ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: GÓRNICTWO z. 191

Włodzimierz HAŁAT Jerzy KICKI Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

WPŁYW JAKOŚCI PODSADZKI NA WIELKOŚĆ STREF ZNISZCZENIA GÓROTWORU WOKÓŁ WYROBISK W SYSTEMIE EKSPLOATACJI GRUBEGO ZŁOŻA RUD MIEDZI

<u>Streszczenie</u>. W pracy przedstawiono wyniki rozwiązania numerycznego fizycznie nieliniowego zachowania się górotworu wokół wyrobisk eksploatacyjnych w złożu rud miedzi. Obliczenia komputerowe zostały wykonane za pomocą metody elementów skończonych z zastosowaniem procedury pseudolepkiej iteracji zaproponowanej przez Cormeau i Zienkiewicza [8]. Przeanalizowano wpływ własności mechanicznych podsadzki na wielkość stref zniszczenia górotworu wynikających z przyjęcia liniowego kryterium Coulomba-Mohra.

1. WSTEP

Cechą charakterystyczną górnictwa rud miedzi w Polsce jest eksploatacja złoża na znacznej głębokości. Dotyczy to w szczególności kopalń Rudna i Sieroszowice, które to kopalnie prowadzą eksploatację na głębokości poniżej 900 m.

Wyznaczenie stanu naprężenia, a zarazem stref zniszczenia w górotworze naruszonym robotami eksploatacyjnymi jest czynnością skomplikowaną. Otrzymanie rozwiązań analitycznych jest wręcz niemożliwe ze względu na stosowanie dużych uproszczeń, dlatego też wykorzystuje się coraz częściej metody numeryczne, za pomocą których buduje się dyskretne modele górotworu. Jedną z częściej ostatnio stosowanych metod numerycznych wykorzystywanych do budowy modeli numerycznych górotworu jest metoda elementów skończonych [7]. Za jej pomocą w względnie prosty sposób można modelować eksploatację w złożonych warunkach górniczo-geologicznych.

W pracy przyjęto, że górotwór zachowuje się jak ciało fizycznie nieliniowe odpowiadające modelowi ciała sprężysto-idealnie-plastycznemu wynikającemu z zastosowania warunku plastyczności Coulomba-Mobra.

Do rozwiązania tak postawionego problemu zastosowano procedurę numeryczną wynikającą z pseudolepkiej iteracji, zaproponowanej przez Cormeau i Zienkiewicza, a opartej na koncepcji modelu lepkoplastycznego Perzyny [6].

Dyskretny model numeryczny górotworu zbudowano dla warunków odpowiadających warunkom górniczo-geologicznym występującym w systemie eksploatacji

1990

Mr kol. 1095

o nazwie Rudna-5. Zroby w tym systemie likwidowane są za pomocą podsadzki bydraulicznej. Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla dwu wariantów jakości stosowanej podsadzki hydraulicznej. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci graficznej.

### 2. ROZWIĄZANIE NUMERYCZNE

Wynik rozwiązania numerycznego oparty jest na przemieszczeniowej koncepcji metody elementów skończonych dla materiałów sprężysto-lepko-plastycznych. Podana ona została przez O.C. Zienkiewicza i I.C. Cormeau [1, 8] przy założeniu addytywności odkształceń. Odkształcenia całkowite są sumą odkształceń sprężystych i lepko-plastycznych:

$$\hat{\varepsilon} = \hat{\varepsilon}^{\circ} + \hat{\varepsilon}^{\forall p} \tag{1}$$

Naprężenia są określone związkiem:

$$\vec{\mathbf{6}} = \mathbf{D}\hat{\mathbf{\xi}} = \mathbf{D}(\hat{\mathbf{\xi}} - \hat{\mathbf{\xi}}^{\mathbf{V}\mathbf{p}}) \tag{2}$$

Prędkości odkaztałceń lepko-plastycznych wyrażone zostały w postaci reguły lepko-plastycznego płynięcia zaproponowanej przez P. Perzynę:

$$\dot{\varepsilon}^{\nabla p} = \gamma < \mathbf{F} > \frac{\partial Q}{\partial G} \qquad \dot{\varepsilon}^{\nabla p} = 0 \quad dla \quad \mathbf{F} < 0$$
(3)

gdzie F powierzchnia plastyczności wyznaczona z kryterium Coulomba-Möhra. Pozwala ona na zastosowanie stowarzyszonego lub niestowarzyszonego prawa lepko-plastycznego płynięcia. Zaletą proponowanej metody w przeciwieństwie do teorii plastyczności jest możliwość chwilowego istnienia stanów naprężenia, dla których zachodzi przekroczenie powierzchni płynięcie [por. 5]. Warunek równowagi MES ma postać [10]:

$$\int B^{T} D \dot{\varepsilon} dv - \int B^{T} D \dot{\varepsilon}^{\nabla P} dv + \dot{\varepsilon} F = 0$$
(4)

gdzie &= Bu; K = B DB dv, po przekształceniach otrzymujemy:

$$K\dot{u} = \dot{R} = 0 \tag{5}$$

Odkształcenia lepko-plastyczne E<sup>vp</sup> obliczene są jako akumulacja przyrostów tych odkształceń. Stosując schemat Eulera całkowania po czasie otrzymujemy:

$$\Delta \varepsilon^{\nabla p} = \Delta t \varepsilon^{\nabla p}, \qquad (6)$$

gdzie At jest długością kroku czasowego.

Optymalne metody całkowania numerycznego i dobór długości kroków czasowych zostały oparte na sformułowaniach podanych przez I.C. Cormeau [1]. Z przeprowadzonych doświadczeń numerycznych wynika, że krok czasowy powinien spełniać warunek

$$\Delta t = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon^{wp}}\right)_{\min} \tag{7}$$

Rozwiązanie sprężysto-lepko-plastyczne może być użyte do analizy problemów wynikających z konwencjonalnej teorii plastyczności.

Jednym z częściej stosowanych w geomechanice kryteriów płynięcia jest liniowa funkcja płynięcia sformułowana przez Coulomba. Postać jej wyrażona za pomocą naprężeń normalnych  $\mathfrak{G}_n$  i naprężeń stycznych T na płaszczyźnie zniszczenia dobrze jest znana [2, 3] i zapisywana jako

$$|\tau| \leq c - 6, \ tgq, \tag{8}$$

gdzie:

c - spójność,

Q - kat tarcia wewnętrznego.

Warunek (8) zakłada, że zniszczenie górotworu zależy od minimalnego i maksymalnego naprężenia głównego (pomija on wpływ naprężenia pośredniego). Kryterium Coulomba-Mohra wyrażone za pomocą naprężeń głównych ma postać:

$$F_{1} = (6_{1} - 6_{3}) + (6_{1} + 6_{3}) \sin \rho - 2 \cos \rho = 0,$$

$$F_{2} = (6_{2} - 6_{1}) + (6_{3} + 6_{1}) \sin \rho - 2 \cos \rho = 0,$$
(9)

gdzie:

6<sub>1</sub>, 6<sub>3</sub> - maksynalne i minimalne wartości naprężeń głównych.

W zapisie za pomocą niezmienników stanu naprężenia dogodne w obliczeniach numerycznych liniowe kryterium Coulomba-Möhra (8) można przedstawić w postaci:

$$\mathbf{F} = \mathbf{f}_{\mathbf{m}} \sin \varphi + \overline{\mathbf{f}} \left[ \cos \Theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \Theta \sin \varphi \right] - \mathbf{c} \cos \varphi = 0 \tag{10}$$

W zależności (10) przyjęto następujące oznaczenia:

6<sub>m</sub> - naprężenia średnie,

6 - pierwiestek z drugiego niezmiennika dewiatora naprężenia,

0 - parametr Lodego.

Dowolny wektor naprężeń głównych może zostać wyrażony poprzez niezmienniki następująco:

$$\begin{pmatrix}
6_{1} \\
6_{2} \\
6_{3}
\end{pmatrix}
= \frac{2}{\sqrt{3}} \overline{6} \begin{cases}
\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\
\sin(\theta) \\
\sin(\theta + \frac{4}{3}\pi)
\end{pmatrix}
+ 6_{m}$$
(11)

gdzie naprężenia uporządkowane są według zależności  $6_1 > 6_2 > 6_3$ , przy czym naprężenia rozciągające są dodatnie.

### 3. JAKOŚĆ PODSADZKI HYDRAULICZNEJ

Największym problemem przy wyznaczaniu własności mechanicznych podsadzki jest ustalenie parametru modułu sprężystości podsadzki. Parametr ten jest niezbędny do przeprowadzenia obliczeń numerycznych za pomocą metody elementów skończonych. Występuje on w macierzy sprężystości D (wzór 4). Parametrem, który jest stosowany w górnictwie do oceny własności podsadzki, jest współczynnik "a" osiadania górotworu przy eksploatacji.

W celu rozwiązania tego problemu przyjęto, że w podsadzce panuje trójosiowy stan naprężenia i zbliżony do jednoosiowego stanu odkształcenia. Przyjmując, że  $\mathcal{E}_x$ ,  $\mathcal{E}_y = 0$ , to zależności między składową pierwotnego stanu naprężenia p<sub>z</sub> a składową stanu odkształcenia  $\mathcal{E}_z$  można wyprowadzić z uogólnionego prawa Hooke'a w postaci:

$$\mathcal{E}_{z} = \frac{1 - \sqrt{2} - 2\sqrt{2}}{1 - \sqrt{2}} \frac{P_{z}}{B}, \qquad (12)$$

gdzie:

p<sub>z</sub> - pierwotne ciśnienie pionowe,

- współczynnik Poissona,
- E moduł sprężystości podsadzki,
- $\mathcal{E}_{-}$  odkształcenie pionowe górotworu.

Zakładając, że odkształconia pionowe górotworu nad przestrzenią wybraną są mierą jego osiedania, czyli:

8 = a

(13)

Podstawiając (13) do (12) 1 przekształcając otrzymamy:

$$\mathbf{E} = \frac{1 - \sqrt{2} - \sqrt{2}}{1 - \sqrt{2}} \frac{\mathbf{P}_{\mathbf{Z}}}{\mathbf{a}}$$

Współczynnik Poissona podsadzki został przyjęty na podstawie pracy [2]. Współczynnik osiadania dla warunków kopalni waba się w granicach od 0,202 do 0,013, co odpowiada sprężystości podsadzki 100 [MPa] i 1500 [MPa].

# 4. DY SKRETNY NUMERYCZNY MODEL GÓROTWORU

Górotwór został zamodelowany za pomocą tarczy o wymiarach 151 x 115 m, znajdującej się w płaskim stanie odkształcenia. Model górotworu został podzielony na 513 ośmiowęzłowych izoparametrycznych elementów skończonych, co w rezultacie dało 1681 punktów węzłowych. W każdym elemencie skończonym całkowanie numeryczne zostało wykonane dla 2 x 2 punktów całkowania Gaussa. Warunki brzegowe przyjęto w ten sposób, że:

- przemieszczenia pionowe węzłów leżących na dolnej poziomej krawędzi są równe zeru,
- przemieszczenia poziome na skrajnych pionowych krawędziach są równa zeru.
- górna pozioma krawędź obciążona jest obciążeniem wynikającym z ciężaru własnego odciętej części górotworu.

Pozostałe punkty węzłowe mają swobodę poruszania się. W modelu górotworu wykonano trzy wyrobiska komorowe. Wzajemne usytuowanie wyrobisk komorowych jak i ich wymiary przedstawiono na rys. 1. Strop wyrobisk komorowych zalega na głębokości 900 m.

Dyskretny model górotworu zbudowany jest z cztersch warstw skalnych. Przestrzeń wysksploatowana wypełniona została materiałem podsadzkowym. Własności fizykomechaniczne oraz parametry wytrzymałościowe warstw skalnych i materiału podsadzkowego przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Numer mate- riału	Nazwa warstwy skalnej	Moduž Younga [MPa]	Współczynnik Poissona	Kat tarcia wewnętrzne- go [o]	Kobezja [MPa]
1 -	piaskowiec	20900	0,26	40	25
2	piaskowiec ilasty	7100	0,27	33	15
- 3	anhydryt	50000	0,21	28	12
4	podsadzka	100/1500	0,27	33	0,015
5	piaskowiec	20900	0,26	28	16



Rys. 1

### 5. WYNIKI OBLICZEN

Obliczenia komputerowe wykonano za pomocą komputeru IBM PC klasy AT o następującej konfiguracji: pamięć operacyjna 640 kb, dysk twardy 20 MB, koprocesor arytmetyczny. Czas obliczeń dla jednego wariantu materiału podsadzkowego wynosił około 10 godzin. Obliczenie do modelu numerycznego górotworu zostało przyłożone jednorazowo.

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono strefy zniszczenia górotworu w okolicy wyrobisk komorowych dla podsadzki o module Younga 100 i 1500 [MPa]. W przypadku gorszego wypełnienia zrobów materiałem podsadzkowym strefa zniszczenia obejmuje cały obszar złoża między komorami II i III, a w stropie nad komorą III sięga ona około 50 m w głąb górotworu. Przy lepszym podsadzeniu zrobów strefa zniszczenia górotworu jest znacznie mniejsza. Występuje ona w filarze między komorami II i III, obejmując również twym zasięgiem niewielki obszar górotworu w stropie komory III. Strefy zniszczenia górotworu zostały zaznaczone w punktach całkowania Gaussa.



Rys. 2



Rys. 3

W rozważeniach numerycznych przyjęte zostały skrajne wartości modułu sprężystości materiału podsadzkowego. Z porównania wyników obliczeń w postaci graficznej można wnioskować o generalnym wpływie jakości podsadzania na wielkość stref zniszczenia górotworu, przemieszczeń górotworu nad przestrzenią wyeksploatowaną oraz rozkładów naprężeń w sąsiedztwie wyrobisk eksploatacyjnych. Jakość materiału podsadzkowego wywiera istotny wpływ na charakter zachowania się górotworu w strefie wyrobisk eksploatacyjnych.

Należy zaznaczyć, że zdaniem autorów pracy przyjęte na podstawie badań wykonanych w Zakładach Badawczych i Projektowych Miedzi "Cuprum" wartości kohezji można uznać za zawyżone lub zastosować inne niż przyjęte kryterium zniszczenia górotworu.

Rozwiązanie analityczne i numeryczne dla modeli górotworu sprężysto--plastycznego i sprężysto-krucho-plastycznego oparte na kryterium Burzyńskiego przedstawiono w pracy [3].

# 6. ZAKONCZENIE

Wyniki przedstawione w pracy zostały podporządkowane głównemu celowi, jakim było porównanie wielkości stref zniszczenia górotworu w zależności od różnego rodzaju stosowanej podsadzki. Doświadczenia tego typu prowadzone w warunkach kopalnianych są kosztowne i kłopotliwe, a ich ocena może nie być jednoznaczna. Występuje więc potrzeba wykonania porównawczych badań modelowych, które przeprowadzono przy założeniu nieliniowości fizycznej górotworu. Aplikacja numeryczna przedstawionego zadania jest stosunkowo prosta. Przeprowadzone obliczenia numeryczne dały możliwość analizy zjawisk zachodzących w górotworze w otoczeniu wyrobisk komorowych. Badania modelowe zawierają w sobie pytanie, czy zastosowany model fizyczny górotworu jest właściwy, a także czy warunki brzegowe zostały dobrane należycie. Przyjęcie do rozwiązania modelu sprężysto-plastycznego należy uznać za model lepiej opisujący zachowanie górotworu, co znalazło potwierdzenie w zrealizowanych badaniach niwelacyjnych osiadania stropu, które zostały przedstawione w pracy [4].

Autorzy uważają za celowe prowadzenie dalszych badań i rozważań na podstawie przyjętego fizycznego modelu górotworu z uwzględnieniem:

- zmiany parametrów wytrzymałościowych górotworu, a w szczególności postępującej degradacji jego spójności wynikającej z prowadzonej eksploatacji,
- próby zwiększenia wymiaru modelu numerycznego, oc pozwalałoby na szerszą analizę wpływu długości wspornika nad zrobami na stan górotworu.

Wpływ jakości podsadzki....

LITERATURA

[1]	Cormeau I.C.: Numerical stability in quasi static elastovisco-plastici- ty. International Journal Numerical Methods in Engineering, Vol. 9, 1975.
[2]	Dydecki M.: Badania modelowe współpracy filara z podsadzką w systemie komorowo-filarowym. Praca doktorska nie publikowana), Kraków 1983.
[3]	Hałat W.: Stan naprężenia i wielkość stref zniszczenia górotworu w są- siedztwie wyrobisk korytarzowych. Polska Akademia Nauk, Instytut Pod- stawowych Problemów Techniki, Mechanika i Komputer, T. 9, Warszawa 1989.
[4]	Kicki J., Gajoch K. i in.: Pomiary niwelacyjne i radiometryczne w stro- pie wyrobisk w oddziałe G-4 ZG Rudna, Kraków 1983 (praca nie publikowa- na, wykonana na zlecenie ZG Rudna).
[5]	Kleiber M.: Metoda elementów skończonych w nieliniowej mechanice kon- tinuum. FWN, Warszawa-Poznań 1985.
[6]	Perzyna P.: Fundamental problems in visco-plasticity. Adwances in Ap- plied Mechanics, 9, 1965.
[7]	Zienkiewicz O.C.: The finite element method. McGraw-Hill, London 1977.

[8] Zienkiewicz O.C., Cormeau I.C.: Visco-plasticity-plasticity and creap in elastic solids - a unified numerical solution approach. International Journal Numerical Methods in Engineering, Vol. 8, 974.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zenon Szczepaniak

ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВА ЗАКЛАДКИ НА РАЗМЕР ЗОН РАЗРУШЕНИЯ МАССИВА ВОКРУГ ВЫРАБОТОК В СИСТЕМЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ МЕДНЫХ РУД БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

Резюме

В статье излагаются результаты решения цифровым методом физически нелинейного поведения массива вокруг выработок в месторождении медных руд. Расчеты на ЗВМ проводниесь с помощью метода конечных элементов с применением псевдолипкой процедуры итерации, предложенной Кормо и Зинкевичем 8. Был проведен анализ влияния механических свойств закладки на размер зон разрушения массива, связанных с принятием линейного критерия.

THE INFLUENCE OF THE QUALITY OF STOWING UPON THE DIMENSIONS OF THE AREA OF DESTRUCTION OF THE ROCK-MASS ADJACENT TO HEADINGS IN THE CASE OF WINNING THICK COPPER-ORE DEPOSITS

#### Summary

The paper presents the results of a numerical solution of the non-linear behaviour of the rock-mass adjacent to headings in copperore deposits. Computer calculations were carried out by means of the method of finite elements, applying the procedure of pseudo-viscous iteration, as suggested by Cormeau and Zienkiowicz [8]. The effect of the mechanical properties of stowing on the dimensions of the area of destruction, resulting from the assumption of Coulomb-Mohr s linear criterion, have been analysed.