ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1987

Seria: GÓRNICTWO z. 145 Nr kol. 885

Henryk FILCEK
Antoni TAJDUŚ

Instytut Geomechaniki Górniczej
AGH - Kraków

STAN NAPRĘŻENIA, PRZEMIESZCZENIA I WYTĘŻENIA W SĄSIEDZTWIE WYROBISKA CHODNIKOWEGO O PRZEKROJU ODPOWIADAJĄCYM OBUDOWIE ŁP

Streszczenie. W pracy przedstawiono rozkład naprężenia i odkształcenia skał wokół wyrobisk chodnikowych, wyznaczany przy wykorzystaniu metody elementów skończonych i elektronicznej techniki obliczeniowej. W Instytucie Geomechaniki Górniczej AGH opracowano zestawy programów MES, pozwalających na określenie stanu naprężenia, przemieszczenia i wytężenia w sąsiedztwie wyrobisk o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego. Programy te opracowane zostały przy przyjęciu, że górotwór opisują następujące modele: Hooke'a, Kelvina, Maxwella, Poyntinga - Thomsona, Burgersa, Binghama. Analizowano wpływ naprężeń pierwotnych i własności wytrzymałościowych skał na stan naprężenia oraz na wielkość początkowej strefy spękań w otoczeniu wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP. Otrzymane wyniki wskazują na duże podobieństwo rozkładu naprężeń w ociosie wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP do rozkładu naprężeń w ociosie wyrobiska prostokątnego. Im mniejsza jest wytrzymałość skały na jednoosiowe rozciąganie, tym zasięg strefy spękań jest większy. Strefa ta występuje głównie w spągu wyrobiska. Podano, że przez odpowiedni dobór kształtu wyrobiska można uzyskać taki stan, by nie powstała w spągu strefa spękań lub była stosunkowo mała. Zagadnienie to przeanalizowano dla wyrobiska w obudowie ŁP-7 wykonanego na głębokości 1000 m.

1. WSTĘP

Prowadzenie robót górniczych na dużych głębokościach powoduje pojawienie się zjawisk fizycznych mających zarówno jakościowo, jak również ilościowo inny charakter niż te, z którymi spotykaliśmy się dotychczas.

Przy wybieraniu pokładów węgla na dużych głębokościach obserwujemy znaczne odkształcenie się skał w otoczeniu wyrobisk górniczych, prowadzące do ich częściowego lub nawet całkowitego zaciśnięcia. Wielkość odkształcania się skał zależy od ich własności fizycznych oraz od stanu naprężenia, jaki panuje w otoczeniu rozpatrywanego wyrobiska górniczego.

Dla uwzględnienia własności fizycznych górotworu buduje się mniej lub bardziej skomplikowane modele. Najczęściej spotykanymi modelami są:

- model Kelvina,
- model Maxwella,
- model Poyntinga-Thomsona (Zenera),

- model Burgersa,
- model Binghama,
- model M/V.

Modele te pozwalają wyjaśnić wiele zjawisk z jakimi spotykamy się w praktyce.

Stan naprężenia w górotworze naruszonym wyrobiskiem górniczym zależy od głębokości, na której ona się znajduje, od własności obudowy, a także od parametrów geometrycznych (wymiary wyrobiska, jego kształt, usytuowanie względem innych wyrobisk itp.). Ta ogromna ilość czynników wpływających na stan odkształcenia i naprężenia w górotworze powoduje, że uzyskanie ścisłych rozwiązań jest utrudnione lub wręcz niemożliwe. W celu uzyskania takiego rozwiązania należy stosować bardzo duże uproszczenia, które obniżają wartość otrzymanych wyników.

Biorąc powyższe pod uwagę do rozwiązania niektórych zagadnień mechaniki górotworu stosuje się metody numeryczne, np. metodę elementów skończonych (w skrócie MES).

W Instytucie Geomechaniki Górniczej AGH opracowano cały szereg programów MES dostosowanych do rozwiązywania zagadnień mechaniki górotworu.

Skonstruowano programy pozwalające na określenie stanu naprężenia, przemieszczenia i wytężenia w sąsiedztwie wyrobisk o dowolnym kształcie przekroju poprzecznego, wykonanych w górotworze, którego zachowanie opisują modele:

- Hooke'a,
- Kelvina,
- Maxwella,
- Poyntinga-Thomsona (Zenera),
- Burgersa,
- Binghama.

Programy te nie wymagają od użytkowników dokładnej znajomości przebiegu obliczeń ani schematów blokowych, na podstawie których je opracowano.

Istnieją dwie drogi wykorzystania opracowanych programów:

1) Rozwiązanie konkretnego zagadnienia, gdy mamy poprawnie określane takie parametry, jak: własności górotworu i obudowy, głębokość, na której posadowiono wyrobisko, jego kształt i wymiary itp.

2) Rozwiązywanie szeregu podobnych zagadnień górniczych o zmieniającym się jednym lub wielu parametrach. Chodzi wtedy o uzyskanie odpowiedzi na pytanie: jaki jest wpływ danego parametru na wyniki rozwiązania. Sposób ten jest przydatny dla określenia ogólnych zasad, które można wykorzystać przy projektowaniu lub prowadzeniu wyrobisk górniczych.

W oparciu o przygotowane programy rozwiązano dwa zagadnienia, których wyniki mogą znaleźć zastosowanie w praktyce projektowej, a ponadto dobrze ilustrują przydatność programów MES. Dla rozwiązania tych zagadnień przeliczono szereg przykładów liczbowych o zmiennym parametrze.

2. WPŁYW NAPRĘŻEŃ PIERWOTNYCH I WŁASNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCIOWYCH NA STAN NAPRĘŻENIA ORAZ WIELKOŚĆ POCZĄTKOWEJ STREFY SPĘKAŃ W OTOCZENIU WYROBISKA O KSZTAŁCIE ODPOWIADAJĄCYM OBUDOWIE ŁP

2.1. Wpływ naprężeń pierwotnych na stan naprężenia w otoczeniu wyrobiska w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP

Dla rozwiązania tego problemu przeliczono 4 przykłady liczbowe przy następujących założeniach:

1) Wyrobisko chodnikowe w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP-7 zostało wykonane w górotworze jednorodnym, sprężystym.

2) Model numeryczny stanowi płaska tarcza o jednostkowej grubości, wycięta prostopadle do osi wyrobiska, znajdująca się w płaskim stanie odkształcenia i odpowiednio podzielona na elementy.

3) Własności górotworu określają parametry:

$$G = 1.74 \times 10^6 \ [\mathrm{kPa}]$$

$$\nu = 0.3$$

gdzie:

G - moduł Kirchhoffa,

ν - współczynnik Poissona.

4) We wszystkich 4 przykładach pierwotne naprężenia pionowe są takie same i odpowiadają głębokości 1000 m. Różne są natomiast pierwotne naprężenia poziome (wartość zależy między innymi od warunków górniczo-geologicznych, np. uskoków, fałdów, sposobu naruszenia górotworu uprzednią eksploatacją górniczą).

W kolejnych przykładach przyjmowano następujące wartości naprężeń pierwotnych działające na modelową tarczę:

Przykład A

$$p_z = -2{,}5 \times 10^4 \ [\mathrm{kPa}] \quad ; \quad \frac{p_z}{p_x} = 0{,}5$$
$$p_x = -5 \times 10^4 \ [\mathrm{kPa}]$$

Przykład B

$$p_z = -2{,}5 \times 10^4 \ [\mathrm{kPa}] \quad ; \quad \frac{p_z}{p_x} = 1$$
$$p_x = -2{,}5 \times 10^4 \ [\mathrm{kPa}]$$

Przykład C

$$p_z = -2,5 \times 10^4 \ [kPa]$$
$$p_x = -1,07 \times 10^4 \ [kPa] \quad ; \quad \frac{p_z}{p_x} = 2,34$$

Przykład D

$$p_z = -2,5 \times 10^4 \ [kPa]$$
$$p_x = -0,625 \times 10^4 \ [kPa] \quad ; \quad \frac{p_z}{p_x} = 4$$

Porównanie rozkładów naprężeń w stropie i spągu (dla przeliczonych przykładów

Rozkład naprężeń poziomych i pionowych w stropie wyrobiska przedstawia rys. 1 oraz tablica 1.

Jak można zauważyć, rozkład naprężeń pionowych σ_z jest we wszystkich 4 przykładach jakościowo podobny. Poczynając od punktu leżącego bezpośrednio w stropie (gdzie $\sigma_z = 0$), naprężenia pionowe σ_z są naprężeniami ściskającymi i w miarę oddalania się od wyrobiska maleją aż do osiągnięcia wartości p_z. Przyrost naprężeń ściskających w miarę oddalania się od wyrobiska (w kierunku pionowym) jest największy dla $\frac{p_z}{p_x} = 0.5$, natomiast najmniejszy dla $\frac{p_z}{p_x} = 4$.

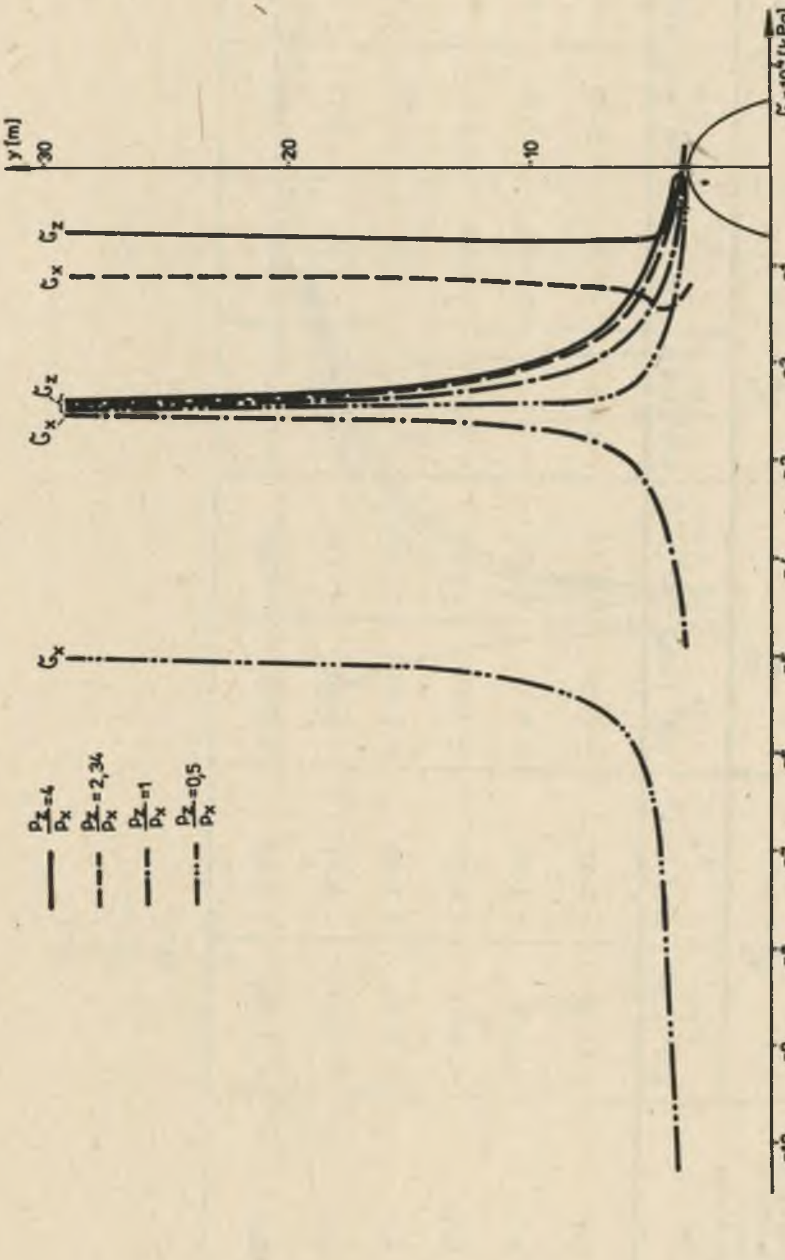
Zmiana natomiast pierwotnego naprężenia poziomego p_x ma duży wpływ na rozkład naprężeń poziomych σ_x. Im większy jest stosunek $\frac{p_z}{p_x}$, tym naprężenia poziome σ_x bezpośrednio w stropie są większe. W miarę oddalania się od wyrobiska maleją i osiągają zbliżoną do p_x. Dla $\frac{p_z}{p_x} = 4$ naprężenia σ_x bezpośrednio w stropie są rozciągające i w odległości około 0,2 m przechodzą w naprężenia ściskające.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć duże podobieństwo rozkładu naprężeń w stropie wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP do rozkładu naprężeń w stropie wyrobiska o przekroju kołowym

Rozkłady naprężeń poziomych i pionowych w spągu wyrobiska przedstawia rys. 2 tablica 2.

Analizując przedstawione wyniki można wysnuć wniosek, że zmiana pierwotnych naprężeń poziomych p_x nieznacznie wpływa na rozkład naprężeń pionowych σ_z.

Pierwotne naprężenie poziome p_x ma natomiast istotny wpływ na rozkład naprężeń σ_x w spągu. W przypadku gdy $\frac{p_z}{p_x} = 0,5$ oraz $\frac{p_z}{p_x} = 1$, w ca-

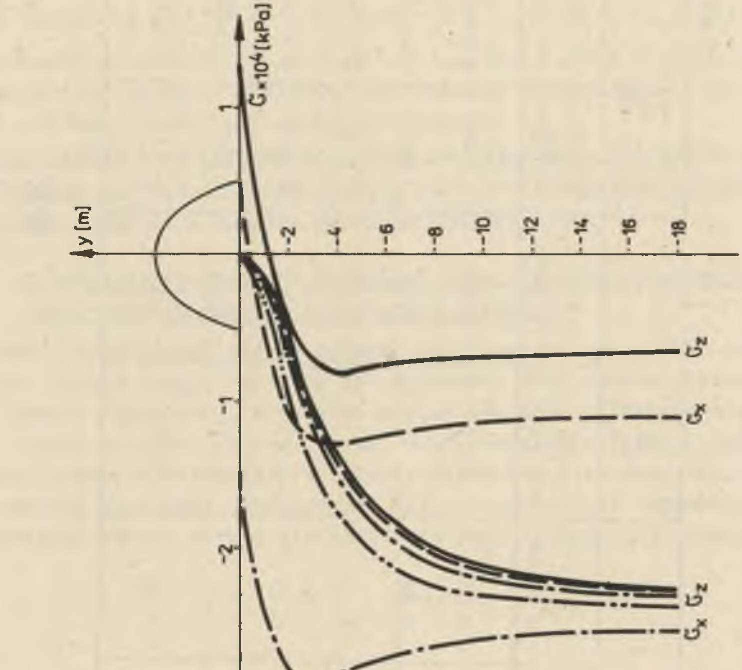


Rys. 1. Rozkład naprężeń poziomych i pionowych w stropie wyrobiska

Fig. 1. Horizontal and vertical stress distribution in heading roof

Tablica 1

Odległość pionowa od stropu wyrobiska (m)	$\frac{p_z}{p_x} = 0.5$		$\frac{p_z}{p_x} = 1$		$\frac{p_z}{p_x} = 2.34$		$\frac{p_z}{p_x} = 4$	
	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]
0.1	- 11.43	- 0.31	- 4.78	- 0,19	- 1.22	- 0.14	- 0.25	- 0.11
0.5	- 8.98	- 1.28	- 4.07	- 0,68	- 1.4	- 0,33	- 0.38	- 0.22
1.4	- 6.84	- 2.03	- 3.34	- 1.39	- 1.39	- 1.05	- 0.72	- 0.88
3.2	- 5.55	- 2.35	- 2.81	- 1.93	- 1.25	- 1.7	- 0.75	- 1.61
6.4	- 5.28	- 2.39	- 2.69	- 2.18	- 1.21	- 2.06	- 0.74	- 2.01
12.7	- 5.06	- 2.44	- 2.55	- 2.35	- 1.11	- 2.31	- 0,67	- 2.29



Rys. 2. Rozkład naprężeń poziomych i pionowych w spągu wyrobiska
Fig. 2. Horizontal and vertical stress distribution in heading floor

Tablica 2

Odległość pionowa od ociosu wyrobiska (m)	$\frac{p_z}{p_x} = 0.5$		$\frac{p_z}{p_x} = 1$		$\frac{p_z}{p_x} = 2.34$		$\frac{p_z}{p_x} = 4$	
	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]	σ_x $\times 10^4$ [kPa]	σ_z $\times 10^4$ [kPa]
0.1	- 5.0	- 0.02	- 1,41	- 0.005	0.[illegible]	- 0.015	1.28	- 0.015
0.5	- 5.64	- 0.09	- 2.06	- 0.05	- [illegible]	- 0.02	0.62	- 0.02
1.5	- 6.06	- 0.61	- 2.57	- 0.45	- 0.9	- 0.36	- 0.3	- 0.33
3.0	- 5.83	- 1.47	- 2.92	- 1.23	- 1.27	- 1.09	- 0.75	- 1.04
9.0	- 5.17	- 2.3	- 2.63	- 2.19	- 1.17	- 2.12	- 0.71	- 2.10
18.0	- 5.05	- 2.4	- 2.54	- 2.35	- 1.11	- 2.31	- 0.66	- 2.3

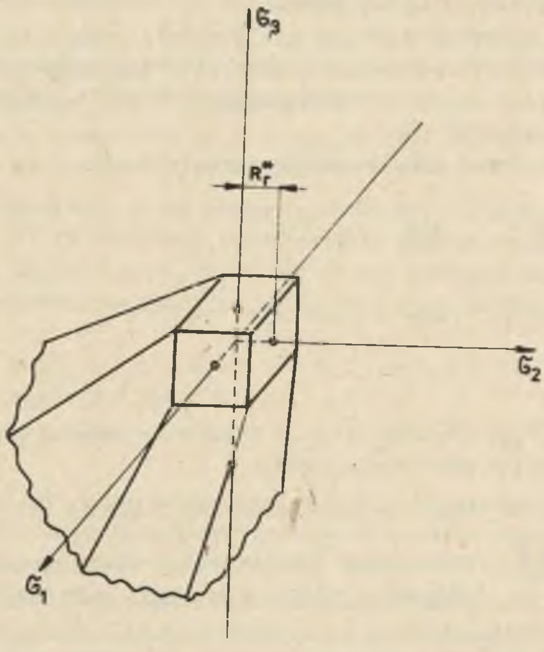
łym przekroju naprężenia poziome są ściskaniami, początkowo malejącymi i osiągającymi minimum, a następnie rosnącymi do wartości zbliżonej do p_x.

W przypadku gdy $\frac{p_z}{p_x} = 2,34$ oraz $\frac{p_z}{p_x} = 4$, w spągu na konturze wyrobiska pojawiają się naprężenia poziome rozciągające, które w miarę oddalania się od wyrobiska maleją, a następnie przechodzą w naprężenia ściskające, osiągają minimum, a następnie rosną do wartości p_x.

Analizując otrzymane wyniki można zauważyć duże podobieństwo rozkładu naprężeń w ociosie wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP do rozkładu naprężeń w ociosie wyrobiska prostokątnego.

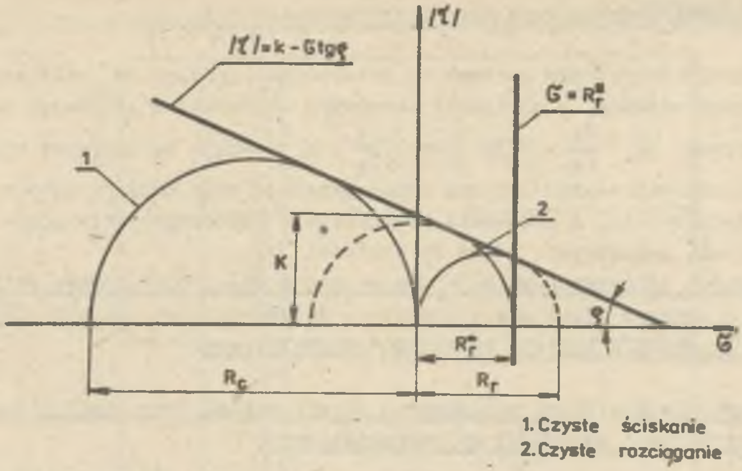
2.2. Określenie wielkości początkowej strefy spękań jako funkcji naprężeń pierwotnych i własności wytrzymałościowych

Przez "początkową strefę spękań" rozumiemy strefę, która tworzy się na skutek "przekroczenia granicy wytrzymałości skał przy pierwszym przeliczeniu danego przykładu". W strefie spękań własności fizyczne ulegają zmianie - spadek modułu Younga, wzrost współczynnika Poissona, spadek własności wytrzymałościowych itp. - zmienia się zatem stan naprężenia oraz stan wytężenia. Następuje powiększenie się strefy spękań. Ostateczny kształt i wielkość strefy spękań otrzymuje się przez iteracyjną zmianę własności.



Rys. 3. Zmodyfikowana hipoteza Coulomba - Mohra w przestrzeni naprężeń głównych

Fig. 3. Modificated Coulomb-Mohr hypothesis in main stress space



Rys. 4. Geometryczne przedstawienie R_c, R_r, R_r^*

Fig. 4. Geometrical representation of T_c, R_r, R_r^*

(Problem jest niezwykle złożony ze względu na trudność określenia własności pozniszczeniowych skał).

W celu określenia wielkości początkowej strefy spękań posłużono się zmodyfikowaną hipotezą Coulomba-Mohra.

W przestrzeni naprężeń głównych powierzchnię graniczną dla tej hipotezy przedstawia ostrosłup odpowiadający hipotezie Coulomba-Mohra i ograniczające go w przedziale naprężeń rozciągających trzy płaszczyzny prostopadłe do osi naprężeń głównych rys. 3.

Równanie powierzchni granicznej ma postać:

$$\sigma_I - R_r^* = 0, \qquad \text{dla} \quad \sigma_I > R_r^*$$

$$\frac{\sigma_I}{R_r} - \frac{\sigma_{III}}{R_c} = 1, \qquad \text{dla} \quad \sigma_I \leqslant R_r^*$$

w którym:

- przez σ_I, σ_{II}, σ_{III} ($\sigma_I \geqslant \sigma_{II} \geqslant \sigma_{III}$) oznaczono kolejno maksymalne, pośrednie i minimalne naprężenia główne,

  R_r^* – wytrzymałość skały na jednoosiowe rozciąganie (rys. 4),

  $R_r = 2k \dfrac{\cos\varphi}{1 + \sin\varphi}$ – "fikcyjna" -wytrzymałość skały na jednoosiowe rozciąganie, wynikająca z hipotezy Coulomba-Mohra.

  $R_c = 2k \dfrac{\cos\varphi}{1 - \sin\varphi}$ – wytrzymałość skały na jednoosiowe ściskanie (rys. 4).

Hipoteza ta jest hipotezą trójparametrową (R_c, R_r, R_r^*) lub (R_c, R_r, ϱ). Korzystając z przeliczonych przykładów liczbowych A, B, C, D, określono początkowe strefy spękań dla 10 zestawów własności wytrzymałościowych (40 przeliczeń) podanych w tablicy 3.

Tablica 3

Przyjęte własności wytrzymałościowe dla przeliczonych przypadków	R_c [MPa]	R_r^* [MPa]	R_r [MPa]
I	71,7	5,7	5,7
II	71,7	3,0	5,7
III	71,7	3,0	3,0
IV	71,7	1,0	5,7
V	71,7	1,0	1,0
VI	101,1	9,2	9,2
VII	150,0	5	5
VIII	63,3	6,8	6,8
IX	20,0	1,5	1,5
X	71,7	0,0	5,7

(Przypadku X nie zaznaczono na wykresach)

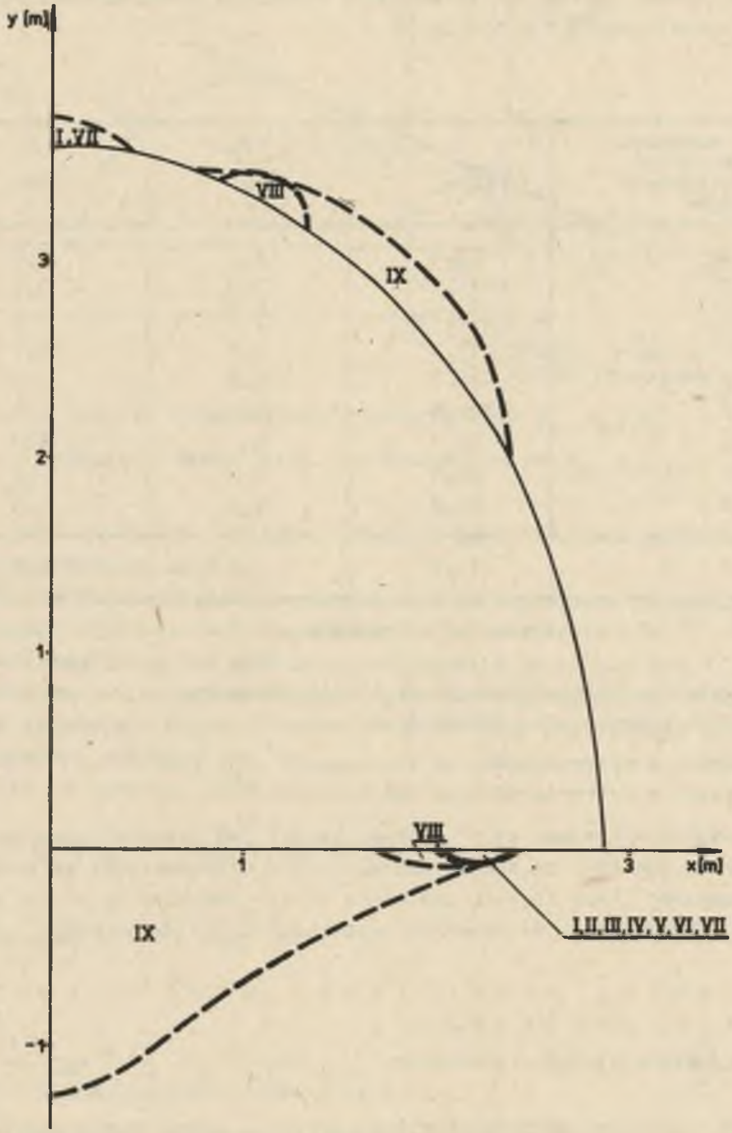
Z przyjętej do obliczeń strefy spękań hipotezy wynika, że zniszczenie skały w danym punkcie może nastąpić na skutek:

a) przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie R_r^* lub
b) przekroczenia wytrzymałości na ścinanie.

W wykonanych wykresach stref spękań rysunki 5-8 rozgraniczono oba obszary. Obszar powstały na skutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie zaznaczono linią ciągłą, natomiast obszar powstały na skutek przekroczenia wytrzymałości na ścinanie zaznaczono linią przerywaną.

2.2.1. Zasięg początkowej strefy spękań dla przykładu A($\frac{p_z}{p_x} = 0,5$) rys. 5

Jak można zauważyć na przedstawionym rysunku, górotwór w otoczeniu wyrobiska w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP-7 ulega spękaniu głównie na skutek przekroczenia jego wytrzymałości na ściskanie. O wielkości początkowej strefy spękań z trzech własności wytrzymałościowych R_c, R_r, R_r^* decyduje R_c. Im większa jest wytrzymałość na ściskanie skał otaczających



Rys. 5. Zasięg stref spękań dla przykładu $\frac{p_z}{p_x} = 0,5$

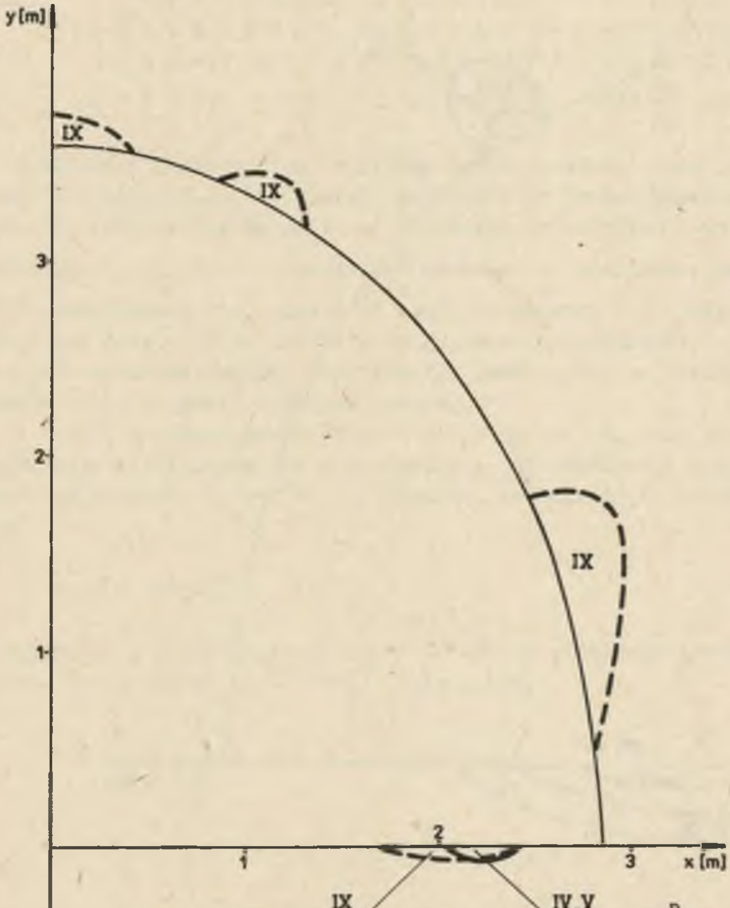
Fig. 5. Fracture zone range for the example $\frac{p_z}{p_x} = 0,5$

wyrobisko, tym mniejsza strefa spękań. Największa strefa spękań znajduje się w spągu.

2.2.2. Zasięg początkowej strefy spękań dla przykładu

$B(\frac{p_z}{p_x} = 1)$ rys. 6

Analizując wymieniony rysunek można stwierdzić, że taki układ naprężeń pierwotnych jest bardzo korzystny. Występuje stosunkowo niewielka strefa spękań (głównie w ociosie) i to przy małej wytrzymałości na ściskanie (R_c = 2 . 10^4 [kPa]).

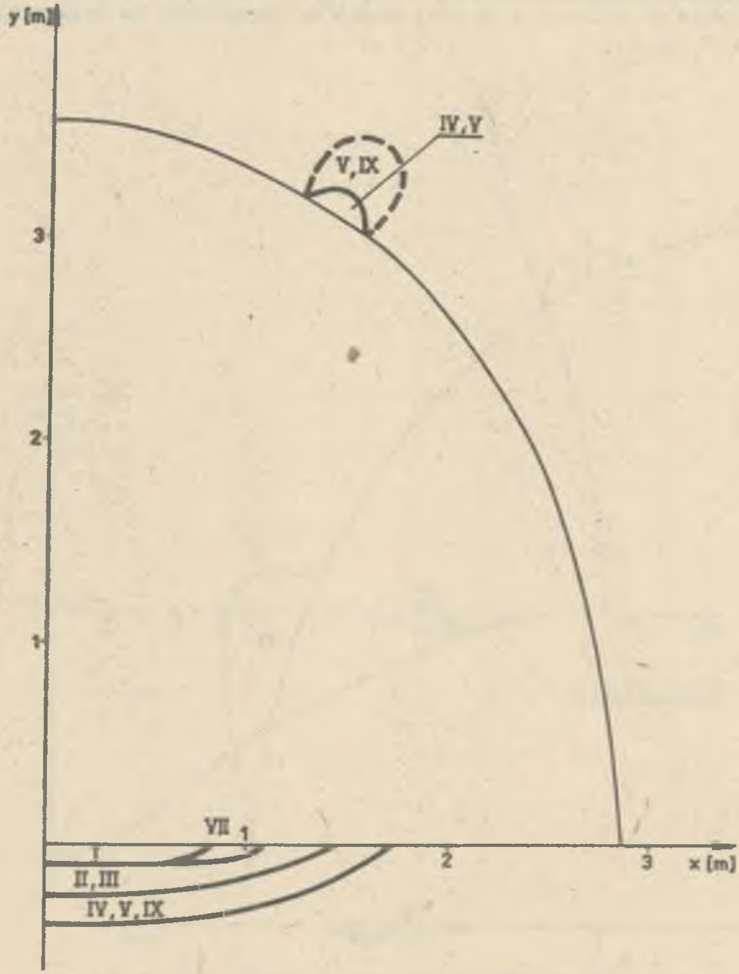


Rys. 6. Zasięg stref spękań dla przykładu $\frac{p_z}{p_x} = 1$

Fig. 6. Fracture zone range for the example $\frac{p_z}{p_x} = 1$

2.2.3. Zasięg początkowej strefy spękań dla przykładu $C(\frac{p_z}{p_x} = 2.34)$ rys. 7

Tutaj, inaczej niż w poprzednich przykładach, początkowa strefa spękań powstaje wskutek przekroczenia wytrzymałości na rozciąganie. Im mniejsza wytrzymałość skały na jednoosiowe rozciąganie R_r, tym zasięg strefy spękań jest większy. Strefa ta występuje głównie w spągu.



Rys. 7. Zasięg stref spękań dla przykładu $\frac{p_z}{p_x} = 2,34$

Fig. 7. Fracture zone range for the example $\frac{p_z}{p_x} = 2,34$

2.2.4. Zasięg początkowej strefy spękań dla przykładu $D(\frac{p_z}{p_x} = 4)$ rys. 8a, b.

W tym przykładzie, w porównaniu z omówionymi uprzednio przykładami A, B, C, powstają największe strefy spękań. Wiąże się to z dużymi naprężeniami rozciągającymi, jakie występują w spągu. Zatem strefy spękań powstają na skutek przekroczenia wytrzymałości skały na jednoosiowe rozciąganie R_r^*. Im mniejsze R_r^*, tym strefa spękań większa.

2.2.5. Określenie zależności pomiędzy wielkością początkowej strefy w spągu, a wytrzymałością na jednoosiowe rozciąganie (dla $\frac{p_z}{p_x} \geqslant 1$)

Analizując poszczególne przykłady można zauważyć pewną zależność wielkości początkowej strefy spękań, powstałej na skutek przekroczenia wytrzymałości skały na rozciąganie, od wielkości wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie R_r^* oraz stosunku $\frac{p_z}{p_x}$ (odrzucając przypadek, gdy $\frac{p_z}{p_x} = 0,5$).

W poszukiwaniu tej zależności przyjęto zmienną Q_r jako wielkość strefy spękań powstałej na skutek przekroczenia wytrzymałości R_r. Q_r określono przez splanimetrowanie odpowiedniej powierzchni na rysunkach i uwzględnienie skali w jakiej wykonano rysunek.

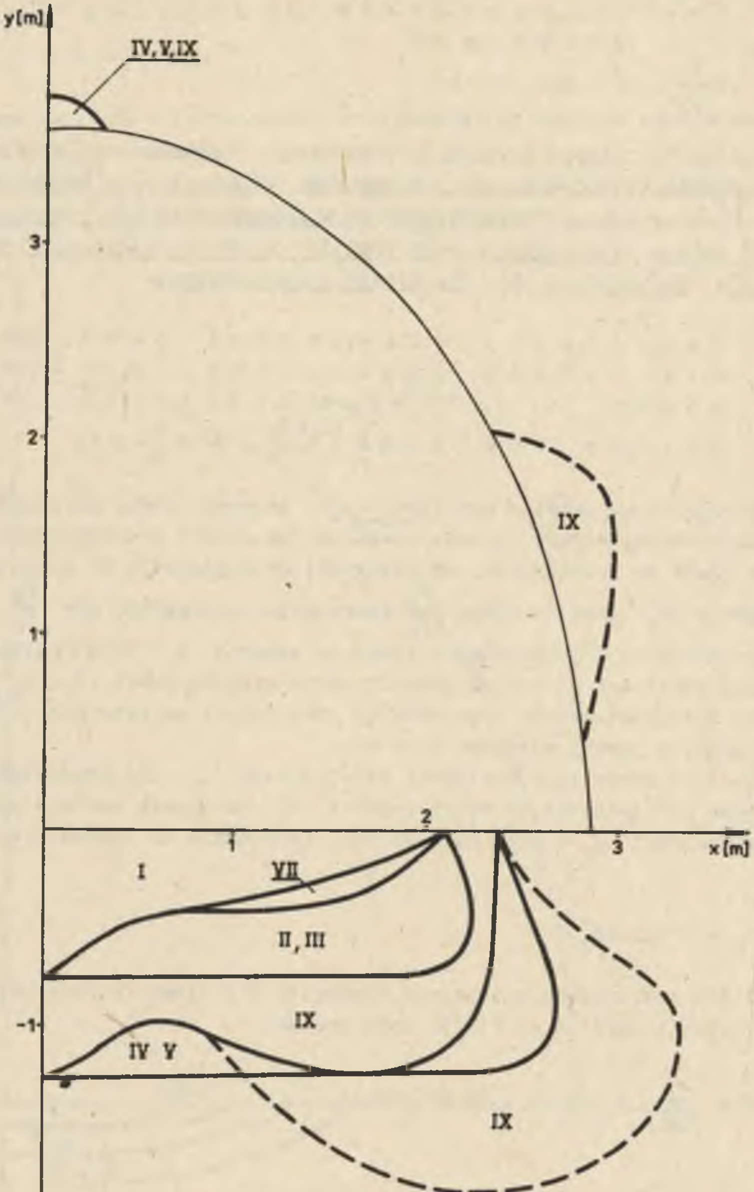
W tabeli 4 zestawiono wielkości stref spękań Q_r dla poszczególnych przykładów w zależności od wytrzymałości R_r^*. Następnie podjęto próbę opisania zależności $Q_r = f(R_r^*)$. Założono, że funkcja ta będzie miała postać:

$$Q_r = a \exp(bR_r^*) \tag{1}$$

Korzystając z metody najmniejszych kwadratów określono współczynnik "a" i "b". Zatem krzywe $Q_r = f(R_r^*)$ mają postać:

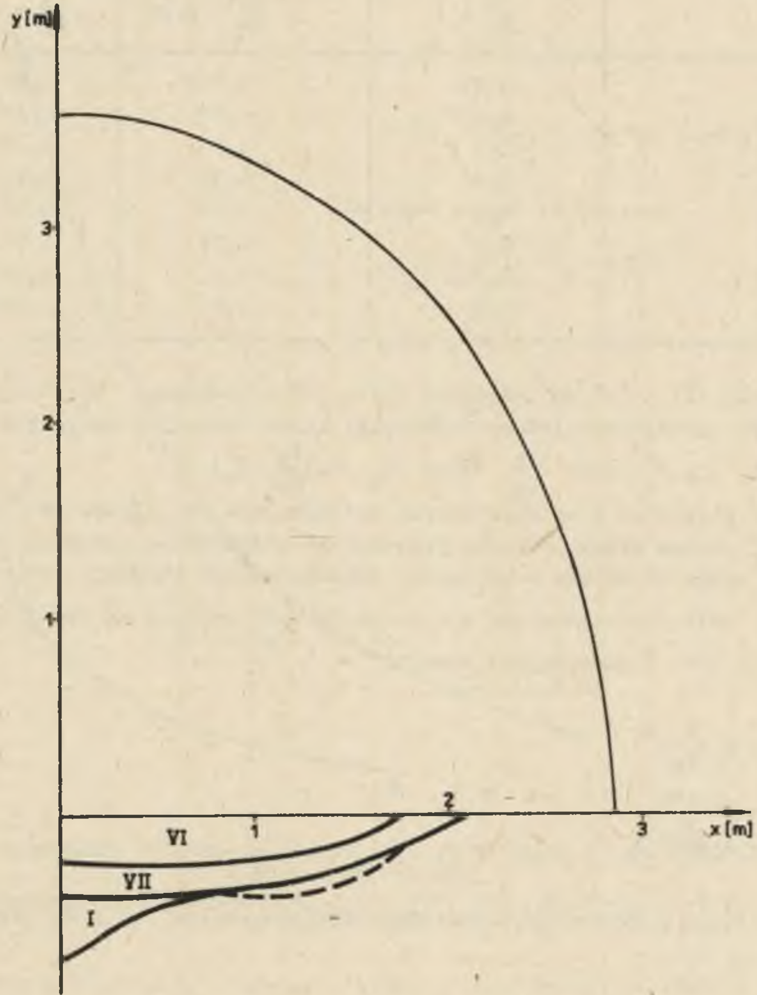
$$\text{dla } \frac{p_z}{p_x} = 4 - Q_r = 7.04 \exp(-0,24\ R_r^*) \tag{2}$$

$$\text{dla } \frac{p_z}{p_x} = 2,34 - Q_r = 1,96 \exp(-0,46\ R_r^*) \tag{3}$$



Rys. 8a. Zasięg stref spękań dla przykładu $\frac{p_z}{p_x} = 4$

Fig. 8a. Fracture zone range for the example $\frac{p_z}{p_x} = 4$



Rys. 8b. Zasięg stref spękań dla przykładu $\frac{p_z}{p_x} = 4$

Fig. 8b. Fracture zone range for the example $\frac{p_z}{p_x} = 4$

Tabela 4

R_r [MPa]	Q_r [m^2]		
	$\frac{p_z}{p_x} = 1$	$\frac{p_z}{p_x} = 2,34$	$\frac{p_z}{p_x} = 4$
0	0,075	2,06	7,09
1	0,012	1,15	6,25
1,5	0,0	1,0	4,60
3,0	0,0	0,53	3,29
5,0	0,0	0,19	2,62
5,7	0,0	0,14	1,56
6,8	0,0	0,0	1,30
9,2	0,0	0,0	0,72

Równania (2) i (3) są funkcjami tylko jednej zmiennej R_r^*. Pożytecznym wydaje się znalezienie jednego równania, które łączyłoby wszystkie trzy wielkości Q_r, R_r^* oraz $\frac{p_z}{p_x}$, czyli $Q_r = f(\frac{p_z}{p_x}, R_r^*)$.

Znając pierwotny stan naprężenia, wytrzymałość na jednoosiowe rozciąganie R_r^* można będzie wówczas przewidzieć wielkość początkowej strefy spękań w spągu wyrobiska w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP.

W tym celu zaproponowano, aby parametr $\frac{p_z}{p_x}$ zawrzeć we współczynnikach "a" i "b" w następujący sposób:

$$a = A_1\left(\frac{p_z}{p_x}\right)^{B_1}$$
$$b = A_2\left(\frac{p_z}{p_x}\right)^{B_2} \tag{4}$$

Korzystając z wyliczonych uprzednio współczynników "a" i "b" wyliczono A_1, B_1, A_2, B_2.

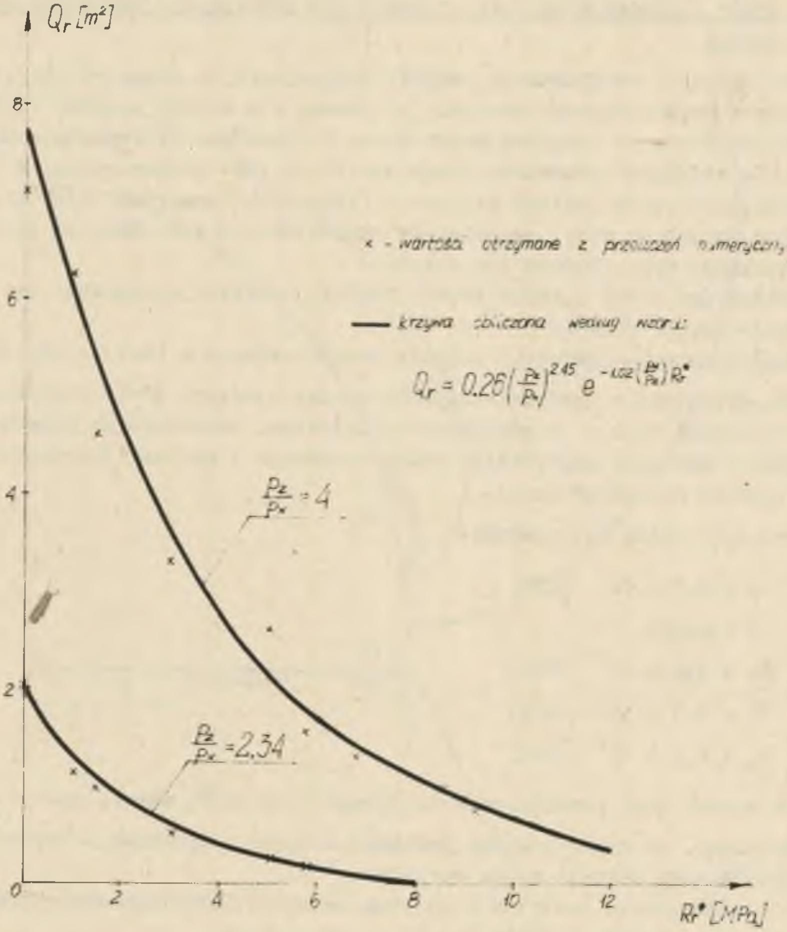
Równanie:

$$Q_r = f\left(\frac{p_z}{p_x}, R_r^*\right)$$

ma teraz postać:

$$Q_r = 0,26\left(\frac{p_z}{p_x}\right)^{2,45} \exp\left[-1,02\left(\frac{p_x}{p_z}\right)R_r^*\right] \tag{5}$$

dla R_r w [MPa]



Rys. 9. Porównanie krzywej teoretycznej z wartościami otrzymanymi z przeliczeń numerycznych

Fig. 9. Comparison of theoretical curve with the values received from calculations

Na rysunku 9 pokazano porównanie krzywej teoretycznej otrzymanej z powyższego równania z własnościami wielkości początkowej strefy spękań otrzymanymi z przeliczeń MES.

Autorzy zdają sobie sprawę, że otrzymana zależność powinna być zweryfikowana także dla innych stosunków $\frac{p_z}{p_x}$, wydaje się jednak, że już teraz wzór (5) można wykorzystać dla szacowania wielkości stref spękań w otoczeniu wyrobiska w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP. Ma to duże znaczenie przy projektowaniu wyrobisk górniczych.

2.3. Dobór kształtu wyrobiska, w otoczeniu którego nie powstanie strefa spękań

Jak wynika z rozwiązanego powyżej zagadnienia, w spągu wyrobiska w kształcie odpowiadającym obudowie ŁP tworzy się strefa spękań, której wielkość zależy od naprężeń pierwotnych i własności wytrzymałościowych. Z punktu widzenia wyciskania spągu strefa ta jest niekorzystna. W strefie spękanej następuje: zmiana własności fizycznych, przyrost objętości, łatwiejsza migracja wody, co zwiększa odkształcenia itp. Może to prowadzić do znacznego wypiętrzenia się spągu.

Postawiono zatem zadanie doboru takiego kształtu wyrobiska, aby nie powstała strefa spękań.

Rozwiązanie postawionego zadania przeprowadzono w następujący sposób:

a) Dla wyrobiska o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP-7, wykonanego na głębokości 1000 m w górotworze sprężystym, określono za pomocą programów MES stan naprężenia, przemieszczenia i wytężenia (zmodyfikowaną hipotezą Coulomba-Mohra).

Przyjęto stałe materiałowe:

$$G = 0,7 \times 10^7 \quad [kPa]$$

$$\nu = 0,428$$

$$R_c = 3,5 \times 10^4 \quad [kPa]$$

$$R_r^* = 0,1 \times 10^4 \quad [kPa]$$

$$R_r = 0,7 \times 10^4 \quad [kPa]$$

W wyniku tego przeliczenia otrzymano początkową strefę spękań w spągu.

b) Założono, że skała spękana została usunięta z wyrobiska. Powstał w ten sposób nowy kształt spągu wyrobiska.

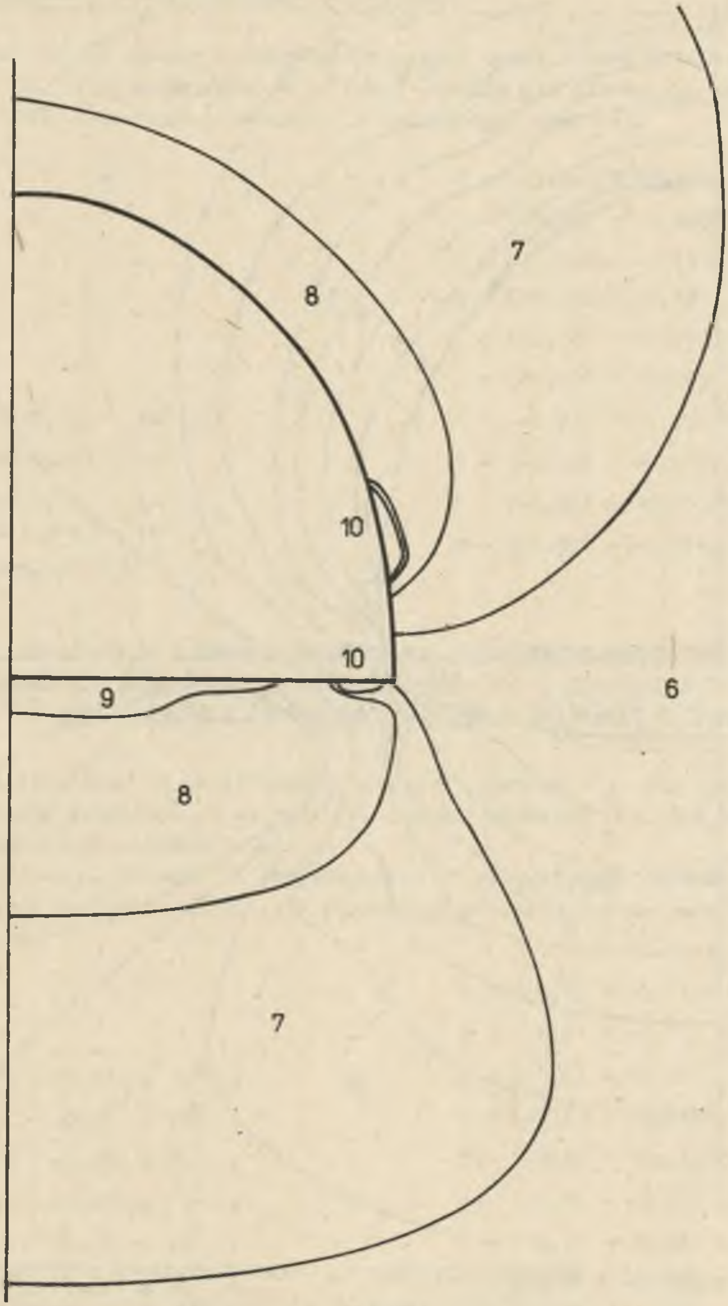
c) Dla zmienionego kształtu wyrobiska ponownie określono stan naprężenia przemieszczenia, a także "nową" strefę spękań.

d) Czynności wymienione w pkt. "b" i "c" powtarzano dotąd, aż uzyskano kształt wyrobiska, przy którym już nie powstała strefa spękań.

Dla przyjętych danych liczbowych trzeba było 9 razy zmieniać kształty wyrobiska, aby uzyskać kształt końcowy, przy którym nie ma strefy spękań.

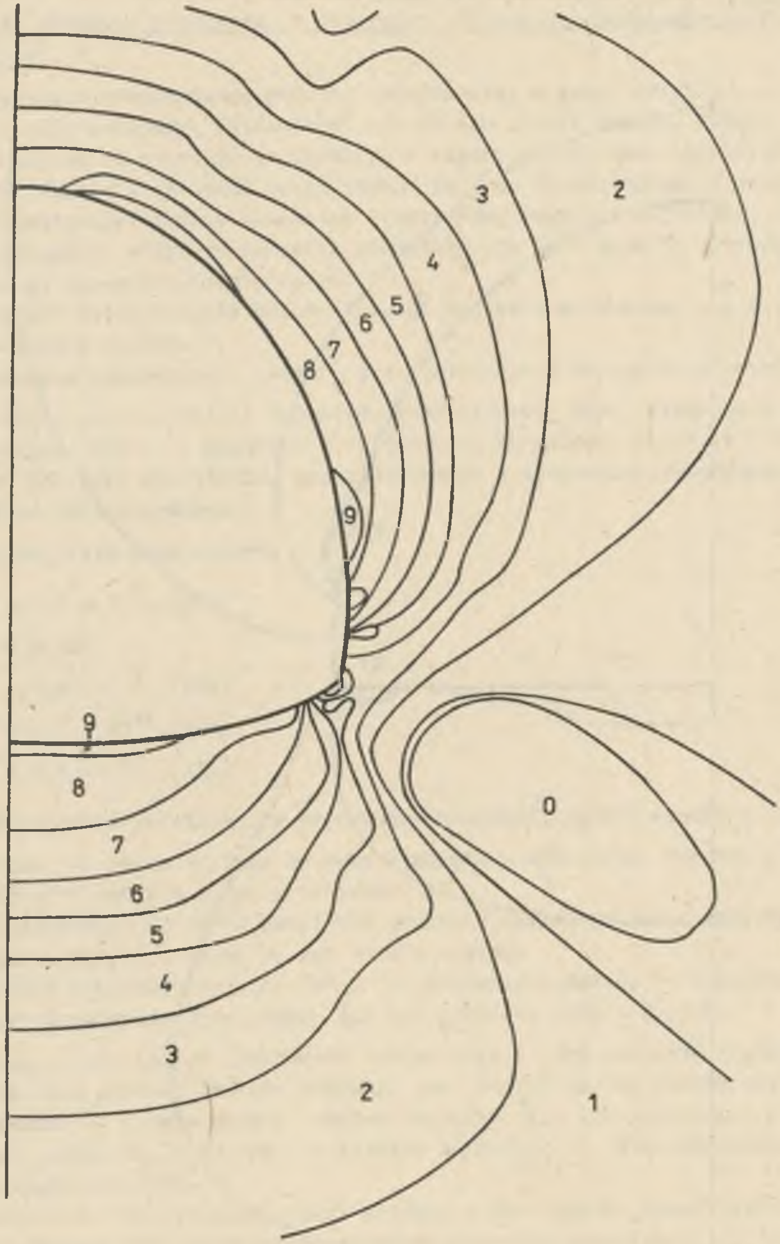
Na rysunku 10 przedstawiono rozkład naprężeń σ_1 dla pierwszego przeliczonego przykładu, a na rys. 11 rozkład naprężeń σ_1 dla ostatniego (dziewiątego) przykładu.

Na wykresach wyodrębniono pola z wpisaną w nie liczbą. Danej liczbie przyporządkowany jest odpowiedni przedział wartości naprężenia σ_1 (lub σ_2).



Rys. 10. Rozkład naprężeń σ_1 dla pierwszego przykładu

Fig. 10. Stress distribution σ_1 for the first example



Rys. 11. Rozkład naprężeń σ_1 dla dziewiątego przykładu

Fig. 11. Stress distribution σ_1 for the ninth example

Poniżej podano liczby z odpowiadającymi im przedziałami wartości naprężenia σ_1 (dla porównania) - po lewej stronie dla pierwszego przykładu (rys. 10), a po prawej stronie dla ostatniego (rys. 11).

6 - (-0,27-0,18) x 10^5 ;
7 - (-0,18-0,09) x 10^5 ;
8 - (-0,09-0,0) x 10^5 ;
9 - (-0,0 -0,09) x 10^5 ;
10 - (0,09-0,18) x 10^5 ;

0 - (-0,209 - -0,187) x 10^5,
1 - (-0,187 - -0,165) x 10^5,
2 - (-0,165 - -0,143) x 10^5,
3 - (-0,143 - -0,121) x 10^5,
4 - (-0,121 - -0,099) x 10^5,
5 - (-0,099 - -0,077) x 10^5,
6 - (-0,077 - -0,055) x 10^5,
7 - (-0,055 - -0,033) x 10^5,
8 - (-0,033 - -0,011) x 10^5,
9 - (-0,011 - -0,011) x 10^5,

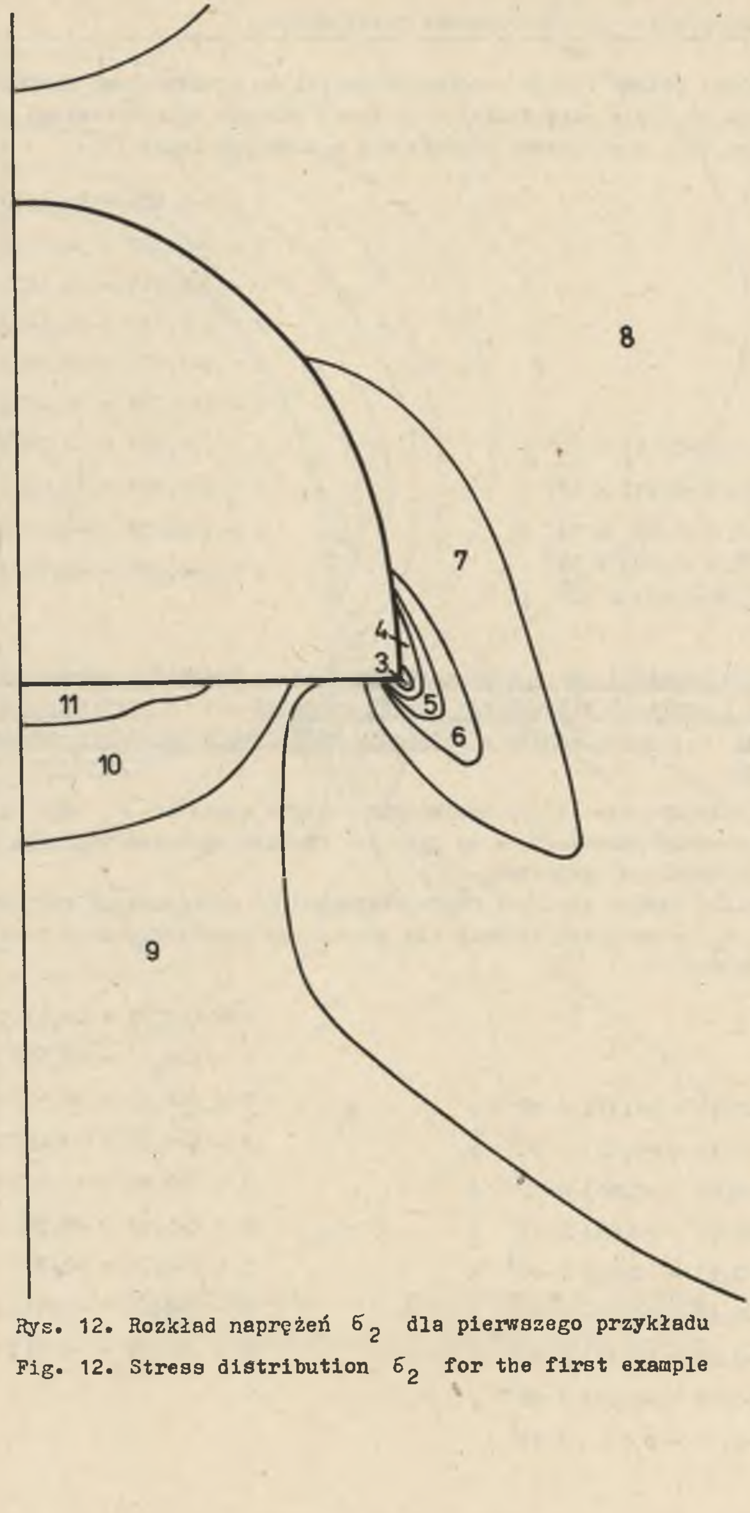
Można zauważyć, że w otoczeniu wyrobiska o kształcie pokazanym na rysunku 11 nastąpił kilkakrotny spadek naprężeń σ_1 w porównaniu z naprężeniami σ_1, jakie panują w otoczeniu wyrobiska o kształcie pokazanym na rys. 10.

Na kolejnym rys. 12 przedstawiono rozkład naprężeń σ_2 dla pierwszego przeliczonego przykładu, a na rys. 13. rozkład naprężeń σ_2 dla ostatniego (dziewiątego) przykładu.

Poniżej podano liczby z odpowiadającymi im przedziałami wartości naprężenia σ_2 - po lewej stronie dla pierwszego przykładu, a po prawej dla dziewiątego.

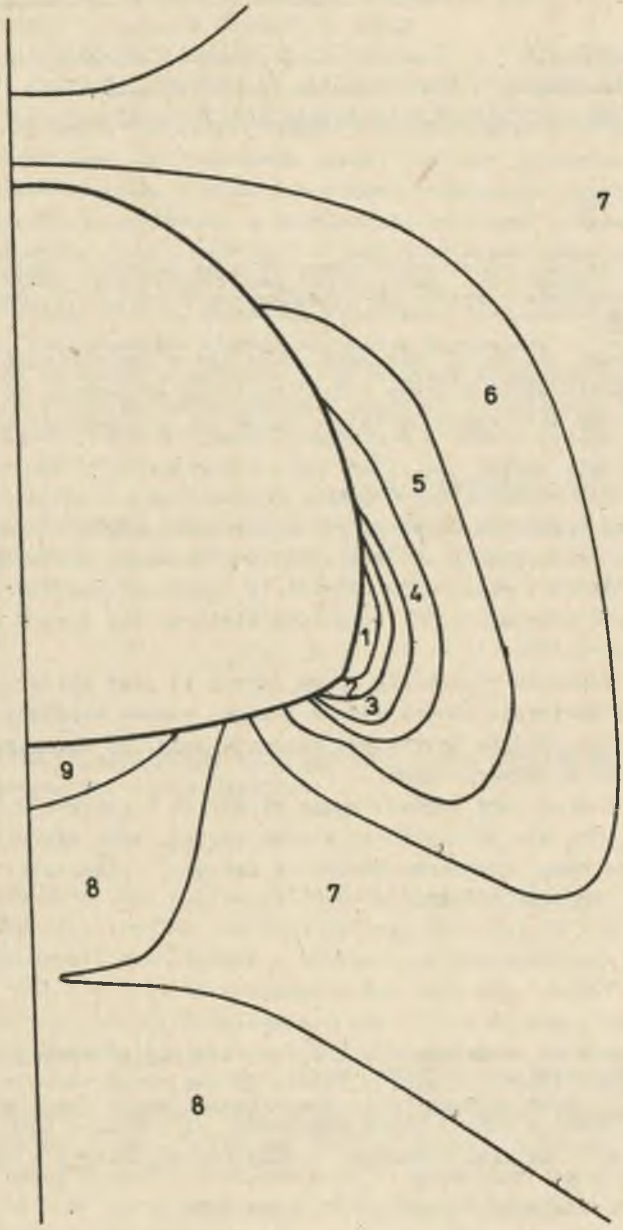
3 - (-1,35 - -1,17) x 10^5 ;
4 - (-1,17 - -0,99) x 10^5 ;
5 - (-0,99 - -0,81) x 10^5 ;
6 - (-0,81 - -0,63) x 10^5 ;
7 - (-0,63 - -0,45) x 10^5 ;
8 - (-0,45 - -0,27) x 10^5 ;
9 - (-0,27 - -0,18) x 10^5 ;
10 - (-0,18 - -0,09) x 10^5 ,
11 - (-0,09 - 0,0) x 10^5 ,

1 - (-0,77 - -0,7) x 10^5,
2 - (-0,7 - -0,63) x 10^5,
3 - (-0,63 - -0,56) x 10^5,
4 - (-0,56 - -0,49) x 10^5,
5 - (-0,49 - -0,43) x 10^5,
6 - (-0,42 - -0,35) x 10^5,
7 - (-0,35 - -0,28) x 10^5,
8 - (-0,28 - -0,21) x 10^5,
9 - (-0,21 - -0,14) x 10^5,



Rys. 12. Rozkład naprężeń σ_2 dla pierwszego przykładu

Fig. 12. Stress distribution σ_2 for the first example



Rys. 13. Rozkład naprężeń σ_2 dla dziesiątego przykładu

Fig. 13. Stress distribution σ_2 for the ninth example

Rozkład naprężeń σ_2 w otoczeniu wyrobiska o kształcie pokazanym na rys. 13 jest znacznie korzystniejszy od rozkładu naprężeń σ_2, otrzymanego w otoczeniu wyrobiska o kształcie pokazanym na rys. 12.

3. UWAGI KOŃCOWE

W przedstawionej pracy analizowano rozkład naprężeń, przemieszczeń i wytężeń w sąsiedztwie wyrobiska chodnikowego o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP-7.

Wyprowadzone wnioski i zależności mają także zastosowanie dla kształtów wyrobisk odpowiadających innym rodzajom obudów ŁP (wynika to z przeliczonych przykładów dla innych rodzajów obudów ŁP, których nie zamieszczono w tej pracy).

Ogólnie można stwierdzić, że:

1) W spągu wyrobiska chodnikowego o kształcie odpowiadającym obudowie ŁP powstaje strefa spękań, której wielkość zależy od pierwotnego stanu naprężeń, własności wytrzymałościowych (a przede wszystkim wytrzymałości na jednoosiowe rozciąganie). Początkową wielkość tej strefy można określić za pomocą wzoru (5).

Z punktu widzenia wyciskania spągu strefa ta jest niekorzystna, gdyż wewnątrz jej następuje spadek modułu Younga, wzrost współczynnika Poissona, przyrost objętości, łatwiejsza migracja wody, co zwiększa odkształcenia zachodzące z upływem czasu.

2) Można dobrać taki kształt spągu wyrobiska o przekroju odpowiadającym obudowie ŁP, aby nie tworzyła się strefa spękań. Przy odpowiednio dobranym kształcie spągu wyrobiska następuje istotny, kilkakrotny spadek naprężeń σ_1, σ_2 w jego otoczeniu.

LITERATURA

[1] Dobrociński S., Szmelter J.: Program rozwijający równania metody elementów skończonych BIULETYN WAT.

[2] Filcek H.: Stan naprężenia i odkształcenia wokół wyrobiska chodnikowego jako funkcja czasu, Praca doktorska, AGH, Kraków 1960.

[3] Kenneth H.: The finite element method for engineenig - New York e.a John Wiley and Sons 1975.

[4] Reiner M.: Andranced rheology. London 1971.

[5] Szmelter J. i inni: Programy metody elementów skończonych, "Arkady", Warszawa 1973.

[6] Tajduś A.: Zastosowanie metody elementów skończonych do zagadnień reologicznych mechaniki górotworu, ZN AGH s. Górnictwo z. 4, Kraków 1983.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz Podgórski

Wpłynęło do Redakcji w styczniu 1985 r.

СОСТОЯНИЕ НАГРУЗКИ, ПЕРЕМЕЩЕНИЯ И НАТЯЖЕНИЯ ВБЛИЗИ ШТРЕКОВЫХ ВЫРАБОТОК С РАЗРЕЗОМ ОТВЕЧАЮЩИМ КРЕПИ

Р е з ю м е

В работе представлен график напряжения и деформации скал около штрековых выработок, определяемый при применении метода конечных элементов и электронной вычислительной техники. В институте горной геомеханики разрабстан комплект параметров МЕ позволяющих на определение состояния напряжения, перемещения и натяжения вблизи выработок с различным видом поперечного разреза. Эти программы были разработаны, предполагая, что горные породы описывают следующие модели: Хоока, Кельвина, Максвелла, Пойнтинга-Томсона, Бургерса, Бингама. Анализировано влияние первичных нрпряжений и свойств сопротивления скал на состояние напряжения и на величину первичной зоны посечки вблизи выработки с формой соответствующей крепи ŁP. Полученные результаты указывают на большое подобие графика напряжения в откосе прямоугольной выработки. Чем меньше сопротивление скалы, тем больше радиус зоны отсеков. Подано, что используя соответственный подбор формы выработки, можно получить такое состояние, чтобы не появиласт в почве зона откосов или была бы мала. Эту проблему проанализировано для выработок в крепи ŁP-7 выполненной на глубине 1000 м.

STRESS, DISPLACEMENT AND EFFORT ADJACENT TO THE DOG HEADING WITH A SECTION CORRESPONDING TO ŁP SUPPORT

S u m m a r y

The paper presents rock stress and deformation distribution adjacent to headings. The distribution has been defined by means of finite element methods and electronic calculation technique. In the Institute of Mining Geomechanics, AGH, the sets of programmes MES have been worked out, which allow to define the stress, displacement and effort adjacent to the headings with any cross-section shape. The programmes have been worked out assuming that rock is described by models of Hook, Kelvin, Maxwell, Poynting-Thomson, Burgers, Bingham. The influence of primary stresses and rock strength properties on the stress and size of primary fracture zone adjacent to the heading shaped correspondingly to ŁP support has been analysed. The results show great similarity of stress distribution in the side of work shaped correspondingly to ŁP support to stress distribution in the rectangular side of work. The smaller rock uniaxial tensile strength, the bigger range of crack zone. This zone occurs mainly in the heading

floor. It has been said that correct selection of heading shape allows for eliminating the fracture zone in the floor or making it very small. This problem has been analysed for the heading in ŁP-7 support made on the depth 1000 m.