

Stefan GALCZYŃSKI

Andrzej WOJTASZEK

Instytut Geotechniki Politechniki Wrocławskiej

STATECZNOŚĆ SKRZYŻOWAŃ WYROBISK GÓRNICZYCH

Streszczenie. W referacie przeanalizowano problem zabezpieczenia stateczności skrzyżowań wyrobisk korytarzowych. Przedstawiono warunki stateczności stropu i ociosów skrzyżowań tych wyrobisk. Podano zasięg stref poślizgu górotworu. Wyprowadzono wzory na obliczenie ciśnienia w stropie i ociosach skrzyżowania.

1. Wstęp

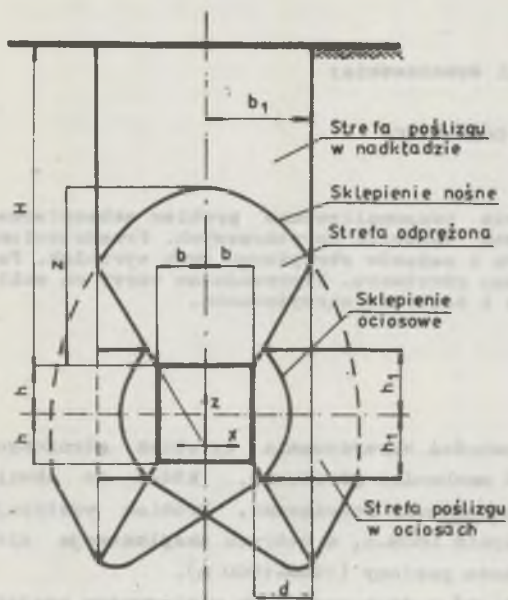
Zagadnienie utrzymania stateczności skrzyżowania wyrobisk górniczych jest jednym z podstawowych zadań mechaniki górotworu, które do chwili obecnej nie zostało w sposób jednoznaczny rozwiązane. Problem występuje szczególnie ostro w przypadku kopalń LGOM-u, w których eksploatacja złóż rudy miedzi schodzi na coraz niższe poziomy (1000-1600 m).

Aby ocenić stateczność skrzyżowań w tych warunkach w pierwszym rzędzie problem ten należy rozpatrywać poczynając od wyrobiska pojedynczego wykonanego na dużej głębokości. Odzwierciedla to rzeczywisty przebieg formowania się przestrzennego układu skrzyżowania, gdyż najpierw powstaje wyrobisko korytarzowe, a dopiero w późniejszym etapie zostaje ono poprzecinane wyrobiskami poprzecznymi. Można więc przyjąć, że skrzyżowanie jako układ przestrzenny powstaje dopiero po ustabilizowaniu się płaskich stref odprężonej i nośnej w sąsiedztwie sieci wyrobisk korytarzowych [2].

Przebieg i zasięg procesu niszczenia się górotworu i tworzenia poszczególnych stref wokół wyrobiska pojedynczego rzutuje więc na proces stabilizacji górotworu z chwilą powstania skrzyżowania wyrobisk. Określenie mechanizmu niszczenia górotworu i tworzenia się jednolitej, ciągłej strefy nośnej nad skrzyżowaniem pozwoli na przyjęcie odpowiedniego układu obliczeniowego uwzględniającego maksymalne wykorzystanie naturalnej nośności masywu skalnego. Umożliwi to również dobór optymalnej obudowy stropu i ociosów o takiej nośności i podatności, aby zasięg stref odprężonych zwłaszcza w ociosach pozwolił na wystąpienie w miarę równomiernego ciśnienia w całym przekroju skrzyżowania.

2. Stateczność pojedynczych wyrobisk korytarzowych

Na skutek zmiany i koncentracji naprężeń górotwór w otoczeniu wyrobiska zostaje zniszczony. Oddziaływanie naprężeń ściskających i rozciągających powoduje spękanie i rozkruszenie masywu. Decydującą jednak rolę w procesie niszczenia górotworu odgrywają naprężenia ścinające. Naprężenia te skoncentrowane w narożach wyrobiska wywołują w rezultacie ścicie górotworu i przemieszczenie go wzdłuż powierzchni poślizgu.



Rys. 1. Strefy naruszenia górotworu wokół wyrobiska

Wyzwolone na tych powierzchniach tarcie decyduje o spadku ciśnienia na obudowę i powoduje stopniowe zasklepienie się spękanego górotworu. W stropie wyrobiska następuje spadek naprężeń a ich wzrost w powstałym sklepieniu ciśnien. W rezultacie wokół wyrobiska tworzą się dwie strefy: odprężonego górotworu w pobliżu wyrobiska, a w jej sąsiedztwie strefa koncentracji naprężeń tzw. nośna, poza którą górotwór pozostaje nienaruszony (rys. 1) [2]. Strefa nośna uformowana w stropie wyrobiska przenosi pierwotne ciśnienie nadkładu i przekazuje je poprzez sklepienie ciśnien na ociosy wyrobiska. Te z kolei spoczywają na podłożu, które stanowią skały spagowe. Stąd zakłada się pełną współzależność stateczności stropu od stateczności ociosów a ociosów od stateczności spągu. Charakterystykę tego układu można przedstawić w następujący sposób:

- 1) Górotwór po wykonaniu wyrobiska ulega spękaniu.
- 2) W narożach wyrobiska następuje ścicie nadkładu zgodnie z prawem Coulomba:

$$\bar{\tau} = \sigma \operatorname{tg} \varphi = \sigma f, \quad (1)$$

gdzie:

- $\bar{\tau}$ - wytrzymałość górotworu na ścinanie,
- σ - naprężenie normalne do powierzchni ścicia,

$f = \operatorname{tg} \varphi$ - współczynnik wytrzymałości górotworu, który w przypadku skał zwięzłych określany jest z zależności [1]

$$f = \sqrt{\frac{R_C}{R_T}}, \quad (2)$$

R_C, R_T - wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie i rozciąganie, φ - posorny kąt tarcia wewnętrzznego wyznaczany jako:

$$\varphi = \arctg f. \quad (3)$$

W warunkach kopalni rud miedzi (LGOM) współczynnik "f" przyjmuje wartości z przedziału

$$1 < f < 5. \quad (4)$$

3) W stropie powstaje strefa poślizgu o szerokości:

$$2b_1 = \frac{2b}{\sqrt{2K} f} \sqrt{1 + Kr^2}, \quad (5)$$

gdzie:

$2b$ - szerokość wyrobiska,

K - współczynnik parcia bocznego w strefie nośnej (górotworu częściowo naruszonego)

$$K = \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\alpha}{4} - \frac{\varphi}{2} \right). \quad (6)$$

Wysokość tej strefy wynosi:

$$z = \frac{\sqrt{2} a_1 - b}{\sqrt{K}}. \quad (7)$$

4) Minimalne ciśnienie górotworu w powstałej strefie wynosi:

$$p_v = \frac{\gamma b_1}{K_1 f}, \quad (8)$$

gdzie:

γ - ciężar objętościowy górotworu,

K_1 - współczynnik parcia bocznego górotworu zniszczonego:

$$K_1 = \frac{\varphi}{1 - \varphi}, \quad (9)$$

przy czym:

ν - współczynnik Poissona.

5) Odległość koncentracji naprężeń pionowych od krawędzi ociosów osiąga wartość:

$$d = b_1 - b. \quad (10)$$

6) W tych warunkach na obudowę ociosów działa ciśnienie:

$$p_b = \xi K_{1,0} \delta \exp\left(-\frac{r_{0,d}}{K_{1,0} h}\right), \quad (11)$$

gdzie: indeks "0" oznacza parametry skał ociosowych,

ξ - współczynnik koncentracji naprężeń pionowych który wg [3] można przyjmować:

$$\xi = 2, \quad (12)$$

h - połowa wysokości wyrobiska.

Powstały układ może ulec zmianie np. na skutek updatnienia obudowy ociosów, co spowoduje wzrost zasięgu strefy poślizgu w występujących w nich skałach. Równocześnie miejsce koncentracji naprężeń pionowych przesunie się w głąb ociosów, kosztem czego zwiększy się szerokość strefy poślizgu w stropie wyrobiska. Doprowadzi to z jednej strony do wzrostu ciśnienia w stropie, z drugiej zaś do jego spadku w ociosach wyrobiska.

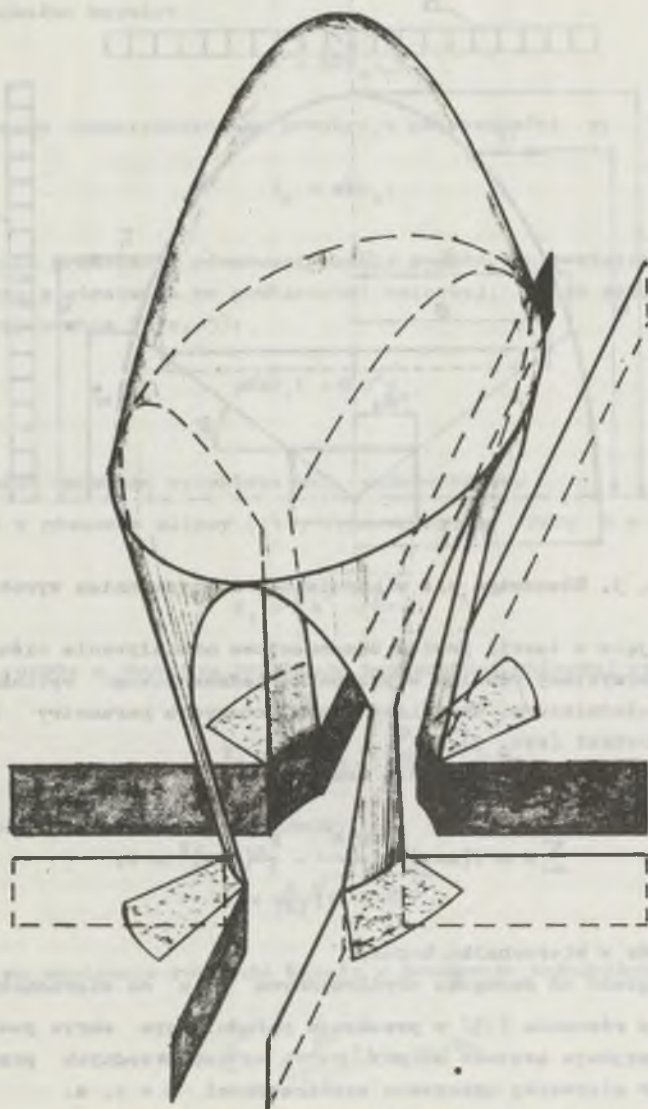
Zasada ta może i powinna być wykorzystana w przypadku dużych koncentracji naprężeń, co ma niewątpliwie miejsce na skrzyżowaniach wyrobisk korytarzowych.

3. Stateczność stropu na skrzyżowaniach korytarzowych wyrobisk górniczych

Proces odprężenia górotworu i koncentracja naprężeń na skrzyżowaniach wyrobisk przebiega w złożonym układzie przestrzennym. W stanie równowagi granicznej proces odprężenia następuje na skutek ścięcia i poślizgu górotworu wzdłuż powierzchni najmniejszego oporu.

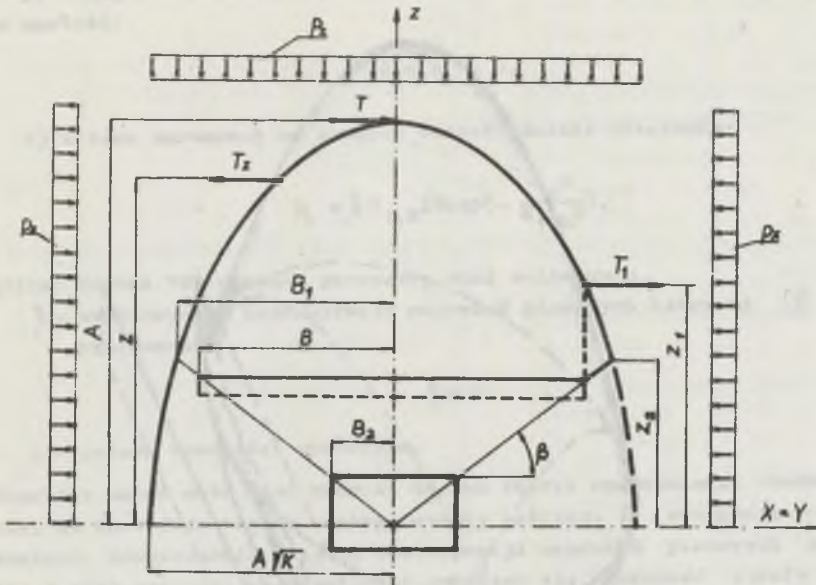
Biorąc pod uwagę, że ścięcie następuje pod wpływem pierwotnych sił ciężkości górotworu, możemy określić poziomy obrys powierzchni poślizgu.

Z analizy [4] wynika, że jest to powierzchnia o przekroju kołowym. Wobec tego powierzchnia poślizgu odpowiada powierzchni stożka ściętego, na którym spoczywa naturalna kopuła nośna (rys. 2). Kopuła ta tworzy powłokę, której powierzchnia środkowa jest powierzchnią obrotową. W takiej powłoce liniami głównej krzywizny są jej południki i równoleżniki. Kołowy przekrój poziomy powłoki spełnia podstawowy warunek równowagi górotworu, a



Rys. 2. Model kopuły nośnej nad skrzyżowaniem

mianowicie osiowo symetryczne pierwotne ciśnienie boczne górotworu ma wywołuje momentu w kołowym pierścieniu powłoki.



Rys. 3. Równowaga sił w kopule nad skrzyżowaniem wyrobisk

Obowiązujące w teorii powłok bezmomentowe oddziaływanie ciśnienia pierwotnego wykorzystamy również w przypadku jednostkowego wycinka powłoki w przekroju południkowym. Określimy w tym przekroju parametry powierzchni środkowej powłoki (rys. 3).

Zapišemy w tym celu równanie momentu:

$$\sum M = T(A-z) - \frac{P_x x^2}{2} - \frac{P_y (A-z)^2}{2} = 0, \quad (13)$$

gdzie:

T - rozpór w wierzchołku kopuły,

A - odległość od początku współrzędnych x, z do wierzchołka powłoki.

Jak wynika z równania (13) w przekroju południkowym obrys powłoki bezmomentowej przyjmuje kształt elipsy, która we współrzędnych przestrzennych przechodzi w elipsoidę opisywaną współrzędnymi $x = y, z$.

Zapisując ją równaniem kanonicznym mamy:

$$\frac{z^2}{A^2} + \frac{x^2}{KA^2} = \frac{2T}{AKp_x} - \frac{2T_x}{A^2 Kp_x} + \frac{2x}{A} - 1 \equiv 1, \quad (14)$$

gdzie:

A i $A\sqrt{K}$ - odpowiednio pionowa i pozioma półoś elipsoidy.

Działający w powłoce rozpór T równoważy poziome ciśnienie pierwotne górotworu i wynosi:

- dla wierzchołka kopuły:

$$T = AKp_z, \quad (15)$$

- dla dowolnego równoleżnikowego przekroju na wysokości z :

$$T_z = zKp_z. \quad (16)$$

W warunkach granicznej równowagi kopuły rozpór ten powinien też wyeliminować ścięcie górotworu po powierzchni walcowej, która może wystąpić w zasięgu skrzyżowania (rys. 3):

$$2BT_1f = 2B^2p_z, \quad (17)$$

gdzie:

B - promień umownego wyrobiska nad skrzyżowaniem.

Korzystając z równania elipsy (14), wyznaczmy z_1 przy $x = B$:

$$z_1 = \sqrt{A^2 - \frac{B^2}{K}}. \quad (18)$$

Wobec tego rozpór w dowolnym przekroju powierzchni walcowej wynosi:

$$T_1 = z_1Kp_z = \frac{Bp_z}{2f}, \quad (19)$$

a większa półoś elipsoidy odpowiednio:

$$A = \frac{B}{2Kf} \sqrt{1 + 4Kf^2}. \quad (20)$$

Pozwala to na zapisanie równania kopuły w przekroju południkowym:

$$z^2 + \frac{x^2}{K} = \frac{B^2}{4K^2f^2}(1 + 4Kf^2). \quad (21)$$

Maksymalną rozpiętość kopuły określimy z przecięcia jej z liniami poślizgu. Wprowadzając do równania (21) zależność (rys. 3):

$$z_2 = B_1 \operatorname{tg} \beta = \frac{B_1}{\sqrt{K}} \quad (22)$$

otrzymamy:

$$B_1 = \frac{B}{2\sqrt{2K}f} \sqrt{1 + 4Kf^2}, \quad (23)$$

gdzie:

z_2 - rzędna węzłowia kopuły,

β - kąt najmniejszego oporu górotworu na ścinanie [2],

B_1 - połowa rozpiętości kopuły nośnej nad skrzyżowaniem.

Z analizy [4] wynika ponadto, że powyżej punktu przecięcia kopuły z powierzchniami poślizgu występują w niej tylko siły ścisające. Potwierdza to, że jest ona linią ciśnień i że wyznaczona z zależności [23] rozpiętość jest maksymalną szerokością strefy poślizgu górotworu nad skrzyżowaniem.

Jak wynika z zależności (4), (6) i (23) oraz tablicy 1 warunek równowagi kopuły będzie spełniony, jeżeli rozpiętość jej będzie minimalnie większa od rozpiętości umownego wyrobiska (B).

Wobec tego w przypadku skrzyżowań do obliczeń można przyjąć:

$$B_1 = B. \quad (24)$$

Tablica 1

f	1	1,5	2	3	4	5
B_1/B	1,11	1,05	1,03	1,01	1,01	1,00

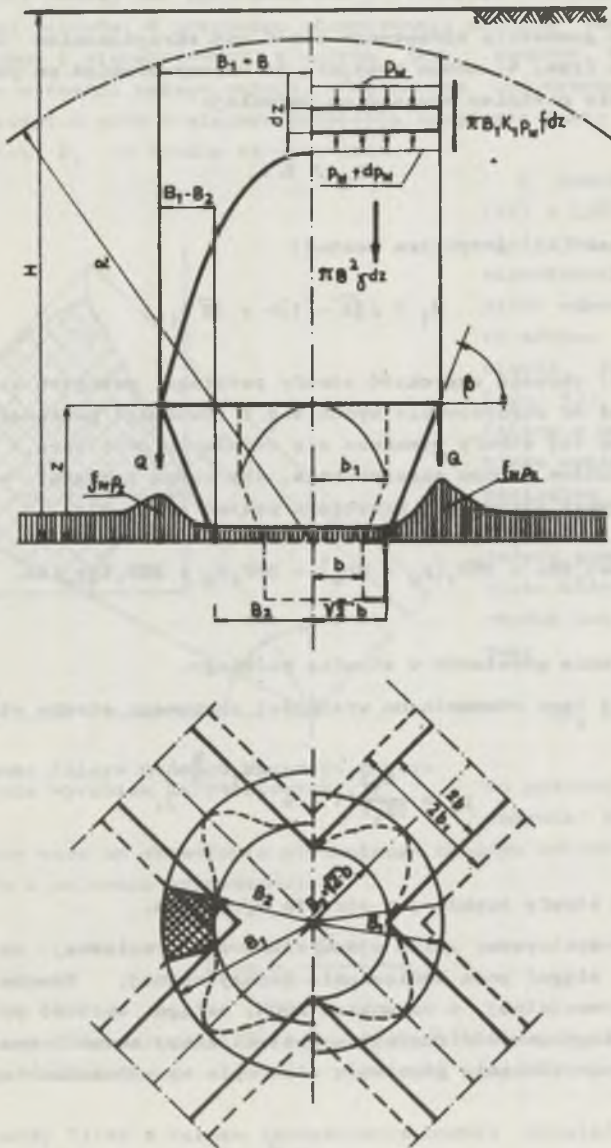
Z drugiej strony aby kopuła pozostawała w równowadze, nie może być osłabiona otworami i musi opierać się całym obwodem na ustabilizowanym masywie skalnym. Obydwa te założenia można ustalić z warunku równowagi granicznej skrzyżowania i tworzących je wyrobisk korytarzowych. Aby kopuła nośna była ciągła, powinna być uformowana powyżej zasięgu stref odprężonych nad wyrobiskami korytarzowymi (rys. 4). Stąd wynika, że:

$$B_1 - B_2 \geq z \operatorname{ctg} \beta = z\sqrt{K}, \quad (25)$$

gdzie:

B_2 - promień umownego wyrobiska kołowego na poziomie stropu skrzyżowania,

z - wysokość wzniesienia linii ciśnień nad wyrobiskami korytarzowymi wg (7).



Rys. 4. Schemat redystrybucji sił nad skrzyżowaniem wyrobisk korytarzowych

Rozpiętość kopuły ciśnień nad skrzyżowaniem powinna wynosić:

$$B_1 \geq B_2 + z\sqrt{K} = B_2 + \sqrt{2} b_1 - b. \quad (26)$$

Analizując geometrię sprzężenia stref nad skrzyżowaniem i wyrobiskami korytarzowymi (rys. 4) można przyjąć, że umowny promień na poziomie stropu skrzyżowania powinien wynosić co najmniej:

$$B_2 > \sqrt{K} b. \quad (27)$$

Wówczas warunek (26) przybiera postać:

$$B_1 > (\sqrt{2} - 1)b + \sqrt{2} b_1. \quad (28)$$

Zależność (28) określa szerokość strefy poślizgu, wewnątrz której możliwy jest ruch skał do skrzyżowania wyrobisk. Z równowagi poziomego elementarnego plasterka tej strefy wyznacza się ciśnienie górotworu, jakie przeniesić musi obudowa stropu skrzyżowania, aby układ pozostał w równowadze. Warunek równowagi statycznej przybiera postać (rys. 4):

$$\int B_1^2 f dz = 2KB_1(p_w + dp_w) - 2KB_1 p_w + 2KB_1 K_1 p_w f dz, \quad (29)$$

gdzie:

p_w - ciśnienie górotworu w strefie poślizgu.

Po scałkowaniu tego równania na wysokości spękanego stropu otrzymamy:

$$p_w = \frac{B_1 f}{2K_1 \Gamma} (1 - e^{-2K_1 f \frac{R}{B_1}}), \quad (30)$$

gdzie:

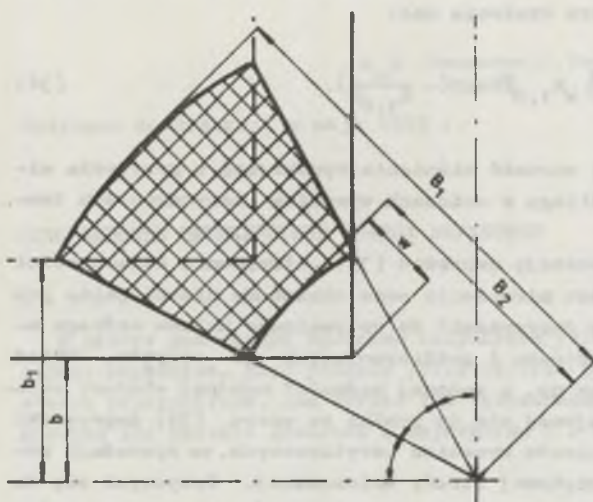
R - zasięg strefy spękanej w stropie wyrobiska.

Aby powstał rozpatrywany układ stanu równowagi granicznej, zasięg strefy spękanej musi sięgać poza wzniesienie kopuły nośnej. Wówczas wykładnik funkcji eksponentyjnej, w warunkach LGOM, osiąga wartość przekraczającą trzy i wobec tego wartość funkcji eksponentyjnej można pominąć. Ostatecznie wzór na ciśnienie górotworu w stropie skrzyżowania upraszcza się do postaci:

$$p_w = \frac{B_1 f}{2K_1 \Gamma}. \quad (31)$$

4. Stateczność ociosów na skrzyżowaniach wyrobisk górniczych

Analogicznie jak w przypadku pojedynczych wyrobisk korytarzowych stateczność kopuły nośnej nad skrzyżowaniem jest ściśle uwarunkowana od stateczności jego ociosów. W przypadku skrzyżowania problem ten staje się bardziej wyraźny i niebezpieczny, a naroża jego punktem newralgicznym decydującym o nośności całego układu. Maksymalna koncentracja naprężeń pionowych wystąpi w nich w miejscu podparcia wezgiłowia kopuły nośnej, czyli w odległości B_1 od środka skrzyżowania.



Rys. 5. Schemat filara nośnego w narożu skrzyżowania wyrobisk korytarzowych

Z analizy warunków (27) i (28) wnioskuje się, że w narożach skrzyżowania powdmy powstać odpowiednie filary zdolne do przeniesienia tych naprężeń (rys. 5). Z geometrii filara w narożach wyrobiska wynika, że między zasięgiem koncentracji naprężeń (B_1) a rozpiętością umownego wyrobiska kołowego (B_2) zachodzi następujący związek:

$$B_2 = \frac{b}{b_1} B_1. \quad (32)$$

(26) otrzymamy wzór na określenie minimalnego zasięgu koncentracji naprężeń pionowych w ociosach skrzyżowania:

$$B_1 = b_1 \frac{\sqrt{2} b_1 - b}{b_1 - b}. \quad (33)$$

Zależność ta spełnia warunek (28) i po uwzględnieniu jej we wzorze (31) określa wartość minimalnego ciśnienia górotworu na obudowę stropu skrzyżowania.

Wówczas na każdy filar w narożu skrzyżowania będzie działać naprężenie o wielkości wynikającej z zależności:

$$P = \frac{\gamma h m^2}{4}, \quad (34)$$

gdzie:

P - ciężar górotworu działającego na jeden filar,

H - głębokość posadowienia wyrobiska.

Zakładając trójkątny rozkład naprężeń w filarach, można z wystarczającą dokładnością przyjąć, że wartość współczynnika koncentracji naprężeń pionowych wynosi $[4]$:

$$\xi_w = 5. \quad (35)$$

Ustalone wielkości (33) i (35) pozwolą ostatecznie na określenie ciśnienia w ociosach skrzyżowania. Zgodnie z zależnością (11) i przyjętym schematem niszczenia górotworu wyniesie ono:

$$P_{bw} = \xi_w K_{1,0} \exp\left(-\frac{r_{o,d}}{K_{1,0} h}\right). \quad (36)$$

Wzór (36) określa maksymalną wartość ciśnienia wynikającą z przyjęcia minimalnego zasięgu strefy poślizgu w ociosach wyrobisk korytarzowych tworzących skrzyżowanie (10).

Ze względu na dużą koncentrację naprężeń (35) utrzymanie stateczności ociosów wg przyjętego schematu niszczenia może okazać się nieopłacalne lub niewykonalne. Wówczas należy doprowadzić do optymalnego układu nośnego uwzględniającego stateczność stropu i podtrzymujących go ociosów. Układ można optymalizować wychodząc np. z zadanej nośności podanej obudowy ociosów. Obudowa o nośności mniejszej niż ta wynika ze wzoru (36) doprowadzi do nadmiernego zaciskania ociosów wyrobisk korytarzowych, co spowoduje powstanie w nich odpowiednio większej strefy zniszczonej. Przyczyni się to z jednej strony do zwiększenia rozpiętości kopuły nośnej i szerokości strefy odprężonej w stropie skrzyżowania, z drugiej zaś do zwiększenia drogi poślizgu w ociosach.

Wówczas zgodnie z zależnościami (31) i (36) otrzymamy stosunkowo nieznaczny wzrost ciśnienia w stropie skrzyżowania przy znacznym zmniejszeniu ciśnienia w ociosach.

Takie działanie poprzez odpowiednie kierowanie ciśnieniem górotworu w stropie i ociosach skrzyżowania może zapewnić racjonalny dobór jego obudowy. Szczególne znaczenie odgrywa ten problem w przypadku kopalń LGOM-u, gdzie występują wysokie wyrobiska i powszechnie stosowana jest obudowa kotwiciowa. W wielu przypadkach przy zabezpieczeniu stateczności skrzyżowań się spełnia ona swego zadania.

LITERATURA

- [1] Dudek J., Gałczyński S., Leszczyński M., Wojtaszek A.: Instrukcja projektowania masywnych obudów górniczych w oparciu o metodę stanów granicznych. Część II - Obciążenia. Inst. Geot. Pol. Wrocław. Raport nr 79, Wrocław 1980.
- [2] Gałczyński S., Wojtaszek A.: Ciśnienie górotworu na obudowę wyrobisk korytarzowych posadowionych na dużych głębokościach.
- [3] Wojtaszek A.: Dawlenie na bokowuju kriej gornych wyrobotok na bolszych głubinach. Studia Geotechnika et Mechanica, Vol. III No. 2-4, 1981.
- [4] Praca zbiorowa: Metoda obliczania stateczności skrzyżowań wyrobisk górniczych w warunkach kopalń rud miedzi. Inst. Geot. Pol. Wrocław. Raport nr 188. Wrocław 1982.

Recenzent: Doc. dr inż. Zenon SZCZEPANIAK

Wpłynęło do Redakcji w maju 1983 r.

УСТОЙЧИВОСТЬ ПЕРЕКРЕСТКОВ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Р е з ю м е

В работе дан анализ проблемы сохранения устойчивости перекрёстков коридорных выработок. Даны условия устойчивости перекрытия и стен выработки вблизи перекрёстков. Дан предел зон проскальзывания горной породы. Выведены формулы для расчёта давления в перекрытии и в стенах перекрёстка.

THE STABILITY OF EXCAVATIONS IN MINING

S u m m a r y

The paper analyzes the problem of safeguarding the stability of dog-heading crossings. The conditions for the stability of both the roof and the walls of such crossings have been given. The paper also quotes the range of the zone of slippage of rock strata and provides formulae for calculating the roof and wall pressure at crossings.