

MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA DYSKRETNÝCH METOD MODELOWANIA DO SYMULACJI PROCESÓW MECHANICZNEGO URABIANIA I PRZERÓBKII RUD METALI

POSSIBILITIES OF USING THE DISCRETE MODELLING METHODS IN SIMULATION OF MECHANICAL EXTRACTION AND PROCESSING OF METALLIC ORES

Jerzy Rojek¹⁾, Cezary Graczykowski¹⁾, Michał Jakub Marijnissen¹⁾,
Tomasz Szolc¹⁾, Izabella Marczevska¹⁾,

Institut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, Warszawa
e-mail: jrojek@jppt.pan.pl

STRESZCZENIE

Modelowanie i symulacje numeryczne są obecnie nieodłączną częścią projektowania i optymalizacji różnorodnych procesów technologicznych. Zastosowanie metod numerycznych w projektowaniu procesów mechanicznego urabiania i przeróbki rud metali jest w dalszym ciągu stosunkowo niewielkie. Procesy odspajania kawałków skały od calizny i ich rozdrobnienia z zastosowaniem różnego rodzaju maszyn, wiążą się z silnie nieciągłymi zjawiskami zniszczenia materiału i są bardzo trudne do modelowania za pomocą standardowych metod numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych, opartych na ciągłym sformułowaniu zagadnienia mechaniki ciała stałego. Duże możliwości w zastosowaniu do tych procesów ma intensywnie rozwijana w ostatnich latach metoda elementów dyskretnych, w której materiał jest reprezentowany przez liczny zbiór ziaren, oddziałujących między sobą poprzez siły kontaktu. Model ten w sposób naturalny uwzględnia materiał rozdrobniony. Uwzględnienie wiązań kohezyjnych między ziarnami oraz możliwości ich zrywania umożliwia modelowanie inicjacji i propagacji pęknięć w materiale. W niniejszej pracy zostaną przedstawione możliwości wykorzystania metody elementów dyskretnych do symulacji urabiania skał za pomocą noży stożkowych i dysków oraz do symulacji zachowania się materiału w młynie. Sprzężenie metody elementów dyskretnych z modelem przepływu płynu umożliwi modelowanie zawiesiny pyłowej rozdrabnianego materiału.

Słowa kluczowe: modelowanie dyskretne, mechaniczne urabianie, rudy metali

ABSTRACT

Numerical modelling and simulation are an inherent part of design and optimisation of various technological processes. Use of numerical methods for the design of mechanical extraction and processing of metallic ores is still relatively limited. Rock cutting and disintegration are associated with strongly discontinuous material failure and are very difficult for modelling with standard numerical methods such as the finite element method based on continuous formulation of solid mechanics problem. The discrete element method intensively developed in the recent years has a high potential for modelling these processes. In the discrete element method, a material is represented by a large collection of particles interacting with one another by contact forces. This model treats a particulate material in a natural way. Employing cohesive bonds in the contact interaction with possibility of their breakage allows us to model

initiation and propagation of fractures in the material. This work will present possibilities of the discrete element method for simulation of rock cutting with pick and disc cutting tools as well as for simulation of material motion in a mill. These possibilities will be illustrated with own numerical results. Coupling of the discrete element method with a CFD model will allow us to model the material in a mill as a suspension of particles in a fluid.

Key words: discrete modelling, mechanical processing, metallic ores

Wstęp

Modelowanie i symulacja numeryczne są obecnie nieodłączną częścią projektowania i optymalizacji różnorodnych procesów technologicznych. Zastosowanie metod numerycznych w projektowaniu procesów mechanicznego urabiania i przeróbki rud metali jest w dalszym ciągu stosunkowo niewielkie. Procesy odspajania kawałków skały od calizny i ich rozdrobnienia z zastosowaniem różnego rodzaju maszyn wiążą się z silnie nieciągłymi zjawiskami zniszczenia materiału i są bardzo trudne do modelowania za pomocą standardowych metod numerycznych, takich jak metoda elementów skończonych, opartych na ciągłym sformułowaniu zagadnienia mechaniki ciała stałego. Duże możliwości w zastosowaniu do tych procesów ma intensywnie rozwijana w ostatnich latach metoda elementów dyskretnych, w której materiał jest reprezentowany przez liczny zbiór cząstek oddziałujących między sobą poprzez siły kontaktu. Model ten w sposób naturalny uwzględnia materiał rozdrobniony. Uwzględnienie wiązań kohezyjnych między cząstkami oraz możliwości ich zrywania umożliwia modelowanie inicjacji i propagacji pęknięć w materiale.

1. Metoda elementów dyskretnych

Metoda elementów dyskretnych jest typowym przykładem modelowania dyskretnego w mechanice materiałów. W metodzie tej materiał jest reprezentowany przez liczny zbiór sztywnych cząstek/bloków (elementów dyskretnych) oddziałujących między sobą poprzez siły kontaktu. Możliwe jest również uwzględnienie oddziaływania daleko-zasięgowego takiego jak oddziaływanie magnetyczne lub elektrostatyczne. Kształt elementów dyskretnych może być dowolny. W niniejszej pracy zastosowano model wykorzystujący ziarna kuliste. Zaletą stosowania cząstek o takim kształcie jest duża efektywność obliczeniowa. Algorytm metody elementów dyskretnych został zaimplementowany przez pierwszego autora w programie DEMpack [1]. Rysunek 1 przedstawia przykładowy model wykorzystujący metodę elementów dyskretnych.



Rys. 1. Symulacja próby jednoosiowego ściskania próbki skały metodą elementów dyskretnych

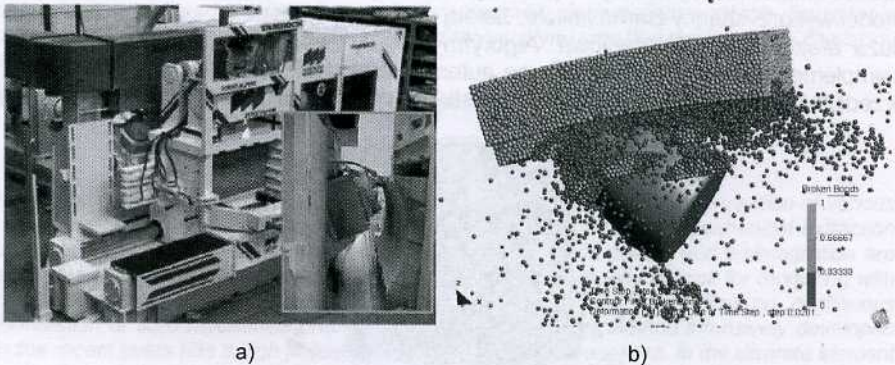
Ruch postępowy i obrotowy sferycznych i cylindrycznych elementów dyskretnych jest opisany za pomocą równań dynamiki ciała sztywnego Newtona-Eulera. Równania ruchu całkowane są względem czasu za pomocą jawnego (ang. explicit) schematu całkowania, który zapewnia dużą efektywność rozwiązania dla pojedynczego kroku. Wadą jego jest konieczność stosowania małych kroków całkowania ze względu na warunkową stabilność schematu całkowania. Mimo to zalety zazwyczaj przeważają nad wadami.

W modelu oddziaływania kontaktowego uwzględnia się różne efekty, w tym sprężystość, tarcie, tłumienie i kohezję. Wprowadzenie kohezji jest konieczne przy modelowaniu skał zwięzłych takich jak rudy miedzi. Możliwość zrywania wiązań kohezyjnych w modelu umożliwia modelowanie inicjacji i propagacji pęknięć materiału w czasie rozdrabniania. Oddziaływanie ziaren rudy po rozdrobnieniu można modelować za pomocą zwykłego modelu kontaktu z tarcieniem, opisanym za pomocą modelu Coulomba. Tłumienie w modelu oddziaływania kontaktowego zapewnia rozpraszanie energii kinetycznej zderzających się cząstek, jak również umożliwia symulację zagadnień quasistatycznych.

Model oddziaływania kontaktowego w metodzie elementów skończonych odgrywa rolę mikromechanicznego modelu materiału [2]. Przyjmując odpowiedni model oddziaływania elementów dyskretnych i dobierając odpowiednie parametry modelu można uzyskać pożądane makroskopowe zachowanie się materiału. Kalibracja modelu oddziaływania kontaktowego jest kluczowym zagadnieniem w metodzie elementów dyskretnych.

2. Symulacja procesów urabiania mechanicznego

Metoda elementów dyskretnych jest bardzo dobrym narzędziem do modelowania i symulacji urabiania skał, co potwierdzają wyniki uzyskane we wcześniejszych pracach badawczych [3]. Rysunek 2a przedstawia symulację urabiania skały nożem głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego. Model numeryczny został opracowany we współpracy z firmą Sandvik Mining and Construction w Zeltweg, Austria, w której laboratorium przeprowadzono badania doświadczalne (rys. 2b).

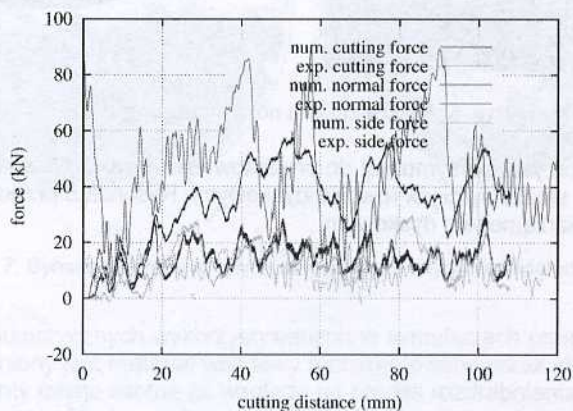


Rys. 2. Badania urabiania mechanicznego skał: a) stanowisko badawcze w laboratorium firmy Sandvik (Zeltweg, Austria), b) symulacja numeryczna

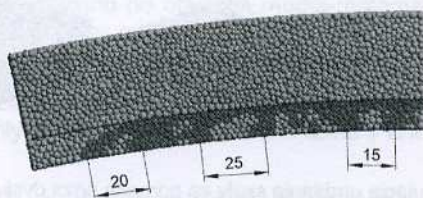
Analiza numeryczna umożliwia badanie wpływu właściwości mechanicznych skały oraz parametrów procesu na efektywność procesu urabiania. Pozwala m.in. uzyskać następujące informacje:

- przebiegi czasowe sił oddziaływania narzędzia i skały (rys. 3),
- rozkład wielkości odłamków skalnych w urobku (rys. 4),
- charakterystyka zużycia narzędzi urabiających (rys. 5),
- energochłonność urabiania.

Wyniki obliczeń charakteryzują się dobrą zgodnością z wynikami badań doświadczalnych (rys. 2-4).



Rys. 3. Porównanie numerycznych i doświadczalnych sił oporu w trakcie urabiania

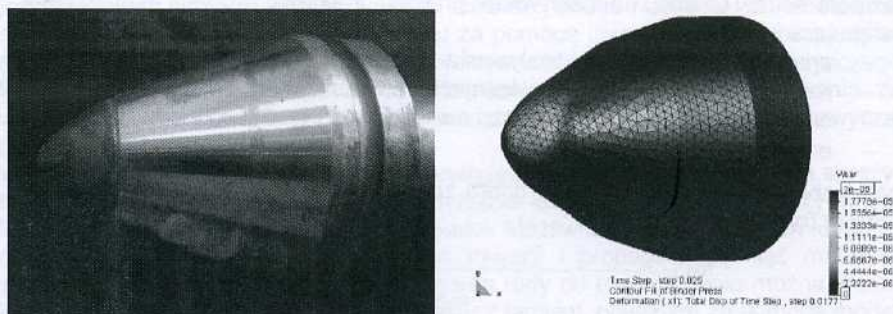


a)



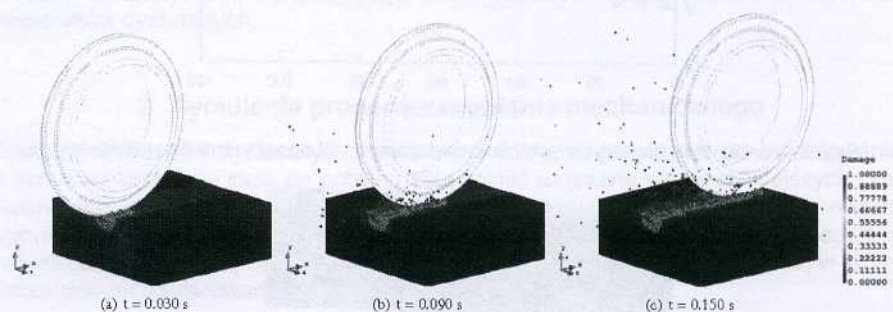
b)

Rys. 4. Porównanie wielkości odłamków wióra: a) analiza, b) eksperyment



Rys. 5. Analiza zużycia noża urabiającego

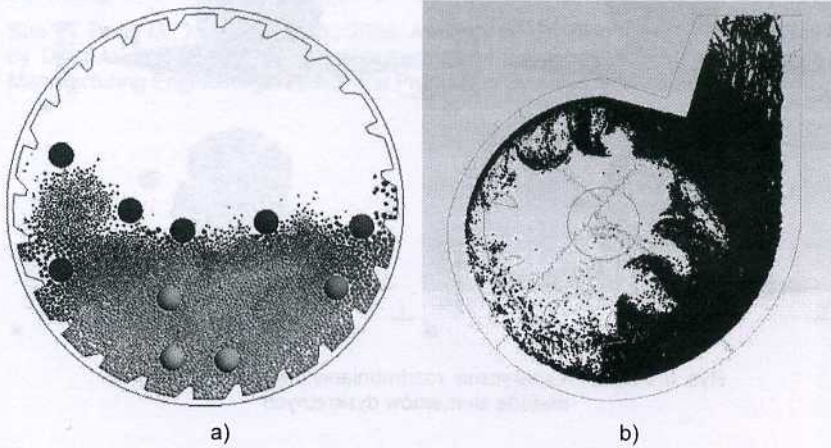
Możliwe jest wykorzystanie symulacji do projektowanie nowych narzędzi i procesów urabiania nożami stożkowymi jak również dyskowymi. Rysunek 6 przedstawia model numeryczny urabiania nożem dyskowym.



Rys. 6. Symulacja urabiania skały za pomocą noża dyskowego (ewolucja parametru uszkodzenia)

3. Symulacja procesów rozdrabniania

Symulacja komputerowa jest pomocna w zrozumieniu skomplikowanych procesów zachodzących w procesie rozdrabniania materiału wsadowego wewnątrz młyna. W [5] analizowano zużycie elementów młyna kulowego wskutek oddziaływania z materiałem wsadowym modelowanym za pomocą metody elementów dyskretnych. Z kolei, w [6] badano ruch materiału wsadowego w młynie kulowym. Rysunek 7 przedstawia przykładowe wyniki własnych symulacji pracy młyna kulowego (rys. 7a) i wentylatorowego (rys. 7b).



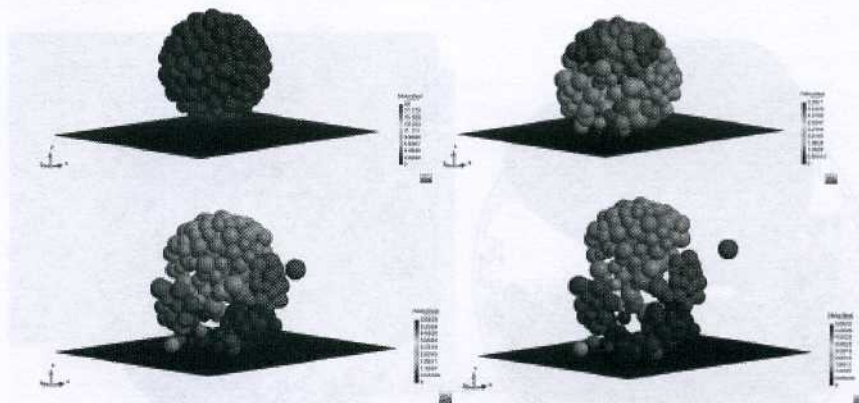
Rys. 7. Symulacja pracy a) młyna kulowego, b) młyna wentylatorowego

W modelach numerycznych wykorzystywanych w symulacjach przedstawionych na rys. 7 uwzględniony jest materiał wsadowy reprezentowany przez elementy dyskretne oraz elementy młyna istotne ze względu na proces rozdrabniania (kule, ruchomy wirnik, obudowa), traktowane jako ciała sztywne. W modelu młyna wentylatorowego rozpatrywany jest ruch mieszaniny powietrza i ziaren rozdrabnianego materiału. W tym przypadku zastosowano do obliczeń model matematyczny przepływu płynu wielofazowego, uwzględniający oddziaływanie fazy stałej i gazowej.

Analiza numeryczna umożliwia symulację ruchu materiału wsadowego wewnątrz młyna, badanie oddziaływania dynamicznego materiału kruszonego z elementami młyna (obciążenie młyna) oraz badanie mechanizmu i energochłonności rozdrabniania materiału.

Modele oddziaływania kontaktowego między ziarnami oraz między ziarnami i elementami młyna powinny uwzględniać efekty odwracalne (sprężystość) oraz nieodwracalne (tłumienie, tarcie) występujące w zderzeniu. Można również uwzględnić możliwość rozbicia ziaren na mniejsze, wskutek obciążenia uderzeniowego. Kryterium rozdrobnienia pojedynczego ziarna może zostać opracowane na podstawie badań eksperymentalnych, jak również numerycznych (rys. 8).

Wyniki symulacji numerycznej mogą być wykorzystane do optymalizacji młyna oraz parametrów procesu.



Rys. 8. Analiza numeryczna rozdrabniania pojedynczego ziarna metodą elementów dyskretnych

Podsumowanie

Metoda elementów dyskretnych jest bardzo dobrym narzędziem do modelowania rud metali poddanych procesom urabiania i rozdrabniania. W sposób naturalny można uwzględnić rozdrobnienia materiału, nieciągłości istniejące oraz powstające w materiale pod wpływem obciążenia. Obserwuje się wzrastające zastosowanie modelowania dyskretnego w symulacji rzeczywistych problemów inżynierskich.

Podziękowanie

Niniejsza praca była częściowo finansowana z projektu CuBR/II/3/NCBR/2014 "Innowacyjna technologia przygotowania rudy miedzi do flotacji z wykorzystaniem wysokoenergetycznych technik rozdrabniania".

Bibliografia

- [1] Rojek J., Oñate E., Zarate F., Miquel J., 2001. Modelling of rock, soil and granular materials using spherical elements. In: 2nd European Conference on Computational Mechanics ECCM-2001, Cracow, Poland.
- [2] Rojek J., Labra C., Su O., Oñate E., 2012, Comparative study of different discrete element models and evaluation of equivalent micromechanical parameters, International Journal of Solids and Structures 49, s. 1497–1517.
- [3] Rojek J, Oñate E, Kargl H., Labra C, Akerman J., Restner U., Lammer E., Zarate F., 2008, Prediction of Wear of Roadheader Picks using Numerical Simulations, Geomechanik und Tunnelbau, 1, s. 47–54.
- [4] Rojek J., Oñate E., Labra C., Kargl H., 2011, Discrete element simulation of rock cutting. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 48 (6), s. 996–1010.

- [5] Kalala J.T., Moys M.H., 2004, Discrete element method modelling of liner wear in dry ball milling, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, s. 597-602
- [6] Sun Y., Dong M., Mao Y., Fan D., 2009, Analysis on Grinding media Motion in Ball Mill by Discrete Element Method, In: *Proceedings of the 1st International Conference on Manufacturing Engineering, Quality and Production Systems*, s. 227-231.