ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1983

Seria: GÓRNICTWO z. 128 Nr kol. 778

Zdzisław GERGOWICZ

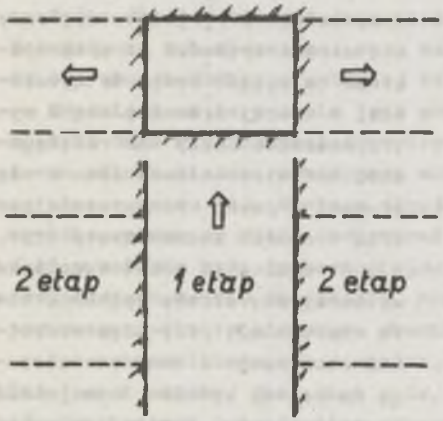
Instytut Geotechniki
Politechniki Wrocławskiej

SKRZYŻOWANIA WYROBISK KORYTARZOWYCH

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki rozważań teoretycznych nad kształtowaniem się naprężeń wokół skrzyżowania. Przedstawione wykresy izolinii jednakowych naprężeń, uzyskane z obliczeń przy wykorzystaniu metody elementów skończonych, pozwalają zaprogramować etapy wykonywania skrzyżowania oraz jego stateczności.

1. Wprowadzenie

Z teoretycznego punktu widzenia skrzyżowania wyrobisk korytarzowych traktuje się, ze względu na ich geometrię jako przestrzenny układ obliczeniowy. Stanowisko takie jest jednak tylko pozornie słuszne. Rzecz w tym, że jeśli uwzględni się proces powstawania takiego skrzyżowania, wówczas układ przestrzenny redukuje się do dwóch układów płaskich, integralnie ze sobą związanych i nawzajem na siebie wpływających. Chodzi mianowicie o to, że nigdy nie wykonuje się skrzyżowania poprzez drążenie wyrobisk we wszystkich czterech kierunkach równocześnie. W pierwszej fazie (rys. 1) powstaje jedno wyrobisko korytarzowe, a dopiero po jego wykonaniu następuje realizacja drugiej fazy, tzn. drążenie wyrobiska poprzecznego.



Rys. 1

Nie ulega kwestii, że fazę pierwszą można traktować jako zagadnienie płaskie, gdyż jest to typowe wyrobisko korytarzowe. Podobne stanowisko można zająć w stosunku do fazy drugiej, z pewnymi jednak uwarunkowaniami. Uwarunkowania te kryją się w fakcie, że drugie wyrobisko jest już wykonywane w naruszonym górotworze. Można je zatem rozpatrywać jako płaski układ obliczeniowy, ale pod warunkiem

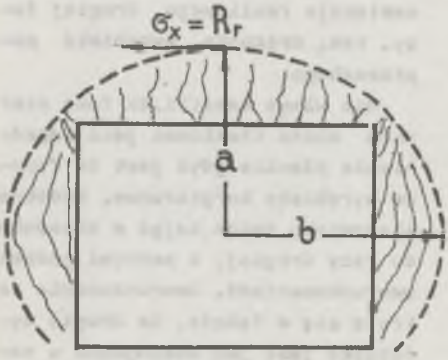
uwzględnienia tych wszystkich zmian w stanie naprężenia górotworu, które wywołane zostały realizacją fazy pierwszej.

Jest sprawą oczywistą, że warunek powyższy jest tylko wtedy możliwy do spełnienia, gdy znane są wspomniane zmiany, czyli, inaczej mówiąc,gdy znany jest stan naprężenia górotworu w najbliższym sąsiedztwie wyrobiska korytarzowego. W tym stanie rzeczy, w wypadku rozpatrywania skrzyżowania,na plan pierwszy wysuwa się zagadnienie pojedynczego wyrobiska.Problem ten, znany od lat, doczekał się wielu opracowań, tym niemniej, ze względu na dużą liczbę czynników, wpływających na kształtowanie się stanu naprężenia wokół takiego wyrobiska, warto mu poświęcić nieco uwagi.

2. Stan naprężeń wokół wyrobiska korytarzowego

Dla lepszego zobrazowania przedstawionych niżej rozważań, pewne dane, dotyczące lokalizacji wyrobiska, jego kształtu i rozmiarów oraz warunków geotechnicznych, zaczerpnięto z praktyki, mianowicie przyjęto mniej więcej takie, jakie występują w głębokich wyrobiskach Zagłębia Lubińskiego. Założono zatem: prostokątny kształt wyrobiska, jego wysokość 4,5 m, szerokość 6,0 m, głębokość usytuowania H = 800 m, ciężar objętościowy nadkładu $\gamma = 2{,}5\ T/m^3$, współczynnik Poissona m = 4÷5. Wyliczone na podstawie powyższych danych pionowe naprężenie pierwotne $p_z = 20$ MPa, zaś naprężenie boczne (poziome) przy m = 5 wynosi 5 MPa, natomiast przy m = 4 około 6,67 MPa.

Posługując się znanymi z mechaniki górotworu wzorami, dotyczącymi wyrobiska prostokątnego, można wyznaczyć wartość naprężenia poziomego w stropie, w osi wyrobiska oraz naprężenia pionowego w ociosach. Gdy naprężenia te zarówno w stropie, jak i w ociosach będą większe od wytrzymałości skały na rozciąganie i ściskanie, wówczas wokół wyrobiska wytworzy się strefa spękań.W stropie spękania te sięgać będą do wysokości, w której zrównają się z wytrzymałością skały na rozciąganie, natomiast ociosy zaczną się kruszyć i pękać rozwarstwiająco oraz w sposób soczewkowaty (rys. 2). W rezultacie wokół wyrobiska wytworzy się strefa spękań (strefa odprężona), przy czym wszystkie obserwacje z natury wskazują na to, że będzie ona miała kształt elipsy. Stwierdzenie to przyjął Sałustowicz za podstawę



Rys. 2

swojej hipotezy sklepienia ciśnień, przy czym wykorzystał do tego celu znane z teorii sprężystości rozwiązanie, dotyczące stanu naprężeń wokół otworu eliptycznego w tarczy, obciążonej wszechstronnie wzdłuż krawędzi. Posługując się wspomnianą hipotezą, możemy parametry elipsy, określającej strefę odprężoną, wyznaczyć ze wzoru

$$\frac{a}{b} = \frac{R_r + p_z - p_x}{2\,p_x}, \qquad (1)$$

gdzie:

a - półoś pionowa elipsy,

b - półoś pozioma,

R_r - wytrzymałość skały na rozciąganie,

p_z - naprężenie pierwotne pionowe,

p_x - naprężenie pierwotne poziome.

Jak widać, w przedstawionym wzorze występuje tylko wytrzymałość skały na rozciąganie. Gdybyśmy wzięli pod uwagę wytrzymałość na ściskanie, to wówczas otrzymamy inny wzór, mianowicie:

$$\frac{a}{b} = \frac{2\,p_z}{R_c - p_z + p_x}, \qquad (2)$$

gdzie:

R_c - wytrzymałość skały na ściskanie.

Tylko dla jednego jedynego stosunku R_r do R_c oba wzory są tożsame. Z reguły są one sprzeczne, mamy zatem dwa różne kryteria, określające strefę odprężoną. Powstaje pytanie, które z nich jest ważniejsze.

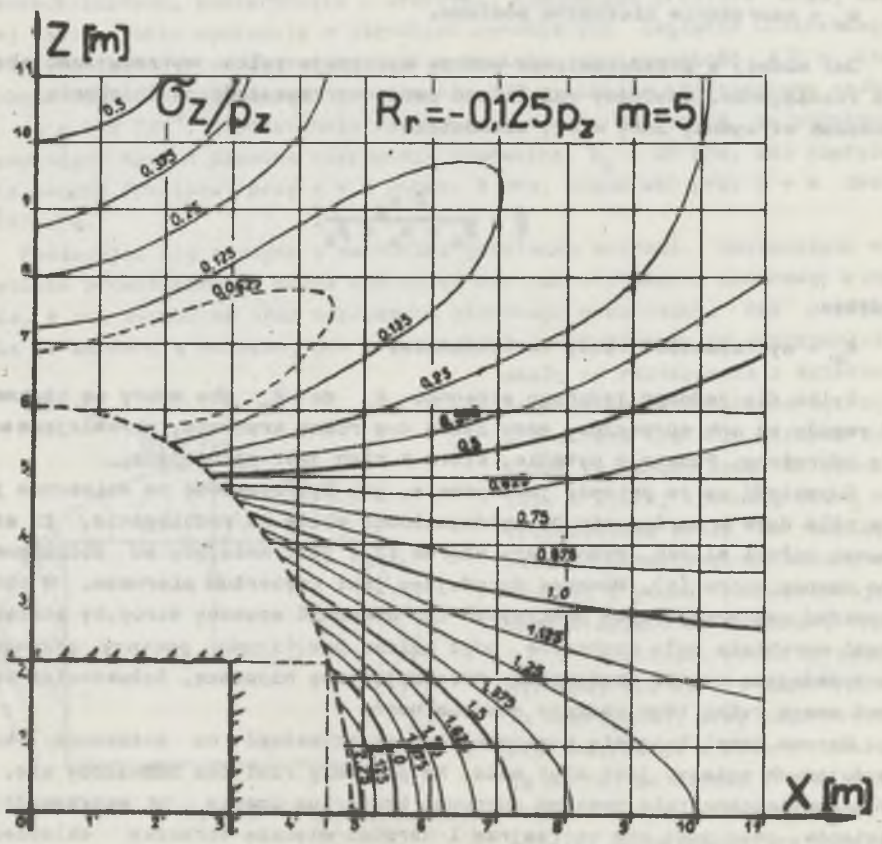
Odpowiedź na to pytanie jest prosta, gdy wytrzymałość na ściskanie jest na tyle duża w porównaniu do wytrzymałości skały na rozciąganie, iż stosunek półosi elipsy, wyznaczony wzorem (2), jest mniejszy od obliczonego za pomocą wzoru (1). Wówczas decydujące jest kryterium pierwsze. W takim wypadku wystarczy tylko podtrzymać lub wzmocnić spękany strop, by stateczność wyrobiska była zachowana, gdyż ociosy bez trudu powinny przenieść przypadające na nie obciążenie. Precyzując swą hipotezę, Sałustowicz brał pod uwagę tylko tego rodzaju ewentualność.

Sprawa komplikuje się poważnie, gdy wytrzymałość na ściskanie skał, budujących ociosy, jest zbyt mała. Na pierwszy rzut oka zdawałoby się, że wówczas istotną rolę powinno odgrywać kryterium oparte na wytrzymałości ociosów, gdyż jest ono ostrzejsze i narzuca większą strzałkę sklepienia ciśnień. W rzeczywistości jednak tak się nie dzieje, gdyż z analizy prze-

biegu zjawisk w górotworze wynika, że decydująca o kształcie strefy odprężonej jest wytrzymałość stropu i jedynie przez jej sztuczne zmniejszenie (osłabienie) lub przez wykonanie bardzo wysokiego sklepienia można by wysunąć na plan pierwszy kryterium odnoszące się do ociosów, a tego nikt przecież robić nie będzie.

Powyższe stwierdzenie pociąga za sobą niezwykle istotne konsekwencje. Wynika mianowicie z niego, że o kształcie strefy odprężonej (spękanej), a więc i o kształcie sklepienia ciśnień decyduje strop, natomiast zasięg strefy odprężonej, a zatem stateczność wyrobiska uzależniona jest od wytrzymałości ociosów. Innymi słowy, w miarę jak niszczą się ociosy, elipsa, ograniczająca strefę odprężoną, przesuwa się w głąb calizny, zachowując jednak swój kształt geometryczny, tzn. poprzednio ustalony stosunek półosi.

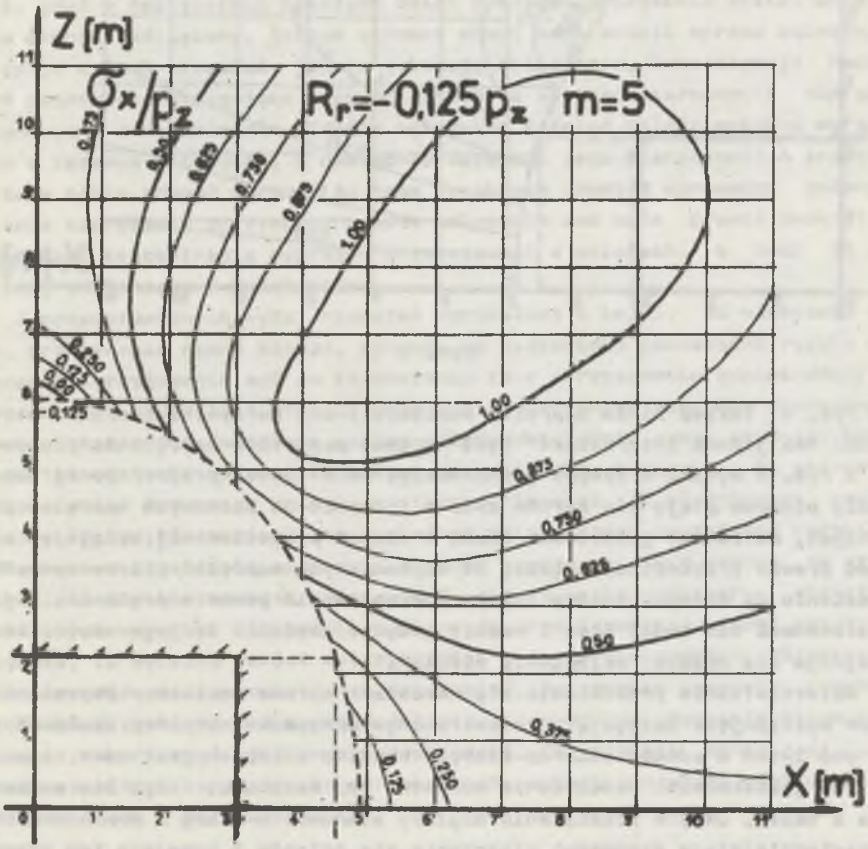
W rozpatrywanym przez nas przypadku zakładamy, że wytrzymałość ociosów jest stosunkowo mała, mniejsza niż naprężenia w tych ociosach występują-



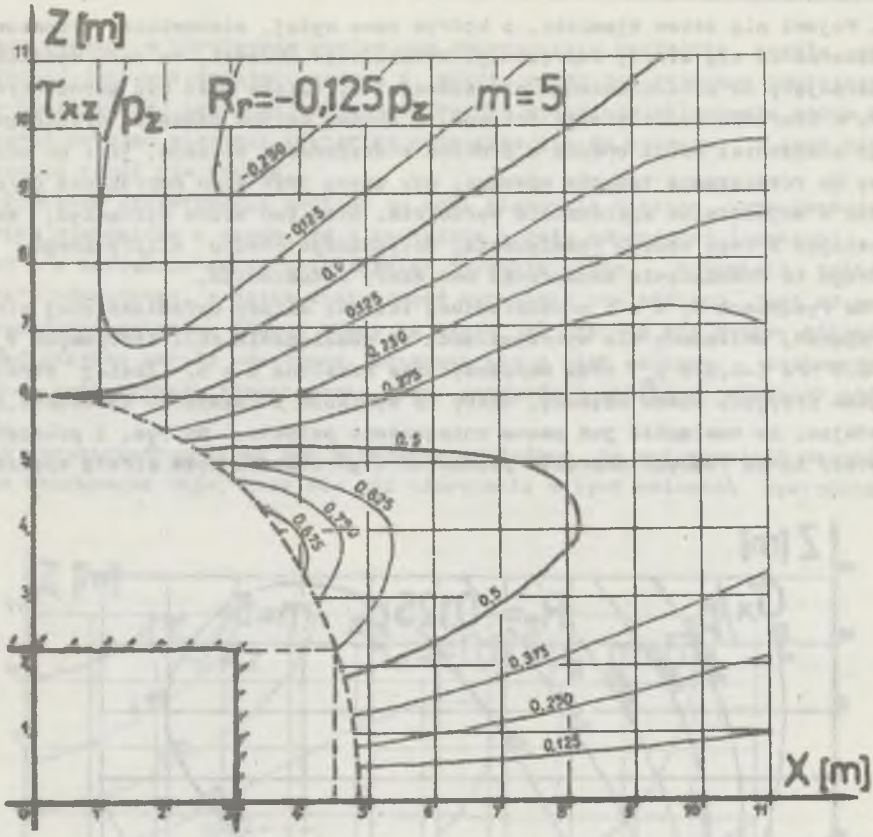
Rys. 3

ce. Pojawi się zatem zjawisko, o którym mowa wyżej, mianowicie stopniowe rozszerzania się strefy odprężonej. Wynika stąd wniosek, że cały wysiłek, zmierzający do zabezpieczenia stateczności wyrobiska musi być skoncentrowany w kierunku stabilizacji ociosów, a sprawa stropu nabiera drugorzędnego znaczenia. Jeśli chodzi o problem stateczności ociosów, jest on możliwy do rozwiązania jedynie wówczas, gdy znany jest stan naprężenia górotworu w najbliższym sąsiedztwie wyrobiska. Stan ten można wyznaczyć, korzystając z tego samego rozwiązania, dotyczącego otworu eliptycznego, z którego to rozwiązania zaczerpnął swe wzory Sałustowicz.

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiono kształt elipsy ograniczającej strefę spękań, obliczony dla wytrzymałości na rozciąganie skał stropowych $R_r = -2{,}5$ MPa ($-0{,}125\ p_z$) oraz współczynnika Poissona $m = 5$. Zasięg strefy spękań przyjęto nieco większy, niżby to wynikało z rozmiarów wyrobiska, zakładając, że nastąpiło już pewne zniszczenie ociosów. Na rys. 3 pokazane zostały linie równych naprężeń pionowych w górotworze poza strefą spękań,



Rys. 4



Rys. 5

na rys. 4 takież linie naprężeń poziomych, zaś na rys. 5 naprężeń stycznych. Nas jednak interesować będą przede wszystkim naprężenia pionowe.

Z rys. 3 wynika w sposób jednoznaczny, że w części przystropowej naprężenia pionowe stają się bardzo małe w stosunku do pionowych naprężeń pierwotnych, natomiast gwałtownie rosną w części przyociosowej, osiągając wartość prawie trzykrotnie większą od wspomnianych naprężeń pierwotnych. W odniesieniu do stropu oznacza to, że nastąpi w nim pewne odprężenie, jego stateczność nie budzi obaw i należy jedynie wzmocnić tę jego część, która znajduje się poniżej sklepienia ciśnień.

Katastrofalnie przedstawia się natomiast sprawa ociosów. Naprężenia w nich występujące osiągają w rozpatrywanym przypadku wartości około 55 MPa. Są one zatem w odniesieniu do słabych skał, a o takich jest mowa, tego rzędu, że jakiekolwiek wzmocnienie ociosów, np. kotwiami, mija się całkowicie z celem. Jedyne rozwiązanie mogłaby stanowić w miarę mocna obudowa, przeciwdziałająca procesowi niszczenia się ociosów i hamująca ich przemie-

szczanie się do wnętrza wyrobiska. Wywoływałaby ona w ten sposób trójosiowy stan naprężenia (likwidacja swobodnej powierzchni) w ociosach,zwiększając tym samym wytrzymałość skały na ściskanie.

3. Skrzyżowania

Jeśli znany jest stan naprężenia górotworu w sąsiedztwie wyrobiska korytarzowego, wykonanego w fazie pierwszej, to problem skrzyżowania można uznać, teoretycznie rzecz biorąc, za rozwiązany. Krzyżujące się z już wykonanym wyrobisko przebiegać będzie w określonych warunkach ciśnienia górotworu, a zatem jego wykonanie sprowadzać się będzie do uwzględnienia tych warunków przez zastosowanie odpowiedniej techniki drążenia i doboru właściwej obudowy. Niestety, sprawa jest tylko na pozór taka prosta. Możemy wprawdzie powiedzieć, rozpatrując problem od strony praktyki górniczej, że rzeczywiście w odniesieniu do stropu nie ma specjalnych trudności, gdyż w następstwie zaszłych zmian w stanie naprężenia został on w dużym stopniu odciążony, jednak ogromne obawy musi budzić sprawa ociosów.Występuje w nich przecież, jak to wykazują obliczenia, koncentracja naprężeń pionowych, osiągająca prawie trzykrotną wartość pierwotnych naprężeń pionowych. W tej właśnie strefie ogromnych ciśnień należy wykonać wyrobisko o żądanym kształcie, a następnie zapewnić jego stateczność.A przecież trzeba sobie zdawać sprawę, że nowe wyrobisko również wprowadzi zmiany w stanie naprężenia górotworu, przede wszystkim zaś może prawie dwukrotnie zwiększyć koncentrację naprężeń ściskających w ociosach, a będą to już ociosy odsłonięte z dwóch stron.

Z przedstawionych wyżej rozważań wynikałoby z kolei, że właściwie nie ma, praktycznie rzecz biorąc, sposobu na całkowicie pozbawione ryzyka wykonanie skrzyżowania ani na zapewnienie temu skrzyżowaniu odpowiedniej stateczności - oczywiście przy założeniu niekorzystnych warunków geotechnicznych. Rozpatrując jednak tę sprawę należy uwzględnić pewne czynniki,które niewątpliwie mogą wpłynąć łagodząco na zaistniałą sytuację. Po pierwsze, trzeba wziąć pod uwagę charakterystyczne dla skał ich właściwości reologiczne. Wszystkie występujące w skałach zmiany stanu naprężenia przebiegają w pewnym przedziale czasowym, a zatem zawsze istnieje szansa na przeciwdziałanie skutkom tych zmian. Gdyby nie ta cecha górotworu, większość wykonanych wyrobisk nie byłaby możliwa do zrealizowania. Drugi pozytywny czynnik, to wyraźny wzrost wytrzymałości górotworu w wypadku trójosiowego stanu naprężenia (wszechstronne ściskanie). Po trzecie wreszcie, uwzględnić należy zjawisko samoistnego dążenia górotworu do uzyskania stanu równowagi, zaburzonego wykonanymi wyrobiskami. Ta ostatnia cecha jest podstawą wszelkich koncepcji konstrukcyjnych, wykorzystujących efekty współpracy obudowy z górotworem.

Wszystkie wymienione wyżej pozytywne czynniki winny być uwzględnione w maksymalnym stopniu. Przyjmując to jako punkt wyjścia, można ustalić kilka wskazań natury praktycznej, dotyczących wykonywania skrzyżowań w warunkach, jakie założono na wstępie. Najważniejsze z tych wskazań brzmiałyby następująco:

- Przed przystąpieniem do drążenia wyrobiska poprzecznego konieczne jest wzmocnienie ociosów istniejącego wyrobiska możliwie silną obudową w rejonie przyszłego skrzyżowania.
- Nie należy z wyrobiskiem poprzecznym dochodzić do wyrobiska już istniejącego. Innymi słowy, wykonując np. przecinkę, należy ją pędzić z dwóch stron równocześnie.
- Postęp w drążeniu wyrobiska poprzecznego powinien być możliwie szybki, ale osiągany krótkimi, najlepiej metrowymi, odcinkami. Każdy taki odcinek winien być natychmiast obudowany silną obudową, zapewniającą stateczność ociosów.
- Konieczne jest zaprojektowanie specjalnej obudowy, odpowiednio mocnej i wykorzystującej do maksimum współpracę z górotworem.

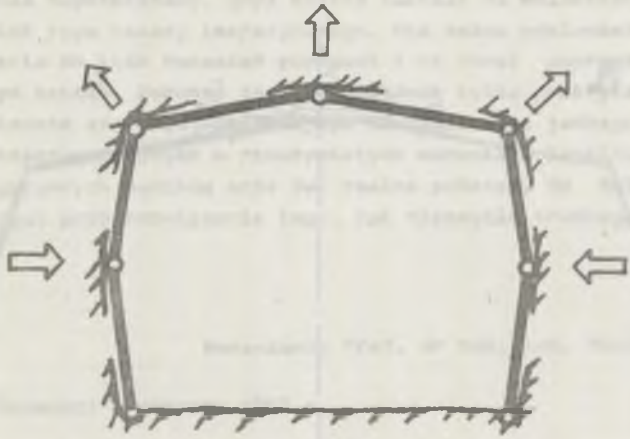
Nie ulega kwestii, że najważniejsze jest ostatnie z przytoczonych tutaj stwierdzeń. Jemu zatem należy poświęcić specjalną uwagę, zwłaszcza że problem doboru właściwej obudowy ma również, jak to wynika z zakończenia ustępu 2, niezwykle istotne znaczenie w odniesieniu do pojedynczego wyrobiska korytarzowego.

4. Wstępna koncepcja obudowy skrzyżowań

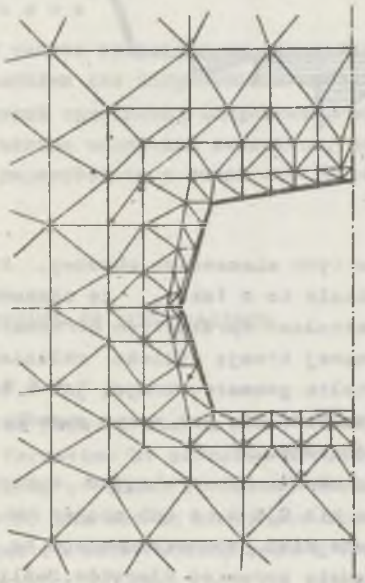
Już przed przystąpieniem do opracowywania koncepcji nowej obudowy wiadomo było, że nie może to być obudowa masywna, podobna do stosowanej w tunelach. Jednocześnie z przedstawionych uprzednio wskazań technologicznych wynikało, że powinna to być obudowa składana, tzn. ustawiana krótkimi odcinkami w miarę drążenia wyrobiska. Kształt i rozmiary wyrobiska eliminowały z rozważań wszelkie obudowy metalowe łukowe oraz sztywne obudowy metalowe ramowe. W tej sytuacji wszystko wskazywało na to, że powinna to być obudowa prefabrykowana, żelbetowa. Przyjęcie tego rodzaju rozwiązania pociągało za sobą pewne konsekwencje typu konstrukcyjnego, mianowicie:

- obudowa ta powinna się składać z elementów stosunkowo krótkich ze względu na ich ciężar i łatwość w ustawianiu;
- jako obudowa typowa, stosowana nie tylko w skrzyżowaniach, lecz w ogólności w wyrobiskach korytarzowych, winna stwarzać możliwość wykorzystania jej zarówno w formie pełnej (segment obok segmentu), jak też w formie ażurowej;
- ze względu na maksymalne wykorzystanie zjawiska współpracy z górotworem nie może to być obudowa sztywna;
- musi to być obudowa zdolna do przenoszenia stosunkowo dużych sił.

Po przeanalizowaniu szeregu wariantów stwierdzono, że wymogi te spełnia najlepiej obudowa wielobokowa, rozporowa. Schemat statyczny takiej obudowy pokazany jest na rys. 6. Praca tego rodzaju układu charakteryzuje się tym, że parcie boczne z ociosów przekazywane jest na strop i odwrotnie, a zatem obudowa poddaje się naturalnemu działaniu górotworu. Jednocześnie wyeliminowane są w niej naprężenia zginające, gdyż w prętach występują jedynie siły osiowe.



Rys. 6

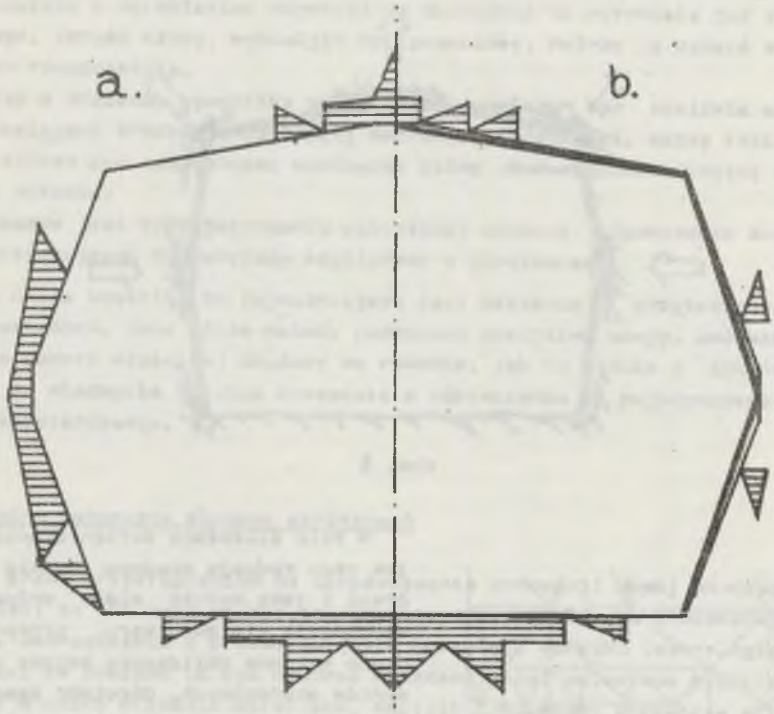


Rys. 7

W celu bliższego zorientowania się, jak tego rodzaju obudowa będzie pracować i jaki będzie miała wpływ na zachowanie się górotworu, przeprowadzono wstępne obliczenia metodą elementów skończonych. Górotwór zamodelowano jako jednorodny, sprężysty, ale bardzo słaby, gdyż moduł sprężystości przyjęto E_g = 4000 MPa, współczynnik Poissona m = 4, wytrzymałość na rozciąganie R_r = 1,7 MPa oraz na ściskanie R_c = 25,5 MPa.Takimi danymi charakteryzuje się np.piaskowiec o spoiwie ilastym. Założono jednocześnie,że elementy obudowy są stosunkowo sztywne, o module sprężystości E_b = 25000 MPa. Na rys. 7 pokazany został wycinek siatki elementów skończonych, modelujących górotwór i obudowę.

Otrzymane rezultaty wykazały istotny wpływ pracy obudowy na stan naprę-

żeń w górotworze. Na rys. 8 przedstawione zostały strefy zniszczeń górotworu nie podtrzymywanego przez obudowę oraz przy uwzględnieniu wpływu obudowy. Z rysunku widać wyraźny zanik stref zniszczeń w ociosach, a więc w miejscach, o które głównie chodziło.



Rys. 8

Niestety okazało się, że siły osiowe w tych elementach obudowy, które przylegają do ociosów, są zbyt duże. Wynikało to z faktu, że stosunkowo sztywna obudowa pracuje w przedziale odkształceń sprężystych górotworu,bo tak założono w obliczeniach. W chwili obecnej trwają dalsze obliczenia, zmierzające do optymalizacji zarówno kształtu geometrycznego, jak i sztywności (upodatnienia) obudowy, przy czym zakłada się już w tym wypadku sprężysto-plastyczny przedział odkształceń górotworu.

Przeprowadzane równolegle wstępne opracowania konstrukcyjne wykazały, że poszczególne elementy nie będą dłuższe niż 2,5 m, a ich ciężar nie przekroczy 400 kg. Przy użyciu specjalnego podajnika, zainstalowanego na podwoziu, ustawianie takich elementów nie będzie sprawiać kłopotów.Jeśli chodzi o siły, przekazywane przez obudowę na górotwór, to mogą one sięgać,

w zależności od zastosowanego zbrojenie betonu, 300 ton (a nawet nieco więcej) na metr bieżący.

5. Zakończenie

Całość przedstawionych wyżej rozważań ma, siłą rzeczy, charakter do pewnego stopnia hipotetyczny, gdyż oparta została na wnioskach, wynikających z dociekań typu raczej teoretycznego. Nie można wykluczać konieczności wprowadzenia do tych rozważań poprawek i to nawet poprawek o diametralnie różnym sensie. Dokonać tego może jednak tylko praktyka, stąd prowadzone są obecnie starania, zmierzające do realizacji jednego lub dwóch skrzyżowań eksperymentalnych w rzeczywistych warunkach kopalnianych. Nawet uzyskanie negatywnych wyników może dać realne podstawy do dalszych rozważań i dalszych prób rozwiązania tego, tak niezwykle trudnego, zagadnienia.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Mirosław CHUDEK

Wpłynęło do Redakcji w czerwcu 1983 r.

ПЕРЕКРЁСТКИ КОРИДОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Р е з ю м е

В работе представлены результаты теоретических рассуждений над закономерностями для напряжений в поблизости перекрёстка. Предоставленные графики изолиний одинаковых напряжений, полученные расчётным путём при использовании метода оконченых элементов, позваляют запрограммировать этапы выполнения перекрёстков а также его устойчивости.

CROSSINGS OF DOG-HEADINGS

S u m m a r y

The paper presents the reults of theoretical considerations concerning the formation of stresses around crossings. The provided diagrams of the isolines of equal stresses, obtained from calculations in which use was made of the method of finite elements, make it possible to programme the stages of constructing such a crossing as well as its stability.