

Halina Marczak*

WYBRANE ASPEKTY BADAŃ WYKORZYSTANIA PODZIEMNYCH WYROBISK GÓRNICZYCH DO SKŁADOWANIA ODPADÓW

Streszczenie. Budowa składowisk odpadów w formacjach geologicznych pod powierzchnią ziemi jest zadaniem wieloetapowym i trudnym, szczególnie w przypadku składowania odpadów niebezpiecznych. Poszczególne etapy obejmują wstępną selekcję lokalizacji składowiska, prowadzenie badań terenowych i laboratoryjnych, prace projektowe i budowlane oraz eksploatację składowiska. Ocenia się, że w celu podziemnego składowania odpadów można wykorzystać również wyrobiska poeksploatacyjne, m.in. komory ługownicze w złożach soli kamiennej. Wtórne wykorzystanie komór stawia przed projektantami zadanie zaprojektowania wyrobisk tak, by rozkład naprężeń i temperatur w masywie skalnym utrzymywał się na dopuszczalnym poziomie. W pracy przeanalizowano wpływ wymiarów eliptycznego przekroju poprzecznego wyrobiska na koncentrację naprężeń w masywie skalnym otaczającym wyrobisko. Obliczenia pozwalają ustalić warunki powstania naprężeń wtórnych niekorzystnych dla stateczności komory.

Słowa kluczowe: podziemne składowanie odpadów, pierwotny stan naprężenia, wtórny stan naprężenia, eliptyczny przekrój poprzeczny wyrobiska, wyrobiska górnicze.

WSTĘP

Aktualnie gospodarowanie niektórymi odpadami polega na ich unieszkodliwianiu poprzez składowanie. Jako miejsca deponowania odpadów brane są pod uwagę składowiska powierzchniowe oraz podziemne. Budowa składowisk odpadów w formacjach geologicznych pod powierzchnią ziemi jest przedsięwzięciem wieloetapowym i trudnym, szczególnie w przypadku konieczności zapewnienia bezpiecznego składowania odpadów niebezpiecznych. Poszczególne etapy obejmują wstępną selekcję lokalizacji składowiska, prowadzenie badań terenowych i laboratoryjnych, prace projektowe i budowlane oraz eksploatację obiektu [4]. Od cech geologicznych i hydrogeologicznych środowiska skalnego zależy rodzaj przeznaczonych do składowania odpadów i ich odpowiednie konfekcjonowanie. Przy wyborze środowiska skalnego do budowy składowiska odpadów w pierwszej kolejności brane są pod uwagę skały o korzystnych warunkach hydrogeologicznych. Najkorzystniejsze są skały odizolowane od wód podziemnych, a w przypadku nie spełnienia tego warunku, skały o niskich parametrach filtracyjnych i nietrudnych warunkach wodnych. Na wybór miejsca składowania istotny wpływ ma potencjalne wzajemne oddziaływanie składowanych odpadów na otaczające środowisko skalne. Oddziaływanie może mieć charakter chemiczny, fizyczno-

* Katedra Inżynierii Procesowej, Spożywczej i Ekotechniki, Politechnika Lubelska, h.marczak@pollub.pl

-chemiczny, radiacyjny i nasilać się w warunkach podwyższonej temperatury i ciśnienia. Podjęcie decyzji o lokalizacji podziemnego składowiska odpadów uzależnione jest ponadto od własności mechanicznych skał. Najodpowiedniejsze są skały sprężyste o wysokiej wytrzymałości lub skały, które podlegają dużym deformacjom plastycznym.

Ocenia się, że na cele podziemnego składowania odpadów można wykorzystać również wyrobiska poeksploatacyjne, m.in. komory ługownicze w złożach soli kamiennych. Wtórne wykorzystanie komór stawia przed projektantami zadanie rozmieszczenia i doboru kształtu i wymiarów wyrobisk tak, aby rozkład naprężeń i temperatur w masywie skalnym utrzymywany był na zaplanowanym dopuszczalnym poziomie w okresie, w którym odpady stanowią zagrożenie dla biosfery i człowieka. Spełnienie tych wymagań ma istotne znaczenie, gdyż wzrost temperatury i naprężeń może niekorzystnie wpływać na własności geomechaniczne masywu skalnego. Szczególnie niepożądane są takie następstwa zmian temperatury i naprężeń, jak spękanie masywu skalnego i powstanie nowych dróg migracji wód podziemnych.

W pracy przeanalizowano wpływ wymiarów przekroju poprzecznego wyrobiska (komory) na koncentrację naprężeń w masywie skalnym otaczającym wyrobisko. W rozważaniach uwzględniono wyrobisko o eliptycznym przekroju poprzecznym.

STABILNOŚĆ PODZIEMNYCH KOMÓR WARUNKIEM ICH WYKORZYSTANIA DO SKŁADOWANIA ODPADÓW

Stabilne komory ługownicze zachowują kształt i wymiary, powstałe po wylugowaniu (brak odspajania skał) oraz pełną izolację za pomocą filarów od sąsiednich komór.

Ogólnie, budowa stabilnych komór zależy od stanu i jakości masywu skalnego [1]. Niepożądany jest taki stan, w którym na obwodzie wyrobiska podziemnego o planowanych wymiarach ma miejsce koncentracja naprężeń rozciągających. Równie niebezpieczny jest stan, w którym na obwodzie wyrobiska koncentrują się naprężenia ściskające będące przyczyną wzrostu wyężenia masywu skalnego otaczającego wyrobisko [1, 2].

Poznanie rozkładu naprężeń pierwotnych i wtórnych (powstaje po wykonaniu wyrobiska) w masywie skalnym w sąsiedztwie wyrobiska podziemnego, w związku z jego wykorzystaniem do składowania odpadów, jest zadaniem o priorytetowym charakterze. Wtórny stan naprężenia oddziałuje na tworzoną komorę w różnym stopniu, w zależności od własności otaczających skał. Własności skał będą decydowały ponadto o zmianie deformacji komory z upływem czasu.

Rozpoznanie własności mechanicznych masywu skalnego ma istotne znaczenie. Różny może być przy tym zakres badań związanych z rozpoznaniem własności mechanicznych masywu skalnego. Generalnie zakres tych badań zależy od przeznaczenia wyrobisk. Dodatkowe badania, w porównaniu do badań prowadzonych przy projektowaniu i wykonywaniu zwykłych wyrobisk, należy przeprowadzić w przypadku magazynowania w wyrobiskach odpadów emitujących ciepło, promieniowanie radioaktywne, itp. W takich przypadkach konieczne jest rozpoznanie zachowania się masywu skalnego pod wpływem podwyższonych temperatur oraz promieniowania radioaktywnego. Składowanie odpadów promieniotwórczych

czych narzuca ponadto przewidywanie własności mechanicznych masywu skalnego w dłuższym okresie czasu, bowiem długi jest czas oddziaływania na środowisko skalne przechowywanych w wyrobiskach odpadów radioaktywnych.

W celu wyznaczenia własności mechanicznych masywu skalnego i oceny jego zachowania realizowane są programy obserwacji i pomiarów bezpośrednio w wyrobiskach podziemnych i na ścianach otworów wiertniczych, pomiarów laboratoryjnych i badań modelowych. Szczególnie szerokie zastosowanie znajduje modelowanie matematyczne rozkładu naprężeń w otoczeniu projektowanego wyrobiska w konkretnych warunkach geomechanicznych masywu skalnego i dla przyjętych parametrów geometrycznych wyrobisk. Analizując różne wartości składowych pierwotnego stanu naprężenia i różne wymiary przekroju poprzecznego wyrobisk (komór ługowniczych) można ocenić, w których miejscach na obwodzie wyrobisk powstaną niepożądane naprężenia rozciągające, a zatem problemy związane z ich stabilnością. Na podstawie obliczeń można ustalić parametry geometryczne wyrobisk, przy których nie powstaje niekorzystna, zwiększona koncentracja naprężeń.

ZAŁOŻENIA DO OBLICZEŃ EKSTREMALNYCH WARTOŚCI NAPRĘŻEŃ NA OBWODZIE WYROBISKA O ELIPTYCZNYM PRZEKROJU POPRZECZNYM

Ze względu na wpływ pierwotnego stanu naprężenia na rozkład naprężeń wtórnych w sąsiedztwie wyrobiska, w obliczeniach uwzględniane będą trzy zasadnicze przypadki pierwotnego stanu naprężenia:

1) jednorodny (hydrostatyczny) stan naprężenia pierwotnego:

$$p_z = p_x = p_y \quad (1)$$

gdzie: p_z – pionowe naprężenie główne

p_x, p_y – poziome naprężenia główne

$$k = \frac{p_x}{p_z} = 1 \quad (1a)$$

gdzie: k – współczynnik parcia bocznego.

2) niejednorodny stan naprężenia pierwotnego:

$$p_z > p_x = p_y \quad (2)$$

$$k < 1 \quad (2a)$$

3) niejednorodny stan naprężenia pierwotnego:

$$p_z < p_x = p_y \quad (3)$$

$$k > 1 \quad (3a)$$

Niezależnie od kształtu przekroju poprzecznego wyrobiska na jego obwodzie powstaje koncentracja naprężeń wtórnych, jednak ich wartość jest już zależna od kształtu przekroju, a przy danym kształcie od ilorazu wymiarów jego przekroju poprzecznego.

Z uwagi na możliwość pełniejszego wykorzystania przestrzeni najodpowiedniejsze są wyrobiska w kształcie walca lub graniastosłupa (prostokątny przekrój poprzeczny). Na konturach prostokątnych przekrojów poprzecznych powstaje jednak duża koncentracja naprężeń wtórnych, która wymusza naturalne dążenie do zaokrąglenia prostokątnych naroży trwające do momentu, kiedy wartości naprężeń zrównają się z wytrzymałością masywu skalnego.

W porównaniu do wyrobisk o prostokątnym przekroju poprzecznym, mniejsza koncentracja naprężeń wtórnych powstaje na konturach wyrobisk o przekroju poprzecznym eliptycznym lub łukowym. Wykorzystując procedurę analityczną można ocenić wpływ wymiarów przekroju poprzecznego wyrobiska (komory) na koncentrację naprężeń wtórnych w charakterystycznych punktach na obwodzie przekroju wyrobiska.

Maksymalne wartości naprężeń w stropie i w spągu komory o przekroju poprzecznym eliptycznym wynoszą [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_{x\max} = p_x \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right) - p_z \\ \sigma_z &= 0\end{aligned}\quad (4)$$

gdzie: σ_x – składowa pozioma wtórnego stanu naprężenia
 p_x – składowa pozioma pierwotnego stanu naprężenia
 a – pionowa oś elipsy
 b – pozioma oś elipsy
 p_z – składowa pionowa pierwotnego stanu naprężenia
 σ_z – składowa pionowa wtórnego stanu naprężenia.

Maksymalne wartości naprężeń w ociosach komory o przekroju poprzecznym eliptycznym wynoszą [1, 2, 3]:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= 0 \\ \sigma_z &= \sigma_{z\max} = p_z \left(1 + 2 \frac{b}{a}\right) - p_x\end{aligned}\quad (5)$$

gdzie: objaśnienie oznaczeń jak we wzorze (4).

OCENA EKSTREMALNYCH NAPRĘŻEŃ NA OBWODZIE KOMORY O ELIPTYCZNYM PRZEKROJU POPRZECZNYM

Przeanalizowano wpływ ilorazu długości osi pionowej i osi poziomej elipsy oraz pierwotnego stanu naprężenia na wartość maksymalnego naprężenia w stropie komory o eliptycznym przekroju poprzecznym. Pierwotny stan naprężenia charakteryzowany jest za pomocą współczynnika parcia bocznego $k = p_x / p_y$. Rezultatem obliczeń według zależności (4), dla każdego zestawu danych wejściowych, są bezwymiarowe parametry $n_1 = \sigma_{x\max} / p_z$ i $n_2 = \sigma_{x\max} / p_x$. Dane wejściowe dla kolejnych wariantów obliczeń i otrzymane wyniki obliczeń parametrów n_1 i n_2 zebrano w tabeli 1 i 2.

Tabela 1. Wartości parametru $n_1 = \sigma_{x \max} / p_z$ w stropie komory o eliptycznym przekroju poprzecznym dla różnych wartości współczynnika k i szerokości komory b (wysokość komory $a = 40$ m)

Table 1. Parameter values $n_1 = \sigma_{x \max} / p_z$ in the roof of the chamber with elliptical cross-section for different values of the coefficient k and the width of the chamber b (chamber height $a = 40$ m)

$k = p_x / p_y$ \ a/b b, m	2 20	1,75 22,86	1,5 26,67	1,25 32	1 40	0,75 53,33	0,5 80
0,15	-0,25	-0,33	-0,4	-0,48	-0,55	-0,63	-0,7
0,2	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6
0,25	0,25	0,13	0	-0,13	-0,25	-0,38	-0,5
0,4	1	0,8	0,6	0,4	0,2	0	-0,2
0,5	1,5	1,25	1	0,75	0,5	0,25	0
0,6	2	1,7	1,4	1,1	0,8	0,5	0,2
0,8	3	2,6	2,2	1,8	1,4	1	0,6
1	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
1,4	6	5,3	4,6	3,9	3,2	2,5	1,8
2	9	8	7	6	5	4	3

Tabela 2. Wartości parametru $n_2 = \sigma_{x \max} / p_x$ w stropie komory o eliptycznym przekroju poprzecznym dla różnych wartości współczynnika k i szerokości komory b (wysokość komory $a = 40$ m)

Table 2. Parameter values $n_2 = \sigma_{x \max} / p_x$ in the roof of the chamber with elliptical cross-section for different values of the coefficient k and the width of the chamber b (chamber height $a = 40$ m)

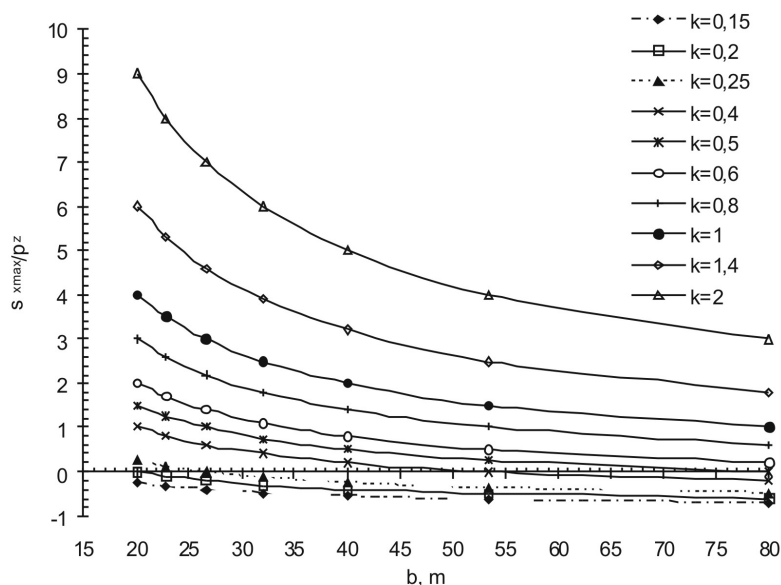
$k = p_x / p_y$ \ a/b b, m	2 20	1,75 22,86	1,5 26,67	1,25 32	1 40	0,75 53,33	0,5 80
0,15	-1,67	-2,17	-2,67	-3,17	-3,67	-4,17	-4,67
0,2	0	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3
0,25	1	0,5	0	-0,5	-1	-1,5	-2
0,4	2,5	2	1,5	1	0,5	0	-0,5
0,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0
0,6	3,33	2,83	2,33	1,83	1,33	0,83	0,33
0,8	3,75	3,25	2,75	2,25	1,75	1,25	0,75
1	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
1,4	4,29	3,79	3,29	2,79	2,29	1,79	1,29
2	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5

Na podstawie wyników przeprowadzonych obliczeń można ocenić, kiedy w stropie komory powstaną niebezpieczne naprężenia rozciągające (wartości ze znakiem „-” w tabeli 1 i 2). Naprężenia rozciągające powstają, jeżeli wartości współczynnika parcia bocznego

$k \leq 0,4$ i jednocześnie, jeżeli iloraz wysokości i szerokości komory przyjmuje określone wartości. Przykładowo, przyjmując wysokość komory (długość pionowej osi elipsy) 40 m i $k = 0,4$, naprężenia rozciągające powstaną, jeżeli szerokość komory (pozioma oś elipsy) będzie większa od 53,33 m (czyli dla wartości ilorazu $a/b < 0,75$). Wartości naprężeń rozciągających w stropie komory wzrastają wraz ze zmniejszaniem się ilorazu składowej poziomej i składowej pionowej pierwotnego stanu naprężenia. Ilustrację graficzną zmiany wartości parametru $n_1 = \sigma_{x \max} / p_z$ w zależności od wymiarów eliptycznego przekroju poprzecznego komory przedstawiają rysunki 1 i 2.

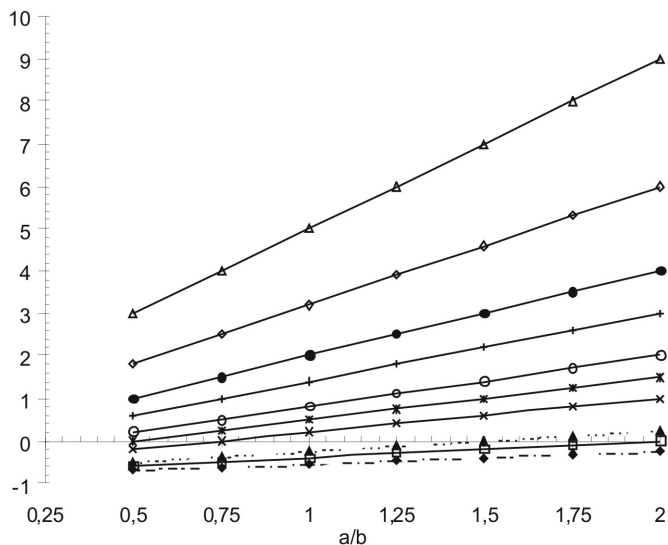
Na podstawie rys. 1 można stwierdzić, że dla wartości $k > 0,5$, $a = 40$ m i dla $b < 80$ m w stropie wyrobiska ma miejsce koncentracja naprężeń ściskających. Wartość tych naprężeń wzrasta wraz ze wzrostem wartości ilorazu składowej poziomej i składowej pionowej pierwotnego stanu naprężenia. Dla danej wartości współczynnika parcia bocznego i dla danej wysokości komory (długości pionowej osi elipsy) koncentracja naprężeń ściskających w stropie komory rośnie wraz ze zmniejszaniem się szerokości komory (długości poziomej osi elipsy).

Analizując rys. 2 można stwierdzić, że naprężenia rozciągające powstaną, jeżeli $k \leq 0,2$ i iloraz $a/b < 2$. Dla wartości $k > 0,2$ powstanie naprężeń rozciągających jest uzależnione od stosunku a/b . Przykładowo, dla $k = 0,5$ naprężenia rozciągające w stropie komory powstają przy stosunku $a/b < 0,5$. Dla $k > 0,5$ i dla stosunku a/b z zakresie od 0,5 do 2 w stropie komory powstaje koncentracja naprężeń ściskających.



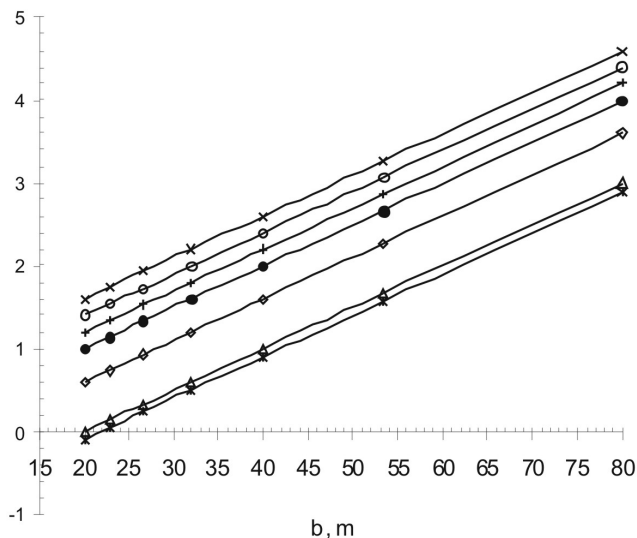
Rys. 1. Wartości ilorazu $\sigma_{x \max} / p_z$ w stropie komory o przekroju poprzecznym eliptycznym w zależności od długości poziomej osi elipsy b (długość osi pionowej $a = 40$ m)

Fig. 1. Values of the quotient $\sigma_{x \max} / p_z$ in the roof of chamber with elliptical cross-section, depending on the length of the horizontal axis of the ellipse b (the length of the vertical axis $a = 40$ m)



Rys. 2. Wartości ilorazu $\sigma_{x \max} / p_z$ w stropie komory o przekroju poprzecznym eliptycznym w zależności od stosunku długości osi pionowej i osi poziomej elipsy (a/b)

Fig. 2. Values of the quotient $\sigma_{x \max} / p_z$ in the roof of chamber with elliptical cross-section, depending on the relative length of the vertical axis and horizontal axis of an ellipse (a/b)



Rys. 3. Wartości ilorazu $\sigma_{z \max} / p_z$ w ociosie komory o przekroju poprzecznym eliptycznym w zależności od długości poziomej osi elipsy b (długość osi pionowej $a = 40$ m)

Fig. 3. Values of the quotient $\sigma_{z \max} / p_z$ in sidewall of chamber with elliptical cross-section depending on the length of the horizontal axis of the ellipse b (the length of the vertical axis $a = 40$ m)

Na rysunku 3 zobrazowano zmianę koncentracji naprężeń na ociosie komory o eliptycznym przekroju poprzecznym w zależności od rozpiętości komory b (długości osi poziomej elipsy) przy założeniu długości osi pionowej elipsy $a = 40$ m.

Z analizy rysunku 3 wynika, że dla wartości $k \leq 2$ i dla eliptycznego kształtu przekroju poprzecznego komory o wymiarach $a = 40$ m, b z zakresu od 20 m do 80 m, w ociosie komory koncentrują się wtórne naprężenia ściskające. Wartość tych naprężeń wzrasta ze zmniejszaniem się wartości współczynnika parcia bocznego k . Przy tej samej wartości współczynnika k , koncentracja naprężeń ściskających w ociosie zwiększa się wraz ze wzrostem rozpiętości komory przy stałej wartości jej wysokości. Na podstawie rys. 3 można stwierdzić, że dla $k > 2$ w analizowanym zakresie rozpiętości komory mogą powstać niebezpieczne naprężenia rozciągające – dla b mniejszego od ok. 22 m i dla $a = 40$ m.

Zaprezentowana metoda oceny koncentracji naprężeń wtórnych na obwodzie komory o eliptycznym kształcie przekroju poprzecznego może znaleźć zastosowanie do ustalenia takiego zaokrąglenia w stropie i w spągu, np. komory walcowej, które wykluczy powstanie niekorzystnej koncentracji naprężeń.

UWAGI KOŃCOWE

Wykonane obliczenia ekstremalnych naprężeń wtórnych na obwodzie wyrobiska podziemnego pozwalają ocenić, czy naprężenia te będą przyczyną utraty stateczności wyrobiska. Zagadnienie to jest istotne w przypadku rozważania wtórnego wykorzystania wyrobiska do składowania odpadów.

Dla jednorodnego stanu naprężenia pierwotnego i dla eliptycznego przekroju poprzecznego komory o wymiarach: pionowa oś elipsy wynosi 40 m, pozioma oś elipsy o dowolnej długości (w obliczeniach przyjmowano wartości z przedziału od 20 m do 80 m), ekstremalne naprężenia w stropie, w spągu i w ociosach wyrobiska są naprężeniami ściskającymi. Zauważyć można ponadto, że dla rozpiętości komory $b > 80$ m, parametr $n_1 = \sigma_{x \max} / p_z$ przyjmuje w stropie komory wartości poniżej jednośc.

Przy niejednorodnym stanie naprężenia pierwotnego charakteryzowanym przez współczynnik parcia bocznego k , wyrażający iloraz składowej poziomej naprężenia pierwotnego i składowej pionowej naprężenia pierwotnego, o wartości $k < 1$, w stropie i w spągu komory mogą powstać naprężenia rozciągające, a jest to uzależnione od wymiarów przekroju poprzecznego komory. Dla $k > 0,5$ i dla wszystkich rozpiętości komory poniżej 80 m, maksymalne naprężenia w stropie są ściskające. W ociosach komory przy $k < 1$ i dla każdej rozpiętości komory ma miejsce koncentracja naprężeń ściskających.

Przy niejednorodnym stanie naprężenia pierwotnego charakteryzowanym przez współczynnik parcia bocznego $k > 1$, w stropie i w spągu komory ekstremalne naprężenia mają charakter ściskający dla każdej rozpiętości komory. Wartości tych naprężeń rosną ze wzrostem wartości współczynnika k . Parametr $n_1 = \sigma_{x \max} / p_z$ przyjmuje wartości powyżej jednośc. W ociosach komory przy $k > 1$ i $k \leq 2$, ekstremalne naprężenia są również ściskające dla każdej rozpiętości komory. Przy $k > 2$ w ociosach komory mogą pojawić się niepożądane, zagrażające stateczności wyrobiska, naprężenia rozciągające.

Rezultaty przeprowadzonych obliczeń są przydatne do formułowania założeń do dokładniejszych badań modelowych w celu określenia wpływu wtórnego stanu naprężenia na wyłączenie masywu skalnego w sąsiedztwie wyrobiska i formułowania wytycznych w zakresie parametrów geometrycznych projektowanych komór.

PIŚMIENNICTWO

1. Durove J., Maras M., Vavrek P., Danko J. Parametryczna ocena stateczności komór ługowniczych. *Przegląd Górniczy*, nr 1, 2001: 26–28.
2. Kłeczek Z.: *Geomechanika górnicza*. Wyd. AGH w Krakowie, Kraków 1985.
3. Marczak H. Analiza wpływu pierwotnego stanu naprężenia na obciążenie obudowy wyrobiska korytarzowego. *Przegląd Górniczy*, nr 6, 2006: 37–43.
4. Nielubowicz B. Ogólne problemy składowania odpadów promieniotwórczych. *Górnictwo*, rok 6, z.1, 1982: 63–78.

SELECTED ASPECTS OF RESEARCH THE USE OF UNDERGROUND MINING WORKINGS FOR WASTE STORAGE

Summary

Construction of landfills in geological formations beneath the earth is a multi-stage and difficult task, especially for the storage of hazardous wastes. Specific steps include the initial selection of the landfill location, conducting field research and laboratory studies, design work and construction and operation of the landfill. It is estimated that in order to underground storage waste can also be used mining excavations, including chambers after leaching in rock salt deposits. Reuse of chambers poses to designers task: to design the mining excavations so that the distribution of stresses and temperatures in the rock mass remained at an acceptable level. The paper examines the impact of cross-sectional dimensions of the elliptical the excavation on the stress concentration in the rock massif surrounding the excavation. The calculations allow to determine conditions for the formation of secondary stresses, which are detrimental to the stability of the chamber.

Keywords: underground waste storage, original state of stress, secondary state of stress, elliptical cross-section of the excavation, mining excavations.