


Rozdrabnianie wczoraj, dziś i jutro



Dr inż. Tomasz GAWENDA
Akademia Górniczo-Hutnicza
Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców
gawenda@agh.edu.pl

Początki nauki o rozdrabnianiu

TEORIA RITTINGERA

P. R. Rittinger wydał w Berlinie w 1867 r. podręcznik pt. „Lehrbuch der Aufbereitungskunde”. Jest to prawdopodobnie pierwszy na świecie podręcznik, w którym omówiono teorię rozdrabniania minerałów i budowę maszyn służących do tego celu. Niżej podane są w dosłownym brzmieniu zasadnicze tezy jego teorii.

„Praca, potrzebna do rozdrabniania, rośnie proporcjonalnie do stopnia rozdrobnienia”. W celu bliższego objaśnienia tego twierdzenia weźmiemy kostkę kamienia o jednorodnych właściwościach i o dowolnej długości krawędzi a . Niech następnie wielkość pracy, potrzebnej do po-

TEORIA KICKA

Friedrich Kick, profesor technologii mechanicznej w niemieckiej wyższej szkole technicznej w Pradze, wydał w 1885 r. książkę pt. „Das Gesetz der proportionalen Widerstände und seine Anwendungen” („Prawo proporcjonalnych oporów i jego zastosowania”).

Swoje prawo sformułował Kick w postaci zasad.

Zasada pierwsza. „Prace, potrzebne do wywołania zgodnej zmiany kształtu 2 geometrycznie podobnych ciał i wykonanych z jedna-

Energetyczne teorie rozdrabniania

Rittinger (1867) przyjął, że cała energia jest zużywana na pokonanie sił spójności międzycząsteczkowej przy rozdrabnianiu materiałów stałych oraz jest wprost proporcjonalna do nowoutworzonej powierzchni.

$$W_R = W_r \cdot S$$

gdzie:

W_R – praca wykonana przy wytworzeniu powierzchni S ,

W_r – praca jednostkowa.

Kolejnym założeniem Rittingera jest to, że praca potrzebna do rozdrabniania rośnie proporcjonalnie do stopnia rozdrobnienia. Stąd wniosek, że im większy jest stopień rozdrobnienia, tym większa jest praca włożona do tego procesu.

Energetyczne teorie rozdrabniania

Kick (1885) założył, cała energia zużyta na rozdrabnianie idzie na wytworzenie odkształcenia, przy którym nastąpi przekroczenie naprężenia krytycznego oraz, że naprężenie wzrasta liniowo z odkształceniem aż do naprężenia krytycznego. Z wymienionych założeń wynika, że praca rozdrabniania jest proporcjonalna do objętości rozdrabnianego materiału.

$$W_K = \frac{\delta_{kr}^2}{E} \cdot V$$

gdzie:

W_K – praca rozdrabniania,

δ_{kr} - naprężenie krytyczne,

E – moduł Younga,

V – objętość rozdrabnianego materiału.

Energetyczne teorie rozdrabniania

Bond (1952) przyjął, że proces rozdrabniania składa się z dwu faz.

W pierwszej powstaje odkształcenie doprowadzające do wystąpienia naprężenia krytycznego, w drugiej natomiast odpowiedni dodatek energii powoduje zniszczenie sił spójności międzycząsteczkowej.

Tego rodzaju model tłumaczy słusność teorii Rittingera dla rozdrabniania drobnego (mały udział energii zużytej na deformację w porównaniu z energią zużytą na pokonanie sił spójności) oraz słusność teorii Kicka dla rozdrabniania grubego (konieczność wytwarzania dużych odkształceń przy stosunkowo niewielkiej nowo utworzonej powierzchni).

$$W = 10 \cdot W_i \left(P^{-1/2} - F^{-1/2} \right)$$

gdzie:

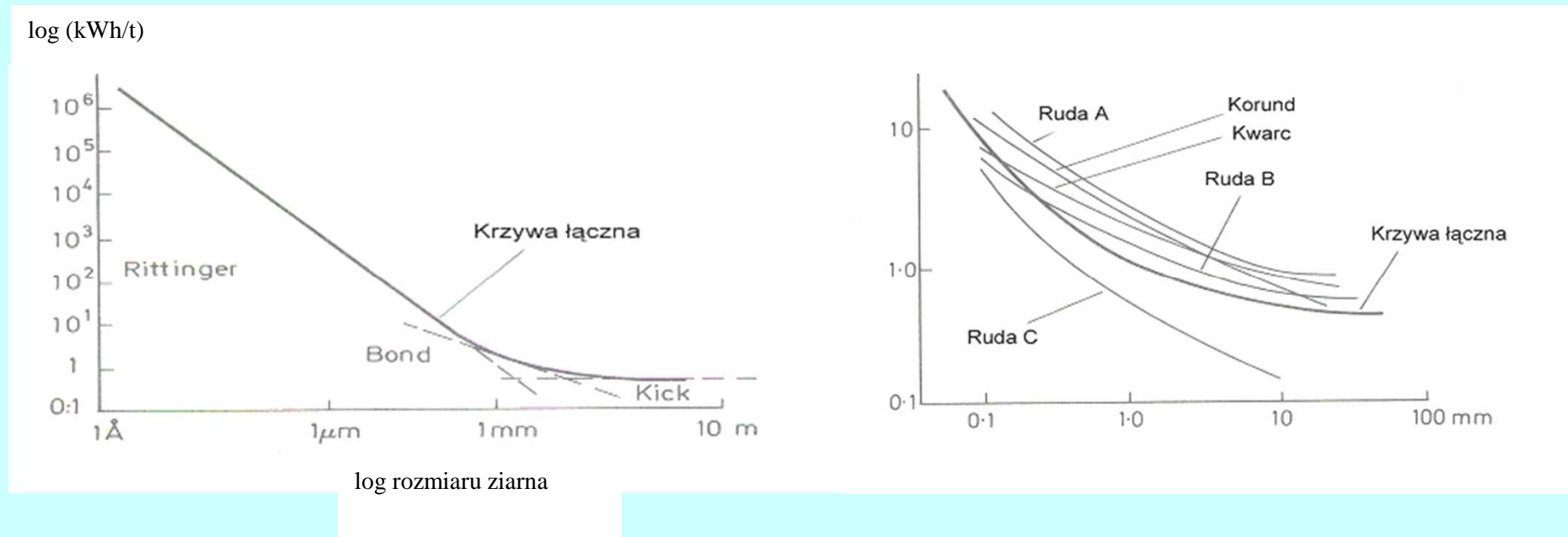
W – ilość energii potrzebnej do rozdrabniania;

W_i – indeks pracy Bonda;

F, P - wymiar ziarna 80 % odpowiednio w nadawie i produkcji

Energetyczne teorie rozdrabniania

Krzywe: wielkość ziarn – zapotrzebowanie energetyczne w zakresach Rittingera, Bonda i Kicka (z lewej), krzywe eksperymentalne dla wybranych materiałów (z prawej)



Metodyka określania energochłonności mielenia

Test Bonda dla młynka kulowego



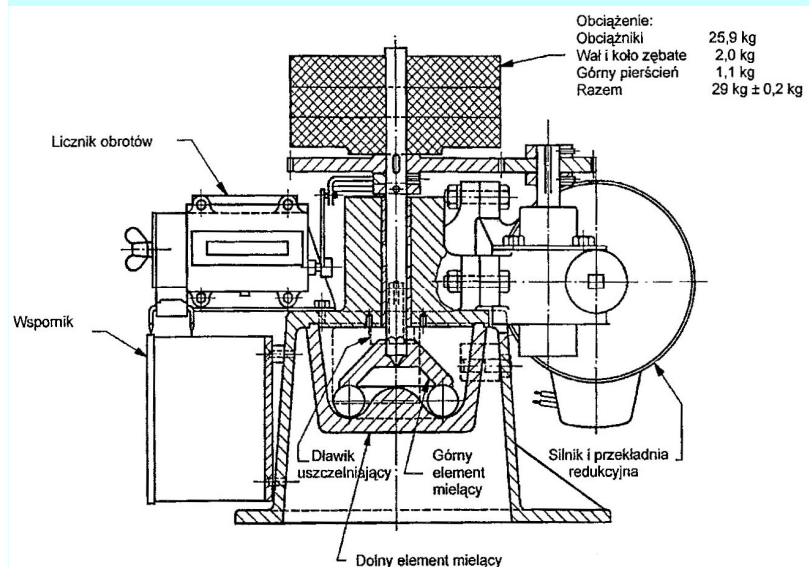
$$W = 10 \cdot W_i \left(P^{-1/2} - F^{-1/2} \right)$$

Wskaźnik podatności przemiałowej Hardgrove'a H_i

Metoda Hardgrove'a została opracowana w roku 1932 przede wszystkim do badania mielności węgla kamiennych.

Wskaźnik podatności przemiałowej Hardgrove'a H_i jest stosowany empirycznie do oceny wydajności i poboru mocy młynów misowych umożliwiających uzyskanie produktu o wymaganym uziarnieniu (PN-ISO 5074:2002).

Przy założeniu, że nakład energetyczny na rozdrabnianie jest wprost proporcjonalny do nowo utworzonej powierzchni (zgodnie z prawem Rittingera), w metodzie tej porównuje się zmianę powierzchni badanej próbki węgla testowanego ze zmianą powierzchni węgla wzorcowego.



$$W_i = \frac{435}{H_i^{0,82}}$$

gdzie H_i jest wartością wskaźnika podatności przemiałowej.

Przegląd maszyn stosowanych do rozdrabniania

Podział kruszarek wg Bracha

Grupa kruszarek	Rodzaj kruszarek
I. Kruszarki rozdrabniające przez nacisk dwu powierzchni roboczych	szczękowe, stożkowe, igłowe, walcowe, stęporowe (tłuczki), pierścieniowe, biegunowe (kołotoki)
II. Kruszarki rozdrabniające przez elementy wirujące, które uderzają w ziarna spoczywające lub spadające	młotkowe, prętowe (dezyntegratory, dysmembratory), udarowo-udrzutowe
III. Kruszarki rozdrabniające przez uderzanie i ścieranie elementami wypełniającymi wnętrze przestrzeni roboczej kruszarki	bębnowe kulowe, prętowe, kulowe wibracyjne
IV. Kruszarki rozdrabniające przy zastosowaniu szybkiego ruchu ziarn przez ośrodek (nośnik gazowy) i rozbijania ich przez uderzenie	strumieniowe
V. Kruszarki ultradźwiękowe, w których proces rozdrabniania ziarn przebiega pod wpływem ultradźwięków	ultradźwiękowe
VI. Kruszarki ekspansyjne, w których proces rozdrabniania przebiega pod wpływem gwałtownego obniżenia ciśnienia zewnętrznego	ekspansyjne
VII. Kruszarki samokruszące, w których proces rozdrabniania jest wynikiem wzajemnego zderzania się ziarn kruszonego materiału.	samokruszące

Procesy rozdrabniania polegające na mechanicznym podziale brył czy ziarn nadawy doprowadziły w zasadzie do klasyfikacji na procesy kruszenia i mielenia wg umownych wielkości ziarn produktu, które realizowane są za pomocą maszyn rozdrabniających – kruszarek i młynów.

Klasyfikacja procesów rozdrabniania wg wielkości ziarn produktu

Procesy rozdrabniania	Taggart	Hukki	Brach	Laskowski
Technika strzałowa	-	< 1 m	-	-
Kruszenie grube	15-10 cm	1m - 10 cm	10-5 cm	35-10 cm
Kruszenie średnie	1,25-1 cm	10 cm - 1 cm	3-1 cm	10-4 cm
Kruszenie drobne	-	-	5-2 mm	4-1 cm
Mielenie grube	3,5 mm - 900 μ m	1 cm - 1 mm	< 1 mm	5-2 mm
Mielenie średnie	600-200 μ m	1 mm -100 μ m		< 1 mm
Mielenie drobne	< 150 μ m	100-10 μ m		< 1 mm
Mielenie bardzo drobne	-	10-1 μ m		< 1 mm

Podział maszyn do kruszenia oraz ich zastosowanie

Rodzaj		Przykłady zastosowania
Kruszarki	szczękowe	<p>jednorozporowe (ruch prosty lub złożony), dwurozporowe (ruch prosty), granulATORY szczękowe (ruch złożony), kombinowane (szczękowo-walcowa), wibracyjne, uderzeniowe</p> <p>Najczęściej: surowce skalne (kamień naturalny miękki, średnio-twardy, twardy, żwir), rudy, żużel hutniczy, gruz budowlany (beton)</p> <p>Bardzo rzadko: węgiel, (mobilne) odpady komunalne twarde i klinkier cementowy</p>
	stożkowe	<p>z wałem podwieszanym lub wspartym, stożkowo-obrotowa (żyratorowa), granulator stożkowy</p> <p>Najczęściej: surowce skalne (kamień naturalny miękki, średnio-twardy, twardy, żwir), klinkier cementowy, rudy, żużel hutniczy, odpady komunalne twarde,</p> <p>Bardzo rzadko: gruz budowlany</p>
	wirnikowe udarowe listwowe	<p>dezintegratory, młyny udarowe, wertykalne – z wałem pionowym (kubizery lub kubityzery)</p> <p>Najczęściej: gruz budowlany, żwir, kamień naturalny miękki, średnio-twardy, twardy, rudy, żużel hutniczy, węgiel, (mobilne) i klinkier cementowy</p> <p>Bardzo rzadko: odpady komunalne</p>
	wirnikowe udarowe młotkowe	<p>młotkowe jedno i dwuwirnikowe, młyny młotkowe, młotkowo-udarowe, młotkowe z walcami,</p> <p>Najczęściej: kamień naturalny miękki, średnio-twardy, twardy, węgiel, rudy, żużel hutniczy, asfalt, odpady komunalne</p> <p>Bardzo rzadko: gruz budowlany, żwir</p>
	walcowe	<p>jednowalcowe, dwuwalcowe, wielowalcowe, kombinowane (walcowo-udarowe, walcowo-młotkowe)</p> <p>Najczęściej: kamień naturalny miękki, średnio-twardy, rudy miękkie, popioły elektrociepłownicze, żużel hutniczy, gruz budowlany (cegła), surowce ilaste</p> <p>Bardzo rzadko: kamień naturalny twardy, żwir, węgiel, (mobilne) odpady komunalne i klinkier cementowy</p>
	prasy walcowe wysokociśnieniowe	<p>Najczęściej: klinkier, surowce skalne, rudy</p>

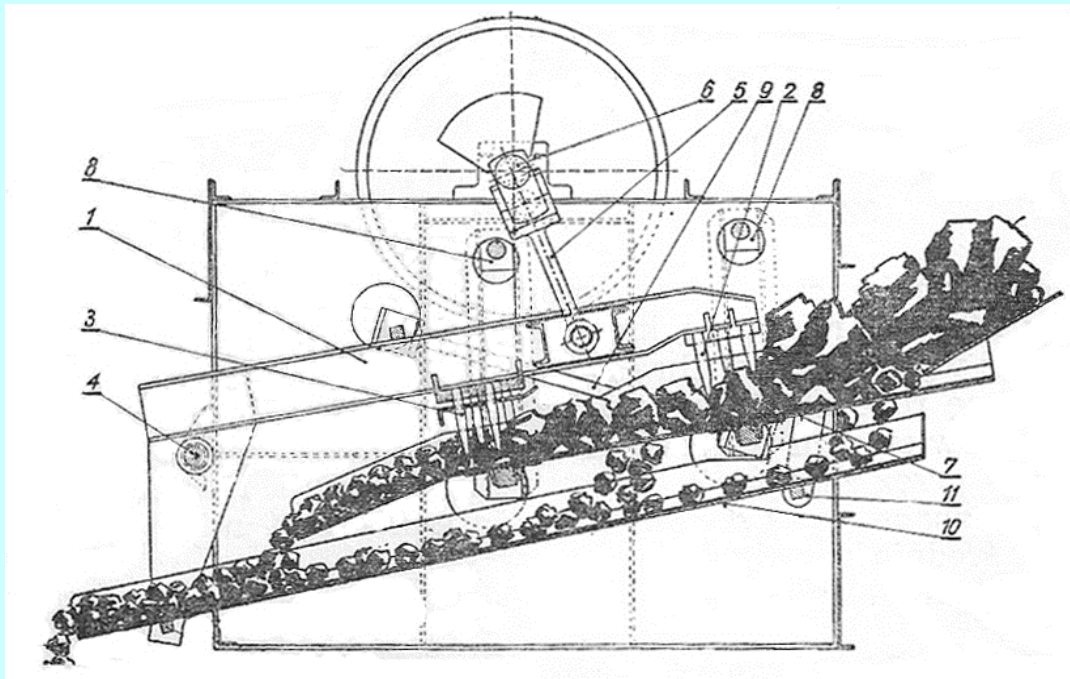
Podział maszyn do mielenia oraz ich zastosowanie

Rodzaj		Przykłady zastosowania	
Młyny	z mielnikami swobodnymi i ruchomą komorą roboczą	<ul style="list-style-type: none"> - <u>grawitacyjne: bębnowe, rurowe (kulowe, prętowe, cylpebsowe), samomielaide</u> - wibracyjne - planetarne 	materiały miękkie (wapień), twarde (np. tlenek glinu), grube, drobne i bardzo drobne, przemysł górniczy, hutniczy, cementowy
	z mielnikami swobodnymi i nieruchomą komorą roboczą, z przekazywaniem energii przez wirnik	<ul style="list-style-type: none"> - <u>pionowe młyny kulowe (Vertimill, Towermill)</u> - z wirnikiem trzpieniowym, gładkim, ślimakowym 	materiały miękkie i twarde w przeróbce surowców mineralnych, materiały twarde (węgiel krzemu), miękkie (talk) bardzo drobne i koloidalne w przemyśle chemicznym, ceramicznym i kosmetycznym
	z ruchomym elementem rozdrabniającym i nieruchomą komorą roboczą	<ul style="list-style-type: none"> - <u>rolkowo-misowe (Pfeiffer)</u> <i>pierscienowo-rolkowe</i> - <u>kulowo-misowe (Claudius Peters)</u> - <u>palcowo talerzowe</u> <i>sztyftowo-talerzowe</i> 	materiały miękkie i twarde w przemyśle górniczym, hutniczym, cementowym
	z ruchomym elementem rozdrabniającym i ruchomą komorą roboczą	<ul style="list-style-type: none"> - <u>pierscieniowo-bębnowe (Horomill)</u> 	materiały miękkie i twarde w przemyśle górniczym, hutniczym, cementowym
	udarowe z roboczymi elementami rozdrabniającymi z dostarczeniem energii przez te elementy	<ul style="list-style-type: none"> - <u>młyny wirnikowe (koloidalne)</u> - dyspergatory - ugniatarki 	mielenie materiałów bardzo drobnych i koloidalnych, rozdrabnianie agregatów utworzonych z cząstek miękkich materiałów, rozcieranie past z tworzyw sztucznych, rozdrabnianie i ugniatanie materiałów plastycznych
	strumieniowe (udarowe) bez mechanicznych elementów z dostarczeniem energii przez gazowe medium robocze	<ul style="list-style-type: none"> - <u>strumieniowe ze sprężoną parą wodną lub powietrzem (przeciwną, spiralne, owalno-rurowe, z płynnym złożem, z tarczą udarową)</u> 	materiały twarde i miękkie, drobne i grube, przemysł górniczy, hutniczy, cementowy

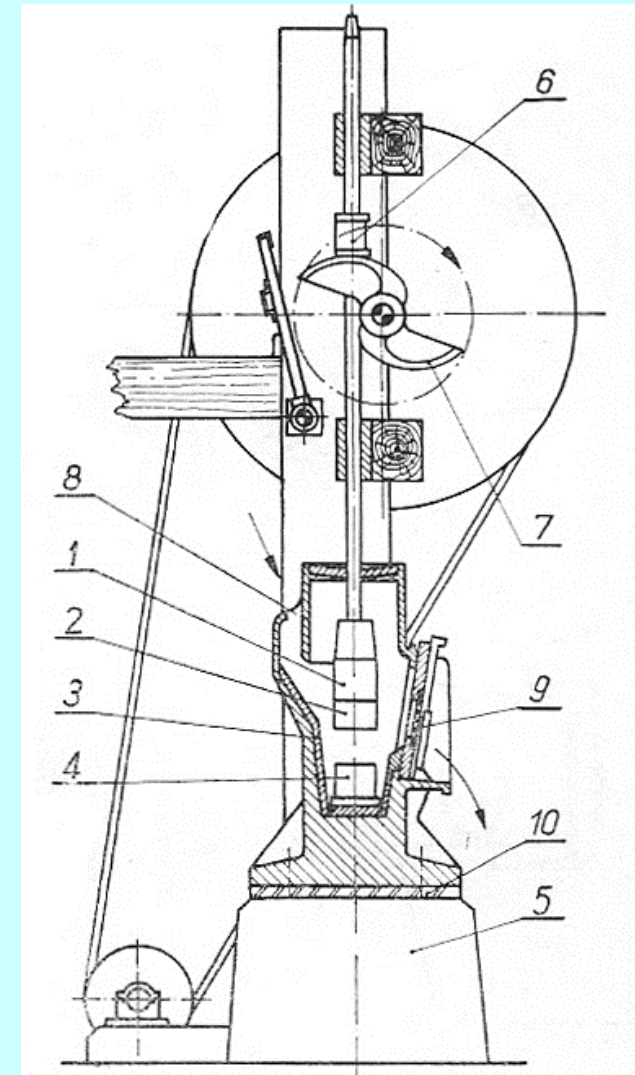
Przegląd maszyn stosowanych do rozdrabniania „wczoraj, dziś i jutro” (4 kategorie)

- I. Już nie są stosowane lub stosowane coraz rzadziej,**
- II. Nie były lub do dziś nie znalazły zastosowania na większą skalę technologiczną,**
- III. Były, są stosowane i nadal się rozwijają,**
- IV. Dopiero powstają lub powstały w ostatnich latach.**

I. Krusząki, które już nie są stosowane lub stosowane coraz rzadziej

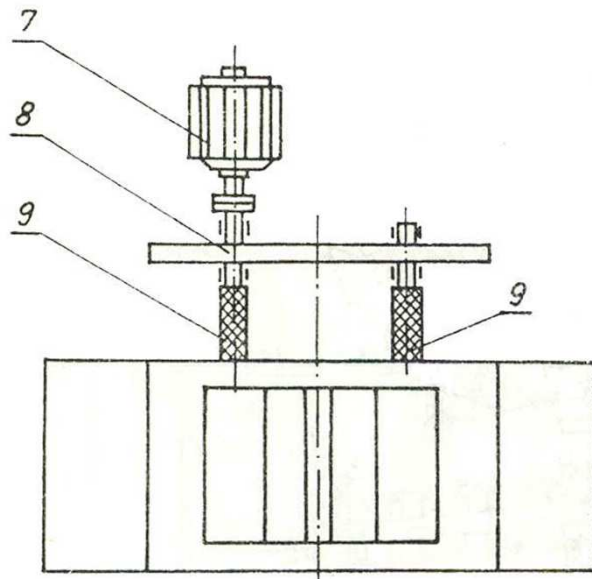
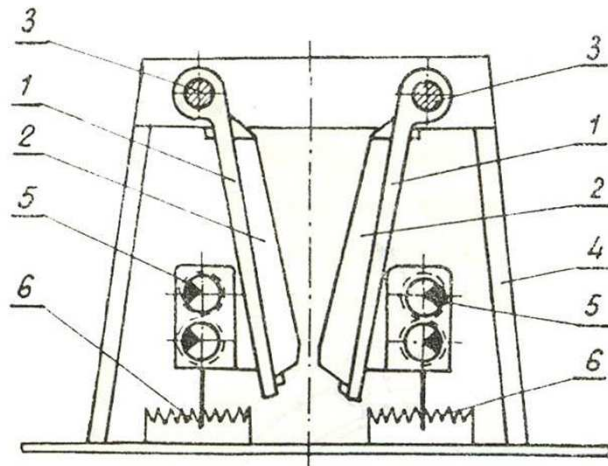


Kruszarka igłowa (Blaschke, 1972)



Kruszarka stęporowa (Blaschke, 1972)

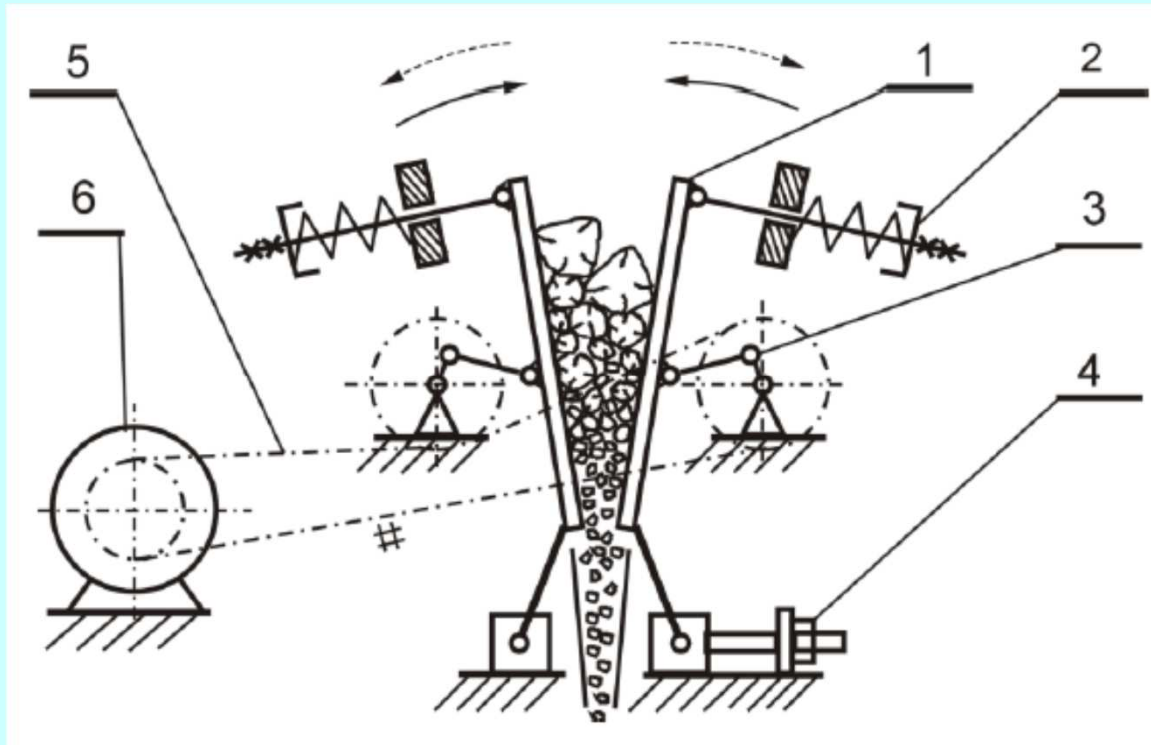
II. Kruszaraki, które nie były lub do dziś nie znalazły zastosowania na większą skalę technologiczną



Schemat kruszarki szczękowej wibracyjnej (Banaszewski 1974)

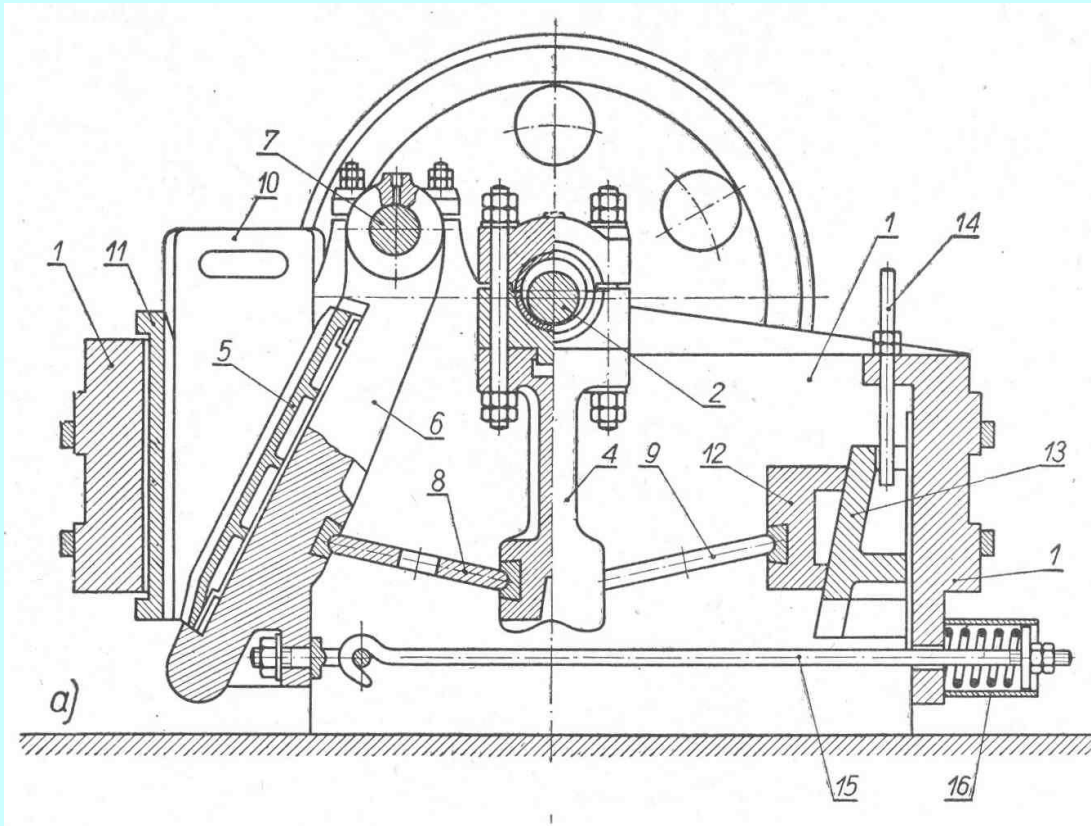
Zastosowanie:
materiały dość łatwo rozdrabialne (ruda siarkowa, sól kamienna, piaskowiec)

II. Kruszarki, które nie były lub do dziś nie znalazły zastosowania na większą skalę technologiczną

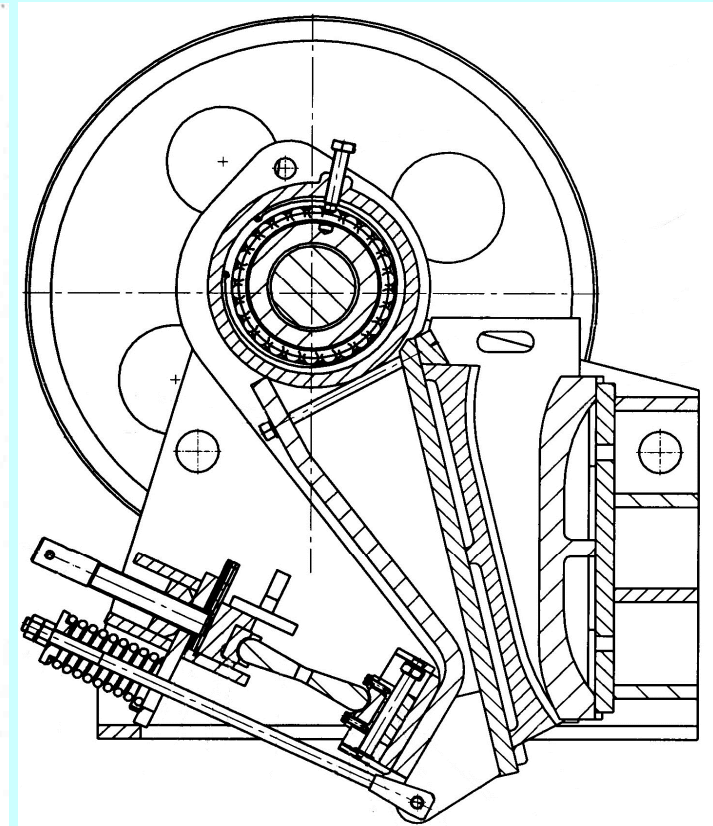


Schemat mechaniczny wibracyjnej kruszarki
szczękowej typu KW 40/1 (Sidor, 1996)

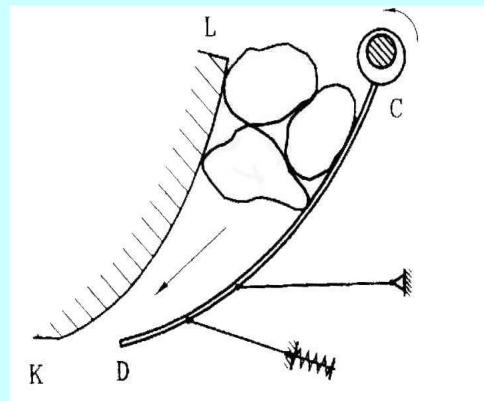
III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



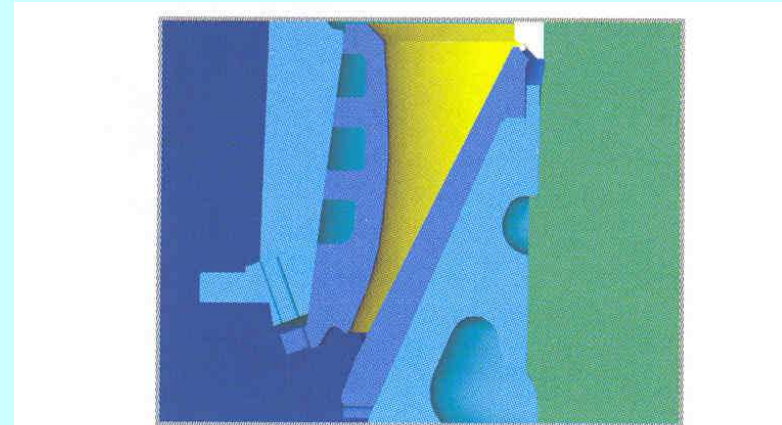
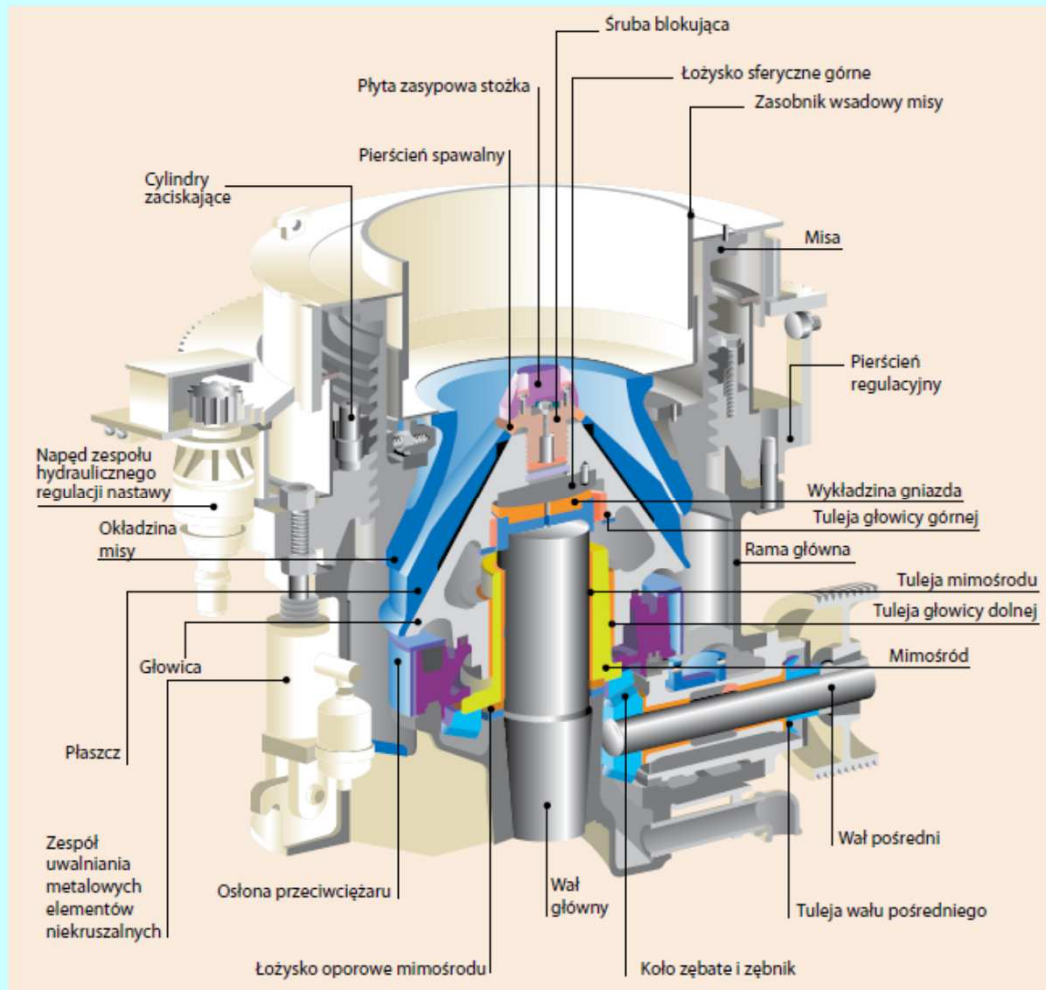
**Kruszarka szczękowa
dwurozporowa**



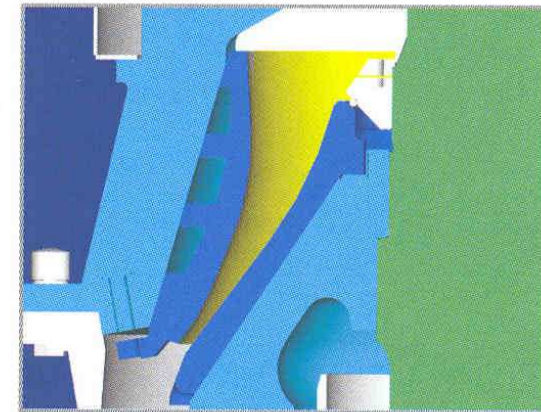
**Kruszarka szczękowa
jednorozporowa**



III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



Przestrzeń kruszenia kruszarki drugiego stopnia

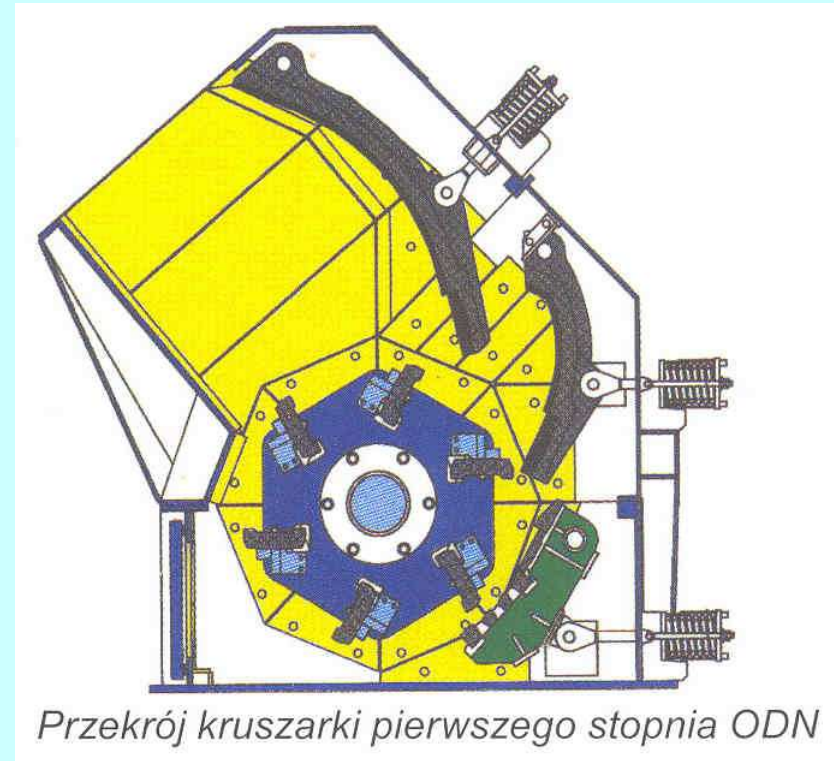
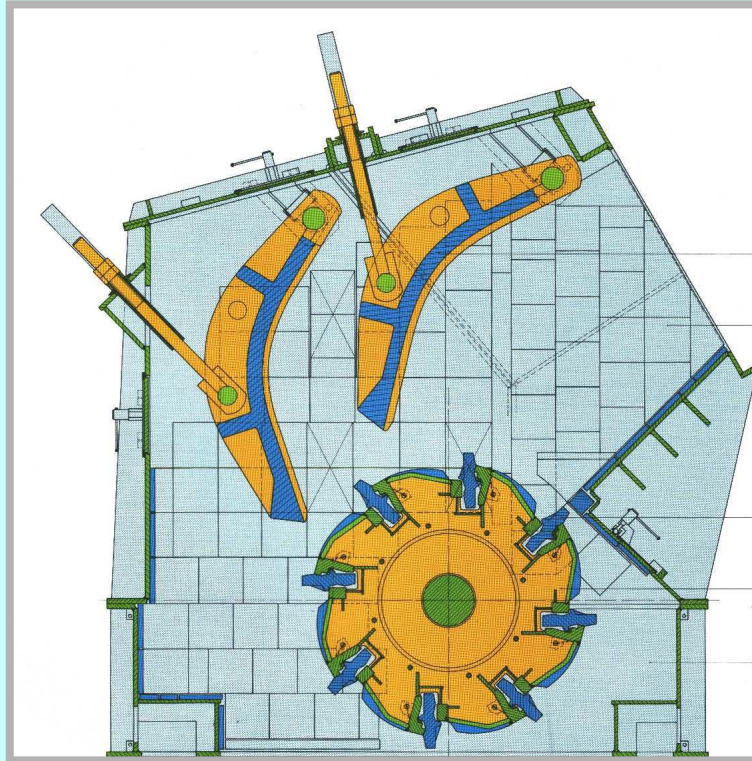


Przestrzeń kruszenia kruszarki trzeciego stopnia

**Kruszarka stożkowa serii Nordberg HP
(Metso Minerals)**

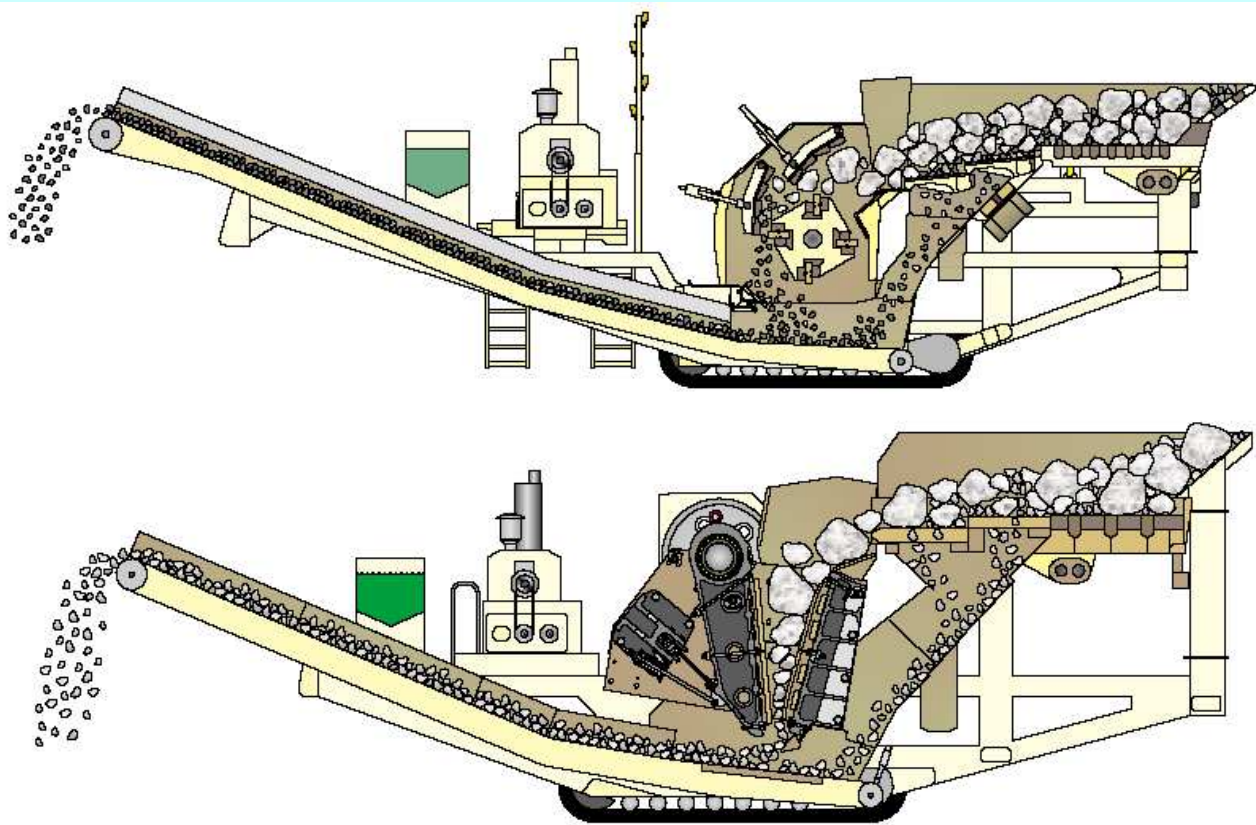
PSP Engineering a.s.

III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



PSP Engineering a.s.

III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



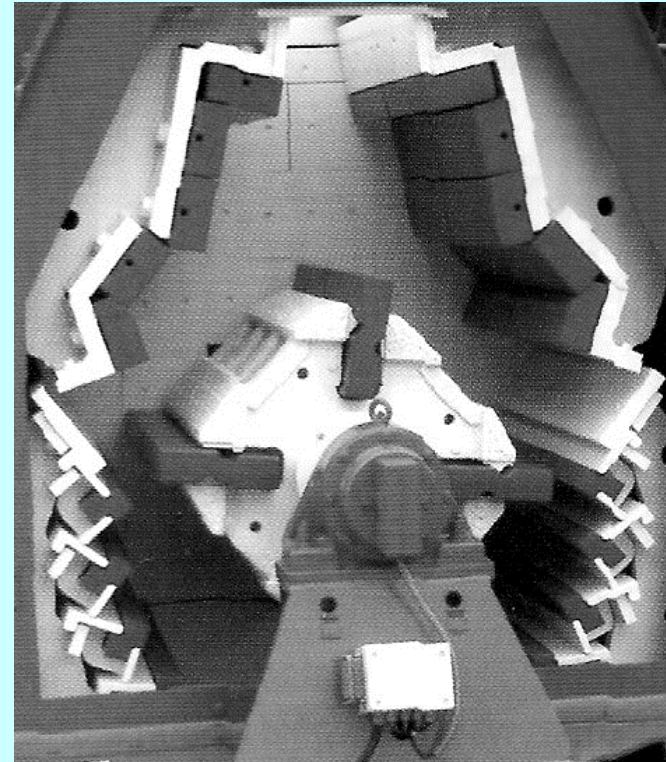
SBM Mineral Processing GmbH

III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



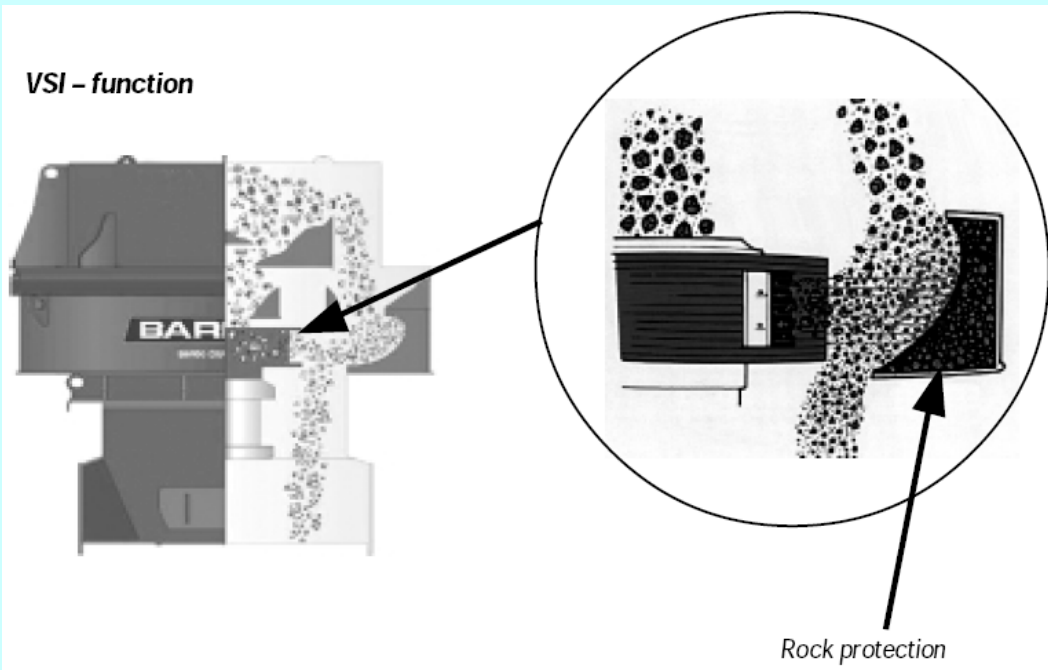
Kruszarka młotkowa KMR 2145

PSP Engineering a.s.



**Kruszarka listwowa (rewersyjna)
Hazemag AP-V**

III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają



III. Kruszarki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają

High Pressure Grinding Rolls HPGR

I generacja – lata 70.

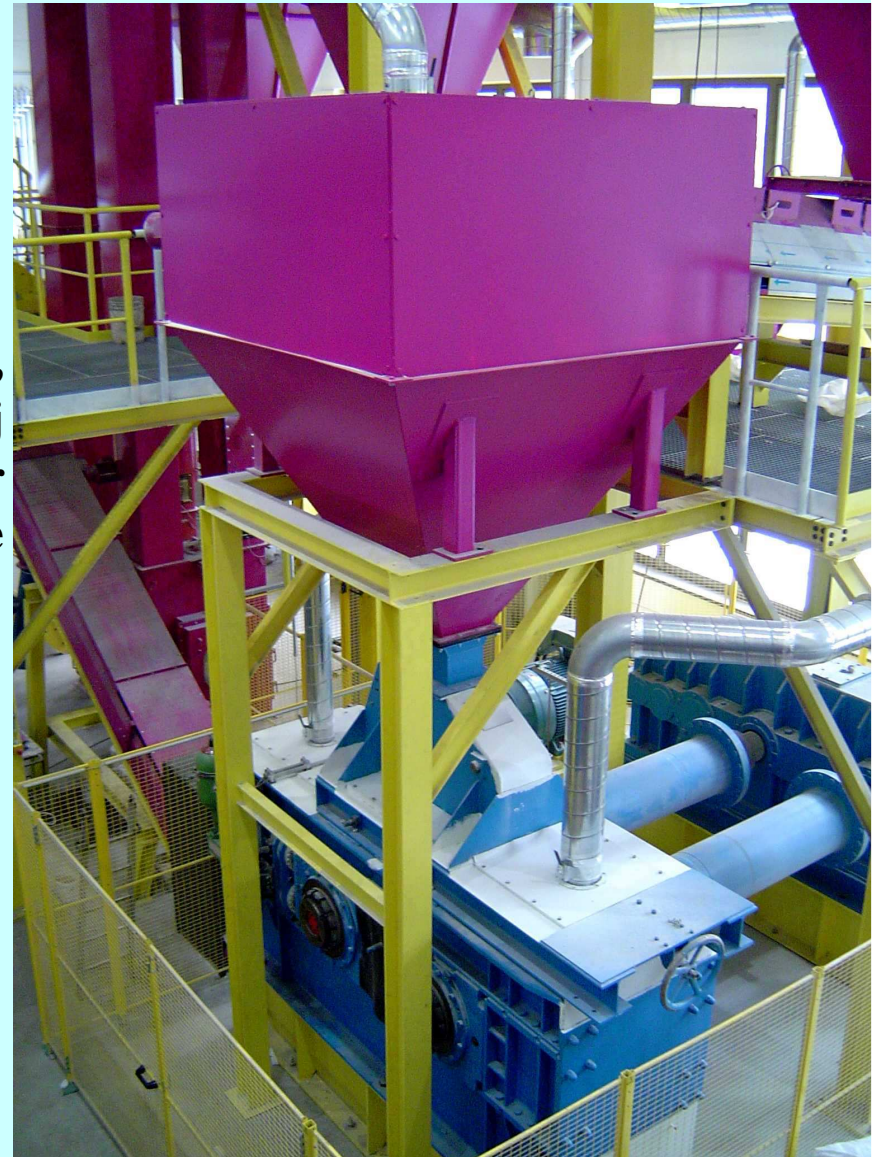
Problemy techniczne: ułożyskowanie walców, szybkie zużywanie się powierzchni roboczej walców w sposób deformujący kształt i wymiar szczeliny sprawiły, że prasy walcowe nie odniosły większego znaczenia praktycznego.

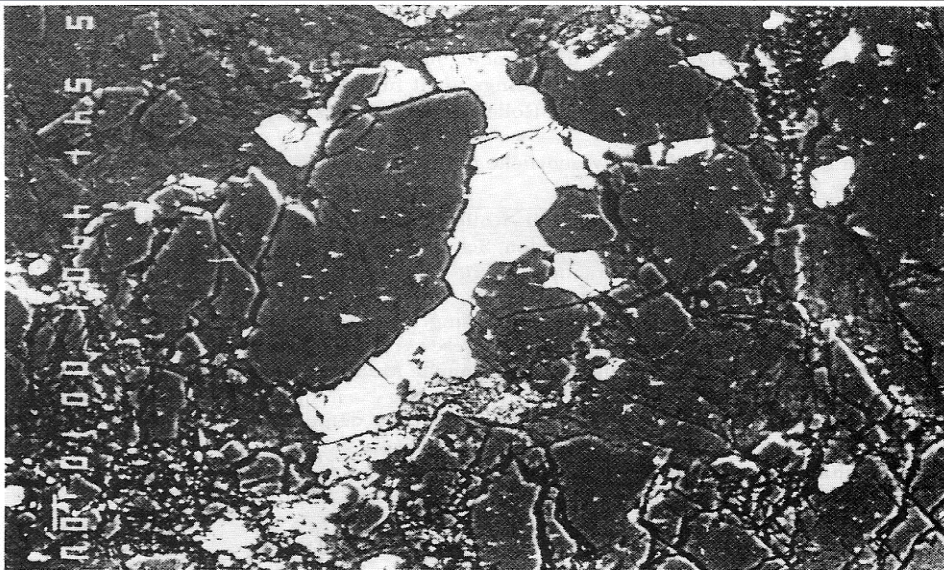
II generacja – lata 80.

(ciśnienie prasowania 40-100 MPa)

III generacja – lata 90.

(>200 MPa)

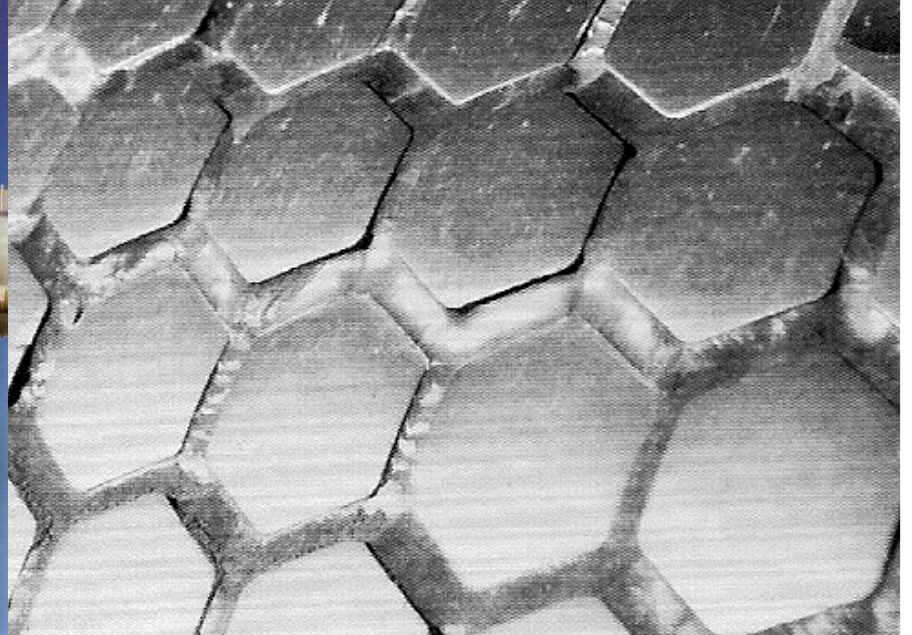
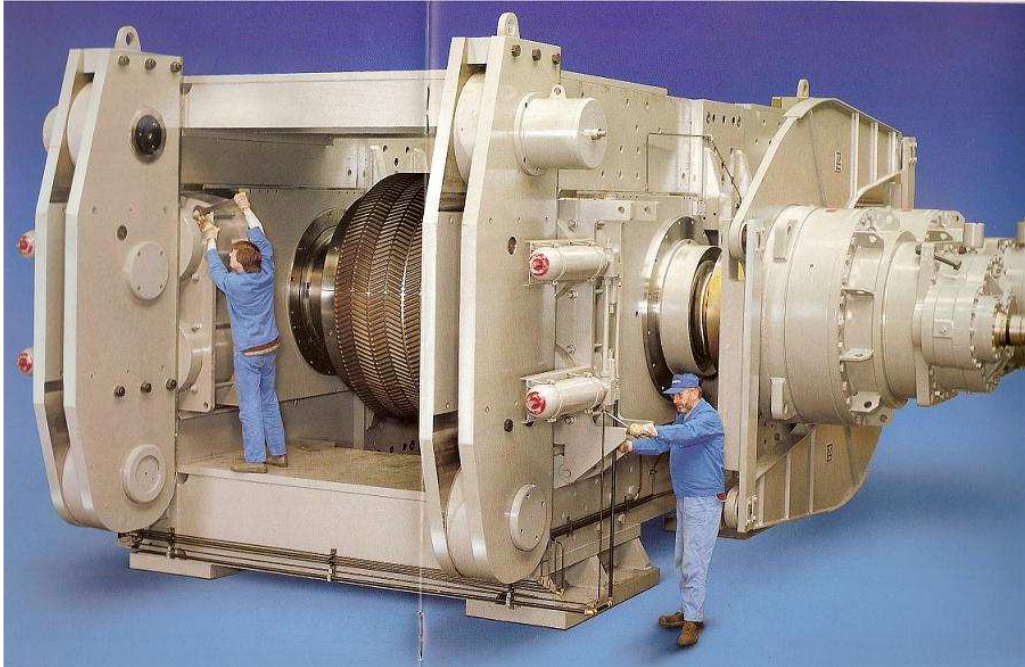
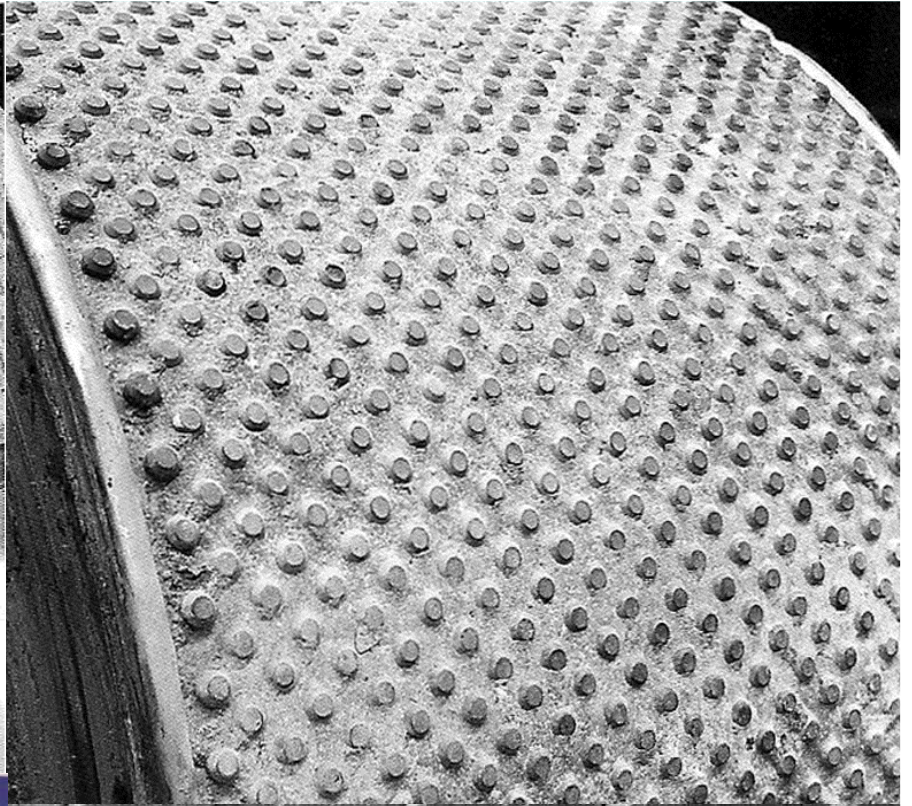
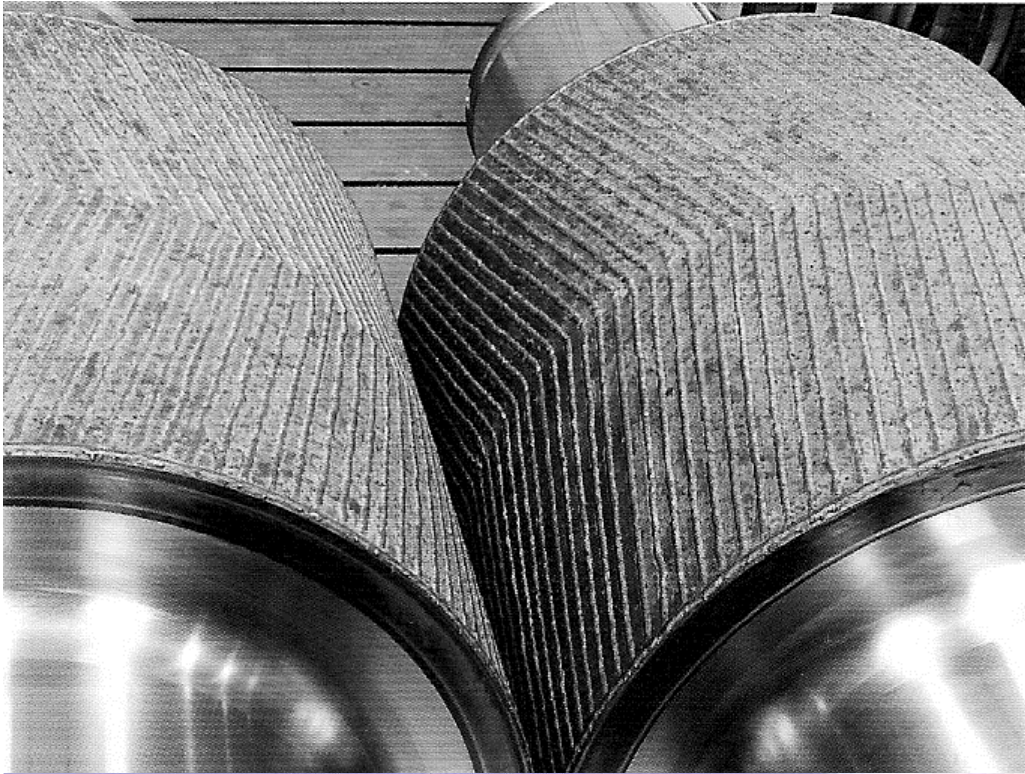




Elektronenmikroskopische (REM)-Abbildung eines Kupfererzes

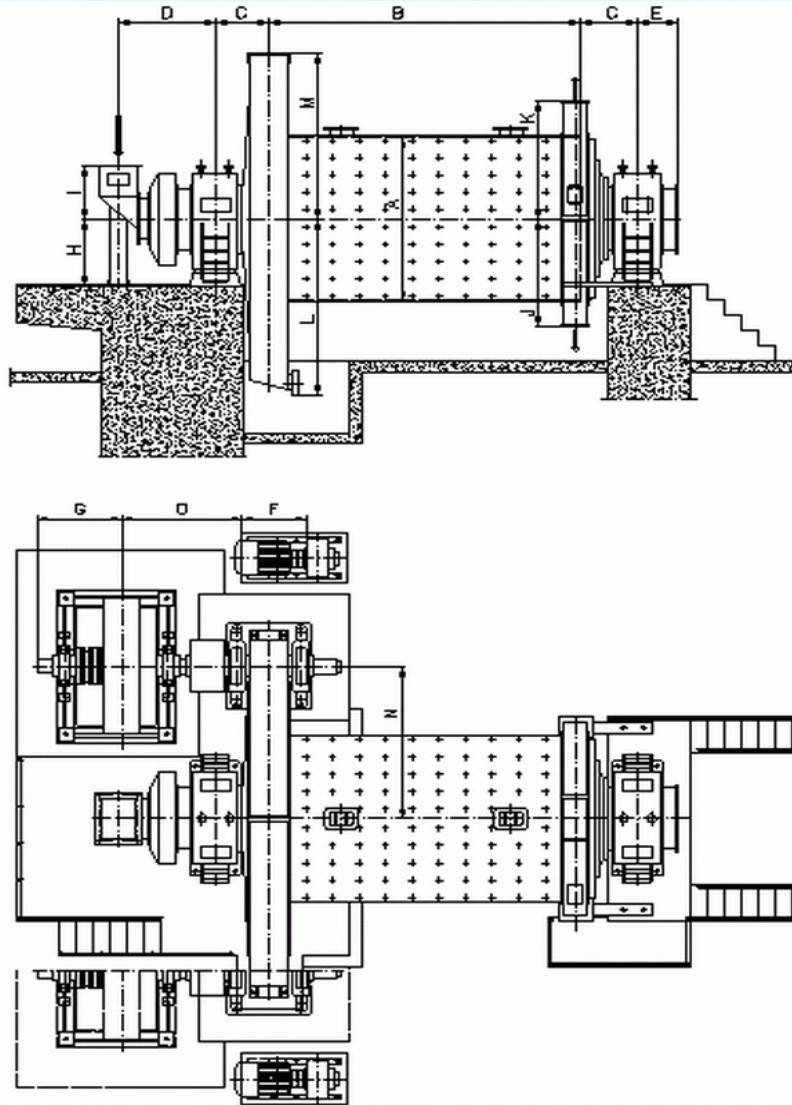
Zastosowanie HPGR:

- rozdrabnianie wapienia,
- klinkieru cementowego,
- rud metali.



III. Urządzenia, które były, są stosowane i nadal się rozwijają

Młyny bębnowe



III. Kruszątki, które były, są stosowane i nadal się rozwijają

Młyn Vertimills (Metso Minerals)

Młyn Vertimill ma nadawę o uziarnieniu do 6 mm, a produktem mielenia są ziarna od 74 mikrometrów do 2 mikrometrów.

Zalety młyna pionowego w porównaniu z młynem bębnowym:

- wyższa wydajność
- mniejsze zużycie energii
- mniejszy stopień przemielenia
- mniejszy hałas – poniżej 85 dB
- mniejsze koszty
- mniej części ruchomych
- niższe koszty instalacji
- mniejsza powierzchnia zabudowy
- większe bezpieczeństwo podczas pracy



IV. Urządzenia, które dopiero powstają lub powstały w ostatnich latach

Urządzenia służące dziedzinie mikro- i nanotechnologii, np. młyny kawitacyjne lub dyspergujące, do produkcji proszków o wymiarach rzędu mikrometru i nanometru.

Urządzenie dyspergujące i deaglomerujące firmy Hielscher

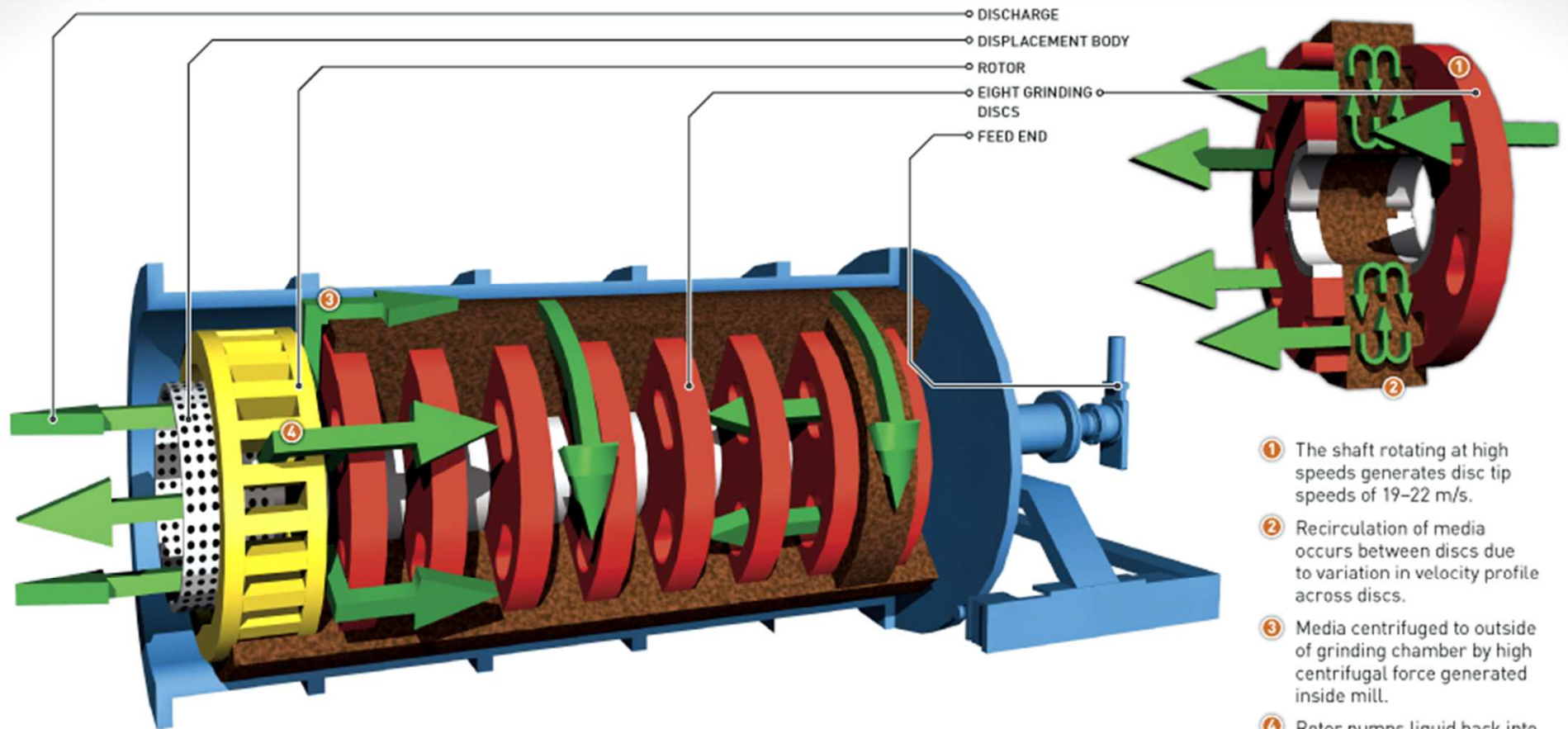
Impulsowy młyn elektromagnetyczny firmy ZWG S.A.

IV. Urządzenia, które dopiero powstają lub powstały w ostatnich latach

Xstrata Technology - IsaMill

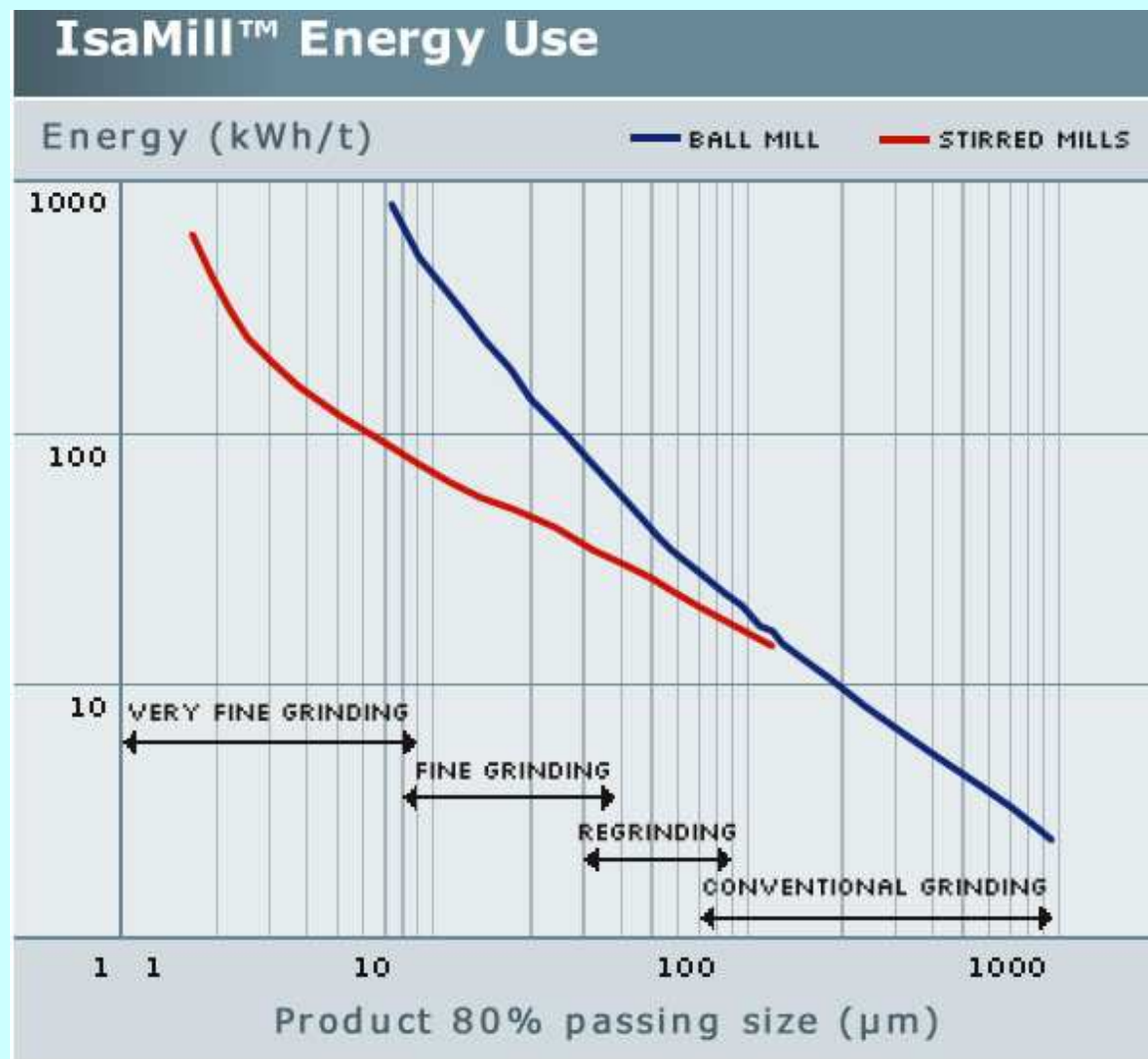


IV. Urządzenia, które dopiero powstają lub powstały w ostatnich latach



IsaMill™ grinding mechanism

IV. Urządzenia, które dopiero powstają lub powstały w ostatnich latach



Podsumowanie

Największe zmiany, które zachodzą w procesach rozdrabniania determinowane są coraz szybszym rozwojem doskonalszych maszyn przeróbczych, a więc jest to podejście techniczno-ekonomiczne związane z optymalizacją procesów przeróbki surowców mineralnych.

Przyszłościowe innowacyjne technologie zmierzają do budowy inteligentnych bezobsługowych zakładów przeróbki, sterowanych zdalnie w odległych miejscach o kilka tysięcy kilometrów od biura i coraz głębszych kopalniach.

Dziękuję za uwagę!