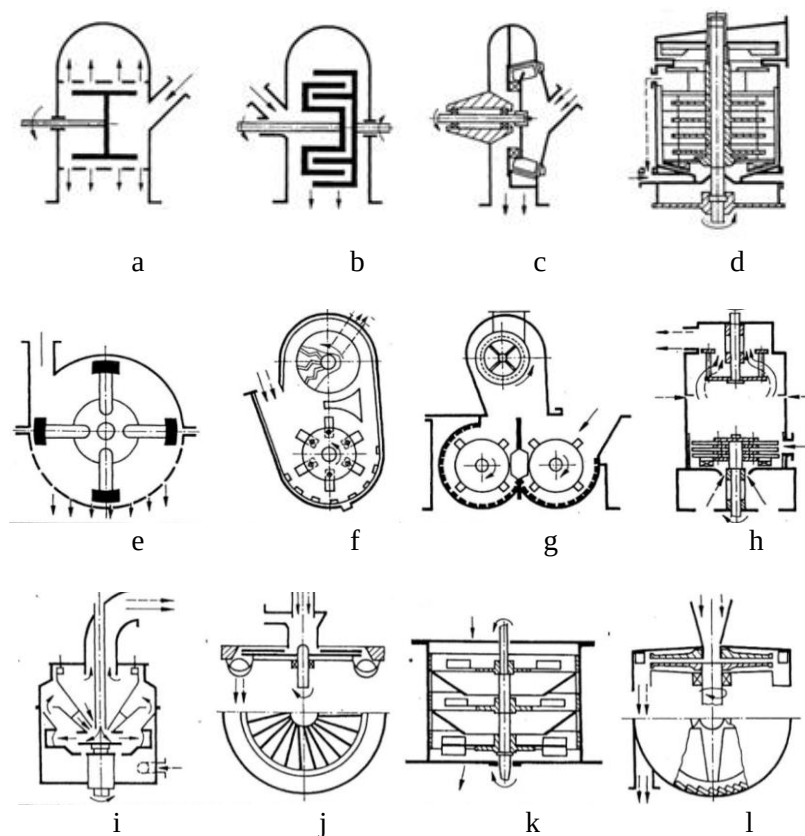
- uzyskiwanie coraz drobniejszego uziarnienia produktu mielenia, w tym produktów o udziale górnej zewnętrznej klasy ziarnowej poniżej 3% - w młynach z separatorem pneumatycznym,
- uzyskiwanie możliwie dużej wydajności jednej maszyny,
- mielenie materiałów o twardości powyżej 5 w skali Mohsa,
- mielenie w specjalnych warunkach, np. w atmosferze gazu obojętnego lub w niskich temperaturach.

Na rozwój miały wpływ następujące czynniki: nowe materiały konstrukcyjne na elementy robocze tych młynów, zwłaszcza materiałów o zwiększonej trwałości na ścieranie, rozwój modelowania matematycznego, szybki rozwój sprzętu informatycznego, postęp w konstrukcji separatorów turbinowych, które stanowią zwykle standardowe wyposażenie młyna do bardzo drobnego mielenia oraz postępy w budowie aparatury kontrolno-pomiarowej i informatyki.

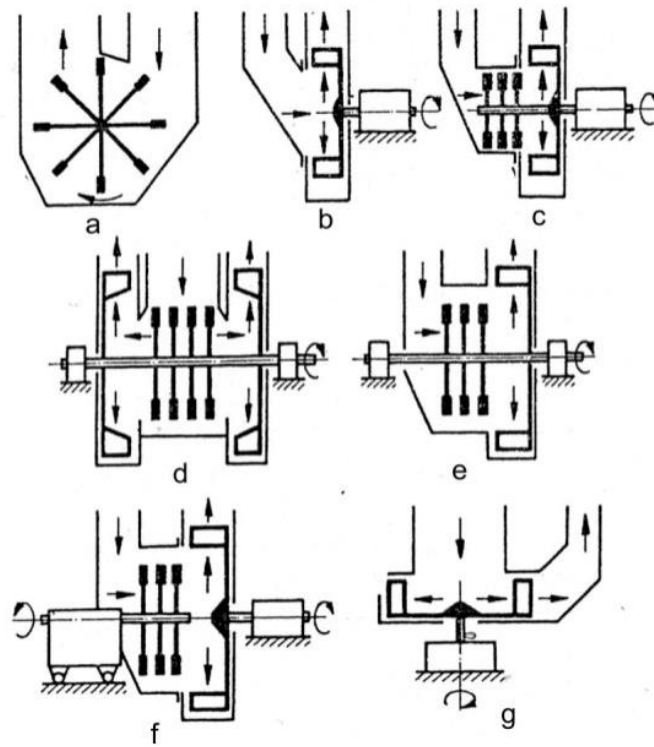
Przy uziarnieniu produktu mielenia poniżej 10 μm wydajność tych młynów rzadko przekracza 1 000 kg/h. Większość z nich to specjalizowane konstrukcje dla branży chemicznej, kosmetycznej, spożywczej, czy

farmaceutycznej. Młyny dla tych branż, a w szczególności dla potrzeb przemysłu farmaceutycznego wymagają zastosowania specjalnych materiałów konstrukcyjnych dopuszczonych do kontaktu z farmaceutykami, specjalnej obróbki powierzchni roboczych oraz konstrukcji łatwej do utrzymania w czystości i do sterylizacji, a także do chłodzenia.

Schematy budowy młynów uderowych do bardzo drobnego mielenia podano w pracy [2] (rys. 12.1). Natomiast podział młynów uderowych z wirnikiem bijakowym przeznaczonych do drobnego i bardzo drobnego mielenia zamieszczono na rysunku 12.2.



Rys. 12.1. Schematy budowy młynów uderowych:
a, b, c, d - z elementami roboczymi połączonymi sztywno z wirnikiem,
e - młyn młotkowy z sitem, f, h - młotkowe z separatorem
g - bijakowy z separatorem, i - odśrodkowy z separatorem, j, k, l - odśrodkowe [2]

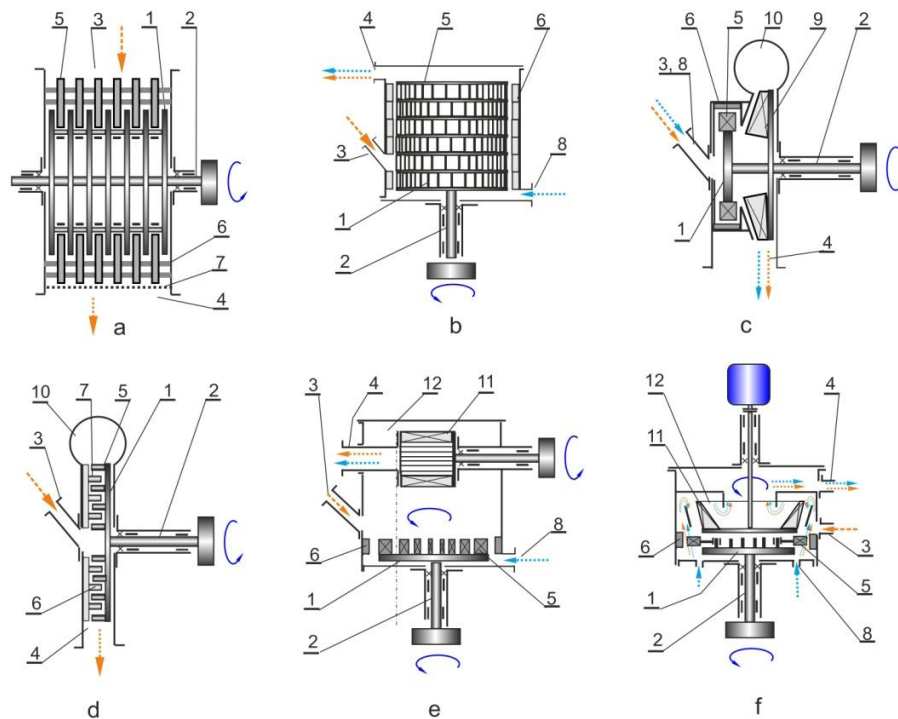


Rys. 12.2. Schematy budowy młynów uderowych:

- a - bijakowy, b - wentylatorowy, c - wentylatorowy z wirnikiem bijakowym,
 d - wentylatorowy podwójny z wstępnym wirnikiem bijakowym,
 e - wentylatorowy z wirnikiem bijakowym i wałem obustronnie podpartym,
 f - wentylatorowy z wirnikiem bijakowym z odrębnymi napędami wirnika
 bijakowego i wirnika wentylatora, g - bijakowy z pionowym wirnikiem [2].

Obecnie produkowanych jest kilkaset konstrukcji młynów uderowych o zakresie wydajności od kilku kg/h – przy bardzo drobnym i drobnym mieleniu do blisko 200 Mg/h przy mieleniu grubym (o uziarnieniu produktu mielenia poniżej 1 mm). Przykłady wybranych młynów podano w pracy [5]. W młynach tych, w wielu przypadkach podczas mielenia zachodzi jednocześnie proces suszenia [6]. Przy bardzo drobnym mieleniu młyny mają wbudowany separator turbinowy, który skraca drogę zawrotu nadziarna. Oferowane są również młyny do kriogenicznego mielenia materiałów plastycznych, które w niskich temperaturach zachowują się jak materiały kruche [7].

Schematy budowy młynów uderowych produkowanych obecnie zamieszczono na rysunku 12.3.



Rys. 12.3. Schematy budowy najczęściej stosowanych młynów uderowych:
 a - młotkowego, b- bijakowego z wirnikiem turbinowym, c - bijakowego z wentylatorem, d - kołkowego (trzępieniowego, palcowego), e - bijakowo-odśrodkowego o osi pionowej z separatorem turbinowym, d - odśrodkowego-młotkowego z separatorem turbinowym, 1 - wirnik, 2 - wał, 3 - wlot nadawy, 4 - wylot produktu mielenia, 5 - elementy robocze czynne, 6 - elementy robocze bierne, 7 - sito, 8 - wlot powietrza wirnik bijakowy o osi poziomej, 9 - wirnik wentylatora, 10 - komora powietrzna, 11 - separator, 12- strefa separacji

12.2. Młyny młotkowe

Młyny młotkowe produkowane są w dwóch podstawowych wersjach:

- z wirnikiem poziomym - dominująca ilość,
- z wirnikiem pionowym - głównie dla potrzeb recyklingu poużytkowych wyrobów metalowych.

Drugi podział młynów związany jest z budową strefy mielenia i wyróżnia młyny:

- z drugim etapem mielenia na profilowanej wykładzinie,
- z drugim etapem mielenia na profilowanej wykładzinie i ruszcie,

- z drugim etapem mielenia na wykładzinie sitowej - tylko przy mieleniu materiałów bardzo miękkich: chemicznych, farmaceutycznych, kosmetycznych i roślinnych.

Kolejny podział tych młynów związany jest ze sposobem odbioru produktu mielenia, który może być:

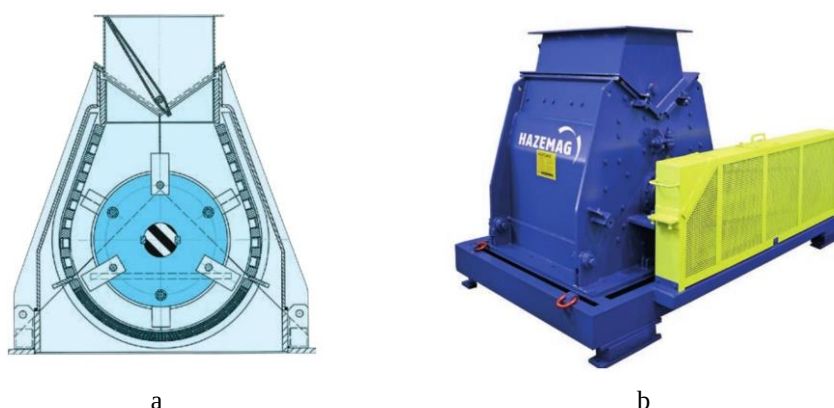
- z odbiorem grawitacyjnym – bez rusztu,
- z odbiorem grawitacyjny – z rusztem,
- pneumatyczny bez separatora,
- pneumatyczny z separatorem pneumatycznym.

Występuje również zróżnicowanie budowy i zamocowania młotków w wirniku młyna. Stąd wyróżnia się młotki:

- jednostronny monolityczny wykonany z jednego materiału,
- jednostronny monolityczny bimetaliczny, którego część robocza wykonana jest z innego bardziej odpornego na zużycie ścierne materiału,
- jednostronny, którego część robocza wykonana jest z innego bardziej odpornego na zużycie ścierne jest wymienna,
- dwustronny, posiadający dwa otwory, który po zużyciu z jednej strony odwracany jest o 180° .

Duże znaczenie mają wymiary, masa oraz liczba młotków oraz sposób ich rozmieszczenia na wirniku. Największe wymiary i masę (dochodzącą do kilkudziesięciu kg) mają młotki w młynach do grubego mielenia o wydajności powyżej 100 Mg/h. W wirnikach młynów do najdrobniejszego mielenia umieszcza się najwięcej młotków usytuowanych w najmniejszych odległościach.

Do bardzo drobnego kruszenia (do uziarnienia o 5% p.n.s. 3 mm) lub grubego mielenia (do uziarnienia o 5% p.n.s. 1 mm, przy maksymalnym uziarnieniu 1,2 mm) z jednoczesnym suszeniem materiałów oferuje młyny młotkowe typu HUM i HNM firma Hazemag [6]. Młyny te można stosować do mielenia materiałów miękkich oraz średnio twardych, takich jak: anhydryt, wapno palone, węgiel brunatny, dolomit, złom elektroniczny, gips, szkło, potas, wapień, glina porcelanowa, ziemia okrzemkowa, kreda, fosforany, sole, kreda francuska i glina. Na rysunku 12.4 przedstawiono schemat budowy i widok młyna HUM z jednym wirnikiem, a w tabeli 12.1 podstawowe parametry młynów HUM.



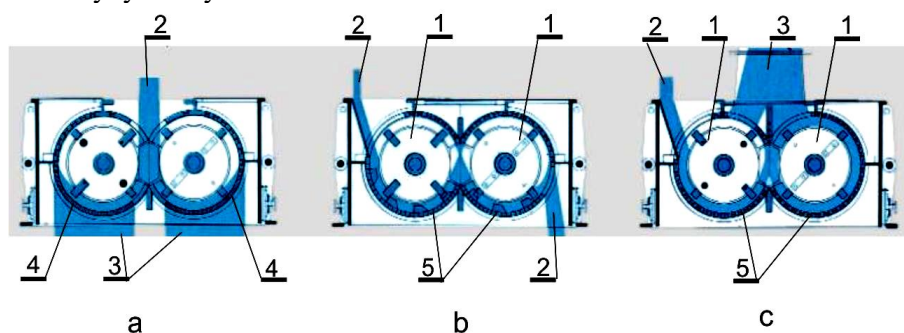
Rys. 12.4. Młyn młotkowy HUM firmy Hazemag:
a – schemat budowy, b – widok młyna [6]

Podstawowe parametry młynów młotkowych HUM [6]

Tabela 12.1.

Typ	Wymiary wirnika, DxL [mm]	Wydajność [Mg/h] przy 5% p.n.s. 3 mm	Moc [kW]	Masa [kg]
HUM 0703	φ 650x250	5	15-45	1 500
HUM 0705	φ 650x500	10	18-55	1 800
HUM 0708	φ 650x750	15	22-75	2 400
HUM 1008	φ 1 000x750	25	30-160	4 800
HUM 1013	φ 1 000x1 250	40	45-200	6 800
HUM 1313	φ 1 300x1 250	50	55-250	10 600

Na rysunku 12.5 zamieszczono schematy budowy i działania dwuwirnikowych młynów młotkowych HNM, a w tabeli 12.2 podstawowe parametry tych młynów.



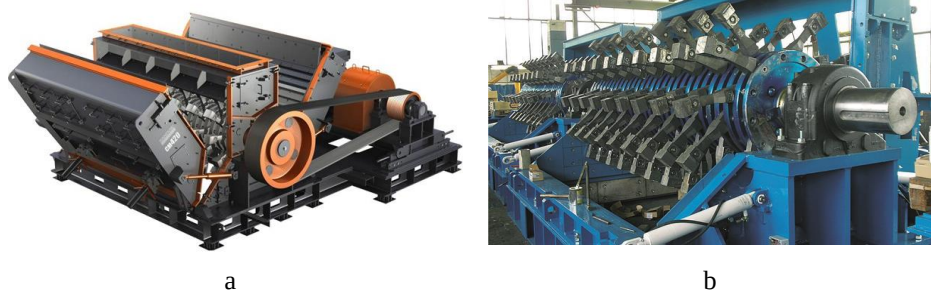
Rys. 12.5. Młyn młotkowy HNM: a - w wersji jako kruszarka z rusztem, b - w wersji jako młyn z odbiorem grawitacyjnym, c - w wersji jako młyn z odbiorem pneumatycznym,
1 - wirnik, 2 - wlot nadawy, 3 - odbiór produktu rozdrabniania, 4 - ruszt, 5 - wykładzina [6]

Podstawowe parametry młynów młotkowych dwuwirnikowych HNM [6]

Tabela 12.2.

Typ	Wymiary wirnika, DxL, [mm]	Wydatność [Mg/h] przy 5 %p.n.s. 3 mm	Moc [kW]	Masa [kg]
HNM 0703	φ 650x250	10	2x15÷45	1.900
HNM 0705	φ 650x500	20	2x18,5÷55	2.500
HNM 0708	φ 650x750	30	2x22÷75	3.100
HNM 1008	φ 1 000x750	45	2x30÷160	7.100
HNM 1013	φ 1 000x1 250	70	2x45÷200	10.000
HNM 1020	φ 1 000x2 000	110	2x55÷250	18.800
HNM 1313	φ 1 300x1 250	120	2x55÷250	21.000
HNM 1325	φ 1 300x2v 500	190	2x90÷400	39.000

Szeroki wybór młynów młotkowych oferuje firma Sandvik. Są to młyny serii CM 420 o wydajności od 75 do 700 Mg/h. Rozwiązanie konstrukcyjne młyna tej serii przedstawiono na rysunku 12.6, a podstawowe parametry podano w tabeli 12.3 [8]



a

b

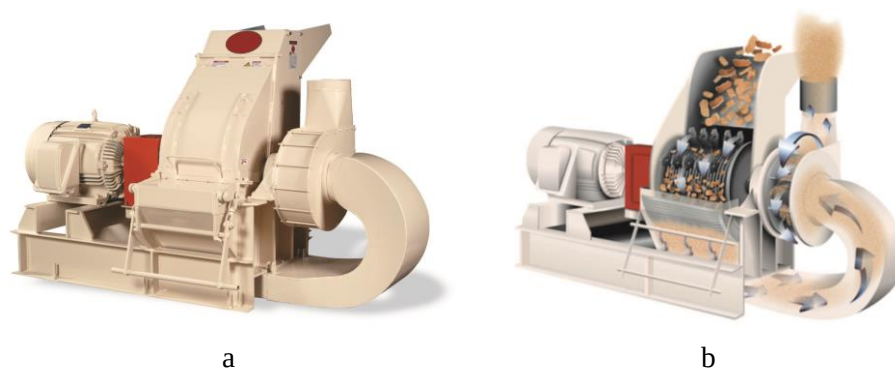
Rys. 12.6. Młyn młotkowy serii CM 420 firmy Sandvik: a - młyn z otwartą obudową, b - wirnik młyna z wymiennymi elementami roboczymi młotków [8]

Podstawowe parametry młynów młotkowych serii CM 420 [8]

Tabela 12.3.

Typ	Średnica wirnika [mm]	Długość wirnika [mm]	Wydajność [Mg/h]	Uziarnienie nadawy [mm]
CM4207/10-10	1 000	1 000	75	0÷250
CM420/10-14	1 000	1 400	130	0÷250
CM420/12-12	1 200	1 200	120	0÷250
CM420/12-14	1 200	1 400	140	0÷250
CM420/14-14	1 400	1 400	150	0÷250
CM420/14-18	1 400	1 800	250	0÷250
CM420/14-22	1 400	2 200	300	0÷250
CM420/14-26	1 400	2 600	400	0÷250
CM420/14-30	1 400	3 000	500	0÷250
CM420/16-22	1 600	2 200	400	0÷250
CM420/16-26	1 600	2 600	500	0÷250
CM420/16-30	1 600	3 000	600	0÷250
CM420/16-34	1 600	3 400	700	0÷250

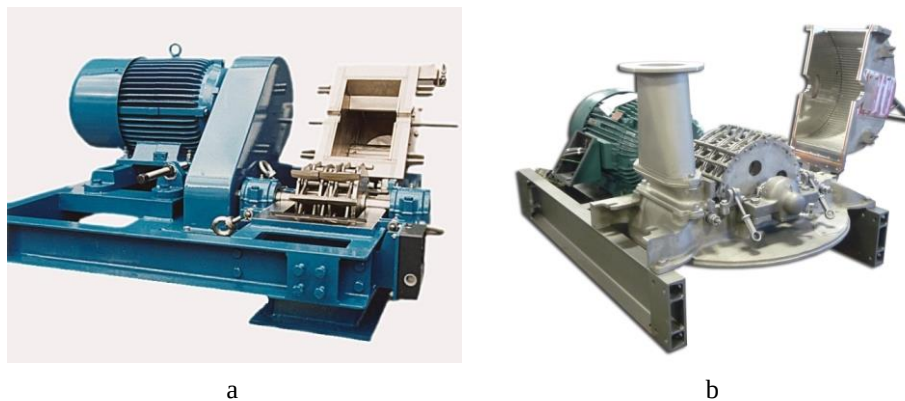
Na rysunku 12.7 zamieszczono młyn firmy Schutte Bufallo z pneumatycznym odbiorem zmielonego produktu [9].



Rys. 12.7. Młyn młotkowy firmy Schutte Bufallo [9]:

a – widok młyna, b – widok strefy mielenia i odbioru produktu rozdrabniania

Na rysunku 12.8 zamieszczono dwa rozwiązania konstrukcyjne młyna z poziomym wirnikiem i z grawitacyjnym odbiorem zmielonego produktu firmy Hosokawa [10, 11].



Rys. 12.8. Młyn młotkowy Mikro-Pulverizer firmy Hosokawa:
 a - wersja dla branży spożywczej i farmaceutycznej [10],
 b - wersja dla przemysłu chemicznego i innych [11]

Firma Hosokawa Alpine opracowała również specjalne wersje młyna, takie jak:

- model: SH / DH lub TH, do których nadawa podawana jest przez jeden, dwa lub trzy dozowniki ślimakowe,
- model: W, do którego nadawa podawana jest grawitacyjnie wspólnie z innymi składnikami,
- model: SCB (Special Carbon Black): o konstrukcji opracowanej specjalnie do mielenia sadzy i jest wyposażona w króciec odbioru pneumatycznego produktu mielenia oraz wtryskiwacz cieczy.

Produkt mielenia z tego młyna posiada uziarnienie w zakresie od 45 do 250 μm [11].

Na rysunku 12.9 przedstawiono specjalne wersje młynów młotkowych. Są to: młyn z pionowym wirnikiem (rys. 12.9 a) – stosowany w recyklingu poużytkowych wyrobów metalowych [12] oraz młyn z zamocowaniem młotków w wirniku za pomocą podwójnych ogniów łańcucha (rys. 12.9 b), co umożliwia przemieszczenia młotków nie tylko w płaszczyźnie prostopadłej do osi geometrycznej wirnika, co ma miejsce w większości młynów młotkowych, lecz także wzdłuż osi geometrycznej wirnika [13] Młyn ten stosowany jest również w rozdrabnianiu w recyklingu.



a



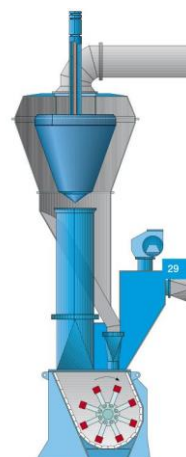
b

Rys. 12.9. Specjalne wykonania młynów młotkowych: a – młyn o pionowej osi wirnika [12], b – młyn z zamocowaniem młotków za pomocą dwóch ogniw łańcucha [13]

Szereg młynów młotkowych (ponad dwadzieścia) zastosowała firma FAM do mielenia: węgla kamiennego, wapienia, dolomitu, gipsu, siarczanu amonu, żużla pomiedziowego, potażu i innych materiałów. Wydajność tych młynów do mielenia wapienia i dolomitu wynosiły 50÷200 Mg/h, węgla 300÷1500 Mg/h, fosforytów 1000 Mg/h. Młyny te często wyposażane są w separatory pneumatyczne – usytuowane nad młynem. Rozwiązania konstrukcyjne młynów firmy FAM zamieszczono na rysunku 12.10 [14].



a



b

Rys. 12.10. Młyny młotkowe z separatorem pneumatycznym: a - młyn PHM1012 z separatorem do mielenia gipsu, średnica wirnika 1000 mm, długość 1200 mm, wydajność 60 Mg/h, uziarnienie nadawy 0÷6,3 mm, produktu mielenia 0÷0,8 mm, b - młyn młotkowy SHM1414 z separatorem LSS2300 do mielenia gipsu, wydajność 19 Mg/h, uziarnienie nadawy 0÷60 mm, produktu mielenia 0÷60 μm [12]

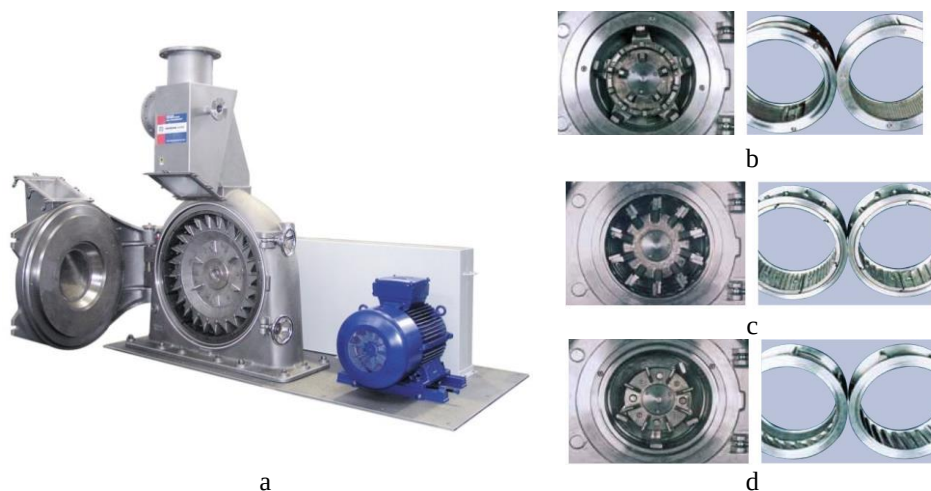
Specjalne rozwiązania konstrukcyjne młynów młotkowych stosuje się w mieleniu materiałów pochodzenia roślinnego oraz branżach: chemicznej, farmaceutycznej, kosmetycznej oraz przemyśle spożywczym.

12.3. Młyny bijakowe

Młyny bijakowe znajdują podobne zastosowanie, jak młyny młotkowe. Istotną różnicą w budowie młyna jest sztywne połączenie bijaków z tarczą wirnika. Produkowane są tak jak młyny młotkowe w dwóch podstawowych wersjach:

- z wirnikiem poziomym – dominująca ilość,
- z wirnikiem pionowym – w tej wersji w większości z separatorem umieszczonym nad wirnikiem z osią geometryczną wirnika separatora pokrywającą się z osią geometryczną wirnika bijakowego młyna.

Usytuowanie i liczba bijaków na wirniku uwarunkowana jest również tak jak w młynach młotkowych młotki – własnościami fizycznymi mielonego materiału, uziarnieniem produktu mielenia, wydajnością młyna. Największe wymiary i masę (dochodzącą kilku kg) mają bijaki w młynach do grubego mielenia o wydajności powyżej 10 Mg/h. W wirnikach młynów do najdrobniejszego mielenia umieszcza się najwięcej bijaków o mniejszej masie, różnym kształcie, które są usytuowane w najmniejszych odległościach.



Rys. 12.11. Młyn bijakowy UPZ z różnymi wersjami wirnika i wykładziny komory mielenia: a - młyn z wirnikiem wielosegmentowym, b - wirnik dyskowy, c - wirnik płytkowy, d – wirnik z młotkami [15]

Młyny bijakowe budowane są w wersji modułowej, która polega na tym, że w jednym korpusie umieszcza się różne wirniki dostosowane do warunków technologicznych mielenia konkretnego materiału. Ponadto użytkownik tego młyna może zamienić wirnik na inny dostosowany do innych własności fizycznych mielenia nowego materiału, bez zmiany instalacji młyna, a w razie konieczności zamienić napęd na inny o większej mocy lub innej prędkości obrotowej wirnika bijakowego młyna. Przykładem tego rodzaju młyna jest młyn UPZ firmy Hosokawa [15] (rys. 12.11), którego podstawowe parametry podano w tabeli 12.4.

Podstawowe parametry młynów UPZ z różnymi wersjami wirnika [15]

Tabela 12.4.

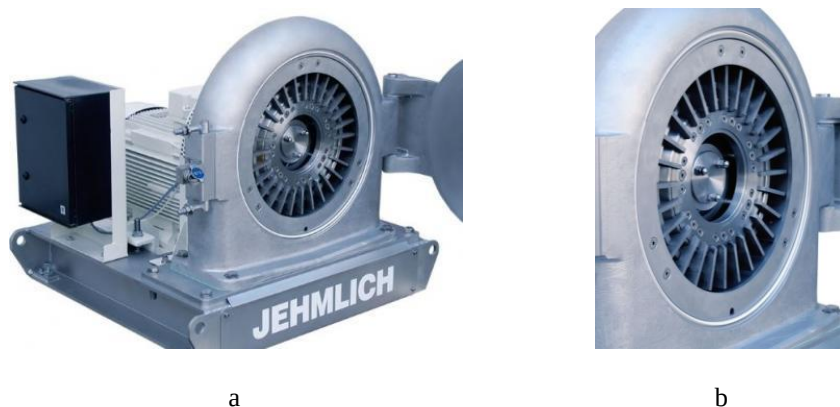
Typ	160	250	315	500	630	800	1000	1250	1400
Wirnik płytkowy	Prędkość bijaków < 120 m/s								
Współczynnik skali [-]	0,25	0,5	1	2	3,6	4,5	6,3	9	14
Przepływ powietrza [m ³ /h]	-	870	1600	3200	5700	7500	10000	12500	14000
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	14000	8300	7100	4600	3480	2850	2380	1860	1490
Moc młyna [kW]	5,5	11	18,5	37	75	90	110	250	315
Wirnik dyskowy	Prędkość bijaków < 85 m/s								
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	7600	6300	5000	3100	2445	2000	1475	1320	1100
Moc młyna [kW]	5,5	7,5	11	22	37	45	55	90	160
Wirniki młotkowy	Prędkość młotków < 85 m/s								
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	7600	6300	5000	3310	2445	2000	1475	1320	-
Moc młyna [kW]	5,5	7,5	11	22	37	45	55	90	-
Wirnik wielosegmentowy	Prędkość bijaków < 120 m/s								
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	-	8550	-	4600	-	-	2380	1860	-
Moc młyna [kW]	-	11	-	37	-	-	110	250	-

- w tej wersji młyn nie występuje

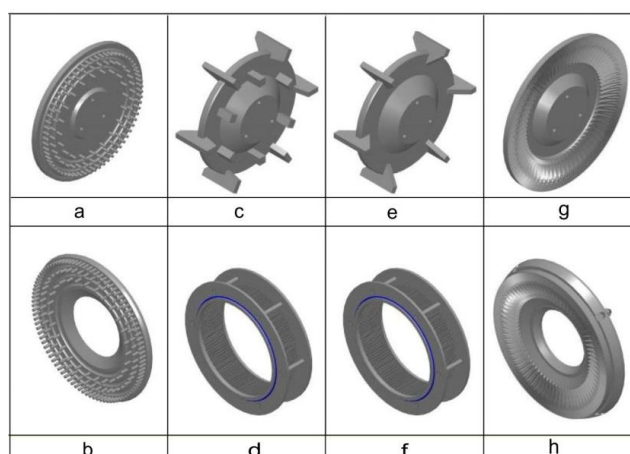
Wirnik wielosegmentowy (rys. 12.11 a) stosuje się do bardzo drobnego mielenia – przy najmniejszej wydajności młyna. Wirnik dyskowy (rys. 12.11 b) umożliwia uzyskanie najmniejszego stopnia rozdrobnienia i stosuje się do mielenia grubego, uzyskując największą wydajność młyna. Wirnik płytkowy (rys. 12.11 c) stosuje się do mielenia drobnego – przy mniejszej wydajności.

Wirnik młotkowy (rys. 12.11 d) stosuje się do mielenia materiałów o najgrubszym uziarnieniu nadawy.

Na rysunkach 12.12 zamieszczono rozwiązanie konstrukcyjne młyna bijakowego, a na rysunku 12.13 wariantowe rozwiązania elementów roboczych młynów bijakowych firmy Jehmlich, a w tabeli 12.5 podstawowe parametry młynów tej firmy [16].



Rys. 12.12. Młyn bijakowy firmy Jehmlich: a – widok młyna, b – wirnik młyna [14]



Rys. 12.13. Elementy robocze młynów bijakowych firmy Jehmlich [16]: a - wirnik kołkowy, b - przeciwwirnik kołkowy - stały, c - wirnik z dodatkowymi trzpieniami, d - wykładzina sitowa tego wirnika, e - wirnik, f - wykładzina sitowa tego wirnika, g - wykładziny tylna strefy kruszenia, h - wykładzina przednia strefy kruszenia

Podstawowe parametry młynów uderowych firmy Jehmlich [16]

Tabela 12.5.

Typ – Rekord	A	B	BT	C	D	2001
Moc silnika [kW]	7,5	18,5	18,5	160	160	160
Średnica wirnika [mm]	212	300	315	450	560	630
Prędkość obwodowa [m/s]	135	223	115	176	140	180
Wydajność [kg/h]	200	500	1000	1000	2000	5000

Młyn firmy Jehmlich zamieszczony na rysunku 12.12.b posiada wymienne elementy robocze wirnika mocowane złączami śrubowymi.

Na rysunku 12.14 przedstawiono młyny bijakowe firmy Pallmann [17], a w tabeli 12.6 podstawowe parametry młynów serii PX.



a



B

Rys. 12.14. Młyn bijakowy firmy Pallmann:

a - z wirnikiem turbo-impellerowym, b - z wirnikiem bijakowym [17]

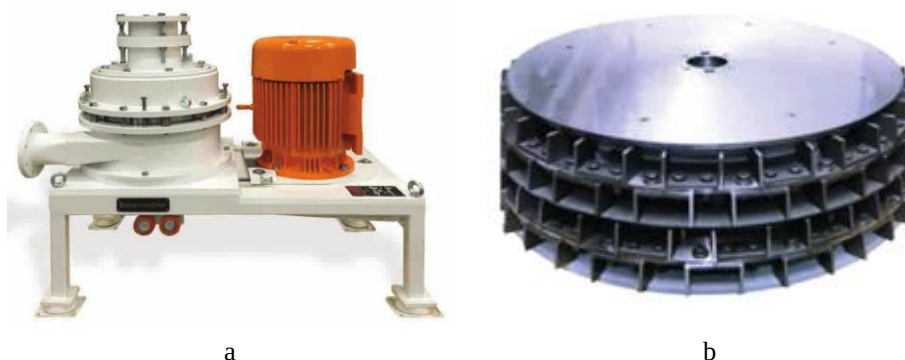
Podstawowe parametry młynów uderowych firmy Pallmann [17]

Tabela 12.6.

Parametry	Typ młyna PX			
	315	500	630	1000
Współczynnik skali [-]	1,0	2,4	4,0	8,6
Średnica wirnika [mm]	315	500	630	1000
Moc silnika [kW]	18,5	45	75	160

Młyny bijakowe zamieszczone na rysunkach 12.12 oraz 12.14 użytkowane są bez separatorów, a podawana do nich nadawa powinna mieć twardość nie przekraczającą 3 w skali Mohsa.

Na rysunku 12.15 przedstawiono młyn oraz wirnik młyna firmy Bauermeister [18], a w tabeli 12.7 podstawowe parametry młynów serii GM.



Rys. 12.15. Młyn bijakowy firmy Bauermeister [16]: a - młyn, b - wirnik turbinowy

Podstawowe parametry młynów udarowych firmy Bauermeister [18]

Tabela 12.7.

Parametry	Seria GM		
	GM 40	GM 80	GM 120
Średnica wirnika [mm]	400	800	1200
Moc silnika [kW]	30	75	160
Przepływ powietrza [m ³ /min]	30	60	100

Młyny serii GM spełniają wymagania dyrektywy ATEX (dyrektywa UE 94/9/UE zastąpionej przez dyrektywę 2014/34/UE) w zakresie odporności na wybuch generujący nadciśnienia do 1 MPa. Rozwiązanie strefy rozdrabniania w młynie eliminuje możliwość gromadzenia się materiału mielonego w młynie oraz na zewnątrz młyna. Wyposażony jest w monitoring temperatury łożysk [16].

Młyny z wirnikiem turbinowym o osi pionowej oferuje firma Mill Powder Tech [17] (rys. 12.16). Jego podstawowe parametry podano w tabeli 12.8. Natomiast z wirnikiem pionowym firma Hosokawa Alpine (rys. 12.17).



Rys. 12.16. Młyn bijakowy firmy Mill Powder Tech z poziomym wirnikiem turbinowym [19]



Rys. 12.17. Młyn bijakowy firmy Hosokawa Alpine z pionowym wirnikiem turbinowym [20]

Podstawowe parametry młynów uderowych firmy Mill Powder Tech [19]

Tabela 12.8.

Typ	Średnica wirnika [mm]	Prędkość obrotowa [obr. /min]	Moc [kW]	Wydatek powietrza [m ³ /min]	Wydajność [Mg/h]
TM-250	250	4000~8000	11÷15	5÷10	0,3÷0,4
TM-400	400	2500~4500	30÷37	10÷20	1
TM-600	600	1750~3000	45÷55	15÷30	2
TM-800	800	1500~2200	65÷92	24÷40	3÷4
TM-1000	1000	1200~2000	55÷110	40÷70	5÷6

Młyn Long Gap – LGM firmy Hosokawa Alpine ma zastosowanie w procesach mielenia z jednoczesnym suszeniem oraz powlekaniem ziaren (otoczkowaniem) oraz mieszaniem produktu. Wszystkie te procesy mogą zachodzić w młynie jednocześnie, a prędkość obwodowa wirnika osiąga 120 m/s. W zależności od własności fizycznych rozdrabnianego materiału, wydajności oraz wymagań technologicznych produktu mielenia, produkt ten może osiągać uziarnienie o $d_{97} = 5 \div 500 \mu\text{m}$, przy wydajności młynów w zakresie od 90 kg/h do 14,5 Mg/h [20].

12.4. Dezintegratory – młyny kółkowe

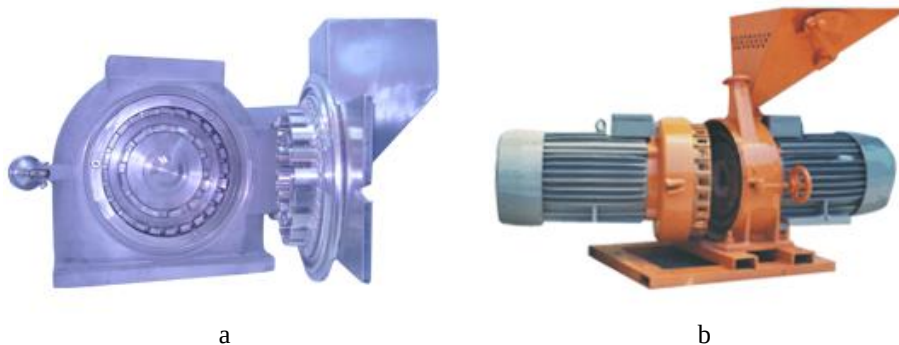
Młyny kółkowe, zwane także dezintegratorami (młynami tarczowymi, igłowymi, pulweryzatorami) znajdują podobne zastosowanie, jak młyny młotkowe. Istotną różnicą ich rozwiązania jest budowa wirnika. Wirnik jako element roboczy posiada wymienne kołki zwane trzpieniami. Kołki te mogą być mocowane w tarczach z jednej strony. W dużych młynach, które mogą być stosowane jako kruszarki drugie ich końce mogą być umieszczane w pierścieniach. Młyny te produkowane są tak jak młyny młotkowe i bijakowe w dwóch typowych wersjach:

- z wirnikiem poziomym – w przeważającej liczbie,
- z wirnikiem pionowym.

Występuje rozwiązanie, które znacząco różni je od pozostałych młynów udarowych, to jest napęd dwóch tarcz z kołkami w przeciwnym kierunku, co znacząco zwiększa możliwości ich mielenia. Stąd drugi ich podział wyróżnia młyny:

- z napędem jednego wirnika tarczowego,
- z napędem dwóch tarcz współśrodkowo usytuowanych wirników.

Typowe rozwiązania obu wersji tych młynów zamieszczono na rysunku 12.18, a podstawowe dane w tabeli 12.9



Rys. 12.18. Młyny kółkowe – dezintegratory firmy Dezintegrator [21]:
a - młyn z jednym wirnikiem D 220, b - z dwoma wirnikami D-114

Podstawowe parametry młynów kołkowych [21]

Tabela 12.9.

Parametry	Typ					
	D-220	D-320	D-450	D-135	D-700	D-114
Wydajność [kg/h]	0,15÷0,3	0,3÷0,6	2,0÷5,0	do 4,0	15,0÷20,0	4,0
Moc silnika [kW]	4	5,5	22	30	37	2x22(30)
Prędk. obrotowa [obr/min]	3890	3000	3000	3000	3000	3000
Uziarnienie nadawy [mm]	do 10	do 10	do 10	3÷4	do 12	-
Długość [mm]	1500	1800	1900	1900	1900	1420
Szerokość [mm]	1000	1000	1000	1000	910	780

W Polsce młyny kołkowe zwane igłowymi oferuje firma F.P. Spomax S.A. [22]. Na rysunku 12.19 zamieszczono dwie wersje tego młyna.



Rys. 12.19. Młyny kołkowe – dezintegratory firmy FP Spomax S.A. [22]:
a - młyn z jednym wirnikiem MI 250, b - z dwoma wirnikami MI 400

W tabeli 12.10 podano podstawowe parametry młynów firmy FP Spomax S.A.

Podstawowe parametry młynów kołkowych firmy FP Spomax S.A [21]

Tabela 12.10

Parametry	Typ			
	Wyk. 1	Wyk. 2	Wyk. 3	Wyk. 4
Prędkość obrotowa tarczy - korpus [obr/min]	6000	8400	6000	8400
Prędkość obrotowa tarczy - pokrywa [obr/min]	3000	4500	3000	4500
Wydajność [kg/h]	150÷1200			
Moc silnika od strony korpusu [kW]	22	30	22	30
Moc silnika od strony pokrywy [kW]	11	15	11	15
Mas [kg]	1620	1735	1620	1735

Firma Hosokawa Alpine oferuje dwa typy szeregi młynów kołkowych. Pierwszy to młyny typu UPZ z wirnikiem tarczowym kołkowym, którego budowa zbliżona jest do młynów zamieszczonych na rysunku 12.11, a podstawową różnicą są tarcze kołkowe wirnika czynnego i biernego. Podstawowe parametry tych młynów podano w tabeli 12.11 [15].

Podstawowe parametry młynów UPZ z wirnikiem kołkowym

Tabela 12.11.

Parametry	Typ młyna								
	160	250	315	500	630	800	1000	1250	1400
Wirnik kołkowy	Prędkość bijaków < 150 m/s								
Prędk. obr. Wirnika [obr/min]	1800 0	1100 0	9000	5910	4920	3400	2900	2700	2200
Moc młyna [kW]	5,5	11	18,5	37	75	90	110	250	355

Na rysunku 12.20 zamieszczono młyn kołkowy Ultraplex firmy Hosokawa Alpine [15] z napędem jednego wirnika, a na rysunku 12.21 młyn Contraplex z napędem dwóch wirników [23]. Młyny te przeznaczone są do przemysłów: spożywczego, farmaceutycznego, kosmetycznego i chemicznego.



Rys. 12.20. Młyn kołkowy Ultraplex firmy Hosokawa Alpine [15]



Rys. 12.21. Młyn kołkowy Contraplex firmy Hosokawa Alpine [23]

Duże młyny z napędem dwóch wirników oferuje firma Stedman [24]. Na rysunku 12.22 zamieszczono widok młyna tej firmy.



Rys. 12.22. Młyn kołkowy firmy Stedman [24] z napędem obu wirników

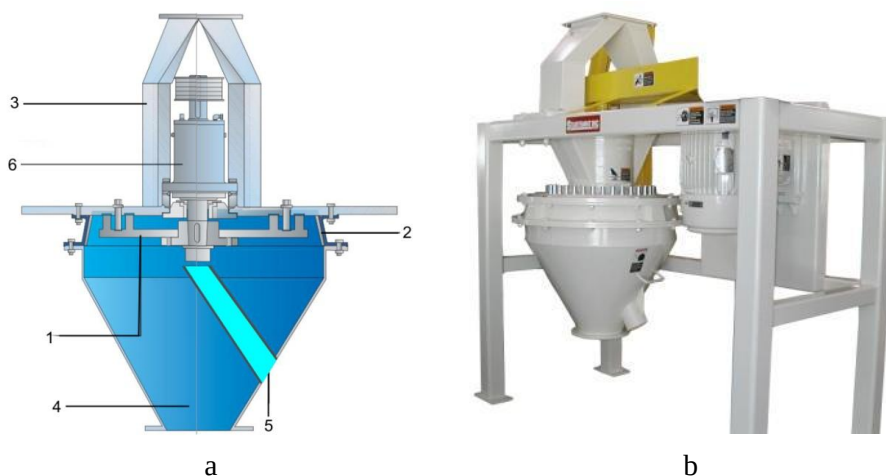
Podstawowe parametry dużych młynów kołkowych firmy Stedman [24]

Tabela 12.12.

Typ	Uziarnienie nadawy [mm]	Wydajność [Mg/h]	Moc silnika dużego wirnika [kW]	Moc silnika dużego wirnika [kW]
H-40	0÷3,8	20÷35	37	55
H-48	0÷5,0	35÷70	74	110
H-54	0÷6,5	75÷150	147	185
H-62	0÷6,5	6÷12	220	295

Firma Sturtevant oferuje młyny kołkowe z wirnikiem o osi pionowej. Zaletą tych młynów jest nadanie przez obracającą się tarczę wirnika dodatkowej prędkości, zwiększając w ten sposób znacząco energię rozdrabniania przez uderzanie w nie kołków. Firma oferuje typszereg młynów o mocy silnika od 3,5 kW do 220 kW, przy czym wydajność największego młyna osiąga 100 Mg/h [25].

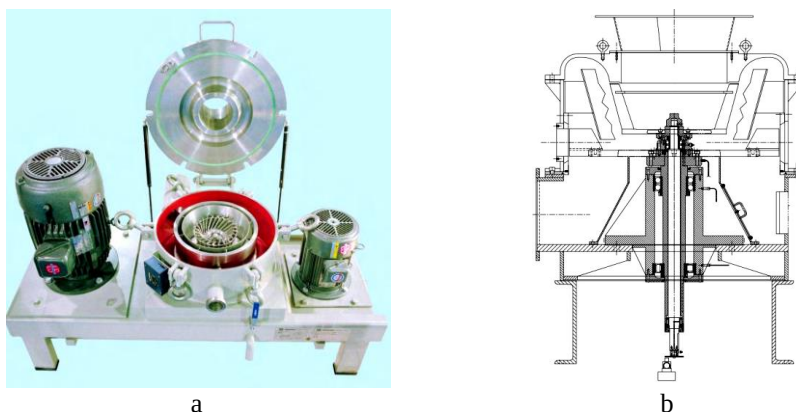
Schemat budowy i wersję przemysłową tego typu młyna zamieszczono na rysunku 12.23 [25].



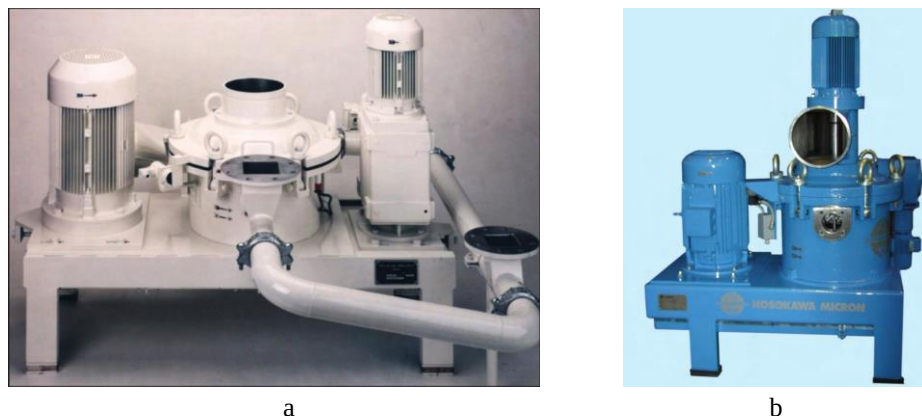
Rys. 12.23. Młyn kołkowy firmy Sturtevant [25] z wirnikiem pionowym:
a - schemat budowy, b - młyn z napędem, 1 - wirnik, 2 - wykładzina rozdrabniająca,
3 - wlot nadawy, 4 - wylot produktu mielenia, 5 - wlot powietrza,
6 - węzeł łożyskowania wirnika

12.5. Młyny z wbudowanym separatorem

Szereg młynów uderowych wyposażonych jest w separator - najczęściej turbinowy stanowiący integralny zespół młyna. Młyny te często nazywane są młynami separującymi. Dużą ofertę tych młynów typu Micro-ACM oferuje firma Hosokawa Alpine [26]. Na rysunku 12.24 zamieszczono kompletny oraz uproszczony rysunek konstrukcyjny. Rozwiązania konstrukcyjne młynów tej serii zamieszczono na rysunku 12.25.



Rys. 12.24. Młyn bijakowy Micro-ACM z separatorem firmy Hosokawa Alpine [26]:
a – młyn z otwartą komorą mielenia i separacji, b - budowa młyna



Rys. 12.25. Młyn bijakowy Micro-ACM z separatorem firmy Hosokawa Alpine [26]:
a - model 25, b - model 30 CL

Podstawowe parametry młynów Micro-ACM podano w tabelach 12.13 oraz 12.14.

Podstawowe parametry młynów separujących Micro-ACM [26]

Tabela 12.13.

Parametry	Typ młyna						
	5	10	15	20	25	40	50
Moc młyna [kW]	5,5	7,5	11	15	18	30	37
Moc separatora [kW]	1,1	1,5	1,5	2,2	2,2	5,5	5,5
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	9 400	6 200	6 200	5 000	5 000	4 300	3 300
Prędkość obrotowa wirnika, separatora, [obr/min]	1 200÷ 4 600	700÷ 4 000	700÷ 4 000	700÷ 3 250	700÷ 3 250	600- 2.900	600- 2.900
Wydatek powietrza [m ³ /h]	500	900	1,350	1 800	2 250	3 600	4 500
Współczynnik skali	0,5	1,0	1,35	1,8	2,25	3,6	4,5

Podstawowe parametry młynów separujących Micro-ACM [26]

Tabela 12.14.

Parametry	Typ młyna						
	75	125	200	300	400	500	600
Moc młyna [kW]	55	92	147	220	294	368	440
Moc separatora [kW]	15	20	40	50	100	125	150
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	2 700	2 100	1 850	1 650	1 400	1 400	1 400
Prędkość obrotowa wirnika, separatora, [obr/min]	600÷ 2,650	600÷ 2,400	500÷ 2,200	500÷ 2,200	400÷ 1,850	400÷ 1,850	400÷ 1,860
Wydatek powietrza [m ³ /h]	6 750	10 800	18 000	27 000	36 000	45 000	54 000
Współczynnik skali	6,75	10,8	18	27	36	45	54

Młyny Mikro-ACM oferowane są w trzech wersjach specjalizowanych do własności technologicznych rozdrabnianych materiałów. Są to wersja podstawowa (The Original), wersja CX Co-Axial oraz wersja SB Split Body [26].

Mniejszą ofertę bijakowych młynów separujących posiada firma Kek-Gardner [27], które największe zastosowanie znalazły w przemyśle spożywczym, farmaceutycznym, nawozów sztucznych, a także gipsu, siarki

mitratów, pestycydów, a także farb do malowania proszkowego i innych materiałów. Na rysunku 12.26 zamieszczono młyn stosowany w przemyśle farmaceutycznym, zapewniający jego łatwe oczyszczanie i sterylizację. W tabeli 12.15 podano podstawowe parametry tych młynów [27].



Rys. 12.26. Młyn bijakowy z separatorem w wykonaniu specjalnym z otwieraną wykładziną komory montowaną w pokrywie [27]

Szeroki program produkcyjny młynów separujących posiada firma Atritor [28], która oferuje młyny serii CM (Cell Mill) zamieszczone na rysunku 12.27. Podstawowe parametry techniczne tych młynów podano w tabeli 12.16. Młyn CM 2250 jest młynem separującym o największej mocy 500 kW. W młynach CM mielone są trzy grupy materiałów, to jest materiały mineralne i sztuczne (kaolin, kamień wapienny, talk, kalcyt fosfaty i inne), surowce i produkty chemiczne oraz szeroka gama środków spożywczych.

Podstawowe parametry młynów separujących CMT [27]

Tabela 12.15.

Typ młyna	2 CMT	3 CMT	4 CMT	5 CMT	6 CMT	7 CMT	8 CMT	10CMT	12CMT
Indeks wydajności	2	2,7	5,4	6.X	10,8	13	31	40	52
Młyn, moc [kW]	7,5	11,0	22,0	30,0	45,0	90,0	150	250	350
Separator, moc [kW]	1,5	2,2	4,0	5,5	7,5	11,0	22	45	55
Przepływ powietrza [m ³ /h]	1190	1700	4250	5100	9180	10200	20000	30500	42000
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	7200	7200	4750	4750	3000	3000	2400	2000	1800
Prędkość obrotowa separatora [obr/min]	4000	4000	2900	2900	2650	2650	2400	2200	1750

Podstawowe parametry młynów u separujących serii CM [28]

Tabela 12.16.

Typ młyna	CM350	CM500	CM750	CM 1000	CM 1250	CM1500	CM2250
Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	6500	4500	3000	2250	1800	1500	1000
Moc młyna [kW]	15÷30	22÷55	45÷90	75÷132	110÷200	132÷350	200÷500
Moc separatora [kW]	5,5	7,5	15	22	30	37	55
Wydatek powietrza [m ³ /h]	1250÷4000	2000÷6000	3000÷12000	4000÷15000	5000÷20000	6000÷25000	9000÷37000



a



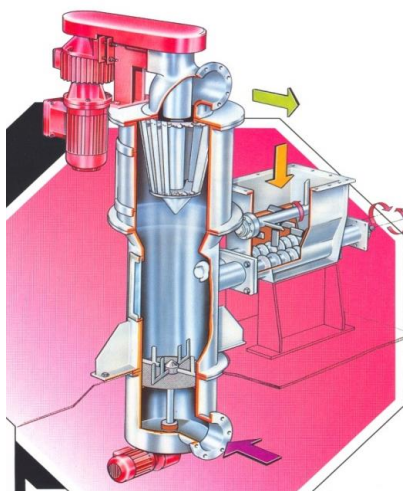
b

Rys. 12.27. Młyn bijakowy CM z separatorem: a - młyn z widocznymi wirnikami rozdrabniającym i separującym, b – młyn CM 500 z wirnikiem siedmiowarstwowym [28]

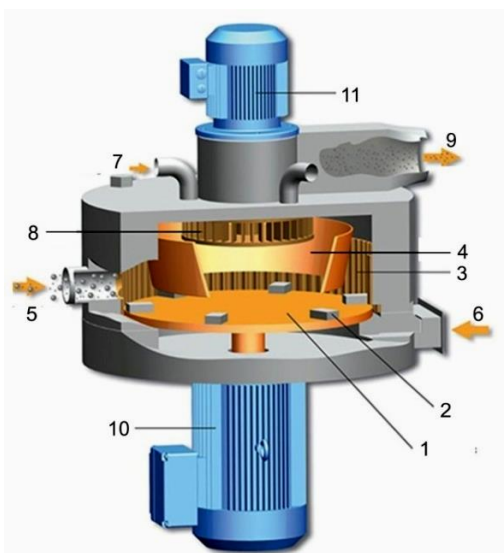
Do mielenia materiałów o dużej wilgotności z jednoczesnym suszeniem i klasyfikacją ziarnową firma Hosokawa Alpine opracowała młyn bijakowy typu MDF [29] (rys. 12.28). Młyn ten przeznaczony jest do rozbrylania i suszenia rozdrobnionych, ale zbrylonych wilgotnych materiałów.

Firma ta produkuje typoszereg pięciu młynów o mocy od 1,5 do 7,5 kW, o mocy silnika separatora od 0,75 do 5,5 kW. Do młyna podawane są gazy spalinowe o temperaturze 450°C, o natężeniu przepływu od 10 do 330 m³/min w zależności od modelu młyna.

Oryginalny młyn (rys. 12.29) do przygotowania odpadów drzewnych do produkcji paliwa opracowała firma TorrCoal Technology BV [30].



Rys. 12. 28. Młyn bijakowy MDF firmy Hosokawa [29] do mielenia z jednoczesnym suszeniem wilgotnych i lepiących się materiałów



Rys. 12. 29. Młyn bijakowy do mielenia drewna [30]: 1 - wirnik, 2 - bijak, 3 - wykładzina, 4 - strefa separacji, 5 - wlot nadawcy, 6 - wlot powietrza, 7 - wlot powietrza, 8 - wirnik separatora, 9 - wylot zawiesiny powietrznej produktu mielenia, 10 - silnik młyna, 11 - silnik wentylatora

Firma ta opracowała technologię produkcji węgla z odpadów drzewnych poprzez proces zwęglania w warunkach wykluczenia powietrza w temperaturach $250\div 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, tzw. torfikacji. Ta obróbka termiczna zwiększa kaloryczność paliwa

związaną z gęstością. Aby drewno było wydajnym paliwem do palenia w piecach, wymaga zmielenia do uziarnienia o $d_{50} = 150 \mu\text{m}$ i zgranulowania.

Proces mielenia odpadów drzewnych przeprowadza się w młynie bijakowym ICM 240 firmy Neuman & Esser. Drewno po zmieleniu w młynie odbierane jest pneumatycznie i oddzielane z powietrza w cyklonie. Uziarnienie produktu mielenia można regulować przez zmianę prędkości obrotowej wirnika separatora turbinowego. Ze względu na zanieczyszczenia drewna piaskiem, gliną elementy robocze młyna wykonano z materiałów odpornych na ścieranie. Młyn wyposażony jest w obudowę dźwiękoszczelno-izolacyjną, monitoring z zabezpieczeniem przeciwwybuchowym oraz układ dozowania CO_2 do strefy mielenia - w razie potencjalnego zagrożenia wybuchem.

Starszą oryginalną konstrukcją młyna udarowego jest młyn z wewnętrzną cyrkulacją zmielonego materiału oraz klasyfikacją ziarnową zachodzącą na stożkowej przegrodzie sitowej, który został opracowany przez Instytut Chemicznej Przeróbki Węgla [31]. Zastosowanie przegrody sitowej uniemożliwia wydostanie się z młyna ziaren o niepożądanym wymiarze. Młyn ten opracowany do mielenia węgla zastosowano w Etiopii do mielenia siarczanu glinu.

Literatura

1. Rumpf H.: Europäisches Symposium Zerkleinern. Nürnberg. 1975 Preprints (1. Teil) Dechema Deutsche Gesellschaft für chemisches Apparatenwesen e. v. S. 19-41
2. Behrens D.: Einige Neuentwicklungen von Fein- und Feinstprallzerkleinerungs, Symposium Zerkleinern, Verlag Chemie, VDI Verlag Düsseldorf 1962, s. 474-502
3. Pasher C.I. Crushing and Grinding Process Handbook Ed. J. Wiley, Chichester 1987
4. Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Leipzig, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1989
5. Sidor J.: Postęp techniczny w konstrukcji młynów stosowanych w procesach bardzo drobnego mielenia Powder & Bulk. 2012 nr 6, s. 26-34
6. Hazemag Hammer Mill HUM and HNM, www.hazemag-group.com
7. www.airproducts.com.pl/kriogenika
8. <http://construction.sandvik.com/products/stationary-crushers-and-screens/stationary-hammer-mills/>
9. <http://www.hammermills.com/pl/product-category/hammer-mills/pneumatic-discharge/>

10. <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/flake-crushers-bexmills-pre-crusher-and-hammer-mills/mp-mikro-pulverizer-hammer-mill/>
11. <https://hmicronpowder.com/brochures-and-videos/article/high-performance-and-low-cost-size-reduction-with-the-mikro-pulverizer-hammer-mill>
12. <http://www.engineeredrecycling.com/equipment/shredders/hammer-mills#prettyPhoto>
13. <https://feeco.com/hammer-mills/>
14. FAM118_E_12_11_27_the-red-point.de www.fam.de
15. Ultraplex Fine Impact Mills Types 100 UPZ – 1400 UPZ. www.alpinehosokawa.com
16. <http://www.jehmlich.info/en/content/testing-facility/index.html>
17. <http://www.pallmannindustries.com>
18. Bauermeister Gap Mill GM-D. <http://www.bauermeisterusa.com>
19. <https://www.mill.com>
20. <https://www.vekamaf.com/equipment/long-gap-mill/>
21. <http://www.dezintegrator.com/en/desintegrators-micronizers-loose-materials>
22. <http://www.spomax.pl/index.php/oferta/inne-urz%C4%85dzenia/item/189-m%C5%82yn-ig%C5%82owy-mi-400>
23. <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/fine-impact-mills-and-classifier-mills/cw-wide-chamber-mill/>
24. www.stedman-machine.com
25. www.sturtevant.com
26. www.hmicronpowder.com 2001 HMII. All Rights Reserved. Printed in the U.S.A. MPS-19 02/01 2.5M RNB
27. Size Reduction Mills. Pre-Breaker Mills Cone Mills Universal Mills Air Classifier Mills. www.kekgardner.com
28. www.atritor.com
29. Materiały firmowe firmy Hosokawa
30. <http://www.advancedsciencenews.com/future-energy-source-generating-char-from-waste>
31. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975

13. Młyny wentylatorowe i odśrodkowe

13.1. Problematyka młynów z rozdrabnianiem udarowym na wykładzinie

Ważną podgrupę młynów udarowych tworzą młyny z wirnikami, w których do rozdrabniania materiału wykorzystuje się działanie siły odśrodkowej. W tych młynach ziarna rozdrabnianego materiału uzyskują dużą energię kinetyczną dzięki swojej prędkości dochodzącej do ponad 100 m/s. Prędkość ta, generowana przez obracający się wirnik, nadaje ziarnom znaczną energię kinetyczną, przekazywaną na proces rozdrabniania wskutek uderzenia w wykładzinę komory lub warstwę rozdrabnianego materiału tworzącą wykładzinę. Tego rodzaju proces rozdrabniania zachodzi w młynach wentylatorowych i odśrodkowych, których niektóre wersje nazywane są młynami entoleter. Młyny entoleter stosowane są także w przemyśle przetwórczym zbożowym, jako sterylizatory do niszczenia insektów w przemyśle młynarskim.

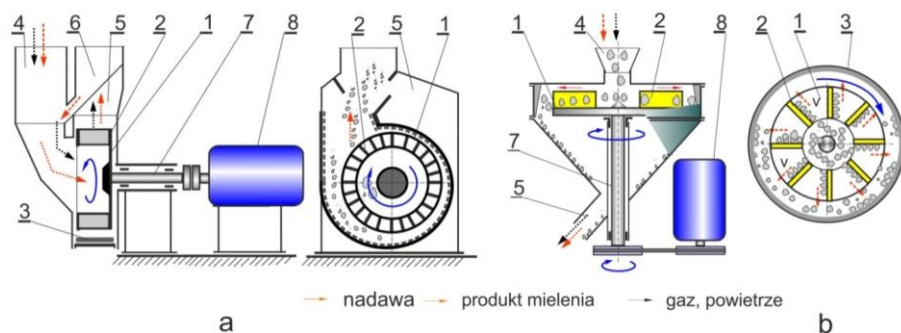
Młyn wentylatorowy, w literaturze anglojęzycznej nosi najczęściej nazwę: *beater wheel mill* [1, 2], a rzadko: *lignite mill* [3] – ponieważ najczęściej mielony jest w nim węgiel brunatny, lub *fan mill* [4], a w literaturze niemieckojęzycznej: *Schlagradmühle*, lub *Ventilatormühle* [5, 6]. Młyn ten wyposażony jest w wirnik o poziomej osi geometrycznej wirnika. Nadawa do mielenia wprowadzana jest w osi geometrycznej wirnika, a produkt mielenia odbierany jest ze strefy mielenia pneumatycznie – strumieniem powietrza, wprawionym w ruch przez ten sam wirnik, który rozpędza ziarna rozdrabnianego materiału.

Budowa młyna wentylatorowego zbliżona jest do budowy wentylatora z wirnikiem promieniowym. Jednak ze względu na masę i zdolności ścierające ziaren rozdrabnianego materiału, łopatki, tarcze wirnika, a zwłaszcza segmenty wykładziny, na których zachodzi proces rozdrabniania, mają znacznie większe grubości oraz wykonane są z materiałów o dużej odporności na zużycie ścierne w podwyższonej temperaturze oraz na korozję termiczną.

Natomiast młyn odśrodkowy o osi pionowej w literaturze anglojęzycznej nosi nazwę *entoleter* [7]. Nazwa tego młyna używana jest również w Polsce w przemyśle ceramicznym i przetwórstwie spożywczym [8, 9]. W literaturze niemieckojęzycznej młyn ten nazywany jest *Schleuderprallmühle* lub *Schleuderrad-Prallmühle* [5].

Należy dodać, że nazwa młyna odśrodkowego *entoleter* używana jest w USA przez firmę Entoleter również do młyna kołkowego o osi pionowej [10].

Schematy budowy młynów: wentylatorowego i odśrodkowego (typu entoletter) zamieszczono na rysunku 13.1.



Rys. 13.1. Schematy budowy i działania młynów: a - wentylatorowego, b - odśrodkowego:
1 - wirnik, 2 - łopata, 3 - wykładzina rozdrabniająca, 4 - wlot nadawy gazu, lub powietrza,
5 - wylot zmielonego materiału, powietrza lub gazu, 6 - zawrót, 7 - wał, 8 - silnik

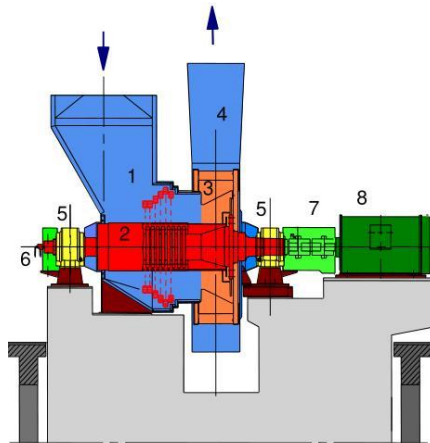
W tych młynach proces rozdrabniania poszczególnych ziaren jest bardzo zbliżony do procesu rozdrabniania zachodzącego w młynach uderowych (młotkowych, bijakowych czy kołkowych). Różnica w procesie polega tylko na tym, że energia do rozdrabniania w młynie odśrodkowym ograniczona jest do energii kinetycznej ziarna, natomiast w młynach z elementami mechanicznymi jest energią tych elementów, to jest: młotka, bijaka czy kołka, natomiast mechanizm przekazywania energii na dezintegrację, czyli rozdrobnienie ziaren jest taki sam. Problemy zużycia ściernego elementów roboczych w młynach wentylatorowych przedstawiono w pracy [11].

13.2. Młyny wentylatorowe

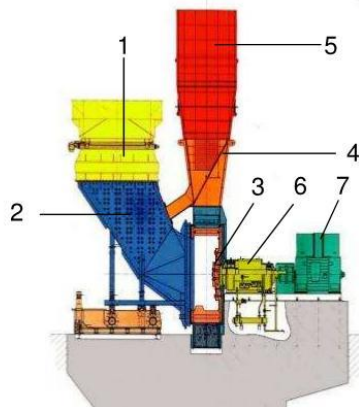
Schemat działania młyna wentylatorowego zamieszczono na rysunku 13.1 a. Nadawa podawana jest w osi geometrycznej wirnika o budowie zbliżonej do budowy wirnika wentylatora. Przy mieleniu węgla (kamiennego lub brunatnego) o mniejszej podatności na mielenie oraz w celu zwiększenia wydajności młyna przed wirnikiem wentylatorowym umieszcza się dodatkowy wirnik z kilkoma rzędami młotków, które wstępnie rozdrabniają nadawę. Wirnik z młotkami umieszczony jest na tym samym wale co wirnik wentylatorowy. Materiał rozdrobniony przez wirnik z młotkami wprowadzany jest na całym obwodzie wlotu do wirnika wentylatorowego, co zapewnia równomierne obciążenie całego wirnika i eliminuje miejscową koncentrację materiału w jednym jego miejscu. Wraz z podawanym do mielenia węglem przez podciśnienie generowane przez obracający się wirnik wciągane są gazy suszące - spalinowe.

Węgiel do młyna wprowadzany jest przez zasyp. Temperatura gazów w zasypie wynosi $950 \div 1100$ °C. Suszenie węgla rozpoczyna się jeszcze przed wlotem do wirnika, natomiast intensywność suszenia zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren węgla podczas mielenia. Większe ziarna węgla oraz ziarna nie wysuszone zawracane są przez separator z powrotem na wlot do wirnika i są ponownie rozdrabniane.

Na rysunkach 13.2 i 13.3 zamieszczono schematy budowy typowych młynów wentylatorowych [12].



Rys. 13.2. Młyn wentylatorowy z wstępnym rozdrabnianiem wirnikiem młotkowym bez separatora [12]: 1 - szyb wlotu nadawy, 2 - sekcja wstępnego rozdrabniania (wirnik młotkowy), 3 – wirnik wentylatorowy, 4 - wylot produktu mielenia, 5 - łożyska wirnika, 6 - układ chłodzenia łożysk, 7 - sprzęgło, 8 - silnik

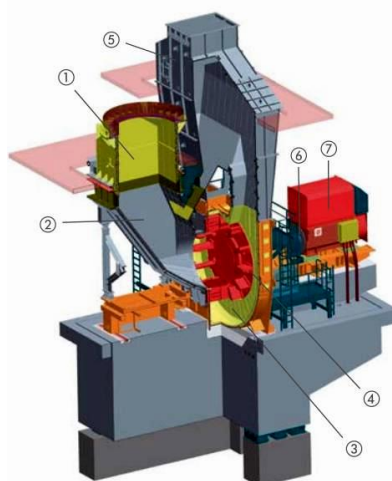


Rys. 13.3. Młyn wentylatorowy bez wstępnego rozdrabniania z separatorem [12]: 1 - skrzynia zasypowa, 2 - pokrywa rewizyjna, 3 - wirnik, 4 - separator statyczny, 5 - wylot produktu mielenia, 6 - węzeł łożyskowania wirnika, 7 - silnik z układem chłodzenia

Temperatura zespołu suszącego za komorą suszenia, przed wlotem na wirnik rozdrabniający, nie powinna przekraczać $450\div 500^{\circ}\text{C}$. Zawartość tlenu w gazach suszących, ze względu na konieczność odparowania wilgoci, nie powinna być niższa niż 15%, co sprawia, że instalacja jest odporna na eksplozję. Wirnik wentylatora generuje podciśnienie około $1\div 2\text{ kPa}$. Młyny te stosowane są do rozdrabniania miękkich mokrych węgla brunatnych i torfu i osiągają wydajność ponad 100 Mg/h , przy jednostkowym poborze energii w zakresie $6\div 10\text{ kWh/Mg}$.

Firma MH Power Systems Europe prowadzi serwis młynów DGS o wydajności do 240 Mg/h do mielenia węgla brunatnych [13]. W młynach DGS węgiel i gazy spalinowe są wstępnie wprowadzane do sekcji wirnika z młotkami, który wstępnie rozdrabnia i podsusza węgiel na wlocie do wirnika właściwego rozdrabniania. Rozwiązanie to eliminuje klasyfikator ziarnowy, stabilizuje ciśnienie w młynie oraz zmniejsza pobór energii. Młyny typu NV o wydajności od $10\div 140\text{ Mg/h}$ stosuje się do rozdrabniania węgla o dużej zawartości wilgoci bez wstępnego rozdrabniania, ale z większym natężeniem przepływu gazów suszących i separatorem pneumatycznym.

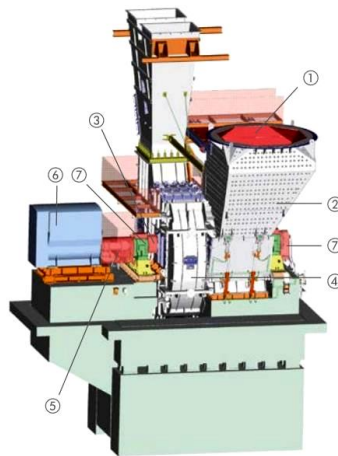
Na rysunkach 13.4÷13.6 zamieszczono rozwiązania konstrukcyjne typowych młynów wentylatorowych.



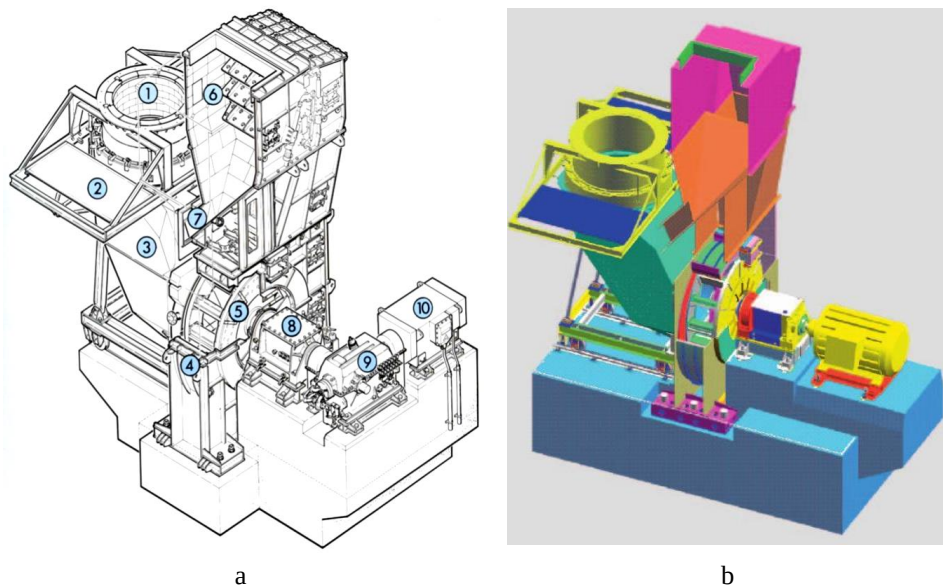
Rys. 13.4. Młyn wentylatorowy firmy Hitachi z wstępnym rozdrabnianiem wirnikiem młotkowym bez separatora [13]: 1 - szyp wlotu nadawy, 2 - sekcja wstępnego rozdrabniania, 3 - wirnik, 4 - wylot produktu mielenia, 5 - łożyska wirnika, 6 - układ chłodzenia silnika, 7 - sprzęgło, 8 - silnik

Młyny wentylatorowe produkują firmy Alstom, Babcock, Hitachi, Neuman & Esser i inne, a w Polsce FPM S.A. Na rysunku 13.6 zamieszczono młyn

wentylatorowy firmy Alston [14] typ N 200.45, a wymiary typoszeru wirników młynów tej firmy na rysunku 13.7. Tabela 13.1. zawiera podstawowe parametry typoszeru młynów typu N [14].



Rys. 13.5. Młyn wentylatorowy firmy Hitachi z separatorem bez wstępnego rozdrabniania [13]: 1 – nadawa, 2 - skrzynia zasypowa, 3 – podest, 4 – komora robocza, 5 – wał wirnika, 6 – silnik, 7 – węzeł łożyskowania wirnika



Rys. 13.6. Młyn firmy Alston [14]. Typ N 200.45: a - ogólna budowa, b - wizualizacja, 1 - wlot gazu suszającego, 2 - podest, 3 - okno rewizyjne, 4 - wykładzina robocza, 5 - wirnik, 6 - separator, 7 - kanał zwrotu nadziarna, 8 - węzeł łożyskowania, 9 - przekładnia o zmiennym przełożeniu, 10 - silnik

Podstawowe parametry młynów wentylatorowych typoszeregu N [14]

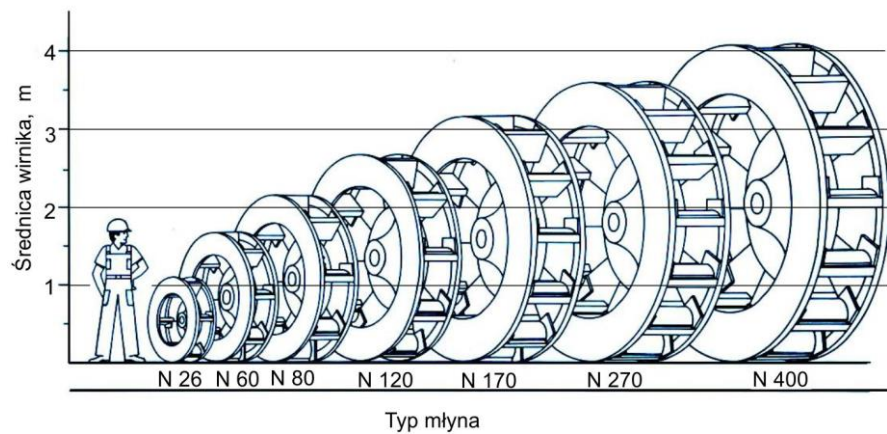
Tabela 13.1.

Typ	Wydajność [Mg/h]	Moc [kW]	Prędkość obrot. wirnika [obr/min]	Typ	Wydajność [Mg/h]	Moc [kW]	Prędkość obrot. wirnika [obr/min]
N 10.150	3,5	45	1500	N 110.60	55,0	420	600
N 15.150	5,5	65	1500	N 120.60	60,0	460	600
N 19.150	7,5	75	1500	N 130.50	65,0	500	500
N 26.150	11,0	120	1500	N 150.50	75,0	570	500
N 28.100	13,0	140	1000	N 170.50	85,0	650	500
N 35.100	16,0	180	1000	N 200.45	100,0	765	450
N 40.100	20,0	200	1000	N 240.45	120,0	920	450
N 50.100	25,0	250	1000	N 270.45	135,0	1035	450
N 60.100	30,0	280	1000	N 300.45	150,0	1200	450
N 70.75	35,0	320	750	N 340.42	170,0	1360	425
N 80.75	40,0	380	750	N 380.42	190,0	1520	425
N 90.60	45,0	400	600	N 400.42	200,0	1600	425

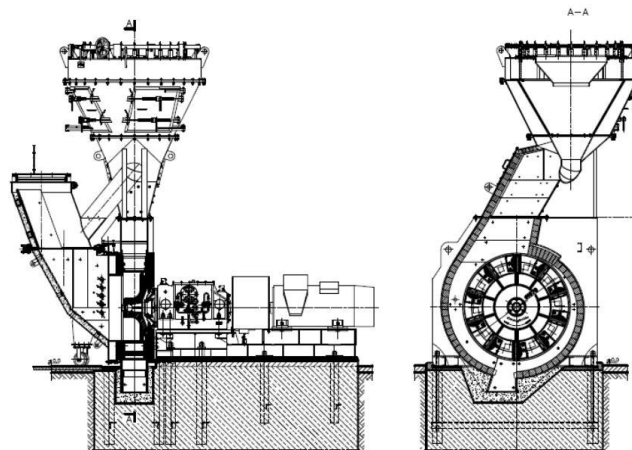
Młyny wentylatorowe stanowią wąsko wyspecjalizowaną podgrupę młynów udarowych, których produkt mielenia – pył węglowy wysuszony podczas mielenia nie jest składowany, tylko bezpośrednio wykorzystywany, to jest podawany do palników, w których jest spalany.

W stosunku do tych młynów, oprócz typowych wymagań stawianym tego rodzaju maszynom, to jest: wydajności uzyskanej przy zachowaniu określonych własności fizycznych nadawy (wytrzymałości na ściskanie, uziarnienia, wilgotności), stabilnej jakości produktu mielenia (uziarnienie, wilgotność i inne), stawiane są jeszcze inne dodatkowe wymagania, czyli:

- stabilne pozostałości na sitach 0,20 mm poniżej 2% oraz 0,09 mm poniżej 20% w produkcie mielenia,
- stabilne natężenie przepływu gazów suszących,
- stabilna temperatura spalin na wlocie do młyna dla węgla o stabilnych parametrach technologicznych,
- temperatura mieszanki pyłowej,
- stabilne ciśnienie w młynie.



Rys. 13.7. Typoszereg wirników młynów typoszeregu N [13]



Rys. 13.8. Budowa młynów wentylatorowych produkcji FPM S.A. MWk 9 oraz MWk 16 z przepływowym separatorem pneumatycznym (odsiewaczem odśrodkowym) [15]

Podczas pracy młynów zachodzi wzajemna zależność poszczególnych parametrów technologicznych, przedstawiana jako charakterystyki pracy młynów. Najczęściej sporządzane charakterystyki pracy młynów wentylatorowych to:

- zależność pomiędzy wydajnością młyna od natężenia przepływu gazów,
- zależność pomiędzy wydajnością młyna a w/w parametrami uziarnienia produktu mielenia,

- zależność pomiędzy w/w parametrami uziarnienia produktu mielenia a natężeniem przepływu gazów,
- jednostkowy pobór energii od wydajności.

Na rysunku 13.8 zamieszczono rozwiązanie konstrukcyjne młynów MWk 9 i 16 produkowanych przez polską firmę FPM S.A [15].

Największy wpływ na pracę młyna ma jakość węgla, szczególnie jego podatność na mielenie określana wskaźnikiem HGI, zanieczyszczenia oraz wilgotność.

Zagadnienia projektowania młynów wentylatorowych są przedmiotem wielu prac badawczych i projektowych [16, 17, 18].

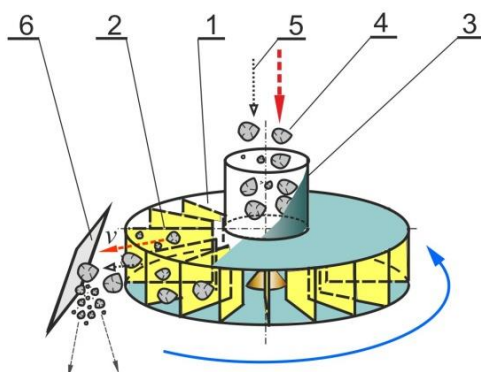
13.3. Młyny odśrodkowe

Sposób działania młynów odśrodkowych jest taki sam jak odśrodkowych kruszarek. Różnica polega głównie na szczegółach budowy młyna oraz parametrach technologicznych (głównie uziarnienia) nadawy i produktu rozdrabniania oraz prędkości obwodowej wirnika, która jest znacznie większa od prędkości obwodowej kruszarek odśrodkowych i wynosi od 100 do 250 m/s [5]. W tych młynach można uzyskać produkt mielenia o uziarnieniu w całości poniżej 63 μm . Maksymalne wydajności tych młynów nie przekraczają kilku Mg/h, a jednostkowy pobór energii mieści się w zakresie 10÷50 kWh/Mg. Ze względu na znacznie mniejsze wymiary ziaren nadawy wirniki wyposażane są w łopatki o mniejszej wysokości - zamknięte z obu stron, a często są monolityczne.

Młyny odśrodkowe znalazły specjalne zastosowanie w procesach mielenia selektywnego, zarówno w zakresie składu ziarnowego produktu mielenia - przy nadawach monomateriałowych. Szczególnie są przydatne w rozdrabnianiu wielu materiałowych agregatów, rozdrabniając je w ten sposób, że usuwane są z powierzchni ziaren materiały będące zanieczyszczeniem minerału stanowiących pożądaną technologicznie materiał. Tego rodzaju selektywne rozdrabnianie ma duże znaczenie w procesach wzbogacania np. rud.

Ważną zaletą technologiczną młynów odśrodkowych jest również wytwarzanie produktu mielenia składającego się z ziaren ostrokrawędzistych, kubicznych ze znacznie rozwiniętą powierzchnią - co jest przydatne w wielu technologiach chemicznych oraz produktu o większej podatności na rozdrabnianie, co ma istotne znaczenie w przypadku przygotowania w tych młynach nadawy do następnego procesu mielenia.

Schemat działania młyna odśrodkowego typu *entoleter* zamieszczono na rysunku 13.9.



Rys. 13.9. Schemat działania młyna wirnikowego typu *entoleter*: 1 - wirnik, 2 - łopatką odbojowa, 3 - wlot nadawy, 4 - nadawa, 5 - powietrze, 6 - łopatką wykładziny, v - prędkość uderzenia ziaren materiału w łopatkę wykładziny

Podstawowe obliczenia dotyczące projektowania młynów odśrodkowych typu *entoleter*, zwłaszcza wyznaczania parametrów geometrycznych i kinematycznych wirnika podano w pracy [19]. Rozwiązania konstrukcyjne młynów *entoleter* zamieszczono na rysunkach 13.10 i 13.11. Młyn oferowany przez firmę Spomasz (rys. 13.11) stosowany jest do wytwarzania kasz ma wydajność $8\div 10$ Mg/h, zainstalowaną moc 5,5 kW oraz masę 220 kg.

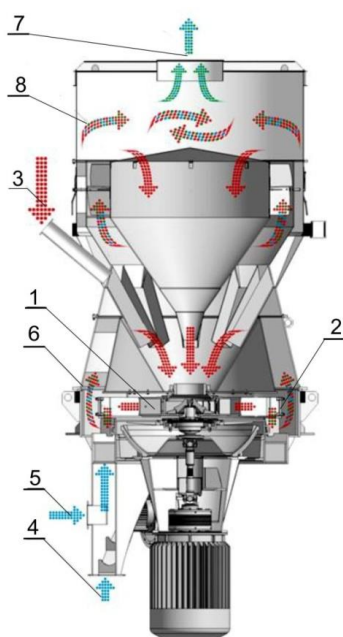


Rys. 13.10. Młyn *entoleter* serii 27-2 CBP o mocy 37 kW i prędkości obrotowej wirnika 1735 obr/min - firmy Entoleter [20]



Rys. 13.11. Młyn entoleter typ FME-3A firmy Spomaz [21]

Na rysunkach 13.12 i 13.13 przedstawiono rosyjskie młyny odśrodkowe stosowane w technologiach mielenia surowców mineralnych i syntetycznych.



Rys. 13.12. Młyn odśrodkowy firmy Ural-Omega z separatorem [22, 23]:
1 - wirnik, 2 - wykładzina, 3 - wlot nadawy, 4 - wlot powietrza, 5 - wlot zawrotu powietrza, 6 - strefa mielenia 7 - obiór produktu mielenia, 8 - strefa separacji



Rys. 13.13. Stanowisko badawcze młyna Titan M [24]

Młyn przedstawiony na rysunku 13.12 znalazł zastosowanie do bardzo drobnego mielenia oraz do aktywizacji powierzchni proszków. Podstawowe parametry tych młynów podano w tabeli 13.2 [23].

Podstawowe parametry młynów odśrodkowych firmy Ural-Omega [23]

Tabela 13.2.

Typ	Wydajność [Mg/h]	Uziarnienie		Moc [kW]	Wymiary [mm]			Masa [Mg]
		Nadawa [mm]	Produkt [μm]		Długość	Szerokość	Wysokość	
KI-0.4	0,1÷0,3	5	0,5÷100	23	5700	2300	4000	2,5
KI-0.63	0,5÷3	>10	0,5÷100	155	10300	5400	8700	16,5
KI-1.0	1÷5	>20	0,5÷100	209	14300	6100	8500	24,7
KI-1.25	5÷10	>30	0,5÷100	315	15200	9150	9250	35
KI-1.6	8÷15	>40	0,5÷100	375	15100	9150	9250	38

Inne zastosowanie mają młyny Titan M. Cechuje je znacząco wyższa selektywność wydzielania minerałów w porównaniu z konwencjonalnymi młynami kulowymi. Badania procesu selektywnego mielenia przeprowadzone w młynie Titan M (rys. 13.13) wykazały, że przy zmieleniu rudy miedzi do uziarnienia poniżej 300 μm można z niej otrzymać 17,6% koncentratu miedzi, a następnie 82,6% czystej miedzi, podczas gdy w młynie kulowym po zmieleniu rudy do uziarnienia poniżej 74 μm wskaźniki te są wyraźnie niższe

i wynoszą odpowiednio w porównaniu 14,5% - koncentratu i 76,1% - czystej miedzi [24].

Bardzo dobre wyniki technologiczne uzyskano w tym młynie przy mieleniu surowców do produkcji materiałów budowlanych rozdrabnianych jako półprodukty do produkcji betonu komórkowego. Uzyskany w tym młynie zmielony piasek kwarcowy skutkuje zwiększeniem wytrzymałości na ściskanie betonu komórkowego od 1,5 do 2,5 razy – przy zmniejszeniu zużycia cementu i wapna o odpowiednio 15÷25% i 20%. Wzrost aktywności fizykochemicznej wystąpił również przy mieleniu cementów, fosforanów i innych materiałów – przy jednoczesnym zmniejszeniu jednostkowego poboru energii.

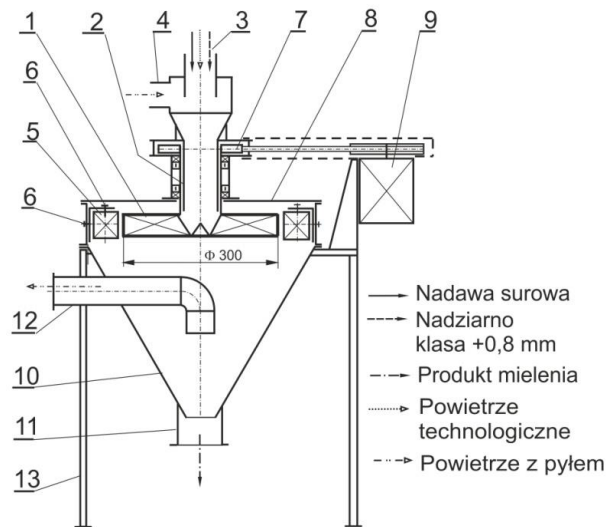
Podstawowe parametry młynów odśrodkowych Titan-M firmy New Technologies [24], podano w tabeli 13.3.

Podstawowe parametry młynów odśrodkowych Titan-M firmy New Technologies [24]

Tabela 13.3.

Parametry	Typ			
	Titan M-040	Układ mielenia Titan M-063	Układ mielenia Titan M-125	Układ mielenia Titan M-160
Wydajność [Mg/h]	0,2÷0,4	1÷3	3÷8	8÷35
Uziarnienie nadawy [mm]	>5	>20	>40	>50
Uziarnienie produktu [mm]	0,06÷0,5	0,04÷0,5	0,05÷0,5	0,06÷3
Moc układu [kW]	18,5	110	305	360
Wymiary układu [m]	2x1,3x3,2	5,5x3,0x7,6	7,6x4,2x15,3	9,0x6,5x15,3
Masa układu [Mg]	2,6	8	22	35

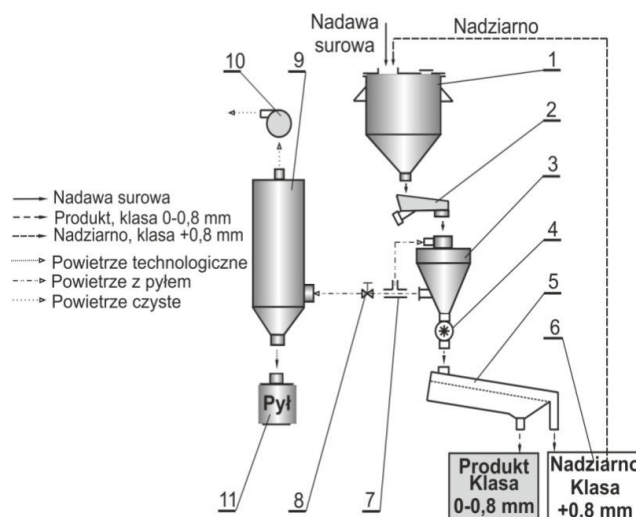
W Akademii Górniczo-Hutniczej badania selektywnego mielenia szkła nawozowego w udarowych młynach (młotkowym i odśrodkowym) przeprowadził J. Sidor [25]. Na podstawie otrzymanych wyników badań opracował koncepcję i parametry prototypowego młyna odśrodkowego w skali półtechnicznej oraz jego układu mielenia. Przeprowadził również rozruch mechaniczny, technologiczny tego młyna oraz kompletnego układu mielenia. Prototypowy młyn przedstawiono na rysunkach 13.14 i 13.15, a układ mielenia na rysunkach 13.16 i 13.17 [26].



Rys. 13.14. Schemat budowy prototypowego młyna MW-300: 1 - wirnik, 2 - wał drążony wirnika, 3 - króciec wlotu nadawy, 4 - króciec wlotu powietrza, 5 - łopatką odbojowa, 6 - złącze śrubowe łopatk, 7 - przekładnia pasowa, 8 - pokrywa, 9 - silnik, 10 – stożek odbioru zmielonego materiału, 11 – króciec odbioru zmielonego materiału, 12 - odbiór powietrza, 13 - konstrukcja wsporcza młyna [26]



Rys. 13.15. Prototypowy młyn wirnikowy MW-300 – podczas wstępnych prób mielenia:
1 - młyn, 2 - króciec wlotu nadawy, 3 - przewody recyrkulacji powietrza,
4 - podajnik celkowy, 5 - przesiewacz wibracyjny, 6 - pojemnik nadziarna,
7 - pojemnik gotowego produktu [26] (Foto J. Sidor)



Rys. 13.16. Schemat budowy prototypowej linii technologicznej: 1 - zbiornik nadawy, 2 - podajnik wibracyjny, 3 - prototypowy młyn MW-300, 4 - podajnik, 5 - przesiewacz wibracyjny PW-90, 6 - zbiorniki produktu mielenia i nadziarna, 7 - trójkąt, 8 - przepustnica, 9 - filtr powietrza, 10 - wentylator, 11 - zbiornik pyłu [26]



Rys. 13.17. Prototypowa linia technologiczna: 1 - zbiornik nadawy, 2 - podajnik wibracyjny, 3 - prototypowy młyn wirnikowy MW-300, 4 - podajnik celkowy, 5 - prototypowy przesiewacz wibracyjny PW-90, 6 - zbiorniki produktu mielenia i nadziarna, 7 - filtr powietrza [26] (Foto J. Sidor)

Autor pracy [26] opracował program badań, prototypowego półtechnicznego młyna oraz kierował tymi badaniami - przeprowadzonymi w Oddziale Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie. Materiałem mielonym było szkło nawozowe – nawóz syntetyczny zawierający związki magnezu, krzemu, wapnia, fosforu oraz mikroelementy, którego zaletą jest przedłużone - wieloletnie działanie w glebie [27]. Jego właściwe działanie wymagało rozdrobnienia go z wytworzonej w procesie syntezy postaci płatków o wymiarach 15x40 mm i grubości 1,4 mm do uziarnienia zawierającego minimum 90% klasy ziarnowej $0,3 \div 0,8$ mm.

Celem badań selektywnego mielenia szkła było wyznaczenie takich parametrów młyna, aby uzyskać produkt mielenia o wąskiej klasie ziarnowej $0,3 \div 0,8$ mm, przy jak najmniejszym udziale klasy $0 \div 0,3$ mm. Eksperymentalny dobór najkorzystniejszych parametrów młyna zapewnił udział produktu finalnego (klasy $0,3 \div 0,8$ mm) wynoszący $52 \div 65\%$ w jednym cyklu mielenia, a udział klasy $0 \div 0,3$ mm poniżej 10%. Wydzielone w przesiewaczu nadziarno - klasę $+0,8$ mm podawano ponownie do mielenia – wspólnie ze szkłem wyjściowym. Prototypowy układ selektywnego mielenia z młynem MW-300 uzyskał wydajność $90 \div 130$ kg/h produktu finalnego.

Zalety technologiczne młynów odśrodkowych można uzyskać tylko przy stabilnym dozowaniu nadawy, co praktycznie wymagane jest w niemal we wszystkich młynach oraz stabilnych własności fizycznych nadawy (uziarnieniu, wilgotności, podatności na mielenie).

Dzięki postępowi inżynierii materiałowej w dziedzinie nowych, odpornych na ścierne zużycie materiałów, młyny odśrodkowe mogą zastąpić w wielu dziedzinach energochłonne oraz o dużych gabarytach młyny kulowe w procesach mielenia na sucho wielu materiałów.

Literatura

1. Ivitas Beater Wheel Millscan Make A Measurable Difference on Your Milling Operations. www.ivitas.cz/.../construction-and-investors-magazine-no-9-2013
2. The Coal Handbook. Towards cleaner production. Vol. 2. Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi ©Woodhead Publishing Limited, 2013
3. Anagnostopoulos J., Bergeles G., Epple B., Stegelitz P.: Numerical Simulation of Grinding and Drying Performance of a Fluid-Energy Lignite Mill. Journal of Fluids Engineering. 2000; 123 (2), pp. 303-310.
4. Hadjiski M., Doukovska L.: Intelligent Technical Fault Condition Diagnostics of Mill Fan. www.springer.com/cda/content/.../9783319141930-c2.pdf?

5. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
6. Schubert H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1989
7. STARCH Chemistry and Technology Second Edition. Edited by Whistler R. L., BeMiller J. N., Paschall E. F.: Academic Press San Diego New York Boston London Sydney Tokyo Toronto 1984
8. Sidor J.: Wstępne badania selektywnego mielenia szkła nawozowego w prototypowym, przemysłowym młynie odśrodkowym. Materiały Ceramiczne. Polskie Towarzystwo Ceramiczne, Kraków. 2010 t. 62 nr 4, s. 596–600
9. Nawrot J., Gawlak M.: Zanieczyszczenia biologiczne jako problem bezpieczeństwa żywności. Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin, Nr 49. 2009 s. 445-450
10. Entoleter Impact Mills. www.entoleter.com
11. Ścieszka S., Grzegorzek W., Żołnierz M.: Simulative tribo-testing of erosive wear for coal impact mills. Scientific Problems Of Machines Operation And Maintenance 4 (164) 2010 pp. 37-54.
12. Berten H. D.: HPE's Lignite Technology. www.kierunekenergetyka.pl/Resources/.../bmp
13. MH Power Systems Europe SERVICE www.eu.mhps.com/..//GB_Prsp_Mills+Components_MHPSE_02-...
14. www.alstom.com
15. Parys T.: Charakterystyki młynów wentylatorowych z różnymi typami odsiewaczy. Praca dyplomowa. AGH Kraków 2012. www.ekokal.com/ch_mlynow.pdf
16. Schettler, H., Mengel, A.: Ventilatormühlen-Entwicklung für Braunkohlendampferzeuger VGB-Kraftwerkstechnik; 2000 80, Nr 12; s. 74-79
17. Jens F.: Untersuchungen zur Aufbereitung von Rohbraunkohle mit Schlagradmühlen für die Direktfeuerung in Kraftwerken. Dissertation Technischen Universität Bergakademie Freiberg 2013
18. Tschobradijski I.: „Beanspruchungsmechanismus der Prallzerkleinerung beim Schiefen Stoß – und Entwicklung des Aufprallwinkels auf die Einzelkorn-Prallzerkleinerung von rheinischer Braunkohle“, Aufbereitungs Technik, 10, 6, (1969) 277-283
19. Brykczyński M., Jurga R., Majewski T.: „Młyny rozdrabniające typu entoleter”. Przegląd Mechaniczny, 37, 3, (1979), 10-16.
20. <https://www.surplusrecord.com/cgi-bin/adpop.pl?855464>
21. www.spomasz.pl

22. Артамонов А.В., Гаркави М.С., Колодежная Е.В., Нефедьев А.П., Коссов Д.Ю.: Технологии изготовления поверхностно модифицированных минеральных порошков с использованием центробежно-ударных измельчителей <http://uralomega.ru/pressroom>
23. http://uralomega.ru/products/grinding_complexes_ki/
24. Titan M VSI mill. www.vsi-crusher.com
25. Sidor J.: Badania procesu selektywnego rozdrabniania szkła nawozowego. Materiały Ceramiczne/Tom: 60, Nr: 4, 2008, s. 213-216
26. Sidor J.: Wstępne badania selektywnego mielenia szkła nawozowego w prototypowym, przemysłowym młynie odśrodkowym Materiały Ceramiczne 2010 t. 62 nr 4, s. 596–600
27. Stoch L. Waćławska I., Lis-Krzyścin A. (2001): Mechanism of biochemical activity of glassy fertilizer. Pollution control in agriculture and fertilizer industry. Chemistry for Agriculture, 2001, vol. 2, s. 74-80

14. Młyny strumieniowe

14.1. Problematyka młynów strumieniowych

Młyny strumieniowe [1, 2, 3] są dużą grupą młynów o dominującym działaniu udarowym. Stosowane są w przemysłach: ceramicznym, chemicznym, farmaceutycznym, kosmetycznym, spożywczym, a w mniejszym zakresie w przemysłach: górniczym, chemicznym i materiałów budowlanych. W tych młynach medium roboczym jest gaz, najczęściej sprężone powietrze, rzadko przegrzana para wodna, inny gaz lub spaliny.

Stąd w polskiej literaturze [4, 5] nazywane są powietrzno-strumieniowymi. Młyny te przeznaczone są do mielenia materiałów średnietwardych o twardości do 5 w skali Mohsa i miękkich o twardości w skali Mohsa 2÷4. W specjalnych konstrukcjach młynów można rozdrabniać materiały o twardości do 9,5 w skali Mohsa, ale do tego celu są rzadko stosowane.

Sposób działania młynów strumieniowych polega na nadaniu dużej prędkości ziarnom rozdrabnianego materiału, a pośrednio energii kinetycznej - głównie przez energię sprężonego powietrza, a następnie wykorzystanie jej na rozdrobnienie ziaren przez wzajemne zderzenia, ścieranie, a w niektórych młynach uderzanie w nieruchomą lub ruchomą przegrodę. Młyny te mają zróżnicowaną budowę spowodowaną ich działaniem, zastosowaniem, wydajnością, możliwościami technologicznymi, a także polityką praw autorskich ich producentów.

W literaturze technicznej anglojęzycznej młyn strumieniowy ma najczęściej ogólne nazwy: *jet mill*, *fluid energy mill* oraz *fluid impact mill*. W języku niemieckim nosi ogólną nazwę *Strahlmühle*.

Wzmiankę o pierwszym zastosowaniu młyna strumieniowego (1882 rok) zamieścił Lexikon der Pharmazie, wydany przez Georg Thieme Verlag w 1987 roku. Młyny te zastosowano w latach 30. ubiegłego wieku, a szybki ich rozwój nastąpił w latach 80. W opracowaniu dotyczącym młynów strumieniowych w farmacji [6] zawarte są informacje o historii rozwoju tych młynów, wraz z chronologią pojawiania się kolejnych rozwiązań tych młynów:

- strumieniowo-tarczowy – wynalazca Goesslin w 1882 rok,
- przeciwbieżny (Majac, Blow Knox) 1917 rok,
- owalno-rurowy 1940 rok,
- spiralny (z płaską komorą mielenia) 1934 rok,
- strumieniowo-złożowy, (strumieniowo-fluidyzacyjny) oferowany jest od 1981 roku.

W Europie najwcześniej pojawiły się komercyjne młyny strumieniowo-spiralne, które na licencji amerykańskiej firmy Mikronizer w 1936 roku, zaczęła

produkować firma I.G. Farbenindustrie AG. w USA pod koniec lat 50. ubiegłego wieku.

Wydajność tych młynów mieści się w zakresie $0,1 \div 10$ Mg/h, ale przeprowadzono również prace nad młynem strumieniowym przeciwbieżnym o dużej wydajności - 30 Mg/h.

Obecnie młyny strumieniowe oferuje szereg firm z Europy, USA oraz Azji.

W Polsce są młyny te przedmiotem prac badawczych w Politechnice Częstochowskiej [3], a oferowane na rynku pochodzą od zagranicznych producentów.

Mając na względzie stosunkowo niewielkie ich zastosowanie w przeróbce surowców mineralnych, w problematyce młynów strumieniowych pominięto obliczenia technologiczne, zamieszczając podstawy ich działania oraz najczęściej oferowane rozwiązania tych młynów.

Podstawy teoretyczne procesu rozdrabniania w młynach strumieniowych są takie same jak dla młynów i kruszarek udarowych. Najważniejsza różnica w działaniu młynów strumieniowych, w porównaniu z mechanicznymi młynami udarowymi, polega na zastąpieniu mechanicznych elementów do nadawania energii ziarnom rozdrabnianego materiału sprężonym medium gazowym o większej prędkości ($200 \div 500$ m/s). Poruszające się ziarna wytracają ją na wzajemne zderzenia, uderzanie w nieruchomy element oraz wzajemne ścieranie, powodują bardzo drobne rozdrabnianie – mielenie. Inne źródła [7] podają, że prędkość ta może dochodzić do $1200 \div 1500$ m/s. Z uwagi na wzrost poboru energii na proces rozdrabniania, który związany ze zmniejszaniem się wymiarów ziaren produktu rozdrabniania [1] znacząco wzrasta w nich jednostkowy pobór energii, zwłaszcza przy rozdrabnianiu materiałów do uziarnienia poniżej $10 \mu\text{m}$. Wartość ta znacznie silniej wzrasta przy mieleniu materiałów o twardości powyżej 5 w skali Mohsa.

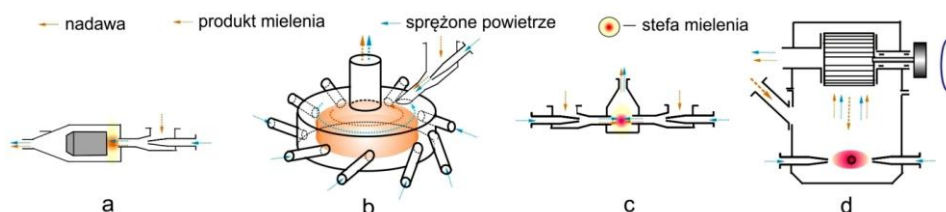
Specjalne młyny strumieniowe są stosowane do bardzo drobnego mielenia materiałów twardych lub średnio twardych, a także wrażliwych na temperaturę. Wydajność tych młynów mieści się w zakresie od 50 kg/h do 10 Mg/h – przy maksymalnym uziarnieniu nadawy w zakresie $0,5 \div 3$ mm oraz uziarnieniu produktu mielenia poniżej $10 \mu\text{m}$. Najmniejszy wymiar ziaren zmielonego materiału zawiera się w zakresie $1 \div 3 \mu\text{m}$. Przy zakresie uziarnienia produktu $5 \div 10 \mu\text{m}$, dzięki zastosowaniu separatora pneumatycznego produkt mielenia może (w tym zakresie uziarnienia) zawierać nawet 98% ziaren. Pobór sprężonego powietrza o ciśnieniu 0,7 MPa może dochodzić do $15\,000 \text{ m}^3/\text{h}$. Maksymalne ciśnienie powietrza lub gazu może w tych młynach wynosić 2 MPa. Maksymalne wymiary gabarytowe instalacji mielenia z młynem strumieniowym przeciwbieżnym wynoszą około $5,5 \times 5,5 \times 8,0$ m.

Klasyfikację młynów strumieniowych stosowanych w latach 80. ubiegłego wieku podano w pracy [2]. Nowe podejście do klasyfikacji tych młynów podano w pracy [4], a aktualną klasyfikację związaną ściśle z produkowanymi obecnie młynami zawarto w pracy [5].

Klasyfikacja ta dzieli młyny strumieniowe na cztery podgrupy, których nazwy w języku angielskim podano nawiasach. Są to młyny:

- strumieniowo-tarczowe, (*fixed/moving target jet mills*),
- strumieniowo-wirowe: z płaską komorą (*pancake, spiral jet mill*),
- owalno-rurowy, (*loop, oval jet mill, jet-o-mill*),
- przeciwstrumieniowe, (*opposing jet mills*),
- strumieniowo-fluidyzacyjne, (*fluidized bed jet mill*).

Sposoby działania poszczególnych – najczęściej stosowanych podgrup młynów strumieniowych podano na rysunku 14.1.



Rys. 14.1. Sposoby działania podstawowych rodzajów młynów strumieniowych:

a – strumieniowo-tarczowego, b – strumieniowo-spiralnego, c – przeciwstrumieniowego, d – strumieniowo-fluidyzacyjnego (strumieniowo-złożowego)

W podgrupie młynów strumieniowo-tarczowych znajduje się dwa młyny z tarczą (przegrodą) stałą (rys. 14.1 a) oraz jedną tarczą obrotową. Rozpędzone strumieniem gazu ziarna materiału rozdrabniane są wskutek uderzenia na tarczach.

W drugiej podgrupie młynów – strumieniowo-spiralnych (wirowych) znajdują się młyny: z płaską walcową, poziomą komorą mielenia umieszczaną w młynie poziomo (rys. 14.1 b) lub pionowo oraz młyny z komorą owalną wykonaną z rury.

Trzecia podgrupa młynów przeciwstrumieniowych, zawiera kilka młynów znanych pod nazwami: Majac, Blow-Know, O-Sepa oraz młyn typu Stegawskiego (rys. 14.1 c).

Czwarta grupa zawiera nowsze rozwiązania młynów – strumieniowo-fluidyzacyjnych, w których znacznie większy udział w procesie mielenia ma

ścieranie wzajemne ziaren materiału. Są to młyny o handlowych nazwach: AFG – firmy Hosokawa Alpine, Condux GS – firmy Netzsch, Cross Jet CJM – firmy Kurimoto oraz JMX – firmy Comex (rys. 14.1 d).

Z uwagi na największy udział młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych na rynku przyjęto ich uproszczony podział na:

- klasyczne: strumieniowo-spiralne, przeciw-strumieniowe,
- strumieniowo-fluidyzacyjne (fluidalne, złożowe).

W młynach strumieniowo-tarczowych główny mechanizm rozdrabniania polega na niszczeniu struktury ziaren materiału – pod wpływem własnej energii, wprowadzonych w ruch przez rozprężające się sprężone powietrze. W pozostałych młynach dominujący udział w rozdrabnianiu ma wzajemne ścieranie się powierzchniowe ziaren.

Podstawowe zalety młynów strumieniowych to:

- brak roboczych części ruchomych,
- wysoki stopień rozdrobnienia,
- wysoka czystość produktu mielenia,
- wąska klasa ziarnowa produktu mielenia,
- niewielkie zużycie nieruchomych elementów roboczych, zwłaszcza w młynach strumieniowo-fluidyzacyjnych,
- niski poziom ciśnienia akustycznego,
- niewielkie wymiary gabarytowe samego młyna,
- wysoka wydajność z jednostki objętości komory mielącej młyna.

Należy również wymienić pewne wady tych młynów to jest:

- wysoki jednostkowy pobór energii wynoszący od około 200 kWh/Mg - przy mieleniu poniżej 100 μm materiałów o twardości poniżej 3 w skali Mohsa, do 6500 kWh/Mg – przy mieleniu poniżej 10 μm materiałów o twardości 9 w skali Mohsa (Tabela 14.1),
- wysoki koszt układu przygotowania sprężonego powietrza,
- wysoki koszt układu odpylania i oczyszczania oraz jego duże wymiary gabarytowe,
- konieczność wstępnego rozdrobnienia nadawy do uziarnienia: $0,11 \div 3$ (10) mm,
- brak możliwości mielenia w standardowych młynach, w środowisku powietrza materiałów tworzących z powietrzem mieszkankę wybuchową.

W tabeli 14.1. podano jednostkowy pobór energii w wybranych młynach, przy uzyskaniu produktów mielenia o zróżnicowanym uziarnieniu wyznaczony z nomogramu podanego w pracy [2]. Porównanie ma charakter poglądowy,

ponieważ dokładnie wskaźnik ten powinno się wyznaczyć przy mieleniu tego samego materiału o tym samym uziarnieniu nadawy i produktu mielenia oraz przy zbliżonej wydajności młynów, lub ich układów mielenia.

Porównanie jednostkowego poboru energii w wybranych młynach [2]

Tabela 14.1.

Typ	Jednostkowy pobór energii kWh/Mg przy mieleniu poniżej μm				
	100	50	10	6	5
	[μm]				
Grawitacyjny – kulowy (średnio)	25	35	100	--	--
Udarowy – kołkowy	16	20	60	105	120
Strumieniowy-spiralny	500	550	1050	2500	3500
Strumieniowy-fluidyzacyjny	200	260	550	800	950

Największe zastosowanie młyny strumieniowe znalazły w branżach: farmaceutycznej, kosmetycznej, spożywczej, chemicznej, a także ceramice specjalnej.

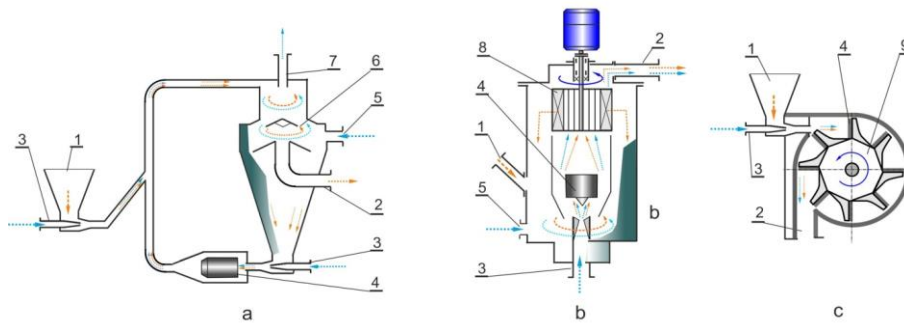
Młyny te, tak jak wszystkie młyny, użytkowane są w układzie mielenia. Należy mieć jednak na uwadze znaczne różnice w udziale masy młyna oraz w wymiarach gabarytowych młynów strumieniowych, w porównaniu z innymi młynami (grawitacyjnymi, wibracyjnymi, mieszałowymi, czy udarowymi). Różnica polega na tym, że masa młyna strumieniowego w stosunku do masy całego układu mielenia stanowi tylko około 10÷30%. Mniejsze wymiary gabarytowe mają niektóre młyny (spiralne, przeciwbieżne) w stosunku do wymiarów ich układu mielenia, w którym największe wymiary mają filtr powietrza oraz sprężarka.

Firmy produkujące młyny strumieniowe zwykle nie podają jednostkowego poboru mocy przez młyn, a jeśli podają to uwzględniają tylko pobór mocy przez młyn, czyli iloczyn ciśnienia i prędkości medium gazowego. Jednak, ze względu na koszty eksploatacji młyna, przy jego doborze należy dokładnie uwzględnić: pobór energii, masę, wymiary gabarytowe kompletnego układu mielenia oraz pobór mocy przez kompletny układ mielenia.

14.2. Młyny strumieniowe klasyczne

Młyny strumieniowo-tarczowe

Na rysunku 14.2 przedstawiono schematy budowy młynów strumieniowo-tarczowych. Najczęściej są to młyny typu Targed. Obecnie oferowane są przez firmy japońskie [9, 10] dwa rozwiązania tych młynów (rys. 14.2 a i b). Rozwiązania te przeznaczone są głównie dla branży farmaceutycznej. Trzecie rozwiązanie młyna zwane Multi-Targed (rys. 14.2 c) zamieszczone w pracy [5], ma tarcze odbojowe zamocowane na wirniku, które wykonują ruch obrotowy o prędkości obrotowej w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu ziaren nadawy, zwiększając ich energię uderzania (nie jest dostępny na stronach internetowych).



Rys. 14.2. Schematy budowy młynów strumieniowo-tarczowych: a - z tarczą stałą [9], b - z tarczą stałą typ MJT-1 [10], c - z tarczą ruchomą Multitarget [5], 1 - wlot nadawy, 2 - odbiór produktu mielenia, 3 - wlot powietrza roboczego, 4 - tarcza nieruchoma, 5 - wlot powietrza pomocniczego, 6 - separator przepływowy, 7 - wylot powietrza, 8 - separator turbinowy, 9 - tarcza ruchoma

Na rysunku 14.3 zamieszczono przykład budowy młyna strumieniowo-tarczowego, którego schemat budowy zamieszczono na rysunku 14.2 b, a na rysunku 14.4 młyn Jet Mill IDS TOP [11].



Rys. 14.3. Micron Jet T typ MJT-1 [10]



Rys. 14.4. Supersonic Jet Mill IDS-2 TOP [11]

Młyn Supersonic Jet Mill IDS-2 TOP wyposażony jest w sprężarkę z silnikiem 15 kW, która wytwarza $2,2 \text{ Nm}^3/\text{min}$ powietrza, a także w wentylator o mocy 3,7 kW. Masa młyna wynosi 800 kg [11].

W młynach strumieniowo-tarczowych generowana jest największa energia ziaren rozdrabnianych przez uderzenie. Tak duża energia ziaren umożliwia wytwarzanie w nich proszków metalicznych. W pracy [12] podano wyniki przeprowadzonych w tym młynie badań rozdrabniania żeliwnych odpadów o uziarnieniu $0,6 \div 1,7 \text{ mm}$ do uziarnienia poniżej $45 \mu\text{m}$.

Młyny strumieniowo- spiralne (wirowe)

Młyny te (rys. 14.1 b) największe zastosowanie znalazły w branży farmaceutycznej, kosmetycznej i spożywczej. Przesądziły o tym następujące względy:

- zastosowanie strumienicy – dyszy przez którą podawana jest do młyna nadawa wraz ze sprężonym powietrzem tylko do dozowania nadawy, a nie jako głównego elementu roboczego do rozdrabniania, co ma miejsce w młynach przeciwbieżnych,
- budowę – umożliwiającą łatwy i szybki dostęp do komory mielenia, w celu jej przeglądu, oczyszczenia oraz sterylizacji,
- niewielkie wymiary strefy mielenia.

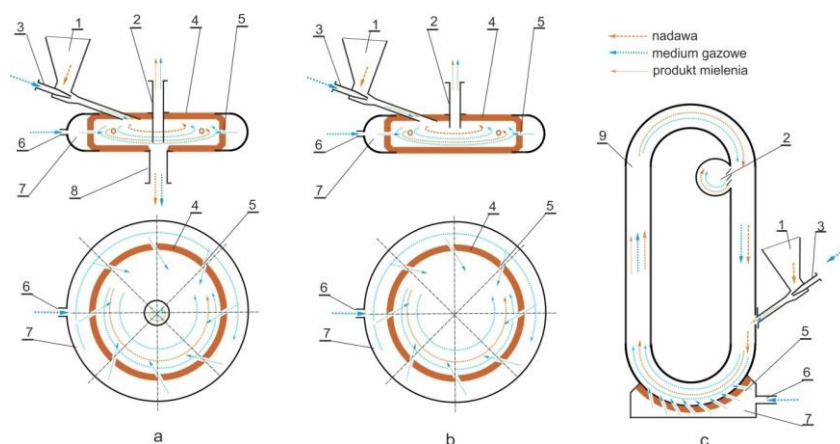
Dominująca ich podgrupa to młyny spiralne, często nazywane: typu mikronizer, lub z płaską komorą mielenia, budowane są w dwóch podstawowych wersjach, to jest z komorą poziomą (większość) oraz z komorą pionową.

Ogólny sposób działania młyna spiralnego zamieszczono na rysunku 14.1 b. W tym młynie nadawa wprowadzana jest początkowo do młyna za pomocą strumienicy, natomiast główny udział w procesie mielenia posiada medium gazowe, wprowadzane do młyna szeregiem dysz ($6\div 20$) umieszczonych w jednej płaszczyźnie. Dyszami mogą być również otwory o odpowiednim kształcie wykonane w poboczniczy walcowej, lub zbliżonej do kształtu walca komory, lub jako odrębne wymienne elementy. Dysze w formie otworów stosowane są w młynach, w których używa się komory wykonane z tworzyw ceramicznych (korundu lub tlenku cyrkonu). Duże znaczenie ma kształt dysz oraz kąt ich usytuowania w komorze, czyli kąt pomiędzy osią geometryczną dyszy, a styczną poboczniczy walcowej wewnętrznej powierzchni komory, lub promieniem komory. Kąt ten jest tak dobierany, aby osie geometryczne dysz usytuowane były stycznie do okręgu o średnicy około dwukrotnie większej od średnicy otworu odbierającego zawieszinę gazową zmielonego materiału.

Proces mielenia w tym młynie, polega na intensywnym ścieraniu powierzchni ziaren poruszających się z dużą prędkością w ruchu wirowym w płaszczyźnie komory (poziomo lub pionowo) oraz odprowadzaniu rozdrobnionych ziaren w jednym lub w dwóch kierunkach, w zależności od budowy młyna (rys. 14.5). Na tym rysunku przedstawiono również schemat budowy i działania młyna owalno-rurowego.

Podstawy projektowania komory mielącej młyna strumieniowo-spiralnego – metodę wyznaczania wymiarów geometrycznych komory oraz wstępnego doboru parametrów technologicznych podano w pracy [2]. W tym opracowaniu podano również podstawowe parametry tych młynów starszej generacji, ale dotychczas użytkowanych.

Przy dwóch kierunkach odprowadzania materiału ze strefy mielenia, ziarna drobne unoszone są siłą strumieniową do góry, a ziarna grubsze opadają grawitacyjnie w dół. Średnice komór mielenia młynów strumieniowo-spiralnych mieszczą się w zakresie $200\div 1000$ mm, natomiast wydajności uwarunkowane średnicą, a właściwie objętością komory mielenia wynoszą od 10 kg/h do 400 kg/h – przy uziarnieniu produktu mielenia w małych młynach około $5\div 6$ μm , a w dużych poniżej 12 μm .



Rys. 14.5. Schematy budowy młynów strumieniowo-spiralnych: a - z grawitacyjnym odbiorem produktu mielenia, b - z pneumatycznym odbiorem produktu mielenia, c - owalno-rurowy (Jet-O-Mizer), 1 - zbiornik nadawczy, 2 - odbiór powietrza z najdrobniejszym materiałem, 3 - strumienica, 4 - płaska komora mielenia, 5 - dysza wlotu powietrza do komory mielenia, 6 - wlot powietrza do kolektora, 7 - kolektor, 8 - odbiór „grubego” materiału, 9 - komora rurowa

Na rysunkach 14.6÷14.8 przedstawiono niektóre rozwiązania współczesnych młynów strumieniowo-spiralnych oraz ich instalacji. Rysunek 14.6 przedstawia młyn w wykonaniu przeznaczonym do branży farmaceutycznej, natomiast rysunek 14.7 młyn do mielenia pigmentu, tlenku tytanu, który bardzo szerokie zastosowanie znalazł w farbách do drewna i metali. Młyn ten oferowany pod nazwą Mikronizer Steam wyposażony jest w specjalną, chronioną prawem wynalazczym wkładkę zwaną Pureline, którą cechuje niższe od wkładek ceramicznych zużycie, a tym samym mniejsze zanieczyszczenie pigmentu. Młyn Mikronizer Steam do mielenia używa pary przegrzanej, co znacznie zmniejsza koszty jego eksploatacji. Podstawowe parametry typoszeregu tego młyna podano w tabeli 14.2.

Podstawowe parametry młynów Micronizer Steam do mielenia tlenku tytanu [14]

Tabela 14.2.

Typ	Średnica komory [mm]	Pobór pary ¹ [kg/h]	Wydajność [kg/h]
4"	102	238	0,9÷18
8"	204	554	4÷45
12"	306	1530	13÷113
15"	381	2125	22÷136
20"	508	4250	45÷453
24"	610	4250	113÷635
30"	762	6800	272÷1360
36"	914	10200	453÷2721
40"	1016	13600	907÷4536

¹ – para o temperaturze 288°C o ciśnieniu 1,03 MPa



Rys. 14.6. Młyn strumieniowo-spiralny dla farmacji [13]



Rys. 14.7. Młyn strumieniowo-spiralny Micronizer Steam do mielenia tlenku tytanu [14]



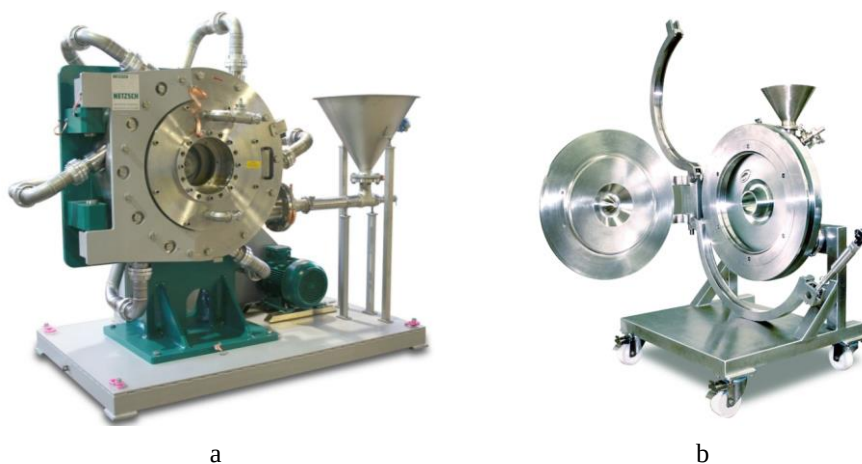
a



b

Rys. 14.8. Układy mielenia młyna strumieniowo-spiralnego [15]:
a - MCJet Mill 200, b - MC Dec 400

Na rysunku 14.9 zamieszczono młyny strumieniowo-spiralne z komorą o poziomej osi geometrycznej [16].



Rys. 14.9. Młyny strumieniowo-spiralne z komorą o poziomej osi geometrycznej:
a - ConJet z separatorem turbinowym firmy Netzsch [16], b - AS firmy Hosokawa-Alpine [17]

Wbudowany w młyn separator umożliwia wytwarzanie produktu mielenia o stabilnym składzie ziarnowym niezależnie od wahań podawania, uziarnienia nadawy i obciążenia młyna oraz powoduje większą zwartość konstrukcji młyna - mniejsze wymiary gabarytowe, masę układu mielenia. Regulacja uziarnienia produktu mielenia odbywa się przez zmianę prędkości obrotowej wirnika separatora.

Oryginalną konstrukcją młyna strumieniowo-spiralnego jest młyn PMT firmy Powder Maker Technologies [18].

Młyn ten ma poziomą komorę mielenia, charakteryzuje się niższym o 30% jednostkowym poborem energii od typowych młynów strumieniowo-spiralnych. Posiada również wbudowany separator i umożliwia wytworzenie produktu mielenia o uziarnieniu poniżej $0,8\text{ }\mu\text{m}$. Medium mielącym jest powietrze lub para wodna. Ciśnienie powietrza mieści się w zakresie od 0,35 do 1,5 MPa, a przegrzanej pary wodnej do 2,4 MPa i 400°C - przy wydatku medium roboczego od 500 do $6000\text{ Nm}^3/\text{h}$.

Układ mielenia tego młyna wyposażony jest w urządzenie separujące twarde ziarna surowców mineralnych, zwłaszcza kwarcu. Przystosowano go również do mielenia surowców mineralnych (kamienia wapiennego, talku, grafitu, zeolitu, wolastonitu, barytu, miki, i innych), uziarnionych kruchych tworzyw polimerowych, papieru, pigmentów, kosmetyków, środków

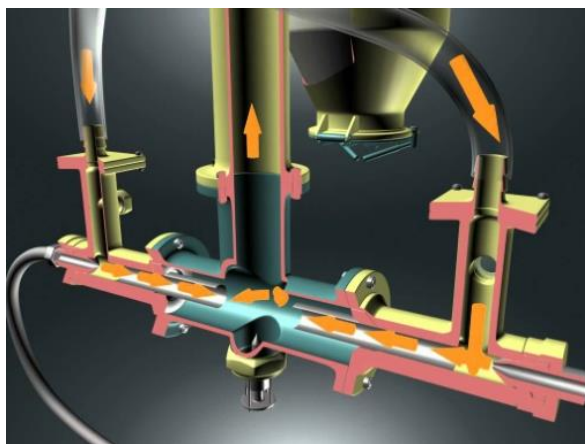
farmaceutycznych, produktów żywnościowych i innych materiałów o twardości poniżej 3 w skali Mohsa.

Największy młyn oferowany jest w dwóch wersjach, to jest jako pojedynczy o wydajności do 4000 kg/h oraz jako modułowy układ mielenia składający się z dwóch młynów SJ100-ER100 z separatorem 2 x 5/260, którego wydajność zawiera się w zakresie 400÷8000 kg/h, przy uziarnieniu produktu mielenia określonego wymiarami ziaren: $d_{97} = 3\div 45 \mu\text{m}$ oraz $d_{50} = 3\div 45 \mu\text{m}$. Wydatek powietrza lub pary przegrzanej wodnej wynosi 4500÷7500 Nm³/h. Młyn ma wymienne dysze oraz niewielkie wymiary gabarytowe.

Młyny przeciwbieżne

W tych młynach proces mielenia zachodzi głównie wskutek zderzeń rozpędzonych ziaren w dwóch znajdujących się na przeciw siebie strumienicach przez strumienice o wspólnej osi geometrycznej (rys. 14.1 c). W niektórych młynach są trzy strumienice o osiach geometrycznych usytuowanych w płaszczyźnie poziomej i przecinających się w jednym punkcie oraz czwartej strumienicy o osi pionowej przecinającej się z osiami strumienic poziomych w jednym punkcie. Budowę oraz sposób działania przeciwbieżnego młyna strumieniowego dwoma dyszami zamieszczono na rysunku 14.10 [19].

Obecnie oferowany jest młyn przeciwbieżny typu Majac model 7-10 wykonany ze stali o mocy silnika sprężarki 22 kW z separatorem turbinowym o mocy silnika 3 kW o wydajności poniżej 100 kg/h [20], którego zespół roboczy zamieszczono na rysunku 14.11.



Rys. 14.10. Budowa strefy mielenia przeciwbieżnego młyna strumieniowego [19]



Rys. 14.11. Zespół roboczy przeciwbieżnego młyna strumieniowego [20]

Opisy budowy i działania starszych typów tych młynów podano w pracach [2, 3, 4, 5]. W ostatnich latach trudno znaleźć firmę, która w swoim programie produkcyjnym ma tego typu młyn. Pomimo pewnych zalet technologicznych oraz prostoty budowy tych młynów o ich mniejszym zapotrzebowaniu przesądziły wady, których nie mają inne młyny strumieniowe:

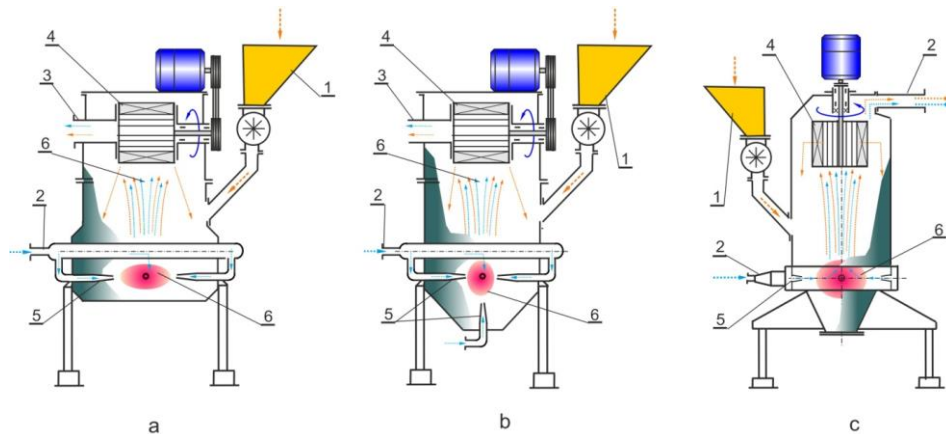
- szybkie zużycie się rur rozpędowych (mieszających) - wykonywanych ze stali i żeliw odpornych na zużycie ściernie, również rur wykonanych z tlenkowych, węglkowych i azotowych tworzyw ceramicznych o twardości $8\div 9,5$ w skali Mohsa,
- większe zanieczyszczenie produktu mielenia materiałem pochodzącym z zużycia elementów roboczych,
- duże wymiary gabarytowe niektórych młynów.

14.3. Młyny strumieniowo-fluidyzacyjne

Młyny te zdominowały rynek młynów strumieniowych, a liczba producentów młynów o wydajności powyżej 250 kg/h jest największa spośród wszystkich producentów młynów strumieniowych. Obecnie produkowane rozwiązania młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych (rys. 14.1 d) wszystkie

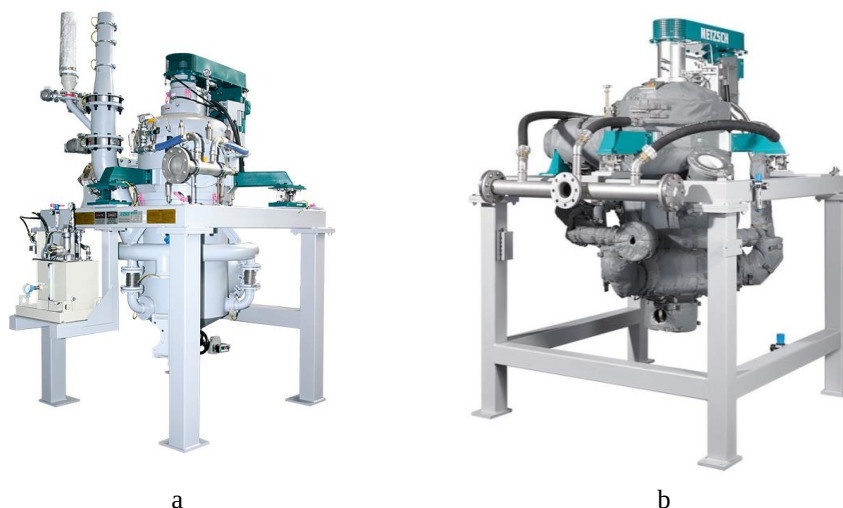
posiadają wbudowany w konstrukcję młyna pneumatyczny separator turbinowy, a różnią się usytuowaniem dysz w strefie rozdrabniania, usytuowaniem osi geometrycznej wirnika separatora oraz liczbą separatorów. Najczęściej oferowany jest młyn wyposażony w trzy lub cztery dysze o osiach geometrycznych usytuowanych w płaszczyźnie poziomej i przecinających się w jednym punkcie znajdującym się na pionowej osi geometrycznej komory młyna oraz wirnikiem separatora o osi poziomej.

Na rysunku 14.12 zamieszczono schematy budowy najczęściej produkowanych młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych.



Rys. 14.12. Schematy budowy popularnych młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych:
 a – młyna z dyszami (3÷5) i poziomym wirnikiem separatora turbinowego (np. Condux CGS),
 b - z trzema dyszami poziomymi i jedną pionową i poziomym wirnikiem separatora turbinowego (np. CJM, Cross Jet Mill), c - czterema dyszami i pionowym wirnikiem separatora turbinowego (JMX), 1 - dozownik ze zbiornikiem nadawcy, 2 - wlot powietrza roboczego, 3 - wylot produktu mielenia, 4 - wirnik separatora turbinowego, 5 - dysze sprężonego powietrza, 6 - strefa intensywnego mielenia

Na rysunku 14.13 zamieszczono młyny strumieniowo-fluidyzacyjne firmy Netzsch, przystosowane do mielenia za pomocą powietrza i przegrzanej pary wodnej.



a

b

Rys. 14.13. Młyny strumieniowo-fluidyzacyjne firmy Netzsch typu CGS: a - w wersji z mieleniem za pomocą powietrza [21], b - przystosowany do mielenia za pomocą pary [22]

W młynach CGS można otrzymać produkt mielenia kamienia wapiennego o uziarnieniu określonym wymiarem ziarna d_{97} w zakresie $2\div 70\text{ }\mu\text{m}$. Młyn przystosowany jest również do mielenia materiałów średniotwardych i twardych.

Najnowsze rozwiązanie konstrukcyjne młyna, a właściwie jego układu mielenia opatentowano pod nazwą E-Jet. W tym młynie zmniejszono średnicę komory zawirowania zawiesiny powietrznej zmielonego materiału. Uzyskano to przez zastosowanie komory rozprężnej, która zmniejsza prędkość obwodową zawiesiny gazowej, a dzięki temu obniża jej powierzchniowe zużycie oraz możliwość osadzania się ziaren. Ponadto zastosowano w nim system przepłukiwania powietrzem strefy odbioru ziaren grubych w komorze separatora oraz dodatkowe pneumatyczne uszczelnienie łożysk wału wirnika separatora.

Młyn wyposażono w dodatkowy system chłodzenia mielonego materiału, co umożliwiło mielenie materiałów wrażliwych na temperaturę. Młyn oferowany jest również w wersjach: odpornej na duże wahania ciśnienia i hermetycznej, przystosowanej do mielenia w atmosferze gazów obojętnych. Opracowano również wersję młyna do mielenia z jednoczesnym suszeniem materiałów o podwyższonej wilgotności. Podstawowe parametry młynów CGS podano w tabeli 14.3.

Podstawowe parametry młynów CGS [23]

Tabela 14.3.

Parametr	Typ						
	32	50	71	100	120	150	180
Wskaźnik wydajności	0,35	1	2	4	6	9	12
Wydatek powietrza [m ³ /h]	330	960	1 920	3 860	5 770	8 640	11 660
Ilość dysz, sztuk	3	3	3	3	4	4	4
Średnica dyszy [mm]	5,0	8,5	12,0	17,0	18,0	22,1	25,6
Średnica komory [mm]	350	600	800	1 200	1 500	1 800	2 100
Moc silnika separatora [kW]	2,2	7,5	15	30	55	75	90
Prędkość obrotowa wirnika separatora [obr/min]	7 000	5 100	3 600	2 600	2 200	1 700	1 550
Uziarnienie produktu [μm]	2,5-70	2,5-80	3-85	3,5 – 90	4-90	5-90	5-90
Długość [mm]	1 000	1 450	1 800	2 680	3 000	3 600	4 200
Szerokość [mm]	1 000	1 450	1 800	2 680	3 000	3 600	4 200
Wysokość [mm]	1 575	2 270	2 880	3 930	5 000	6 100	7 300
Masa [kg]	680	1 200	3 000	5 400	11 000	16 000	20 000

Parametry techniczne młynów serii firmy Netzsch CGS wskazują na szerokie możliwości technologiczne tych młynów, w szczególności duży zakres wydatku powietrza uwarunkowany zakresem wydajności młynów.

Największy młyn CGS 180 ma wydatek powietrza do około 11700 m³/h, przy niewielkiej powierzchni zabudowy: 4,2x4,2 m, ale dużej wysokości 7,3 m. Wydajność młynów uwarunkowana jest także własnościami fizycznymi mielonego materiału, zwłaszcza podatnością na mielenie, uziarnieniem nadawy

i produktu mielenia oraz wilgotnością i wynosi $0,5 \div 10$ Mg/h. Masa samego młyna (bez urządzeń pomocniczych: sprężarki, filtra powietrza, instalacji rurowej, sterowania i innych) wynosi 20 Mg. Duży wydatek powietrza generuje dużą moc silnika sprężarki, lub wielkość wytwornicy pary oraz wymaga dużej powierzchni filtracji filtra powietrza. Młyny CGS wyposażone są standardowo w separator turbinowy z jednym wirnikiem.

Wytwarzanie sprężonego powietrza za pomocą sprężarki napędzanej silnikiem elektrycznym, wiąże się ze znacznymi stratami energii. Sprawność energetyczna całego układu wytwarzania sprężonego powietrza powinna uwzględniać sprawność wytworzenia energii elektrycznej w elektrowni, przesyłu energii do zasilania silnika sprężarki oraz straty w instalacji zasilania młyna sprężonym powietrzem. Sprawność energetyczna współczesnej elektrowni cieplnej przy wytwarzaniu energii elektrycznej wynosi od 0,36 do 0,49. Uwzględniając straty przesyłu prądu oraz sprawność standardowej dwustopniowej sprężarki uzyskuje się przed podaniem sprężonego powietrza do młyna sprawność około 21% [24]. Większą sprawność młyna uzyskuje się przy zastosowaniu do procesu mielenia przegrzanej pary wodnej, która nie tylko znacząco poprawia sprawność młyna, ale jeszcze zmniejsza jednostkowy pobór mocy przez młyn, a dodatkowo dzięki większemu ciśnieniu, umożliwia uzyskanie ponad dwukrotnie większej prędkości gazowego medium roboczego – dochodzącej do 1200 m/s, niż w przypadku sprężonego powietrza. Tak duże prędkości medium umożliwiają otrzymanie znacznie drobniejszego uziarnienia mielonego materiału, w tym o skali nano [24]. Zestawienie parametrów młynów z obu mediami podano w tabeli 14.4 [24]. Parę wodną można zastosować tylko w młynach o dużej wydajności.

Parametry mediów stosowanych w młynach strumieniowych [24]

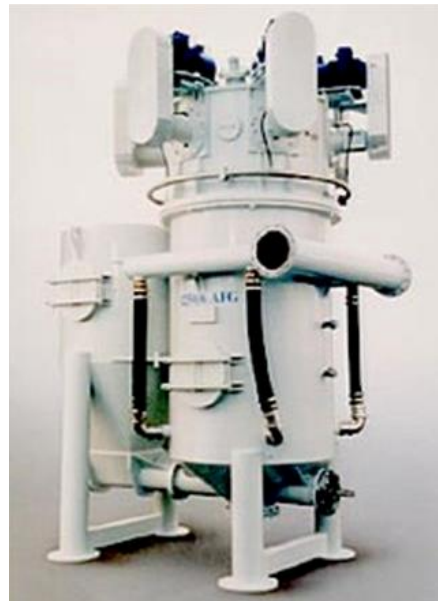
Tabela 14.4.

Parametry	Rodzaj medium	
	Powietrze	Przegrzana para wodna
Ciśnienie medium [Mpa]	0,4	4
Ciśnienie medium [°C]	225	350
Prędkość strumienia medium [m/s]	572	1190
Gęstość medium [kg/m ³]	0,87	0,53
Lepkość dynamiczna [Pas]	$2,41 \cdot 10^5$	$1,42 \cdot 10^5$

Znacznie szerszy program produkcyjny młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych mają firmy Hosokawa-Alpine oraz Hosokawa Mikron Corporation. Firmy te oferują młyny z większą liczbą separatorów od 2 do 6, przy czym odbiory zawiesiny zmielonego materiału mogą być połączone jednym kolektorem lub można z nich odbierać produkty mielenia odrębnie – o różnym uziarnieniu. W młynach stosuje się różną liczbę dysz od 3 do 5. Na rysunku 14.14 zamieszczono młyny strumieniowo-fluidyzacyjne AGF firmy Hosokawa Mikron Corporation z czterema dyszami oraz z różną liczbą separatorów.



a



b

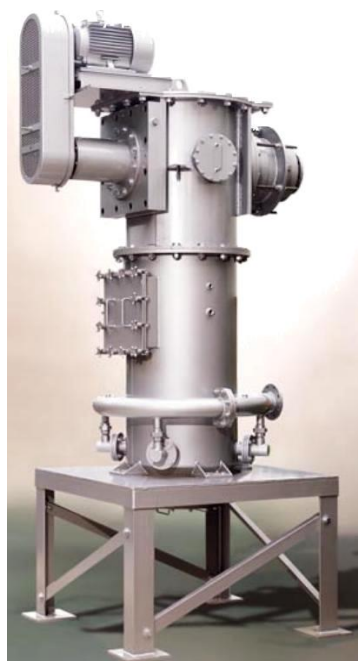
Rys. 14.14. Schematy budowy i działania młynów strumieniowo-fluidyzacyjnych firmy Hosokawa Mikro Corporation [25]: a - z czterema separatorami, b - z sześcioma separatorami [26]

Większa liczba separatorów o mniejszych wymiarach zwiększa koszt młyna, ale zapewnia jego większą elastyczność technologiczną, a w szczególności jego mniejszą wysokość, co ma istotne znaczenie przy młynach o dużej wydajności.

Na rysunkach 14.15 oraz 14.16 zaprezentowano młyny produkowane przez firmę Comex [27] oraz firmy Fluid Energy Processing and Equipment Company [28]. Firma ta oferuje jeszcze strumieniowe młyny spiralne i owalno-rurowe.



Rys. 14.15. Młyn firmy Comex-Grup [27]



Rys. 14.16. Młyn firmy Fluid Energy Processing and Equipment Company [28]

Podstawowe parametry młynów strumieniowych firmy Comex-Grup podano w tabeli 14.5.

Podstawowe parametry młynów strumieniowych firmy Comex-Grup [27]

Tabela 14. 5.

Typ	Współczynnik skali	Moc sprężarki [kW]	Moc separatora [kW]	Wydażność [Mg/h]	Przepływ [m ³ /h]	Uziarnienie d ₉₇ [μm]	Wysokość [m]
JMX 200	1	80	4	0,04÷0,5	700	2÷110	2,31
JMX 350	3	240	7,5	0,12÷1,5	2100	3,5÷130	3,11
JMX 500	6,25	500	15	0,25÷3,2	4300	5÷250	4,41

Szereg informacji dotyczących problematyki bardzo drobnego mielenia w młynach strumieniowo-fluidyzacyjnych podano w pracach [29, 30, 31].

Literatura

1. Pasher C.I. Crushing and Grinding Process Handbook Ed. J. Wiley, Chichester 1987
2. Höffl K.: Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1985
3. Grzelak E.: Maszyny i urządzenia do przeróbki mechanicznej surowców mineralnych WNT Warszawa 1975
4. Korzeń Z., Rink R.: Powietrzno-strumieniowe technologie mikronizacji ciał twardych – tendencje rozwojowe i propozycje nowych wdrożeń. Mechanika 18, z. 11, 1999, s. 49–65
5. Zbroński D.: Młyny powietrzno-strumieniowe stosowane w przeróbce wybranych materiałów ziarnistych. Górnictwo i Geoinżynieria, Rok 35 Zeszyt 4 2011, s. 167-177
6. Butti S.: Micronisation process in pharmaceutical and chemical application from R&D to production scale. www.pharmtech-expo.ru
7. Saravacos G., Kostaropoulos A.G.: Handbook of Food Processing Equipment Second Edition. Springer International Publishing Switzerland 2016
8. Otwinowski H.: Przeróbka mechaniczna surowców mineralnych, Rozdrabnianie strumieniowe i klasyfikacja pneumatyczna. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2013
9. http://www.npk.co.jp/english/chemical_e/products/ids/featurer.html
10. <http://www.hosokawamicon.co.jp/en/machines/13>
11. http://www.npk.co.jp/english/chemical_e/products/ids/spec.html

12. Ghambari M., Mahdokht Emadi Shaibani M. E., Eshraghi N.: Production of grey cast iron powder via target jet milling. *Powder Technology* 221, 2012 pp. 318-323
13. <http://www.sturtevantinc.com/products/product/sanitary-micronizer/>
14. <http://www.micronizer.com/product/steam-micronizer/>
15. <http://www.dec-group.net/products/micronizing/mc-jetmillr-400.html>
16. <https://www.netzsch-grinding.com/pl>
17. <https://www.hosokawa-alpine.com/powder-particle-processing/machines/jet-mills/as-spiral-jet-mill/>
18. http://www.powder-maker.com/en/grinding_classify/micronising_powder_grinding.htm
19. https://www.youtube.com/watch?v=P_uGdX2MPzM
20. <https://www.machinio.com/listings/3712718-used-majac-jet-pulverizer-classifier-model-7-10-stainless-steel-construction>
21. <https://www.netzsch-grinding.com/pl/produkty-rozwiazania/mielenie-na-sucho/mllyn-strumieniowo-fluidyzacyjny-cgs/>
22. <https://www.netzsch-grinding.com/en/products-solutions/dry-grinding/s-jet-steam-jet-mill/>
23. <https://www.netzsch-grinding.com>
24. Überhitzter Wasserdampf öffnet neue Türen. Mechanische Verfahren Schüttguttechnik 2009 H. 11-12, S. 40-42
25. <http://www.hosokawamicron.co.jp/en/machines/126>
26. <https://www.industry-plaza.com/fluidised-bed-opposed-jet-mill-afg-p90497.html>
27. www.comex-group.com
28. Fluid Energy Processing and Equipment Company <http://www.fluidenergype.com/equipment/ultra-fine-grinding-jet-milling-systems-production-scale/roto-jet>
29. Liu G.: How to select and start up a fluized-bed jet mill system. As appeared in June 2016. www.powderbulk.com
30. Vegt O. M.: Jet milling from a particle perspective. www.rug.nl/research/portal/files/2771928/thesis.pdf
31. Otwinowski H., Pavlovich Zhukov V., Wyleciał T., Nikolaevich Belyakov A., Górecka-Zbrońska A.: Research and Modeling of Processes in The Fluidized Bed Opposed Jet Mill. *Technical Sciences* 2014, 17(4), pp. 381–390

15. Młyny specjalne i eksperymentalne technologie mielenia

15.1. Problematyka młynów specjalnych

Młyny specjalne stanowią grupę maszyn o zróżnicowanych działaniach – sposobach przekazywania energii na proces rozdrabniania i różniące się od większości młynów sposobem działania, wąskim specjalistycznym zastosowaniem, a najczęściej tylko eksperymentalnym charakterem. Ponadto zaliczone do tej grupy młyny cechuje bardzo zróżnicowana budowa oraz mechanizm przekazywania energii na destrukcję ziaren materiału. W większości tych młynów sam proces mielenia zachodzi na drodze mechanicznej, ale te elementy robocze (swobodne mielniki) otrzymują energię kinetyczną trzema drogami, to jest:

- mechaniczną od wirnika,
- magnetyczną od jednego lub dwóch magnesów stałych oraz obrotowej komory,
- elektromagnetyczną od sześciu elektromagnesów.

W każdym z tych młynów właściwy proces rozdrabniania polega na przekazywaniu otrzymanej różnym sposobem energii kinetycznej swobodnych mielników na rozdrabnianie ziaren materiału, czyli w tej fazie typowe rozdrabnianie na drodze mechanicznej.

Do grupy młynów specjalnych zaliczono następujące podgrupy maszyn rozdrabniających:

- wirnikowe – udarowe [1, 2, 3, 4, 5, 6],
- obrotowo-magnetyczne [7, 8, 9, 10],
- elektromagnetyczne [11, 12, 13, 14, 15, 16].

Schematy budowy i działania tych młynów z mielnikami swobodnymi zamieszczono na rysunku 15.1.

Procesy rozdrabniania przeprowadzane są nie tylko w młynach, czy kruszarkach przez oddziaływanie elementami mechanicznymi, lecz także wykorzystując inne zjawiska fizyczne w ośrodkach rozdrabniania. Są to głównie technologie eksperymentalne z dużym potencjałem ich praktycznego zastosowania [17]. Wśród nich wyróżnić należy:

- rozdrabnianie z udziałem mikrofal [18],
- rozdrabnianie metodą pneumatyczną z wysokimi prędkościami [19],
- rozdrabnianie metodą hydrauliczną z wysokimi prędkościami [20].

Młyny wirnikowe – udarowe (rys. 15.1 a), ze względu na sposób przekazywania energii oraz zbliżoną do grupy drugiej młynów budową (rozdz. 2, tab. 2.12), zaliczono do młynów mieszadłowych. Jednak sposób ich działania oraz parametry pracy są na tyle różne, że należy je potraktować jako

odrębną podgrupę. Ponadto sposób ich działania znacząco różni się od sposobu działania młynów mieszadłowych.

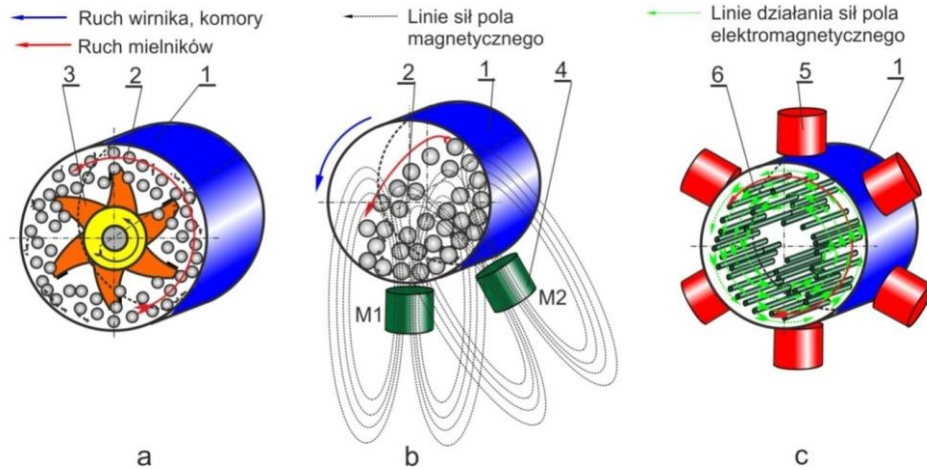
W tych młynach przy znacznie niższym stopniu napełnienia komory – około 0,3 (w młynach mieszadłowych wynosi około 0,9) oraz innej budowie wirnika, zachodzi całkowicie różny ruch mielników, którego skutkiem jest inny charakter procesu rozdrabniania. Charakter wynika ze sposobu oddziaływania elementów wirnika – bijaków na swobodne mielniki, czyli impulsowego oddziaływania udarowego, a w dominującej większości uderzenia centralnego w kule, podczas gdy w młynach mieszadłowych dominuje oddziaływanie styczne. Uderzane mielniki poruszają się do punktu uderzenia w wykładzinę lub w inny mielnik, a ich przemieszczenia są wielokrotnie dłuższe od przemieszczeń jakie występują w młynach mieszadłowych. Skutkiem tego jest całkowicie różny rodzaj obciążeń rozdrabniających ziarna mielonego materiału. Obciążenia te charakteryzują się dominującym udziałem normalnych oddziaływań udarowych, podczas gdy w młynach mieszadłowych dominują oddziaływania styczne z propagacją naprężeń o niższej prędkości.

Ponadto w młynach wirnikowych – udarowych proces mielenia zachodzi zawsze w całkowicie innych warunkach technologicznych, to jest tylko przy obniżonym ciśnieniu, stabilizowanej temperaturze oraz w atmosferze gazu obojętnego.

Młyny obrotowo-magnetyczne wykorzystują do procesu mielenia tylko mielniki ferromagnetyczne, a na ich ruch składają się dwa zjawiska fizyczne, to jest: znaczne siły magnetyczne pochodzące od magnesów stałych generujących silne pole magnetyczne oraz niewielkie siły grawitacji i tarcia – generowane ruchem obrotowym komory. W młynie można uzyskać dwa warianty działania, to jest niskoenergetyczny i wysokoenergetyczny. Przy działaniu niskoenergetycznym pod obrotową komorą umieszcza się pod komorą tylko jeden magnes M1 (rys. 15.1 b), którego pole magnetyczne przyciąga mielniki w dolne położenie komory, a ruch obrotowy powoduje tylko ich obrót wokół swojej osi. Natomiast przy umieszczeniu w młynie obu magnesów, lub tylko magnesu M2, występuje tzw. wysokoenergetyczne działanie, to jest podnoszenie do góry mielników przez ruch obrotowy komory oraz „odrzucanie” mielników przez siłę pochodząca od pola magnetycznego magnesu M2 i ich ruch zachodzi według trajektorii podanych na rysunku 15.1 b.

Młyn elektromagnetyczny wynalazł Gruzin P. Khomeriki w 1965 roku, a trzy lata później uzyskał na niego patent amerykański (US 3398902). Proces mielenia w tym młynie zachodzi w sposób mechaniczny dzięki swobodnym mielnikom, a istotna różnica – w porównaniu ze znanymi młynami z mielnikami swobodnymi, polega na zastąpieniu mechanicznego elementu

wprowadzającego w ruch mielniki (komory, wirnika) wirującym polem elektromagnetycznym. W sposób uproszczony skutek działania linii sił pola elektromagnetycznego przedstawiono na rysunku 15.1 c. Komora tego młyna jest wykonana ze stali niemagnetycznej.



Rys. 15.1. Schematy budowy i działania młynów specjalnych: a - wirnikowego - udarowego, b - obrotowo-magnetycznego, c - elektromagnetycznego, 1 - komora, 2 - mielniki kule, 3 - wirnik, 4 - magnesy stałe (M1, M2), 5 - elektromagnesy, 6 - mielniki pręty

Zalety młyna elektromagnetycznego to niewątpliwie:

- przekazywanie energii bezpośrednio swobodnym mielnikom,
- brak innych elementów ruchomych (komory, rolek, wirników czy zespołu roboczego),
- możliwość zwiększania energii mielników przez zwiększanie natężenia prądu w elektromagnesach,
- możliwość jednoczesnego suszenia mielonego materiału,
- duża szybkość procesu mielenia.
- cicha praca – emitowany poziom ciśnienia akustycznego nie przekracza 60 dB.

Natomiast wadami tego młyna jest:

- możliwość rozdrabniania nadawy o maksymalnym wymiarze ziaren kilku mm.
- generowanie dużej mocy biernej, którą należy kompensować,
- spadek działania sił elektromagnetycznych w kierunku osi komory, dlatego średnice badanych i produkowanych młynów nie przekraczają 150 mm,

- trudności z uzyskaniem dużych wydajności – wynikające ze skutków w/w zjawiska.

Eksperymentalne technologie rozdrabniania wykorzystujące do tego procesu rozdrabniania bardzo różne zjawiska fizyczne są przedmiotem prac wielu uczelni technicznych i ośrodków badawczych firm. Technologie te nie znalazły praktycznego zastosowania, ale ich potencjał technologiczny wskazuje na możliwość ich wykorzystania w specjalnych warunkach.

15.2. Młyny wirnikowe – wysokoenergetyczne

Młyny te produkuje tylko jedna firma Zoz GmbH. Młyny użytkowane są przy obniżonym ciśnieniu w zakresie od 0,1 hPa podciśnienia do 0,05 MPa nadciśnienia, stabilizowanej temperaturze od - 20°C do 80°C. Komory młynów umieszczone są w płaszczu z cieczą o stabilizowanej temperaturze. Przeznaczone są głównie do mielenia proszków metali w atmosferze gazu obojętnego, ale można w nich wytwarzać również proszki ceramiczne [1, 2, 3, 4, 5]. Firma ta oferuje trzy wielkości młyna o pojemności komory mielącej 100; 400 oraz 900 dm³.

Młyn Simployer CM 100 o pojemności komory 100 dm³ ma możliwość pracy w sposób okresowy lub ciągły. Na rysunku 15.2 przedstawiono oba warianty tego młyna, a na rysunku 15.3 największy młyn CM 900.

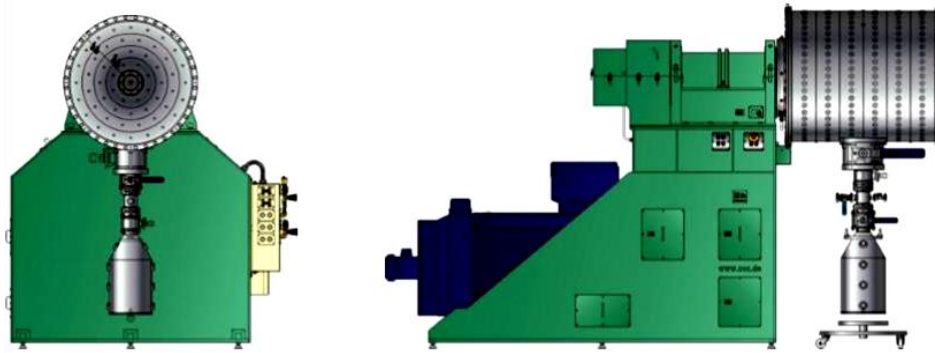


a



b

Rys. 15.2. Młyn wirnikowo-udarowy Simployer CM 100 [3]:
a - o działaniu okresowym, b - o działaniu ciągłym



Rys. 14.3. Młyn wirnikowo-udarowy Simporter CM 900 [5]

W pracy [1] podano podstawowe informacje dotyczące projektowania i doboru młynów wirnikowych – uderowych oraz wyniki badań procesu mielenia w tych młynach. Zastosowanie tych młynów do mechanicznego stapiania (mechanical alloying) podano w pracy [2].

Podstawowe parametry tych młynów podano w tabeli 15.1 [3, 4, 5]

Parametry młynów wirnikowych CM

Tabela 15.1.

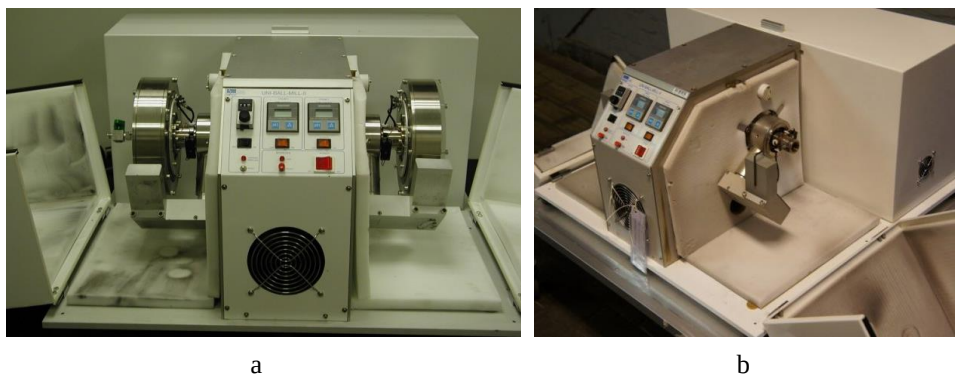
Typ młyna	Moc silnika [kW]	Pojemność komory [dm ³]	Prędkość obrotowa wirnika [obr/min]	Sposób pracy	Masa materiału [kg]
CM100	110	100	500	Okresowy/ciągły	20
CM400	400	400	375	Ciągły	100
CM900	800	900	325	Ciągły	250

Młyny te charakteryzuje bardzo wysoki wskaźnik mocy jednostkowej, który wynosi od 1100 kW/m³ – dla młyna CM 100 oraz 889 kW/m³ dla młyna CM 900. Wskaźnik ten dla innych młynów z mielnikami swobodnymi przyjmuje wielokrotnie mniejsze wartości, to jest: 15÷17 kW/m³ dla młynów grawitacyjnych, 45÷70 kW/m³ dla wibracyjnych, oraz 150÷300 kW/m³ dla mieszadłowych. Tylko młyn planetarny Hicom [9] charakteryzuje się około dwukrotnie większą wartością tego wskaźnika.

15.3. Młyny obrotowo-magnetyczne

Młyny te opracowane w Australii znalazły zastosowanie głównie w skali laboratoryjnej w procesach mechanicznego stapiania (MA) oraz wysokoenergetycznego mielenia (HEBM) [7, 8, 9]. Objętości komór laboratoryjnych młynów nie przekraczają $0,5 \text{ dm}^3$, a wg informacji niepublikowanych opracowano młyn o największej objętości komory 5 dm^3 . Dwukomorowe młyny obrotowo-magnetyczne zamieszczono na rysunku 15.4 [9, 10].

W praktyce laboratoryjnej używane są dwa typy tego młyna to jest Uniball 2 oraz Uniball 5. W komorach tego młyna łatwo jest uzyskać atmosferę obojętną. W literaturze brak jest informacji o innych niż laboratoryjne zastosowania tych młynów, zwłaszcza młynów przemysłowych.

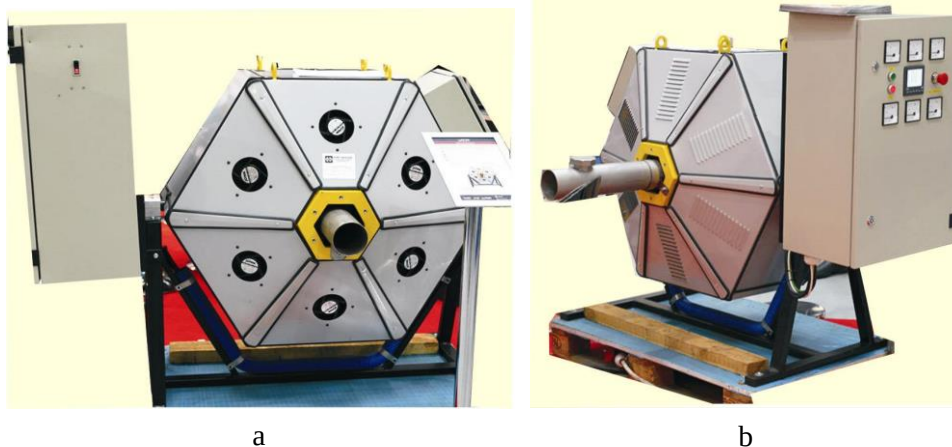


Rys. 15.4. Młyny obrotowo-magnetyczne: a – Uniball-Mill 5 [9], b – Uniball-Mill 2 [10]

15.4. Młyny elektromagnetyczne

W tym młynie siły pola elektromagnetycznego generują ruch wirowy swobodnych mielników – prętów o niewielkiej średnicy – około $0,5 \div 5 \text{ mm}$ o długości $5 \div 60 \text{ mm}$. Proces mielenia zachodzi w nich w komorach o średnicy $90 \div 136 \text{ mm}$ [11] wykonanych ze stali niemagnetycznej (rys. 15.1 c). W komorze młyna wiruje pole elektromagnetyczne z częstotliwością prądu przemiennego w sieci to jest 50 Hz , które porusza z tą samą częstotliwością swobodne mielniki. Proces mielenia w tych młynach zachodzi wskutek dużej szybkości mielników, wzajemnego zderzania się oraz uderzania w komorę. Jednocześnie wskutek tarcia wytwarzana jest duża ilość ciepła. Ciepło to można wykorzystać do jednoczesnego suszenia mielonego materiału [15]. W Polsce młyn elektromagnetyczny oferuje firma Grupa Wolff. Rozwiązanie konstrukcyjne tego młyna przedstawione na wystawie SYMAS 2014 zamieszczono na rysunku 15.5. Niestety jego producent nie podaje żadnych

parametrów technologicznych i technicznych dotyczących tego młyna, a jedynie wzmiankę, że młyn cechuje o 90% niższy jednostkowy pobór energii – bez informacji w porównaniu z jakim młynem, rodzajem mielonego materiału oraz warunkach technologicznych w jakich ten rezultat otrzymano. W Europie młyny elektromagnetyczne typ AVS 100 oraz AVS 150 oferuje firma GlobeCore [11] (Rys 15.6).



Rys. 15.5. Młyn elektromagnetyczny oferowany przez firmę Wolff [13]:
a - widok od strony wylotu, b - od strony wlotu materiału mielonego



Rys. 15.6. Młyn elektromagnetyczny oferowany przez firmę GlobeCore:
a - AWS 100, b - AWS 150 [11]

Młyny elektromagnetyczne są przedmiotem prac badawczych w Politechnice Częstochowskiej oraz w Politechnice Lubelskiej.

Zawarte w pracy [15] porównanie parametrów młynów grawitacyjnego kulowego i elektromagnetycznego przy mieleniu węgla brunatnego wskazujące, że młyn elektromagnetyczny ma około 9 razy mniejszy jednostkowy pobór energii ma jedynie charakter teoretyczny i nie jest zgodne z warunkami rzeczywistymi. Wynika to zarówno z braku informacji o rodzaju mielonego węgla, parametrów uziarnienia nadawy (do młyna kulowego podawana jest nadawa o kilkukrotnie większych wymiarach ziaren), uziarnieniu produktu mielenia, wilgotności węgla przed i po mieleniu, jak również informacji oraz innych kosztach eksploatacyjnych - np. poboru energii niezbędnej do wstępnego zmielenia nadawy do młyna elektromagnetycznego. W literaturze brak jest informacji o młynach elektromagnetycznych uzyskujących wydajności 10÷100 Mg/h oraz parametrach technologicznych procesu mielenia w tych młynach.

W pracy [15] podano informację, że jednostkowy pobór energii przy mieleniu węgla brunatnego w młynie elektromagnetycznym wynosi 5 kWh/Mg - przy jego teoretycznej wydajności 20 Mg/h - bez podania uziarnienia i wilgotności nadawy, a w młynie kulowym 45 kWh/Mg - co nie jest zgodne z rzeczywistością.

Wskaźnik ten, w przypadku mielenia węgla kamiennego lub brunatnego wyznaczony w konkretnych przemysłowych młynach wynosi:

- około 14 kWh dla młyna wibracyjnego o wydajności 5 Mg/h – przy mieleniu węgla brunatnego [21],
- 14÷22 kWh/Mg – dla młynów kulowych (z wentylatorem) – przy mieleniu węgla kamiennego w zakresie wydajności 8,6÷33 Mg/h [22], a przy młynach o większej wydajności jest jeszcze mniejszy,
- 4,5÷7,8 kWh/Mg – dla młyna wentylatorowego typ N 90 F – przy mieleniu węgla brunatnego o zakresie wydajności w zakresie 30÷54 Mg/h [23],
- około 14 kWh/Mg młyna wentylatorowego – przy mieleniu węgla kamiennego o wydajności 76 Mg/h [24],
- 9 kWh/Mg – dla młyna pierścieniowo-kulowego EM 70 – przy mieleniu węgla kamiennego o wydajności 14 Mg/h [25].

Wymienione młyny miały węgiel o uziarnieniu nadawy o maksymalnych wymiarach ziaren w zakresie 30÷60 mm, natomiast nadawa do młyna elektromagnetycznego powinna mieć uziarnienia poniżej 6 mm [11]. Stąd jeśli uwzględni się jednostkowy pobór energii niezbędny do wstępnego rozdrobnienia nadawy do tego młyna oraz rozbudowę młynowni o agregat do

wstępnego rozdrabniania z urządzeniami pomocniczymi, to oszczędności energii w młynie elektromagnetycznym nie będą tak znaczne – zwłaszcza, że sposób ich wyznaczania budzi wątpliwości. W całkowitych kosztach eksploatacji młyna elektromagnetycznego należy również uwzględnić koszty kompensacji mocy biernej.

W przypadku posiadania nadawy o uziarnieniu poniżej kilku mm młyn ten, ze względu na prostą budowę może być przydatny w wielu gałęziach przemysłu, zwłaszcza do domielania na mokro i na sucho materiałów.

15.5. Eksperymentalne technologie rozdrabniania

W procesie rozdrabniania – mielenia wykorzystano eksperymentalną technologię mikrofalową [18], która polega na impulsowym oddziaływaniu mikrofal na wstępnie rozdrobnione ziarna rudy (poniżej 150 mm). Ziarna te są agregatami pożądanego minerału oraz różnego rodzaju skały płonnej. Oddziaływanie zachodzi z mocą powyżej 1 kW, a czas trwania impulsu mikrofal był krótszy niż 0,1 sekundy, a najkorzystniejszy poniżej 0,001 sekundy. Mikrofałe oprócz rozdrabniania powodują również zmiany strukturalne różne dla poszczególnych składników agregatu, czego skutkiem większa jest podatność materiału na rozdrobnienia w kolejnym etapie. Zmiany te są rezultatem różnic rozszerzalności cieplnej poszczególnych składników w zagregowanych ziarnach rudy, generując obszary o zróżnicowanych naprężeniach powodujących mikropęknięcia lub inne zmiany fizyczne w agregatach rudy.

Rozdrabnianie lub zwiększenie podatności na rozdrabnianie ziaren rudy ma charakter selektywny przez działanie mikrofal na określone materiały będące składnikami zagregowanego ziarna rudy. Zaletą tego rozdrabniania jest przygotowanie rudy do ługowania w hałdzie.

Typowo fizyczną metodą jest rozdrabnianie materiałów metodą pneumatyczną z wysokimi prędkościami [19]. Do realizacji tej metody opracowano urządzenie udarowe UBC-CERM3 pracujące z prędkością od 100 do 350 m/s. W tym urządzeniu prędkości uderzania ziaren wyznaczano eksperymentalnie kierując się kryterium minimalizacji jednostkowego poboru energii. Ziarna materiału rozdrabniano przez uderzenie elementem roboczym wykorzystującym energię sprężonego gazu pod wysokim ciśnieniem - do 1,7 MPa. Aby zwiększyć skutek działania elementu roboczego w strefie, w której znajdowały się ziarna materiału obniżono ciśnienie. Schemat budowy urządzenia do rozdrabniania udarowego zamieszczono w pracy [23]. Badania rozdrabniania tą metodą przeprowadzono na próbkach kamienia wapiennego,

kwarcu i soli kamiennej. Materiały te wybrano kierując się wstępnymi wynikami badań w zakresie wpływu prędkości uderzenia na stosunek liczby Poissona do porowatości charakteryzującego te kruche materiały. W badaniach używano materiały o uziarnieniu $1\div 2$ mm. Otrzymane wyniki badań wskazują, że najkorzystniejsze prędkości rozdrabniania mieszczą się w zakresie $200\div 250$ m/s. Otrzymane wyniki badań mają charakter poznawczy.

Badania rozdrabniania udarowego metodą hydrauliczną z wysokimi prędkościami przeprowadzone są w USA i Chinach. Niektóre ich wyniki podano w pracy [20]. Praca ta zawiera również wyniki badań przeprowadzonych w Polsce na oryginalnym stanowisku badawczym. Rozdrabnianie tą metodą polega na rozpędzeniu ziaren materiału do dużej prędkości strumieniu wody, który oprócz nadawania prędkości ziarnom materiału, wchodzi w szczeliny i mikroszczeliny na powierzchni ziaren powodując ich rozdrobnienie.

Stanowisko badawcze młyna opracowano na podstawie symulacji komputerowych. Jest to prototyp tego rodzaju młyna o pionowej osi geometrycznej komory wyposażony w wysokociśnieniowy hydromonitor, zbudowany na bazie pompy typu Hammelmann HDP 164. Stanowisko umożliwia przeprowadzanie badań rozdrabniania materiałów w zakresie ciśnień $50\div 300$ MPa, przy zmiennym wydatku wody w zakresie $0,2\div 0,5$ dm³/s. Na tym stanowisku można rozdrabniać materiał o maksymalnym wymiarze ziarna 2 mm, z wydajnością, wynoszącą dla różnych materiałów w zakresie $8\div 53$ g/s [20]. W tej pracy zamieszczono wyniki badań rozdrabniania materiałów kruchych przeprowadzonych przy następujących stałych parametrach procesu, czyli średnicy dyszy wodnej 0,7 mm, dyszy rozdrabniająco-homogenizującej typu RI2-1 o średnicy 2,4 mm, stałej odległości wylotu dyszy homogenizacyjnej od tarczy rozdrabniającej 10 mm, oraz opcjonalnym przedłużeniu dyszy rozdrabniająco-homogenizującej o 200 mm.

Badania nad efektywnością hydrostrumieniowego rozdrabniania przeprowadzono dla nadawy o maksymalnym wymiarze ziaren 2 mm, dla materiałów: węgla kamiennego, magnezytu, barytu, mikrokulek szklanych oraz piasku kwarcowego.

Do celów porównawczych efektywności rozdrabniania w/w materiałów przeprowadzono badania rozdrabniania tych materiałów w laboratoryjnym młynie planetarnym PM10. Badania miały na celu porównanie jednostkowego poboru energii na proces mielenia. Wyniki badań wykazały, że energochłonność procesu mielenia hydrostrumieniowego, badanych materiałów jest od kilku do dwudziestu kilku razy mniejsza, niż podczas rozdrabniania mechanicznego w młynie

planetarnym. Otrzymane rezultaty mają sens porównawczy tylko dla warunków laboratoryjnych. Niemniej jednak można przypuszczać, że technologia udarowego wysokociśnieniowego, (hydrostrumieniowego) rozdrabniania może być alternatywą dla standardowych – mechanicznych technologii rozdrabniania materiałów kruchych.

Obiecujące wyniki badań procesu bardzo drobnego mielenia hydrostrumieniowego przeprowadzonych w zmodyfikowanym urządzeniu do cięcia strumieniem wody, w którego działaniu wykorzystano zjawisko kawitacji przedstawiono w pracy [26]. Technologię wysokoenergetycznego cięcia na zimno twardych ognioodpornych materiałów ceramicznych za pomocą strumienia wody z niewielką ilością drobnych ziaren twardego materiału, zwaną Water Jet (WJ) opracowano w NASA (USA) dla potrzeb produkcji wahadłowców. Obecnie urządzenie to jest powszechnie stosowane do cięcia ceramiki, twardych tworzyw metalicznych oraz stali, a także do urabiania w górnictwie. Poprawne działanie tego urządzenia wymaga zapewnienia stabilnego ciśnienia roboczego wody w zakresie 400÷600 MPa. Wysoki potencjał tej technologii wykorzystano do opracowania prototypowego młyna Water Jet Mill (WJM) przeznaczonego do wytwarzania mikro i nanoproszków. W procesie rozdrabniania ziaren monofazowego materiału wykorzystano zjawisko mikrokawitacji pary, którego wynikiem są implozje w czystych mikropęcherzykach pary. Zjawisko to wspomagane jest zastosowaniem reżimu impulsowego oraz multiplikacją ciśnienia uderzenia w przegrodę za pomocą efektu uderzenia wodnego zwiększającego ciśnienie do kilku GPa [26]. Pompa zasilająca młyn WJM wytwarza ciśnienie około 400 MPa, gęstość mocy przekroju – przypadającej na jego jednostkę powierzchni wynosi 164 kW/mm². Przy tych warunkach generowana moc strumienia wody wynosi około 8 kW. W tym młynie proces rozdrabniania ziaren materiału zachodzi wskutek oddziaływania kawitacyjnego strumienia wody. Proces ten zachodzi cyklicznie, ponieważ część zawiesiny zawierającej rozdrobniony w pierwszej fazie materiał zwracana jest ponownie do procesu mielenia. Oznacza to, że proces rozdrabniania kawitacyjnego zachodzi w dwóch fazach. Pierwsza faza to rezultat mikrokawitacji po zderzeniu materiałów z przegrodą, druga występuje wewnątrz rurki doprowadzającej zawiesinę do strefy uderzania. Źródłem kawitacji jest wysoki gradient prędkości zbioru ziaren w zawieszynie. Proces niszczenia pęcherzyków kawitacyjnych na powierzchni ziaren materiału tworzy w obszarze uderzenia cieczy falę uderzeniową o silnym oddziaływaniu niszczącym. Ciśnienie uderzenia podczas implozji pęcherzyków kawitacyjnych dochodzi do 57 GPa, przy temperaturze otoczenia 20°C i ciśnieniu otoczenia 1 MPa. Ciśnienie to jest znacznie większe od wytrzymałości na ściskanie

większości rozdrabnianych materiałów. Przegrodę, na której zachodzi proces rozdrabniania cechuje wysoka sztywność - wykonana jest ze spiekanego węgla wolframu o dużej wytrzymałości mechanicznej. Jako nadawy do procesu mielenia użyto czysty krzem o uziarnieniu poniżej 100 μm . Podczas badań otrzymano produkt mielenia o uziarnieniu w zakresie 50÷500 nm o średnim wymiarze ziarna 148 nm. Jednostkowy pobór energii na proces mielenia wynosił $5,8 \cdot 10^5$ kJ/kg, (161 kWh/kg), czyli 161 000 kWh/Mg. Należy dodać, że są to wstępne wyniki badań [26], a parametry procesu oraz urządzenia są dalekie od optymalnych. Mając na względzie już osiągnięte dobre rezultaty technologiczne, urządzenie WJM można zastosować do wytwarzania mikro i nanoproszków nie reagujących z wodą, niestety przy bardzo wysokich nakładach energii.

Technologie rozdrabniania wykorzystujące promieniowanie podczerwone do rozdrabniania materiałów kruchych podano w pracach [27, 28]. Obie w/w technologie nie znalazły praktycznego zastosowania.

Literatura

1. Kaupp G., Naimi-Jamal M R., Ren H., Zoz H.: Reactive Dry-Milling for Environmental Protection -encouraging industrial applications for High Kinetic Processing. Worldwide Process, Germany, M5-923-28-002.qxd, pp. 24-27 [04-2003]
2. Zoz H., Ren H., Rehardt R., Benz H.U.: High Energy Milling/ Mechanical Alloying / Reactive Milling. Zoz GmbH, D-57482 Wenden, Germany Part I Zoz GmbH. pp. 1-65
3. Simoloyer CM 100 Industrial Simoloyer. www.zoz.de
4. Simoloyer CM 400 Industrial Simoloyer. www.zoz.de
5. Simoloyer CM 900 Industrial Simoloyer. www.zoz.de
6. Varin R.A., Chiuu Ch., Wronski Z.S.: Mechano-chemical activation synthesis (MCAS) of disordered $\text{Mg}(\text{CH}_4)_2$ using NaBH_4 . Journal of Alloys and Compounds 462. 2008, pp. 201-208
7. Calka A., Wexler D., Oleszak D., Bystrzycki J.: Formation of Amorphous and Nanostructural Powder Particles from Amorphous Metallic Glass Ribbons using Ball Milling and Electrical Discharge Milling. Solid State Phenomena Vols. 101-102 (2005) pp. 111-116. <http://www.scientific.net>
8. Varin R.A., Czujko T., Chiua Ch., Wronski Z.: Particle size effects on the desorption properties of nanostructured magnesium dihydride (MgH_2) synthesized by controlled reactive mechanical milling (CRMM). Journal of

- Alloys and Compounds 424 (2006) 356-364. www.elsevier.com/locate/jallcom
9. Calka, A., and Radlinski, A. P.: Universal high performance ball-milling device and its application for mechanical alloying, *Materials Science and Engineering A*, 1991. 134, 1350–1353
 10. <http://www.iveindhoven.com/en/article/laboratory-ball-mill-2/>
 11. <https://avs.globecore.com/products/avs-150.html>
 12. Młyn elektromagnetyczny. Politechnika Częstochowska Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii – Karta produktu (niedatowana)
 13. Młyn elektromagnetyczny. Wystawa SYMAS 2014 Kraków – oferta firmy Wolff
 14. Micorek T., Rejdak M., Robak J., Różycki G.: Badania mikronizacji węgla kamiennego w młynie elektromagnetycznym. *Energetyka. Piece przemysłowe & Kotły* 2016 Nr 4 s. 21-33
 15. Sławiński K., Nowak W., Szymanek P.: Suszenie węgla brunatnego przy użyciu młyna elektromagnetycznego. Politechnika Częstochowska Wydział Inżynierii Środowiska i Biotechnologii. www.planrozwoju.pcz.pl/dokumenty/konferencja/artykuly/28.pdf
 16. Styła S.: A New Grinding Technology Using an Electromagnetic Mill – Testing the Efficiency of the Process. *Econtechmod An International Quarterly Journal* – 2017, Vol. 06, No. 1, 81–88
 17. Schönert, K., Bruchvorgänge und Mikroprozesse des Zerkleinerns, S. 185, H. Schubert (Ed.) *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*, Wiley-VCH Weinheim 2003
 18. Kobusheshe J.: *Microwave Enhanced Processing of Ores*. The University of Nottingham June 2010
 19. Moosavi A. B.: *Improvements In Comminution Efficiency Through High Velocity Impact*. The University of British Columbia. Vancouver 2012
 20. Borkowski P., Borkowski J., Bielecki M.: Mikronizacja materiałów kruchych metodą hydrostrumieniową. *Mechanik* Nr 9/2014, s. 73-76
 21. Vibrating mills. www.ritec.com
 22. Kurdowski W.: *Poradnik technologa przemysłu cementowego*. Wyd. Arkady Warszawa 1981
 23. Doležal R.: *Dampferzeugung Verbrennung, Feuerung, Dampferzeuger*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo 1985
 24. Parys T.: *Charakterystyki młynów wentylatorowych z różnymi typami odsiewaczy*. Praca dyplomowa. AGH Kraków 2012. www.ekokal.com/ch_mlynow.pdf

25. Tatarek. A.: Urządzenia pomocnicze bloków ciepłowniczych. Politechnika Wrocławska Wrocław 2008
26. Dvorský R., Slíva A., Luňáček J., Piksová K.: Preparation Of Silicon Nanoparticles By Means Of Disintegration In A Cavitation Water Jet, nanocon2014.tanger.cz/files/proceedings/nanocon_10/.../584.pdf
27. Klich A.: Niekonwencjonalne techniki urabiania skał. Praca zbiorowa, Wyd. Śląsk, Katowice 1998
28. Reś J.: Rozdrabnianie ponadwymiarowych brył metodą elektrohydrauliczną. Rozprawy Monografie 75. Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne AGH Kraków 1998

Współczesne maszyny do rozdrabniania - kruszarki i młyny

Streszczenie

Materiały uziarnione, w tym proszki, takie jak: kruszywa, spoiwa mineralne, rudy metali, materiały ogniotrwałe, izolacyjne, surowce energetyczne (węgle i materiały roślinne), nawozy mineralne i sztuczne, zużyte samochody, sprzęt elektroniczny, AGD, odpady (przemysłowe i komunalne), surowce i produkty (chemiczne, ceramiczne, spożywcze, farmaceutyczne, kosmetyczne oraz wiele innych, a także mikro i nanoproszki wytwarza się głównie w procesach rozdrabniania, czyli kruszenia i mielenia. W tych procesach stosuje się maszyny rozdrabniające (kruszarki i młyny), które na skalę przemysłową pojawiły się już w XIX wieku, a ich dynamiczny rozwój kontynuowany jest od drugiej połowy XX wieku. Rozwój ich konstrukcji umożliwił postęp w naukach podstawowych: matematyce, fizyce, mechanice, w tym mechanice pękania, wytrzymałości materiałów, a także w inżynierii materiałowej, elektronice oraz informatyce. Praca ujmuje syntetycznie aktualny stan wiedzy z dziedziny współczesnych maszyn rozdrabniających (kruszarek i młynów) w inżynieriach: mineralnej, ceramicznej, chemicznej, energetyce, technologiach wytwarzania proszków specjalnych oraz nanoproszków. Wstępna część pracy zawiera: charakterystykę procesów, własności i wymagania technologiczne rozdrabnianych materiałów, wskaźniki maszyn rozdrabniających oraz klasyfikacje kruszarek i młynów.

Problematykę kruszarek ujęto w trzech rozdziałach, odpowiadających głównemu kryterium podziału tych maszyn ze względu na charakter przekazywania obciążeń na proces kruszenia w czasie. Są to kruszarki z dominacją obciążeń wolnozmiennych (walcowe, walcowo-szczękowe, szczękowe i stożkowe), obciążeń szybkozmiennych (młotkowe, bijakowe, odśrodkowe i inne), wibracyjne, specjalne oraz specjalne technologie kruszenia. Rozdziały traktujące poszczególne grupy kruszarek zawierają: klasyfikacje, zastosowanie, podstawowe obliczenia technologiczne, schematy budowy, podstawowe parametry, kryteria doboru, rozwiązania konstrukcyjne oraz aktualną bibliografię. Problematykę młynów ujęto w dwóch aspektach: mechanizmu przekazywania energii na proces mielenia oraz budowy i sposobu działania. Uwzględniono wszystkie stosowane obecnie młyny, w tym także eksperymentalne oraz stosowane w praktyce laboratoryjnej. Są to młyny: grawitacyjne (kulowe), mieszadłowe, wibracyjne, obrotowo-wibracyjne, planetarne, rolowo-misowe, walcowe (prasy), udarowe (młotkowe, bijakowe,

dezintegratory). Odrębnie potraktowano młyny odśrodkowe, wentylatorowe, strumieniowe, specjalne (wirnikowe wysokoenergetyczne, elektromagnetyczne, obrotowo-magnetyczne) oraz eksperymentalne technologie mielenia. Każda grupa młynów zawarta jest w odrębnym rozdziale zawierającym: klasyfikację, zastosowanie, podstawowe obliczenia technologiczne, schematy budowy, podstawowe parametry, rozwiązania konstrukcyjne oraz aktualną bibliografię. Szczególną uwagę zwrócono na najnowsze rozwiązania konstrukcyjne maszyn rozdrabniających. Podano również przykłady własnych osiągnięć autorów w tej dziedzinie.

Modern machines for comminution – crushers and mills

Abstract

Grained materials, including powders, such as: aggregates, mineral binders, metal ores, refractory and insulating materials, energy raw materials (coals and plant materials), mineral and artificial fertilizers, used cars, electronic equipment, household appliances, waste (industrial and municipal), raw materials and chemical products, ceramic, food, pharmaceutical, cosmetics and many others, as well as micro and nanopowders are mainly produced in the comminution processes, that is crushing and grinding. In these processes, comminution machines (crushers and mills) are used, which have already appeared on the industrial scale in the 19th century, and their dynamic development has been continued since the second half of the twentieth century. The development of their construction has aided progress in basic sciences: mathematics, physics, mechanics, including fracture mechanics, material durability, as well as material engineering, electronics and information technology. The work synthetically describes the current state of knowledge in the field of modern comminution machines (crushers and mills) used in the following industries: mineral, ceramic, chemical, power engineering, technologies for the production of special powders and nanopowders. The initial part of the work includes: characteristics of comminution processes, properties and technological requirements of crushed materials, indicators of crushing machines and classifications of crushers and mills. The problem of crushers is presented in three chapters, corresponding to the main criterion for the division of these machines due to the nature of transferring loads into disintegration process over time. These are crushers with the dominance of slow-changing loads (roller, roller-jaw, jaw and cone crushers), fast-changing loads (hammer, impact, centrifugal and other), vibratory crushers, special crushers and special crushing technologies. The chapters describing individual crusher groups include: classifications, applications, basic technological calculations, construction diagrams, basic parameters, selection criteria, constructional solutions and the current bibliography. Problems of mills are considered in two aspects: the mechanism of energy transfer for the grinding process, and the construction and mode of operation. All currently used mills have been described, including experimental and applied in laboratory practice. These are mills: gravity (ball), agitators, vibratory, rotary-vibrating, planetary, roller-bowl, roller (presses), impact (hammer, disintegrators). In addition, centrifugal, fan, jet, special (rotor, high-energy, electromagnetic, rotational-magnetic) mills were described separately as well as experimental milling

technologies. Each group of mills has been treated in a separate chapter containing: classification, application, basic technological calculations, construction diagrams, basic parameters, constructional solutions and up-to-date bibliography. Special attention has been paid to the latest design solutions of comminution machines. Examples of authors own achievements in this field were given.