

NUMERICAL SOLUTION OF HARD ROCK DISINTEGRATION PROCESS – PART 2

NUMERICKÉ ŘEŠENÍ PROCESU ROZPOJOVÁNÍ TVRDÝCH HORNIN – ČÁST 2

*Karel FRYDRÝŠEK*¹

¹ *Assoc. Prof., M.Sc., Ph.D., Department of Mechanics of Materials, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava
17. listopadu 15/2172, Ostrava, tel. (+420) 59 732 3495
e-mail karel.frydrysek@vsb.cz*

Abstract

This paper focuses on a numerical analysis of a hard rock (ore) disintegration process. A bit moves into the ore and subsequently disintegrates it. The disintegration (i.e. fracture of ore) is solved via a deterministic approach (FEM) and a probabilistic approach (FEM in combination with the SBRA - Simulation-Based Reliability Assessment method, i.e. Monte Carlo simulations, stochastic inputs). The ore is disintegrated by deactivating the finite elements satisfying fracture conditions. The results are compared with experiments. The application of the SBRA method is a new and innovative trend in this area. Finally, the probabilistic reliability assessment is mentioned.

Abstrakt

Článek se zaměřuje na numerickou analýzu procesu rozpojování tvrdých hornin (rud). Nůž se pohybuje do horniny a následně ji rozpojuje. Rozpojování (tj. lom rudy) je řešeno deterministickým přístupem (MKP) a pravděpodobnostním přístupem (MKP v kombinaci s metodou SBRA - Simulation-Based Reliability Assessment, tj. simulace Monte Carlo, stochastické vstupy). Ruda je rozpojována pomocí deaktivace konečných prvků, které splňují podmínky odlomení. Výsledky jsou porovnány s experimenty. Aplikace metody SBRA v této oblasti je novým a inovativním trendem. V závěru je uveden pravděpodobnostní posudek spolehlivosti.

Key words: rock mechanics, hard rock (ore), disintegration process, excavation tool, design, probability, SBRA Method.



Fig. 1 Interaction between bits and hard rock (i.e. disintegration, experiment)

1 INTRODUCTION

The provision of sufficient quantities of raw materials for the industry is the main limiting factor of further development, see [1]. Excavation tools of mining machines have undergone quite long-term development, and they are still a subject of concern for inventors. It is therefore very important to understand the ore disintegration process, including an analysis of the bit (i.e. an excavation tool) used in mining operations. The main focus is laid on the modelling of a mechanical contact between the bit and the platinum ore and its evaluation (i.e. a practical application in the mining technology), see Fig. 1. However, material properties of the ore have a large stochastic variability. Hence, the stochastic approach (i.e. the Simulation-Based Reliability Assessment

Method) in combination with the FEM is applied. This article reports about the improvement of the first (deterministic) solution presented in [2].

2 FINITE ELEMENT MODEL OF ORE DISINTEGRATION PROCESS

Fig. 2 shows a basic scheme (quasi-static loading, plain strain formulation, mechanical contact with friction between the bit and platinum ore, boundary conditions, etc.).

The FEM (i.e. MSC.Marc/Mentat software, see references [1] to [6]) was used in modelling the ore disintegration process. The bit moves into the ore with a prescribed time-dependent function and subsequently disintegrates it. When the bit moves into the ore (i.e. a mechanical contact occurs between the bit and the ore) the stresses (i.e. the equivalent von Mises stresses) in the ore increase. When the equivalent stress is greater than the tensile strength in some elements of the ore, then these elements break off (i.e. these elements are dead). Hence, a part of the ore disintegrates. In the MSC.Marc/Mentat software, this is done by deactivating the elements; see Fig. 2b and Fig. 3.

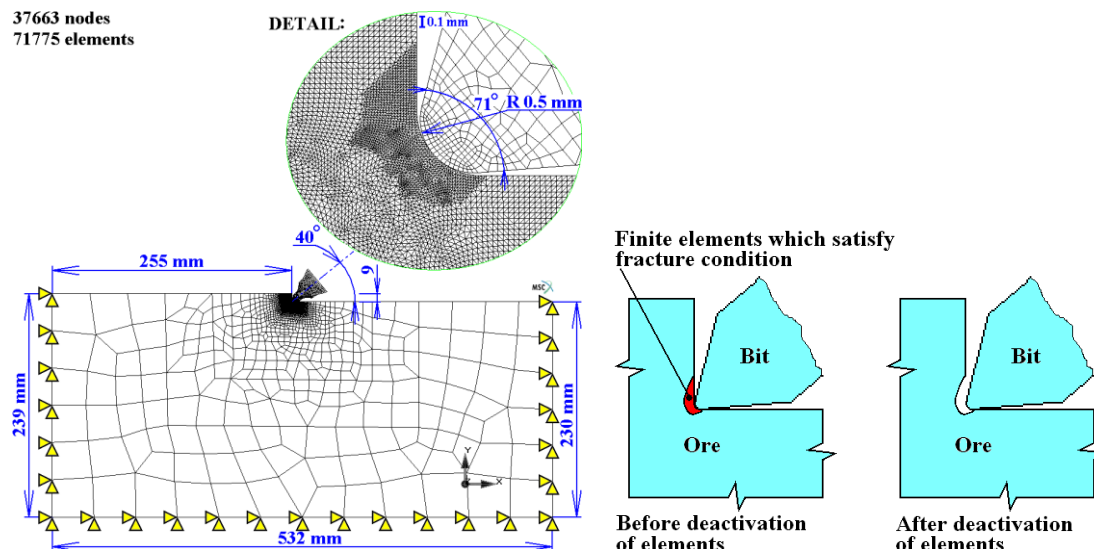


Fig. 2 a) Finite element model and its dimensions; b) Disintegration of a part of the ore

The FEM (i.e. MSC.Marc/Mentat software, see references [2] to [6]) was used in modelling the ore disintegration process. The bit moves into the ore with a prescribed time-dependent function and subsequently disintegrates it. When the bit moves into the ore (i.e. a mechanical contact occurs between the bit and the ore) the stresses (i.e. the equivalent von Mises stresses) in the ore increase. When the equivalent stress is greater than the tensile strength in some elements of the ore, then these elements break off (i.e. these elements are dead). Hence, a part of the ore disintegrates. In the MSC.Marc/Mentat software, this is done by deactivating the elements; see Fig. 2b and Fig. 3.

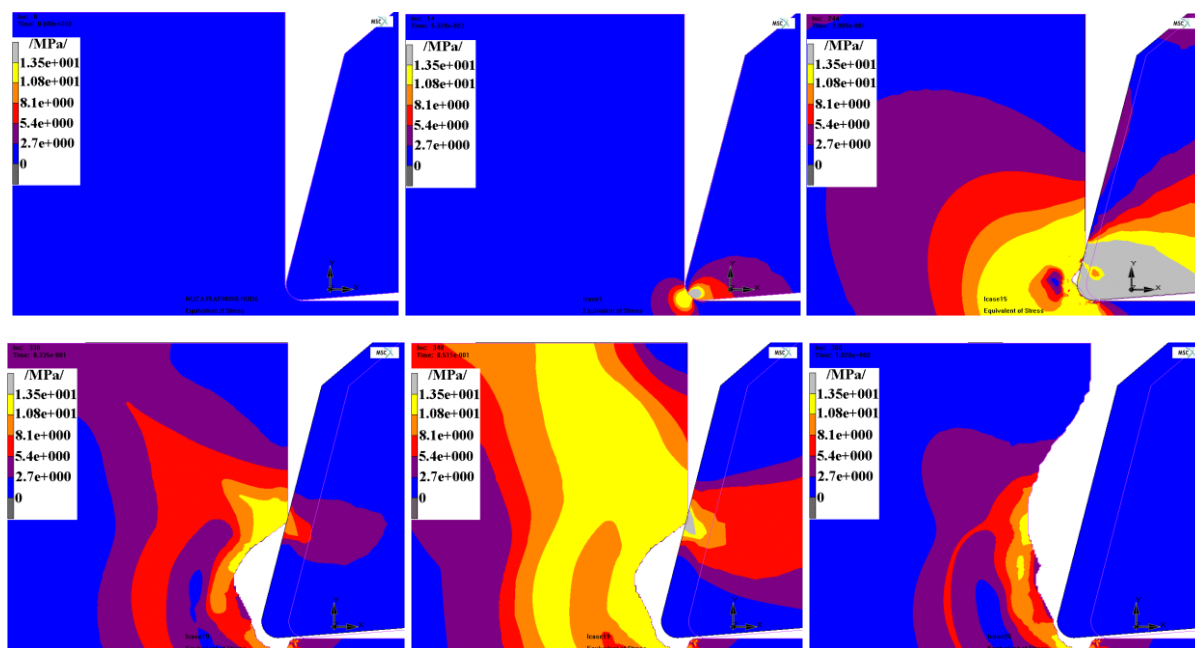


Fig. 3 Disintegration of ore (equivalent von Mises stresses distributions)

3 DETERMINISTIC APPROACH

A deterministic approach (i.e. all types of loading, dimensions and material parameters etc. are constant) provides an older but simple way to simulate mechanical systems. However, any deterministic approach cannot truly include the variability of all inputs (i.e. variability of material properties of the ore), because nature and the world are of a stochastic character. The solution of ore disintegration process via a deterministic approach (i.e. a basic simple solution) is shown in the reference [2] (i.e. the first part of this article).

4 PROBABILISTIC APPROACH (SBRA METHOD)

However, this problem is solved via probabilistic approaches which are based on statistics. Let us consider the "Simulation-Based Reliability Assessment" (SBRA) Method, a probabilistic direct Monte Carlo approach, in which all inputs are given by bounded (truncated) histograms. The bounded histograms include the real variability of inputs. The application of the SBRA method is a modern and innovative trend in mechanics; see the references [3], [4] and [7] for example. Material properties (i.e. isotropic and homogeneous materials) of the whole system are described in Fig. 4a, where E is Young's modulus of elasticity and μ is Poisson's ratio.

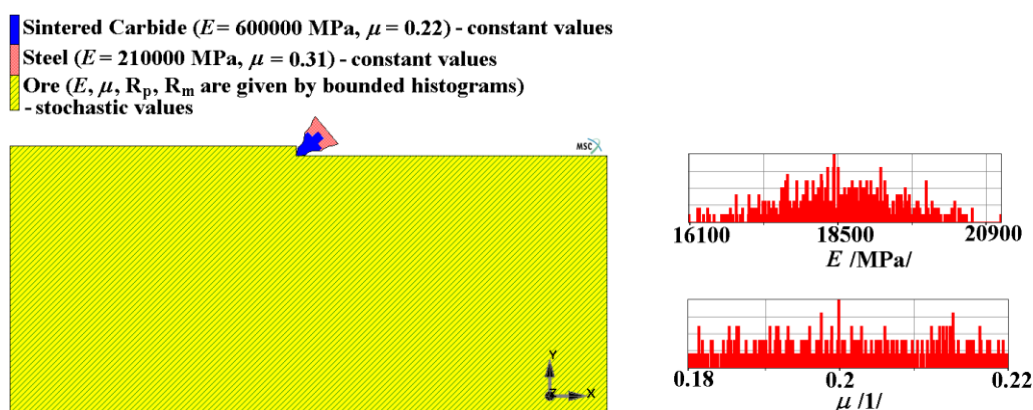


Fig. 4 Stochastic material properties and probabilistic inputs (histograms of Young's modulus and Poisson's ratio)

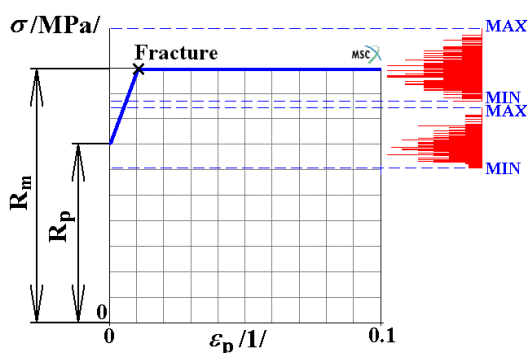


Fig. 5 Stochastic material properties of the ore (stress σ vs. plastic strain ϵ_p)

The bit is made of sintered carbide (sharp edge) and steel. Stochastic influences of material parameters of the bit can be neglected. The elastic properties of the ore are described by Hooke's law in the histograms, see Fig. 4b.

The ore material is elasto-plastic with isotropic hardening rule. The plastic properties are described by the yield stress R_p and the fracture stress R_m , which are given by bounded histograms, see Fig. 5.

The results (acquired by the SBRA method in combination with the FEM) were subsequently statistically evaluated (Anhill, MSC.Marc/Mentat and Mathcad software was used). Because of the material non-linearities, mechanical contacts with friction, a large number of elements, many iteration steps, and the choice of 500 Monte Carlo simulations, four parallel computers (with 26

CPU) were used to handle the large computational requirements for this problem. The FETI Domain Decomposition Method (i.e. the application of parallel computers) was used; see the references [2], [3], [5] and [6].

The whole time for the non-linear solution (i.e. 1.04 s) was divided into 370 steps of a variable length. The Full Newton-Raphson method was used for solving this non-linear problem. The solution of 500 Monte Carlo simulations (calculated simultaneously on four different parallel computers with 26 CPU) was made.

5 RESULTS AND STOCHASTIC EVALUATION

From the FEM results, the reaction forces R_x , R_y and the total reaction force $R_v = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ can be calculated. These forces act in the bit, see Fig. 6a (calculated for one simulation - i.e. a situation when the ore material is described by constant values R_p , R_m , E and μ) and Fig. 6b (a distribution of the total reaction forces acquired from the 500 Monte Carlo simulations - a stochastic result).

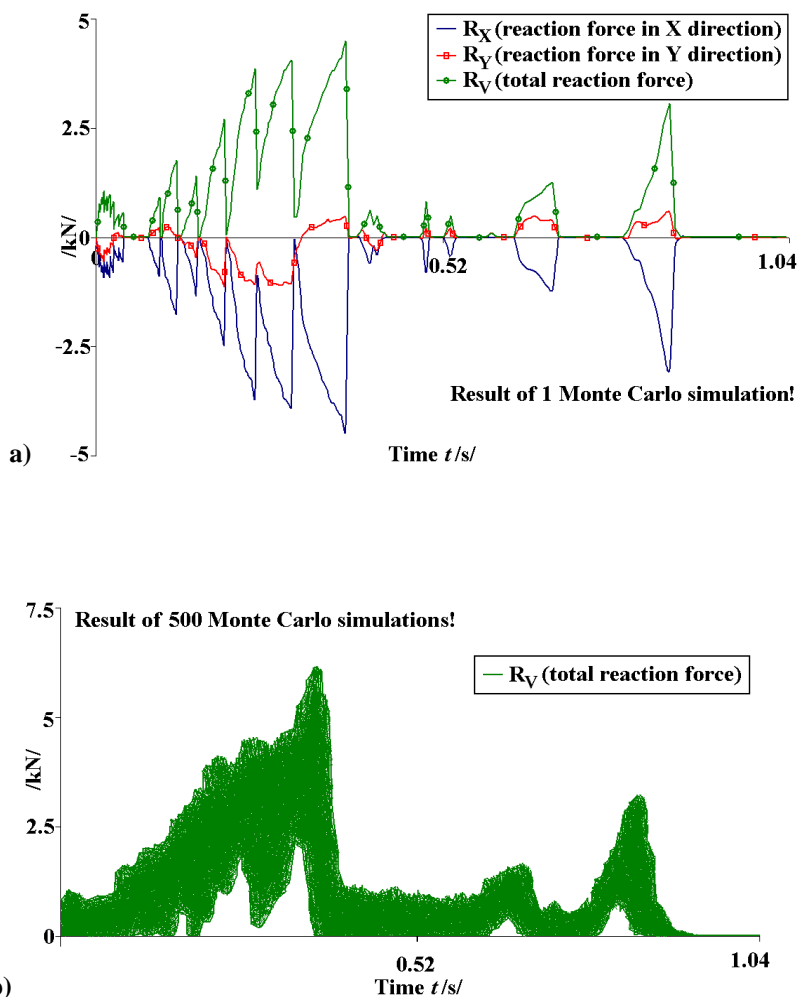


Fig. 6 Reaction forces in the bit a) Deterministic approach; b) Probabilistic approach

The maximum total reaction force (acquired from 500 Monte Carlo simulations) is given by the histogram

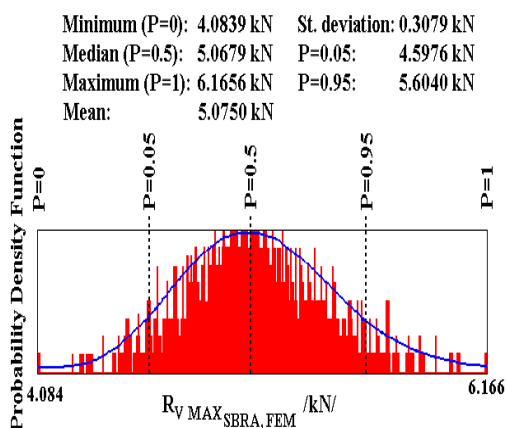
$$R_{V \text{ MAX}_{\text{SBRA, FEM}}} = 5068^{+1098}_{-984} \text{ N, see Fig. 7.}$$


Fig. 7 Maximum total reaction forces in the bit (probabilistic approach)

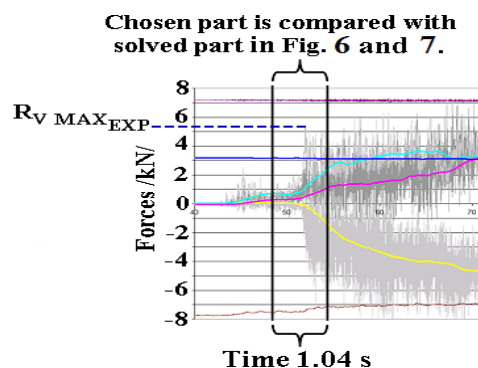


Fig. 8 Experimental measurement compared with the SBRA-FEM simulations

6 STOCHASTIC SIMULATIONS AND EXPERIMENTAL MEASUREMENTS

The calculated maximum forces (i.e. SBRA-FEM solutions, see Fig. 6b and Fig.7) can be compared with the experimental measurements (i.e. compared with a part of Fig. 8), see also the references [2], [3], [5] and [6].

The evaluation of one force measurement (Fig. 8) shows that the median value of maximum force is $R_{V\text{MAXEXP-MED}} = 5280 \text{ N}$. Hence, the relative error calculated for the acquired median value $R_{V\text{MAXSBRA, FEM-MED}} = 5068 \text{ N}$, see Fig. 8, is:

$$\Delta_{R_{V\text{MAX}}} = 100 \times \frac{R_{V\text{MAXEXP-MED}} - R_{V\text{MAXSBRA, FEM-MED}}}{R_{V\text{MAXEXP-MED}}} = 4.02 \% . \quad (1)$$

The error of 4.02% is acceptable. However, the experimental results also have large variability due to the anisotropic and stochastic properties of the material and due to the large variability of the reaction forces.

7 PROPOSITION OF FULLY PROBABILISTIC ASSESSMENT

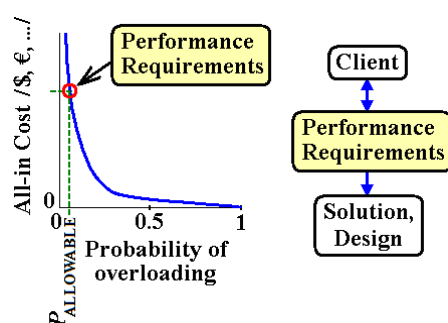


Fig. 9 Definition of the acceptable probability of overloading

The reliability function RF , see the references [3] and [7], can be defined by the equation:

$$RF = R_{V\text{MAXALLOWABLE}} - R_{V\text{MAXSBRA, FEM}} ,$$

where $R_{V\text{MAXALLOWABLE}}$ is the allowable reaction force in the cutting bit, which can be acquired from the real capacity of the whole cutter-loader system in the mine. If situations when $RF \leq 0$, then the cutter-loader system is overloaded. Else if $RF > 0$, then safe situations of loading occur. Hence, the fully probabilistic assessment can be calculated by comparing the probabilities:

$P(RF \leq 0) \leq P_{\text{ALLOWABLE}}$, where $P_{\text{ALLOWABLE}}$ is the acceptable probability of overloading of the cutting-loader system. This overloading sometimes really occurs in the mine. The value of $P_{\text{ALLOWABLE}}$ can be given by chosen performance requirements of the client (i.e. investor), see Fig. 9.

8 OTHER APPLICATIONS OF SBRA METHOD

Applications of the SBRA Method in the area of biomechanics (new design of external fixators for treatment of patients in traumatology), machine industry (new design of massive machine for fatigue testing of railway axles), structures on elastic foundation and other examples are reported in [3], [4] and [5].

Applications of the SBRA method as well as other probabilistic approaches are modern and innovative trends in engineering design.

9 SHORT INFORMATION ABOUT OTHER WAYS OF NUMERICAL SOLUTION OF HARD ROCK DISINTEGRATION PROCESS

In this article, the solution of the hard rock disintegration process is focused mainly on the evaluation of reaction forces in the bit. However, there are also other ways how to solve this problem (mainly focused on the evaluation of rock fracture), for example see the references [8], [9] and [10] etc.

10 CONCLUSIONS

This paper combines the SBRA (Simulation Based Reliability Assessment) Method and the FEM as a suitable tool for simulating a hard rock (ore) disintegration process. All basic factors have been explained (i.e. 2D boundary conditions, material nonlinearities, mechanical contacts and friction between the cutting bit and the

ore, the methodology for deactivating the finite elements during the ore disintegration process, the application of parallel computers). The use of the finite element deactivation during the ore disintegration process (as a way of expanding the crack) is a modern and innovative way of solving problems of this type. The error of the SBRA-FEM results (i.e. in comparison with the experiments) is acceptable. Hence, the SBRA with the FEM can be a useful tool for simulating an ore disintegration process.

Because the real ore material (i.e. yield limit, fracture limit, Young's modulus, Poisson's ratio etc.) is extremely variable, the stochastic theory and the probability theory were applied (i.e. the application of the SBRA Method). The SBRA Method, which is based on Monte Carlo simulations, can include all stochastic (real) inputs and then all results are also stochastic quantities. However, for a better application of the SBRA method (for simulating this large problem of mechanics), it is necessary to use superfast parallel computers. Instead of 500 Monte Carlo simulations, as presented in this article, it is necessary to calculate $\geq 10^4$ simulations. Our department will be able to make these calculations if new and faster parallel computers become available. Hence, the fully probabilistic assessment was proposed according to the acceptable probability of the overloading of the whole cutting-loader system.

All the results presented here were applied for optimizing and redesigning the cutting bit (an excavation tool); see the reference [3] and Fig. 10. In the future, 3D FE models (instead of 2D plane strain formulation) will be applied for greater accuracy.

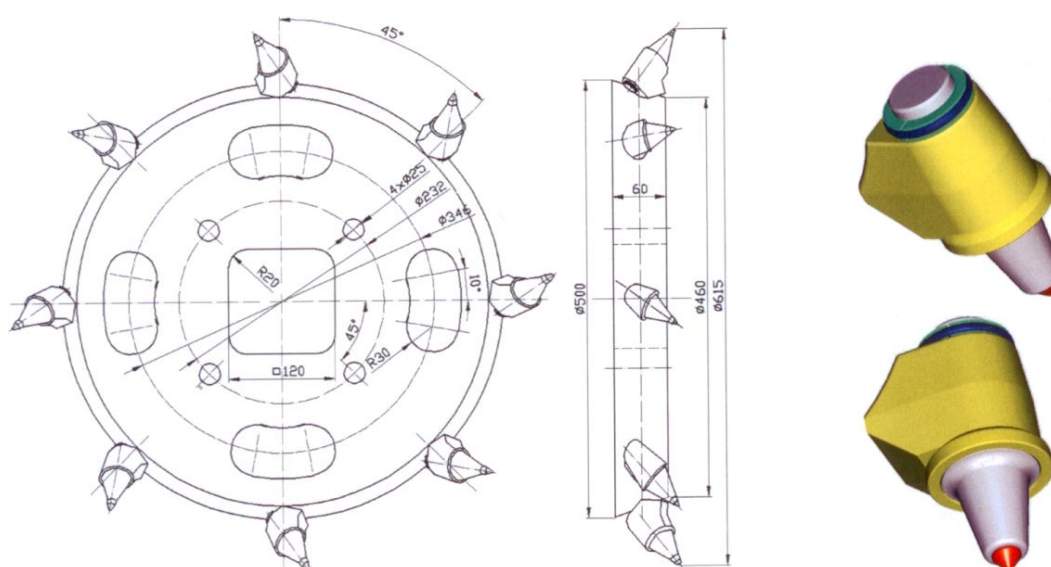


Fig. 10 Final shape of excavation tool for hard rock disintegration process

ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by the Czech-USA project LH11073 - KONTAKT II, by the Czech-Slovak project 7AMB12SK123 and by the Slovak-Czech project SK-CZ-0028.

REFERENCES

- [1] GONDEK, H., FRYDRÝŠEK, K.: *Mining Machines in Technical Practice (Short Introduction)*, VŠB – Technical University of Ostrava, Ostrava, 2012, pp. 123, book in print.
- [2] FRYDRÝŠEK, K., GONDEK, H.: Numerical Solution of Hard Rock Disintegration Process, In: *GeoScience Engineering*, vol. LV, no. 4, 2009, ISSN 1802-5420, VŠB-TU Ostrava, CZ, pp. 14-22.
- [3] FRYDRÝŠEK, K.: *Pravděpodobnostní výpočty v mechanice I (Probabilistic Calculations in Mechanics I)*, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB - Technical University of Ostrava, Ostrava, Ostrava, Czech Republic, pp. 1-149, 2010, written in Czech language, ISBN 978-80-248-2314-0.
- [4] FRYDRÝŠEK, K.: Probabilistic Approaches Used in the Solution of Design for Biomechanics and Mining, p. 304, In: Bérenguer, Ch., Grall, A., Soares, C., G.: *Advances in Safety, Reliability and Risk Management*, CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, London, UK, 2012, pp. 1900-1905, ISBN 978-0-415-68379-1.

- [5] FRYDRÝŠEK, K.: Stochastic Solution and Evaluation of the Ore Disintegration Process, In: *Proceedings of the 2009 International Conference on Scientific Computing CSC2009 - WORLDCOMP'09*, CSREA Press, Las Vegas, USA, 2009, pp.40-46, ISBN: 1-60132-098-1.
- [6] FRYDRÝŠEK, K., GONDEK, H.: Finite Element Model of the Ore Disintegration Process, In: *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara – Journal of Engineering*, Tome VI, Fascicule 1, University Politehnica Timisoara, Faculty of Engineering – Hunedoara, Romania, pp. 133-138, 2008, ISSN 1584 – 2665.
- [7] MAREK, P., GUŠTAR, M., ANAGNOS, T.: *Simulation-Based Reliability Assessment For Structural Engineers*, CRC Press, Boca Raton, USA, pp.365, 1995, ISBN 0-8493-8286-6.
- [8] HORÁK, J.: Mathematical Modelling of Rock Cutting, In: *Geomechanics 91*, ed. Rakowski, Z., Balkema, Rotterdam, 1992, ISBN 90 5410 039 7, pp. 347-352.
- [9] PODGÓRSKI, J., JONAK, J.: *Numeryczne badania procesu skrawania skal izotropowych*, Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2004, ISBN 83-87833-53-3, pp. 80 (in Polish language).
- [10] <http://www.ita-aites.cz/files/tunel/2005/1/cast8.pdf>.

RESUMÉ

Současný vědecko-technický rozvoj, spojený s rozvojem výpočetní techniky, umožňuje stále nové možnosti při řešení úloh mechaniky. Nejinak je tomu i v hornictví, respektive v mechanice hornin, proto je v tomto článku předvedeno využití numerických přístupů při řešení kvazistatické úlohy problematiky rozpojování tvrdých hornin (rud). Motivace k řešení této úlohy vznikla díky spolupráci s dlužní společností Agroplatinum Cooperated Limited z Jihoafrické republiky. Při hlubinném dobývání rud nebo hornin jsou obecně nežádoucí prostoje spojené s poškozením nebo častými opravami či výměnami otupených rozpojovacích nástrojů (nožů). Z tohoto důvodu (ekonomického hlediska), je velmi žádoucí řešit problematiku rozpojování rud (nebo obecně tvrdých) hornin (tj. soustava nůž rubanina) z hlediska budoucí optimalizace režných podmínek. Proces rozpojování masivu je hlavní činností v technologickém procesu těžby. Provádí se pomocí rozpojovacích orgánů, které patří mezi nejdůležitější části dobývacího stroje. Práce všech ostatních částí dobývacího stroje je podřízena hlavnímu cíli, kterým je zajištění plynulého a efektivního chodu rozpojovacího orgánu (snaha o maximální výkonost, snaha o rozpojení rudy s minimální energetickou náročností a s co nejmenším rozdrobením, možnost regulace výšky a šířky záběru nože, vysoká životnost nože atp.).

Prvotní řešené úlohy týkající se rozpojování hornin a rud byly deterministické povahy, avšak později byly řešeny náročnější úlohy stochastické povahy, které mnohem přesněji vystihují reálnou situaci, přičemž jako nové a velmi výhodné řešení tohoto složitějšího problému se jeví kombinace MKP (software MSC.Marc/Mentat) a metody Simulation-Based Reliability Assessment (SBRA), tj. simulace Monte Carlo se stochastickými vstupy a výstupy.

Numerický model rozpojování je založen na MKP. Síť konečných prvků, která obsahuje 37663 uzlů a 71755 rovinných elementů, byla v blízkosti místa styku nože a platinové rudy zhuštěna (tj. ve zkoumaném místě, kde lze očekávat největší hodnoty napětí a také rozpojování neboli odlamování rudy).

Nůž je považován za elastický, izotropní a homogenní materiál vyhovující Hookeovu zákonu s deterministickými vlastnostmi (tj. zadané konstantní materiálové vlastnosti).

Rubanina (lokální oblast těžby masivu rudy) je modelována pomocí elastoplastického, isotropního a homogenního materiálu se stochastickými vlastnostmi. Materiál rudy v elastické oblasti vyhovuje Hookeovu zákonu, kde modul pružnosti a Poissonovo číslo jsou dané histogramy (v praxi jsou to vždy velmi proměnlivé hodnoty náhodného charakteru související se strukturou, chemickým složením rudy a jinými vlastnostmi).

Pro vlastní modelování rozpojování rudy je využito testu na překročení meze pevnosti v elementech části sítě konečných prvků. V programu MSC.Marc/Mentat je odlomení elementu (rudy) ošetřeno tzv. deaktivací elementů. Tento způsob modelování dovoluje poměrně výstižně řešit výsledné zatěžující síly, které vznikají v noži v průběhu dolování (rozpojování).

Takto pojaté řešení procesu rozpojování platinové rudy je poměrně rozsáhlou a složitou nelineární úlohou (řešený čas 1.04 s, tj. čas nájezdu nože do horniny, je rozdělen na 370 kroků proměnlivé délky, jejichž řešení se získává obvyklým iteračním postupem pomocí obecné Newton-Raphsonovy metody a to vše v cyklu pro 500 simulací). Z tohoto důvodu (tj. poměrně dlouhá doba výpočtu jedné simulace) byly použity pro řešení čtyři různé paralelní počítače, přičemž byla využita FETI (Finite Elements Tearing and Integrating) metoda doménové dekompozice pro dva a čtyři procesory počítače.

Hlavním cílem tohoto výpočtu je stanovení reakčních silových účinků v rozpojovacím nástroji v závislosti na čase a jejich vyhodnocení. Stochastický charakter výsledné reakční síly je dobře patrný, což je

vzhledem k nehomogenitám platinové rudy typické také pro reálnou situaci v provozu. V závěru je porovnána vypočtená síla s experimentálními měřeními.

Na základě pravděpodobnostního posudku spolehlivosti byl navržen nový design a optimalizace rozpojovacího orgánu.

Z uvedeného je zřejmé, že kombinace metody SBRA s MKP je velmi vhodná pro řešení velmi složité problematiky rozpojování rud (nelineární úlohy mechanického kontaktu). Metoda SBRA spojená s MKP aplikovaná při paralelním programování dává úplně nové kvantitativně jiné (dříve neřešitelné) možnosti při modelování reálných situací rozpojování hornin. Získané výsledky mají stochastický charakter, který dostatečně přesně reprezentuje realitu. Je zřejmé, že deterministickým výpočtem a deterministickým posudkem nelze zodpovědně řešit tak silně stochastickou úlohu, jakou je předvedená problematika rozpojování platinové rudy. Aplikace metody SBRA v této oblasti je tedy novým a inovativním trendem inženýrských výpočtů.