

**KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe  
INSTYTUT METALI NIEŻELAZNYCH**

**MATERIAŁY  
XI MIĘDZYNARODOWEJ KONFERENCJI  
PRZERÓBKI RUD METALI NIEŻELAZNYCH**

**ICNOP 2015**

**PROCEEDINGS OF THE  
XI<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON NON-FERROUS ORE PROCESSING**



**WROCLAW 2015**

KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe

INSTYTUT METALI NIEŻELAZNYCH

**MATERIAŁY  
XI MIĘDZYNARODOWEJ KONFERENCJI  
PRZERÓBKI RUD METALI NIEŻELAZNYCH**

**ICNOP'2015**

**PROCEEDINGS OF THE  
XI<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE  
ON NON-FERROUS ORE PROCESSING**



KGHM  
**Cuprum**

KGHM CUPRUM sp. z o.o. –  
Centrum Badawczo-Rozwojowe

Wrocław, 2015

ICNOP'2015, Trzebieszowice, 27-29.05.2015

## O uwarunkowaniach badawczo-rozwojowych koncepcji wysoko-energetycznego rozdrabniania rud miedzi

Tomasz Szolc, Robert Konowrocki i Maciej Michajłow

*Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk,  
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa, tszolc@ippt.pan.pl*

### **Streszczenie**

*W pracy zostaną przedstawione podstawowe zalety oraz problemy związane z możliwością wykorzystania wysoko-energetycznej, udarowej techniki mielenia rud miedzi w porównaniu z metodami stosowanymi dotychczas w warunkach O/ZWR KGHM – Polska Miedź S.A. Na tym tle będą omówione wymagania techniczne i eksploatacyjne stawiane szybkoobrotowym młynom typu wentylatorowego przewidzianym do mielenia udarowego w trybie „na sucho”. W szczególności zostaną przedyskutowane zjawiska dynamiczne towarzyszące działaniu tego typu urządzeń oraz opisane nowoczesne metody obliczeniowe pozwalające na przewidzenie ich pozytywnych i negatywnych skutków na efektywność pracy oraz na trwałość i niezawodność najbardziej odpowiedzialnych elementów roboczych. Do tych zjawisk należy przede wszystkim zaliczyć drgania mechaniczne wymuszane wysoce dynamicznym oddziaływaniem nadawy na koło bijakowe. Są to drgania giętne linii wałów układu napędu młyna oraz drgania skrętne, które mogą być wzajemnie ze sobą sprzężone. Ponadto, te ostatnie znacząco oddziałują na pracę napędowego silnika elektrycznego wpływając na stateczność i płynność jego działania oraz na zużycie energii elektrycznej. Do jakościowego i ilościowego badania tych zjawisk będą zastosowane strukturalne modele mechaniczne wykorzystujące metodę elementów skończonych i podejście hybrydowe oraz tzw. obwodowy model napięciowy silnika elektrycznego. Za pomocą tych narzędzi obliczeniowych przeprowadzone zostaną symulacje komputerowe działania szybkoobrotowego młyna typu wentylatorowego. Na podstawie wyników tych symulacji będzie możliwym określenie efektywności i energochłonności działania urządzenia oraz przewidzenie trwałości zmęczeniowej i trybologicznej najbardziej obciążonych i odpowiedzialnych jego elementów.*

**Słowa kluczowe:** *wysoko-energetyczne rozdrabnianie rudy miedzi, młyn wentylatorowy, analiza dynamiczna*

## On Research&Development-aspects of the highly-energetic concept for the copper ore comminution

### **Abstract**

*In the paper there will be presented fundamental advantages and problems connected with an application possibility of the highly-energetic, impact-type technique of the copper ore comminution in a comparison with the analogous methods used till present by the ore processing plants belonging to the company KGHM – Polska Miedź S.A. In this aspect the main technical and exploitation requirements expected from the high-speed beater mills for impact-type copper ore comminution in a dry mode shall be considered. In particular, there will be discussed dynamic phenomena associated with an operation of such devices as well as modern computational methods enabling us an expectation of their positive and negative consequences for an operational effectiveness, durability and robustness of the most responsible working elements. The mechanical vibrations can be regarded here as one of the most detrimental phenomenon caused by the highly dynamic interaction between the beater-wheel and the comminuted ore. First of all, these are bending and torsional vibrations of the beater-*

## XIth International Conference on Non-Ferrous Ore Processing

*wheel shaft line, which can be mutually coupled with each other. Moreover, the latter significantly interact with an operation of the driving electric motor, influencing its stability and working quality as well as an energy consumption. For qualitative and quantitative investigations of these dynamic phenomena the advanced structural finite element and hybrid mechanical models and the circuit voltage model of the electric motor shall be applied. By means of these computational tools several computer simulations of the high-speed copper ore beater mill operation are going to be carried out. Basing on the obtained computational results a determination of the beater mill operational effectiveness and efficiency as well as an expectation of fatigue and tribological durability of the most responsible working elements will be possible.*

**Key words:** *copper ore highly-energetic comminution, beater mill, dynamic analysis*

### Wstęp

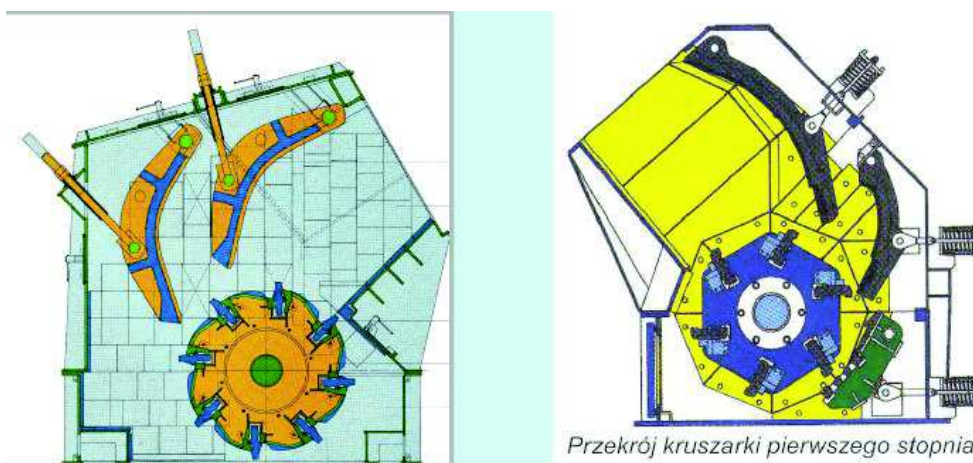
Stosowana obecnie technologia rozdrabniania rudy miedzi w O/ZWR KGHM Polska Miedź S.A. polega na kruszeniu udarowym kruszarkami młotkowymi i następnie na 3-stopniowym mieleniu na mokro mielnikowymi młynami bębnowymi, tj. kulowymi, prętowymi i cylpepsowymi. Jak wynika ze statystyk opracowanych przez KGHM, cały proces rozdrabniania rudy do potrzeb flotacji jest niezwykle energochłonny, pochłaniający od 40 do 50% energii wykorzystywanej w całym procesie produkcji koncentratu miedzi. Przyczyną jest stosunkowo niska wydajność i duża energochłonność pracujących w O/ZWR KGHM wspomnianych powyżej przestarzałych, wolnobieżnych młynów. Przez to, w tych zakładach należy stosować odpowiednio dużą ich liczbę, tak by nie dochodziło do hamowania pracy wysokowydajnych, szybkoobrotowych kruszarek udarowych. Wiąże się to ze zbyt dużym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. W związku z powyższym, przeprowadzono analizę możliwości rozwoju technologii wysokoefektywnego rozdrabniania rud miedzi oraz porównano ich przewidywane parametry techniczne i wskaźniki ekonomiczne z analogicznymi wynikami charakteryzującymi aktualnie stosowane rozwiązania. W tym celu m. in. w [1] dokonano przeglądu innych perspektywicznych technik mielenia za pomocą młynów produkowanych przez renomowanych na świecie wykonawców. Są to przede wszystkim młyny rolowo-misowe firmy Loesche, młyny typu VERTIMILL, młyny typu IsaMill, młyny wibracyjne oraz prasy walcowe. Pomimo obiecujących parametrów technicznych podawanych przez producentów tych urządzeń, istotna poprawa ich efektywności w warunkach O/ZWR KGHM nie wydaje się oczywista. Uzasadnienie tej tezy wynika z przedstawionego w [1] zestawienia podstawowych własności i wybranych parametrów technicznych tych urządzeń. W związku z powyższym, zbadanie możliwości zastosowania udarowej techniki rozdrabniania rud miedzi za pomocą szybkoobrotowych młynów typu wentylatorowego wdaje się niezwykle zasadne i dlatego stanowi przedmiot niniejszej pracy.

## 1. Urządzenia do udarowego rozdrabniania surowca

### 1.1 Wirnikowe kruszarki udarowe

Należy podkreślić, że w trzech O/ZWR KGHM wstępny etap rozdrabniania urobku wydobywanego z kopalń, tj. kruszenie, jest realizowany przez szybkoobrotowe kruszarki młotkowe w sposób udarowy. Taka metoda rozdrabniania charakteryzuje się dużą wydajnością. Jak wynika z informacji literaturowych [2], wydajność nowocze-

nych kruszarek młotkowych wynosi 2500 t/h, a kruszarek listwowych (bijakowych) dochodzi do 2200 t/h. Zasadę działania typowej kruszarki młotkowej oraz listwowej schematycznie ilustruje rysunek 1. W kruszarkach młotkowych rozdrabnianie odbywa się głównie poprzez uderzenie ziaren nadawy młotkami wahliwymi zamocowanymi na obracającym się wirniku o ściany odbojowe i ruszty, zaś w listwowych przez kilkukrotne uderzenie ziaren sztywnymi listwami zamocowanymi również na obracającym się wirniku o płyty odbojowe. Dodatkowo w kruszarkach młotkowych rozdrabnianie materiału następuje w dolnej części komory wskutek ścinania i tarcia młotków o materiał znajdujący się na ruszcie.



Rys. 1. Schemat działania kruszarek udarowych – listwowej i młotkowej

Wspólną cechą procesów rozdrabniania w kruszarkach wirnikowych jest wyraźna przewaga dominującego działania rozdrabniającego – udaru, co pociąga za sobą dużą selektywność rozdrabniania. Następuje zatem rozdrabnianie materiałów jednorodnych petrograficznie wzdłuż powierzchni naturalnych lub nabytych we wcześniejszych stadiach rozdrabniania osłabień spójności, a także rozdrabnianie w pierwszej kolejności ziaren spękanych, zwietrzałych itp. Według [3-5], własności te stwarzają wielokierunkowe możliwości jego wykorzystania przede wszystkim jako:

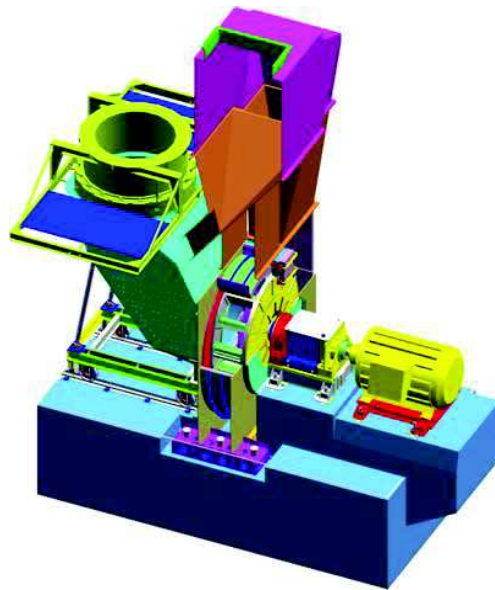
1. wzbogacanie kruszyw mineralnych poprzez oczyszczenie ziaren z przyklejonych zanieczyszczeń ilastych podczas udaru (rozpylenie iłu, gliny),
2. homogenizacja materiałów ziarnistych polegająca na przeprowadzeniu do klas drobniejszych wyłącznie ziaren zwietrzałych, spękanych, o nieregularnych kształtach; zjawisko to wykorzystuje się w przypadku materiałów budowlanych w procesie uszlachetniania,
3. wzbogacanie wstępne surowca polegające na odsiewaniu bezpośrednio po procesie rozdrabniania klas ziarnowych dostatecznie wzbogaconych lub zubożonych w składniki użyteczne (to zjawisko dotyczy rud).

Kruszarki młotkowe mogą być przeznaczone do jedno-stadialnego kruszenia miękkich i średnio-twardych surowców, np. wapienia, dolomitu, gipsu, węgla kamiennego oraz różnych surowców z zawartością kleistych glin i iłów. Wydajność kruszarek udarowych listwowych jest uzależniona od prędkości obwodowej listew, liczby listew, wysokości listew udarowych, długości wirnika, szerokości szczeliny pomiędzy

płytami odbojowymi a listwami, kształtu i kąta nachylenia okładzin, konstrukcji zasypu i wysokości, z której podawana jest nadawa, rodzaju ścian odbojowych (pełne lub rusztowe) i właściwości fizykomechanicznych rozdrabnianej nadawy, [6]. Czynniki tych nie udało się objąć w pełni użytecznymi dla praktyki wzorami obliczeniowymi, dlatego też wydajność kruszarek określana jest doświadczalnie, [3,4]. Wielkość maksymalnych ziaren produktu rozdrabniania zależy głównie od szerokości szczeliny pomiędzy płytami a listwami i prędkości obrotowej wirnika. Tym samym istnieje zależność pomiędzy stopniem rozdrobnienia a wydajnością.

## 1.2 Wirnikowe młyny udarowe

Ze względu na fakt, iż granica pomiędzy kruszeniem a mieleniem surowca jest umowna, a wirnikowe kruszarki udarowe są stosowane obecnie do wszystkich stadiów kruszenia oraz mielenia, istnieją młyny działające udarowo, w sposób analogiczny jak ww. szybkoobrotowe kruszarki. Są to młyny bijakowe, które podobnie jak kruszarki młotkowe, posiadają dodatkowo zainstalowane bijaki w postaci młotków przegubowo mocowanych na tarczy. Młyny szybkoobrotowe mielą surowiec uderzając jego cząstki podczas wpadania do komory roboczej przez kanał zasypowy.

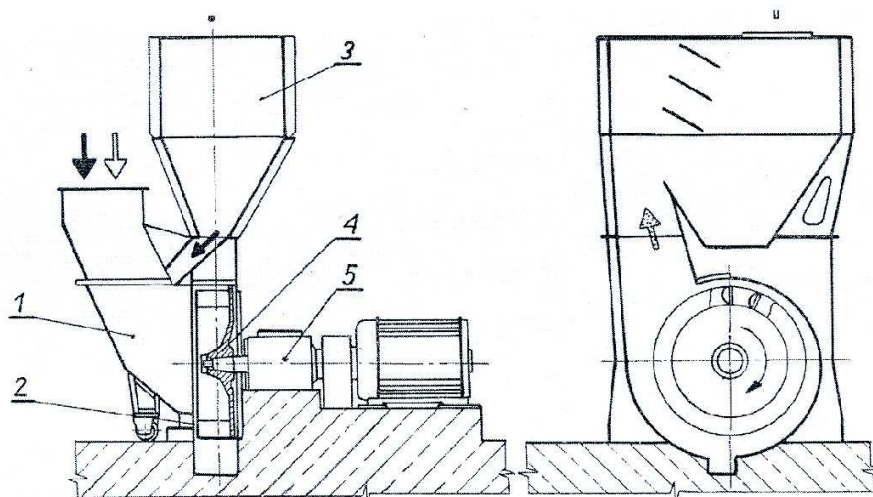


Rys. 2. Młyn wentylatorowy

Do udarowych młynów szybkoobrotowych należą młyny wentylatorowe o nominalnej prędkości obrotowej 500÷1500 obr/min, w których surowiec jest rozbijany bijakami stanowiącymi łopatki wirnika. Wirnik młyna wentylatorowego wytwarza tu jednocześnie odpowiednie ciśnienie do pokonania oporów przepływu czynnika suszącego i nośnego, przez co staje się on wentylatorem powietrza pierwotnego, w którym wyłożone blachami pancernymi łopatki wentylatora stanowią jednocześnie elementy mielące. W tym urządzeniu skutek szybkoobrotowego ruchu koła bijakowego wykorzystywany jest efekt wentylacyjny pozwalający na aerodynamiczne wyprowadza-

nie produktu mielenia z komory roboczej. Młyny wentylatorowe mogą mieć znaczną wydajność dochodzącą do 250 Mg/h. Dotychczas są powszechnie stosowane do rozdrabniania węgla brunatnego i kamiennego o dobrej podatności przemiałowej. Widok typowego młyna wentylatorowego przedstawiono na rysunku 2.

Klasyczny młyn wentylatorowy jest urządzeniem do mielenia, suszenia, odsiewania i transportu mieszanki (zawiesiny) pyłowo-gazowej. Taki młyn pokazany schematycznie na rysunku 2 składa się z tzw. drzwi (1), komory roboczej (2), kanału spalin z zasuwą (klapą) i odsiewacza (3). Wewnątrz komory roboczej obraca się koło bijakowe (4) zamontowane w sposób wysięgnikowy na końcu wału podpartego zazwyczaj na dwóch łożyskach baryłkowych smarowanych zanurzeniowo i obiegowo olejem w tzw. skrzyni łożyskowej (5). Napęd wału koła bijakowego silnikiem elektrycznym jest przekazywany najczęściej bezpośrednio, tj. bezprzekładniowo, za pomocą sprzęgła podatnego. Powierzchnie elementów roboczych koła bijakowego i komory roboczej szczególnie narażone na obciążenia udarowe, trybologiczne i erozję są pokryte odpowiednimi opancerzeniami.



Rys. 3. Schemat działania młyna wentylatorowego

Młyny wentylatorowe są wyposażone w uproszczone separatory wytrącające grube ziarna na zasadzie zmiany kierunku strumienia. Przemiał uzyskiwany wynosi dla węgla kamiennych  $R88 = 25\div 35\%$ , zaś dla węgla brunatnych  $R88 = 30\div 60\%$ . Dyspozycyjność tego typu młynów jest dość wysoka, aczkolwiek podobnie jak udarowe kruszarki są one bardzo czułe na zużycie elementów mielących (tzn. łopatek bijakowych wirnika i wykładzin obwodowych komory mielenia), co przy końcu okresu między-remontowego prowadzi do znacznego zmniejszenia wentylacji i wydajności maksymalnej. Omawiane młyny posiadają bardzo dobre właściwości suszarnicze, mogą być stosowane do przemiału surowców wilgotnych i charakteryzują się ponadto prostotą wykonania. Indywidualna instalacja młynowa wyposażona w młyny wentylatorowe składa się z minimalnej liczby elementów, co zapewnia najniższe koszty inwestycyjne.

Młyny wentylatorowe mają szereg zalet. Oto najważniejsze z nich:

## XIth International Conference on Non-Ferrous Ore Processing

1. ogólnie wysoka wydajność (dochodząca do 250 Mg/h w przypadku dużych młynów węglowych) możliwa do dalszego powiększenia za pomocą wzrostu wartości prędkości obrotowej koła bijakowego i optymalnego sterowania wentylacją,
2. niska energochłonność (n. p. w przypadku młynów węglowych samo rozdrabnianie pochłania  $\sim 5\div 8$  kWh/Mg),
3. brak niepotrzebnych strat energii powodowanych wzajemnym, bezpośrednim ocieraniem się mielników, jak to ma miejsce w młynach kulowych, prętowych czy cylpepsowych stosowanych tradycyjnie,
4. prostota konstrukcji,
5. stosunkowo niskie koszty wykonania,
6. łatwość obsługi,
7. wysoka dyspozycyjność ruchowa.

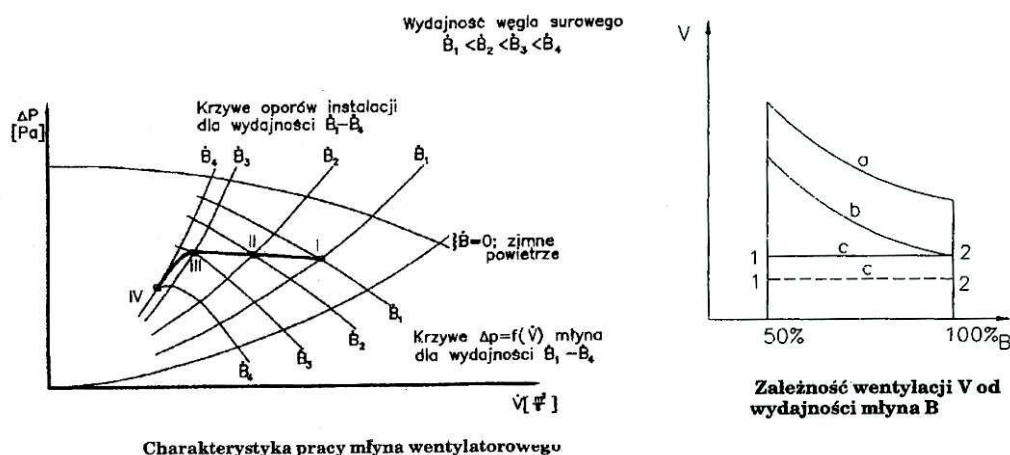
Biorąc pod uwagę wymienione powyżej zalety młynów wentylatorowych na tle własności tradycyjnych młynów mielnikowych stosowanych dotychczas w O/ZWR KGHM, wydaje się być wysoce zasadnym zbadanie możliwości ich wykorzystania do rozdrabniania rudy miedzi. Należy w tym miejscu podkreślić, iż pod pojęciem klasycznego młyna wentylatorowego rozumiane jest urządzenie przeznaczone do udarowego rozdrabniania szybko wirującym kołem bijakowym węgla kamiennego lub brunatnego i wykorzystujące jednocześnie efekt wentylacji do zasilania wyprodukowaną zawiesziną powietrzno-pyłową kotłów energetycznych w elektrowniach ciepłych. W omawianym przypadku zastosowania do przeróbki rudy miedzi przewiduje się jedynie wykorzystanie udarowego rozdrabniania nadawy szybko wirującym kołem bijakowym oraz wywoływane przepływem powietrza aerodynamiczne opróżnianie komory roboczej młyna przez produkt o odpowiednio wysokim stopniu uziarnienia. Następnie, zamiast wdmuchiwanie zawiesziny powietrzno-pyłowej węgla do kotła, wydmuchiwana z komory roboczej zawieszina powietrzna ziaren rozdrobnionej rudy miedzi ma być poddawana klasyfikacji i oddzieleniu od powietrza w celu przygotowania produktu mielenia do domielenia na morko lub bezpośrednio do flotacji. W związku z powyższym, adoptowany młyn do udarowego rozdrabniania rudy miedzi może być dalej nazywany „młynem typu wentylatorowego” lub „młynem bijakowym”, w przeciwieństwie do kruszarek bijakowych, w których opróżnianie komory roboczej i klasyfikacja następują najczęściej w sposób grawitacyjny. W przypadku zastosowania młyna typu wentylatorowego do rozdrabniania rudy miedzi można uzyskać dodatkowe korzyści wynikające z charakteru działania takiego urządzenia. Są to:

1. mała fluktuacja momentu obciążenia maszyny napędzanej, szczególnie w przypadku przewidzianego do przeróbki rudy miedzi wzmocnionego, cięższego koła bijakowego, którego powiększony moment bezwładności wpływa na jego charakter działania do postaci koła zamachowego, dzięki czemu uzyskiwana jest znikoma fluktuacja momentu obciążenia silnika wpływając tym na obniżenie zużycia energii w ustalonych warunkach pracy,
2. korzystny sposób rozdrabniania z punktu widzenia procesu flotacji (udarowy charakter procesu powoduje naturalne oddzielenie się siarczków od skały płońskiej, uzyskiwane są dość jednolite, regularne kształty i wymiary ziaren produktu).



Niemniej jednak, z tym zamierzeniem wiąże się kilka podstawowych problemów, które należałoby rozwiązać w celu urzeczywistnienia pomysłu zbudowania prototypu szybkoobrotowego młyna typu wentylatorowego do udarowego rozdrabniania rudy miedzi. Najważniejsze z tych problemów to:

1. mała ilość dostępnych informacji teoretycznych dotyczących mechanizmu rozdrabniania i jego wpływu na parametry mielenia; brak odpowiednich teoretycznych modeli analitycznych i komputerowych pozwalających na nowoczesne wspomaganie procesów konstruowania, które są dotychczas realizowane na podstawie znanych z dostępnej literatury, n. p. w [7-9], charakterystyk uzyskiwanych doświadczalnie i pokazanych na rysunku 4.
2. stosunkowo szybkie zużywanie się elementów roboczych młyna wraz ze wzrostem prędkości działania bijaków,
3. intensywny przepływ zawiesiny powietrznej wraz ze wzrostem prędkości działania bijaków,
4. niezbadane zdolności stopnia rozdrobnienia kosztem wydajności poniżej 0.5 mm,
5. trudny do przewidzenia proces klasyfikacji połączony z oddzielaniem produktu od strumienia powietrza.



Rys. 4. Uzyskane doświadczalnie charakterystyki pracy młyna wentylatorowego, [8]

Rozwiązanie tych problemów wymaga zastosowania nowoczesnych metod modelowania komputerowego, zaawansowanych technologii materiałowych oraz prowadzenia żmudnych badań eksperymentalnych. Zrealizowanie takiego zamierzenia może być dokonane w ramach ukierunkowanego projektu technologicznego przez specjalistów z odpowiednich dziedzin nauki i techniki drogą ścisłej współpracy wykorzystującej efekt synergii doświadczeń. W celu przystosowania młyna typu wentylatorowego do wysokoenergetycznego rozdrabniania rudy miedzi należałoby wykonać szereg zadań o charakterze badawczo-rozwojowym, konstrukcyjnym i technologicznym. Oto najważniejsze z nich:

1. Zbadanie procesu przeróbki rud miedzi o różnych składach litograficznych za pomocą zaawansowanych modeli komputerowych mechanizmu rozdrabniania ciała stałego oraz przepływu zawiesiny powietrznej rozdrabnianych cząstek na-

## XIth International Conference on Non-Ferrous Ore Processing

dawy w komorze roboczej. Wówczas, dla różnych kształtów geometrycznych i wymiarów narzędzi roboczych młyna oraz dla różnych prędkości obwodowych wieńca bijakowego i różnych stopniach dławienia dolotu można byłoby opracować zależności teoretyczne pomiędzy wydajnością młyna a spadkiem wentylacji i wzrostem ciśnienia całkowitego nośnika z uwzględnieniem takich parametrów młyna wentylatorowego jak: wysokość transportowania, całkowita różnica ciśnień (sprężenie), strata ciśnienia przewodowego, stopień napełnienia koła bijakowego, czy wskaźnik sprężania. Dzięki temu zaistniałaby możliwość skonfrontowania uzyskanych obliczeniowo charakterystyk teoretycznych z analogicznymi charakterystykami otrzymywanymi dotychczas w sposób doświadczalny i przedstawionych na przykład w pracach [7-9].

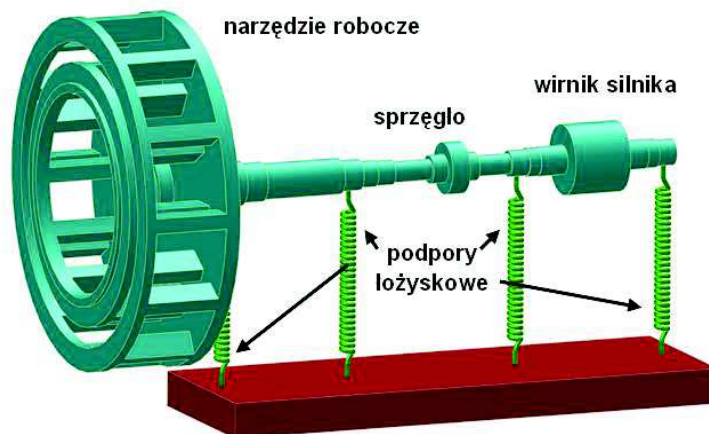
2. Dokonanie wnikliwej analizy wytrzymałościowej i dynamicznej konstrukcji młyna typu wentylatorowego, w szczególności przy prędkościach obwodowych wieńca koła bijakowego przekraczających typową wartość 80 m/s - nawet do ok. 150 m/s, realizowanych przy prędkościach obrotowych wału dochodzących do 3000 obr/min i stanowiących źródło niebezpiecznych drgań mechanicznych.
3. Wprowadzenie wysokoodpornych udarowo i trybologicznie nowoczesnych materiałów kompozytowych do pokrywania powierzchni bijaków, płyt odbojowych i ścian komory roboczej młyna w celu zwiększenia jego trwałości eksploatacyjnej i wydłużenia okresów między-naprawczych.

### **2. Metodyka badania zjawisk dynamicznych towarzyszących działaniu młyna wysokoenergetycznego**

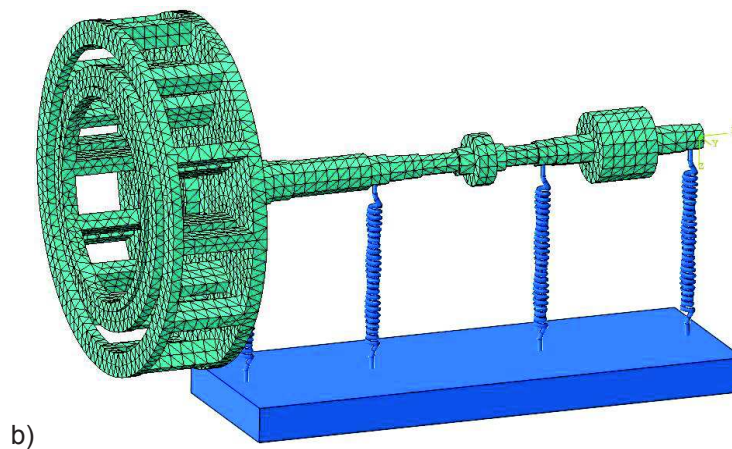
Badania teoretyczne dotyczące działania szybkoobrotowego młyna typu wentylatorowego do rozdrabniania rudy miedzi oraz umożliwiające zapewnienie należytej wytrzymałości szczególnie odpowiedzialnych jego komponentów muszą być przeprowadzone za pomocą zaawansowanych, strukturalnych modeli mechanicznych obejmujących szybko wirujące narzędzia robocze młyna, cały układ ich napędu wraz z silnikiem elektrycznym, sprzęgłami i in. oraz elementy obudowy i posadowienia maszyny. Ze względu na przewidywany wysoce dynamiczny charakter działania takiego młyna, przy wykorzystaniu tych modeli będzie badany nie tylko podstawowy ruch roboczy urządzenia, lecz również wszelkie możliwe ruchy pasożytnicze w postaci drgań skrętnych, giętnych, osiowych i translacyjnych. W związku z tym, modele te są zbudowane z odkształcalnych skrętnie, giętnie i wzdłużnie elementów skończonych oraz brył sztywnych i oscylatorów lepko-bezwładnościowo-sprężystych połączonych wzajemnie zgodnie ze strukturą rzeczywistego obiektu. Za pomocą belkowych elementów skończonych poddanych dyskretyzacji uzyskany zostanie klasyczny jednowymiarowy model metodą elementów skończonych (MES), [10]. Natomiast pozostawienie naturalnego, ciągłego rozkładu własności fizycznych tych elementów w postaci tzw. lepko-sprężystych makro-elementów ciągłych poprowadzi do analogicznego dyskretno-ciągłego modelu hybrydowego o identycznej strukturze oraz parametrach fizycznych i geometrycznych jak wspomniany powyżej model MES, [11,12]. Istotny wpływ na własności statyczne i dynamiczne rozpatrywanych wariantów układu napędu młyna wentylatorowego ma podparcie komponentów wirujących za pomocą łożysk. Zastosowane w tym celu łożyska toczne są reprezento-

wane w obu omawianych modelach przez oscylatory dynamiczne o dwóch stopniach swobody każde, dzięki którym zostanie uwzględnione lepko-bezwładnościowo-sprężyste oddziaływanie elementów tocznych tych łożysk oraz ich obudów. Natomiast do wyznaczenia parametrów dynamicznych posadowienia całego układu, jak również własności dynamicznych wybranych elementów roboczych młyna, na przykład koła bijakowego, trzeba będzie wykorzystać trójwymiarowe modelowanie metodą elementów skończonych, tak by następnie metodami redukcji modalnej móc wprowadzić odpowiednio zastępcze sztywności, współczynniki tłumienia i parametry bezwładnościowe do obydwu wzajemnie analogicznych wirnikowych modeli belkowych układu napędu, tj. do jednowymiarowego modelu MES oraz do modelu hybrydowego. Przykładowe strukturalne modele młyna wentylatorowego przyjęte według powyższych założeń przedstawia rysunek 5.

Podstawowymi obciążeniami zewnętrznymi działającymi na młyn są moment napędowy generowany przez silnik, siły i momenty obciążające koło bijakowe młyna oraz wszelkiego rodzaju efekty dynamiczne powodowane resztkowymi niewyważeniami statycznymi i dynamicznymi elementów szybko-wirujących, błędami montażowymi niewspółosiowości kolejnych odcinków wałów połączonych wzajemnie sprzęgłami oraz efekty wywoływane siłami żyroskopowymi, kontaktowymi i in. W przypadku napędu młyna silnikiem asynchronicznym zostanie wykorzystany jego model obwodowy w postaci równań Park'a, za pomocą którego będzie generowany elektromagnetyczny moment napędowy, [13-15]. Moment oporowy działania młyna zostanie wyznaczany na podstawie chwilowych wartości globalnych sił powstających wskutek rozdrabniania urobku przez szybko-wirujące koło bijakowe, sił aerodynamicznych oraz sił tarcia. Te siły wywołują zarówno sam moment oporowy równoważony momentem napędowym silnika jak i oddziaływania poprzeczne i wzdłużne w stosunku do osi obrotu bijaków, wymuszając tym samym drgania giętne i osiowe całego koła bijakowego sprzężone z całym układem jego napędu. Składowe zmienne tych sił wzbudzają również drgania skrętne całego układu, które w naturalny sposób nakładają się na podstawowy ruch roboczy urządzenia.



a)

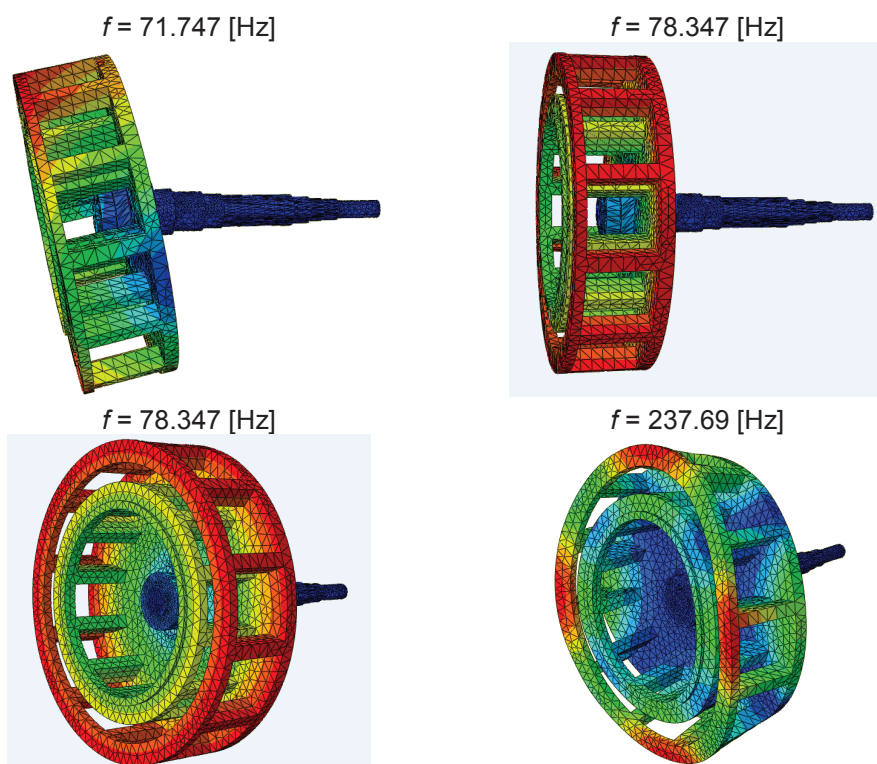


Rys. 5. Strukturalne modele wirnikowej młyna wentylatorowego: jednowymiarowy – belkowy (a), trójwymiarowy zbudowany metodą elementów skończonych (b)

Ze względu na złożony charakter przyłożenia sił powstających wskutek rozdrabniania urobku do bijaków młyna wentylatorowego drgania skrętne mogą być znacząco sprzężone z drganiami giętymi, osiowymi a nawet z drganiami translacyjnymi obudowy i posadowienia całego obiektu. W związku z powyższym, niezbędnym staje się przeprowadzenie pełnej analizy dynamicznej i wytrzymałościowej badanego obiektu w postaci symulacji komputerowych działania maszyny obejmujących ruch podstawowy wraz ze sprzężonymi wzajemnie drganiami giętno-skrętno-wzdłużnymi i translacyjnymi oraz badań jakościowych w formie analiz drgań własnych, funkcji odpowiedzi częstotliwościowych i analiz stateczności. Wyniki tych obliczeń pozwolą przewidzieć ekstremalne wartości statycznych i dynamicznych sił i momentów przenoszonych przez poszczególne elementy urządzenia, ocenę ich zużycia trybologicznego, trwałości zmęczeniowej, umożliwią wyznaczanie reakcji dynamicznych łożysk, określenie warunków powstawania rezonansów, efektów parametrycznych i in. oraz, co niezwykle istotne, dadzą możliwość oszacowania poboru energii potrzebnej do zasilania młyna wentylatorowego w zależności od masy rozdrabnianego urobku w jednostce czasu. Ze względu na założony szybkoobrotowy charakter pracy proponowanego młyna, szczególna uwaga musi być skupiona na niekorzystnych efektach dynamicznych wywoływanych niemożliwymi do uniknięcia resztkowymi niewyważeniami elementów wirujących oraz błędami montażowymi niewspółosiowości wałów i łożysk, które jak wynika z dostępnej literatury, stanowią przyczynę istotnych problemów eksploatacyjnych istniejących młynów wentylatorowych. Należy podkreślić, iż należyta zgodność odpowiadających sobie wyników obliczeń uzyskanych za pomocą obydwu wymienionych powyżej modeli charakteryzujących się identyczną strukturą i parametrami, lecz różniącymi się nawzajem opisami matematycznymi wykazuje teoretyczną poprawność tych wyników oraz podnosi ich wiarygodność z punktu widzenia zastosowań praktycznych. Ponadto, przewiduje się dokonanie oceny zużycia materiałowego powierzchni koła bijakowego pracującego w szczególnie niekorzystnych trybologicznie warunkach. Rezultaty tych analiz pozwolą na pozyskanie niezbędnej wiedzy umożliwiającej wybór najkorzystniejszego wariantu dzia-

łania bijaków, ich kształtu geometrycznego, proporcji wymiarowych, kątów natarcia i innych ważnych parametrów.

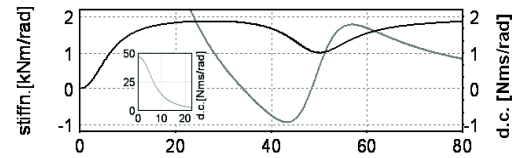
W pracy dokonano przykładowej wstępnej analizy drgań własnych trójwymiarowego modelu MES koła bijakowego typowego młyna wentylatorowego wraz z jego wałem napędowym. Na rysunku 6 pokazano trzy podstawowe formy własne tego elementu i przyporządkowane im wartości częstości drgań własnych. Pierwszą formę o częstości 71.747 Hz charakteryzuje obrót wieńca koła bijakowego względem osi prostopadłej do osi obrotu wału napędowego. Drugą formę o częstości 78.347 Hz cechuje obrót zewnętrznego wieńca koła bijakowego względem osi obrotu wału napędowego. Należy zauważyć, że pierwsza forma własna jest związana drganiami giętymi układu wałów napędowych młyna, a forma druga jest analogicznie sprzężona z drganiami skrętnymi tego układu. Na podstawie przewidywanych parametrów konstrukcyjnych i prędkości obrotowych wału planowanego młyna wentylatorowego do rozdrabniania rudy miedzi można stwierdzić stosunkowo duże prawdopodobieństwo powstawania niebezpiecznych rezonansów z tymi dwoma pierwszymi postaciami drgań, których wartości liczbowe częstości własnych mogą zawierać się w zakresie pasma częstości wymuszeń zewnętrznych wywołanych działaniem urządzenia. Natomiast trzecia forma własna o dużej częstości 237.69 Hz nie wykazuje cech sprzężenia z drganiami wału oraz wydaje się mieć mniejsze szanse niebezpiecznego wzbudzenia rezonansowego.



Rys. 6. Podstawowe postacie drgań własnych trójwymiarowego modelu koła bijakowego

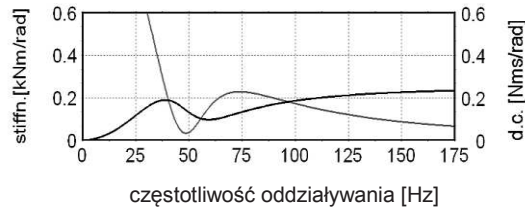
Charakterystyka statyczna „twarda”

Niestabilna charakterystyka tłumienia magnet.



Charakterystyka statyczna „mięka”

Stabilna charakterystyka tłumienia magnet.



prędkość obrotowa [obr/s]

częstotliwość oddziaływania [Hz]

Rys. 7. Charakterystyki statyczne i dynamiczne silników asynchronicznych, [15]

Planowany wysokoenergetyczny młyn wentylatorowy do rozdrabniania rudy miedzi będzie mógł być napędzany silnikiem asynchronicznym o statycznej charakterystyce „twardej” lub „miękkiej”, jak pokazano na rysunku 7. Na podstawie wstępnie przeprowadzonej analizy dynamicznej oddziaływania elektromechanicznego układu napędu młyna z różnymi silnikami asynchronicznymi można stwierdzić, iż „twarda” charakterystyka może w określonym zakresie częstotliwości wymuszenia wprowadzać ujemne tłumienie magnetyczne (zaznaczone linią szarą) powodujące niestabilną pracę całego urządzenia, czego nie wykazuje charakterystyka „mięka”.

### 3. Podsumowanie

W pracy przedstawiono zalety wysokoenergetycznego, udarowego rozdrabniania rud miedzi w warunkach O/ZWR KGHM – Polska Miedź S.A. za pomocą młynów typu wentylatorowego oraz przewidywane problemy techniczno-eksploatacyjne związane z zastosowaniem tego typu technologii. W celu przewidzenia pozytywnych i negatywnych skutków jej wprowadzenia do procesu wzbogacania zaproponowano wykorzystanie zaawansowanych, nowoczesnych technik obliczeniowych do badania obciążeń dynamicznych, zużycia trybologicznego i poboru energii elektrycznej. Wyniki przeprowadzonych analiz i symulacji pozwolą na ocenę faktycznej efektywności takiej technologii oraz na uniknięcie wielu efektów uciążliwych i niepożądanych.

### Bibliografia

- [1] Szolc T., 2014, Analiza możliwości rozwoju technologii wysokoefektywnego rozdrabniania rud miedzi oraz porównanie ich przewidywanych parametrów technicznych i wskaźników ekonomicznych z analogicznymi wynikami charakteryzującymi aktualnie stosowane rozwiązania, Raport wewn. IPPT PAN, Projekt „SynBioTech”, zadanie nr 8.
- [2] Marktfocus Brecher, 2010, Aufbereitungs Technik, Baurverlag BV GMBH, Guetersloh.
- [3] Gawenda T., 2010, Kruszarki wirnikowe udarowe w produkcji kruszyw mineralnych, *Surowce i Maszyny Budowlane*, nr 4.
- [4] Gawenda T., 2013, Wpływ rozdrabniania surowców skalnych w różnych kruszarkach i stadiach kruszenia na jakość kruszyw mineralnych, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, Tom 29, Zeszyt, 53-65, DOI 10.2478/gospo-2013-0002.

## ICNOP'2015, Trzebieszowice, 27-29.05.2015

- [5] Naziemiec Z., Saramak D., 2012, Analiza energochłonności procesów rozdrabniania kruszyw mineralnych, *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej*, Nr 134 *Studia i Materiały* Nr 41, s. 209-220.
- [6] Zawada J., 1998, Wstęp do mechaniki procesów kruszenia, Radom 1998.
- [7] Höffl K., 1985, Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen, VEB Deutscher Verlag für Grundstoff-industrie, Leipzig 1985.
- [8] Bydzicki A., 1998, Rozwój konstrukcji młynów wentylatorowych produkowanych przez Fabrykę Palenisk Mechanicznych S.A. w Mikołowie, Zbiór Referatów III Konferencji Naukowo-Technicznej „Budowa i eksploatacja młynów do przemiału węgla i innych minerałów”, Ustroń-Zawodzie 1998, 179-187.
- [9] Parys R., 2010, Wyniki pomiarów eksploatacyjnych i obserwacji pracy młynów wentylatorowych typu MWk z różnymi odsiewaczami, Proc. of the 11th International Conference on Boiler Technology 2010, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej* 2010, 367-380.
- [10] Kruszewski J. i in., 1984, Metoda elementów skończonych w dynamice konstrukcji, (praca zbiorowa), Wyd. Arkady, Warszawa, 1984.
- [11] Szolc T., 2000, On the discrete-continuous modeling of rotor systems for the analysis of coupled lateral-torsional vibrations, *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 6, Issue 2, s. 135-149.
- [12] Szolc T., 2003, Analiza dynamiczna złożonych, dyskretno-ciągłych układów mechanicznych, *Prace IPPT PAN*, Warszawa 2/2003 (*Praca habilitacyjna*).
- [13] Shi, K. L., Chan, T. F., Wong, Y. K., Ho, L. S., 1999, Modelling and simulation of the three-phase induction motor using SIMULINK, *Int. Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 36, s. 163-172.
- [14] Schiferl R. F., Ong C. M., 1983, Six-phase synchronous machine with AC and DC stator connections. Part I: Equivalent circuit representation and steady-state analysis, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS- 102, No. 8, s. 2685-2693.
- [15] Szolc T., Konowrocki R., Michajłow M., Pręgowska A., 2014, An investigation of the dynamic electromechanical coupling effects in machine drive systems driven by asynchronous motors, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 49, s. 118–134.

ISBN 978-83-929275-7-0