ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1987

Seria: GÓRNICTWO t. 157 Nr kol. 934

Mirosław CHUDEK

Instytut Projektowania, Budowy Kopalń
i Ochrony Powierzchni Pol. Śl.

Lucjan STEFAŃSKI

Ministerstwo Górnictwa i Energetyki

OBCIĄŻENIA I NAPRĘŻENIA DZIAŁAJĄCE W OTOCZENIU SZYBU ORAZ GRUBOŚĆ JEGO OBUDOWY JAKO FUNKCJA GŁĘBOKOSCI I WŁASNOŚCI GEOMECHANICZNYCH MASYWU SKALNEGO

Streszczenie. Wyprowadzono funkcję naprężeń występujęcych w otoczeniu szybu oraz podano odległość maksymalnej ich wartości od środka wyrobiska. Na tej podstawie określono grubość obudowy szybu uzależnionę od jego średnicy w świetle, głębokości i wytrzymałości skał otaczających.
Rozważono także inne przypadki obciążeń działających na obudowę szybu spowodowane zginaniem i ścinaniem obudowy. Końcowe wzory na obliczanie naprężeń i grubości obudowy szybu (rys. 3, 5, 8, 10) w granicach sprężystości, a więc: naprężenia obwodowe σ_t, promieniowe σ_r i całkowite σ_c w masywie górotworu w otoczeniu szybu (od ociosu w głąb górotworu) i wynoszą:

$$\sigma_t = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}\left(1 + \frac{a}{r}\right)$$

$$\sigma_r = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)$$

gdzie:

R_{rs}, R_{cs} - średnie wytrzymałości skał na rozciąganie i ściskanie.
Wartości maksymalnych naprężeń dla $r = 2a$ wynosi:

$$\sigma_{r_{max}} = 0{,}375\, p_z \sqrt{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 0{,}75\, p_z \sqrt{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}$$

$$\sigma_{c_{max}} = 2{,}25\, p_x$$

Grubość obudowy można wyliczyć ze wzorów:

- dla głębienia szybów w górotworze nie objętym wpływami eksploatacji

$$d = 1{,}33\, a_o \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}}} \sqrt[4]{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}$$

- dla warunków zginania obudowy szybu

$$d_z = \frac{hr}{g}\sqrt[3]{\frac{p_z}{R_g}}\sqrt{\frac{R_{rs}}{R_{cs}}}$$

- dla warunków ścinania obudowy szybu

$$d = \frac{R_{rs}}{R_d}\left(R - \frac{a_o^2}{R}\right)\left(1 - \frac{p_x}{p_z}\right)^*$$

1. WPROWADZENIE

Wyniki badań "in situ" [7], jak również badań modelowych [1, 7] wykazały, że stan naprężenia górotworu w otoczeniu wyrobisk górniczych zależny jest przede wszystkim od głębokości (ciśnienia pierwotnego p_z), właściwości fizykomechanicznych skał, a głównie od ich wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie oraz od kształtu i wielkości przekroju poprzecznego wyrobiska.

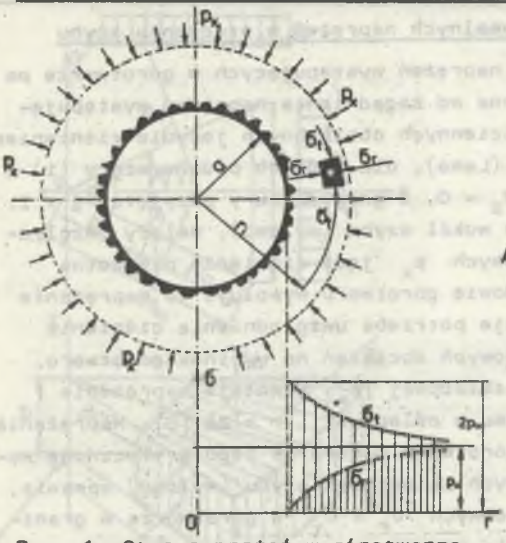
Górotwór zbudowany z poszczególnych warstw sedymentacyjnych charakteryzuje się zmienną wytrzymałością z tendencją rosnącą wraz z głębokością zalegania [1]. Rosnący trend wykazuje także gęstość przestrzenna skał.

Uwzględniając badania modelowe oraz rozkład naprężeń występujących w otoczeniu wyrobisk górniczych przy założeniu warstwowej budowy górotworu charakteryzującego się określonymi własnościami geomechanicznymi, podano w niniejszej pracy funkcję rozkładu naprężeń w górotworze występujących w otoczeniu szybu. Na tej podstawie określono wzór na grubość obudowy szybu. Ponieważ eksploatacja pokładów węgla prowadzona w pobliżu szybu lub pod nim (eksploatacja w filarze szybu) może wywołać dodatkowe naprężenia [7] pochodzące od zginania i ścinania - przeanalizowano także w niniejszej pracy również te przypadki wpływające na grubość obudowy szybu.

2. OBCIĄŻENIA I NAPRĘŻENIA ŚCISKAJĄCE DZIAŁAJĄCE W OTOCZENIU SZYBU

2.1. Dotychczas stosowane metody

Rozkład i wielkość naprężeń w górotworze po wykonaniu wyrobiska pionowego do głębokości H o promieniu a w jego wyłomie określa się wg następujących wzorów [8] (rys. 1, 2):



Rys. 1. Stan naprężeń w górotworze w otoczeniu szybu

Fig. 1. State of stress in the rock mass around the shaft

Rys. 2. Schemat do obliczeń

Fig. 2. Scheme for calculation

- naprężenie obwodowe:

$$\sigma_t = p_x\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right); \quad \text{MPa} \tag{1}$$

- naprężenia promieniowe (aradialne):

$$\sigma_r = p_x\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right), \quad \text{MPa} \tag{2}$$

gdzie:

p_x - naprężenia pierwotne równe ciśnieniu poziomemu w górotworze nienaruszonym,

r - odległość maksymalnych naprężeń w górotworze od osi szybu do miejsca analizowanych naprężeń.

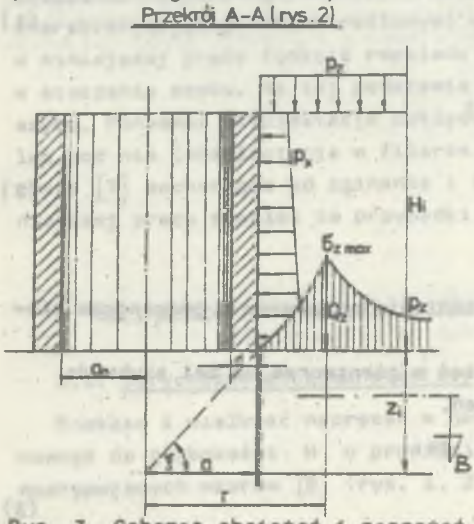
Przy czym ze wzorów (1) i (2) wynika, że:

$$\sigma_t + \sigma_r = 2p_x \tag{3}$$

2.2. Wprowadzanie funkcji maksymalnych naprężeń w otoczeniu szybu

Istota powstawania i działania naprężeń występujących w górotworze po wykonaniu wyłomu szybu jest odmienna od zagadnienia naprężeń występujących przy rozpatrywaniu rur grubościennych obciążonych jedynie ciśnieniem poziomym prostopadłym do osi rury (Lame), dla których podane wzory (1) i (2) wyprowadzono przy założeniu $\sigma_z = 0$, a grubość rury przyjęto $g = 1$. Rozpatrując naprężenia występujące wokół szybu (wyłomu), należy uwzględnić fakt, że źródłem ciśnień poziomych p_x jest ciśnienie pierwotne $p_z = \gamma \cdot H$, które w warstwowej budowie górotworu wywołuje to naprężenie zmienne z głębokością. Stąd istnieje potrzeba uwzględnienia ciśnienia pierwotnego p_z jako źródła składowych obciążeń na wycinek górotworu. Ciśnienie pionowe p_z, oprócz jego składowej p_x, wywołuje naprężenie σ_{zmax} w górotworze za ociosem wyłomu w odległości $r = 2a$ [6]. Naprężenia σ_{zmax} determinują stan równowagi górotworu w strefie jego krytycznego wytężenia. Działanie naprężeń pionowych za ociosem szybu (wyłomu) sprawia, że suma naprężeń radialnych i obwodowych $\sigma_r + \sigma_t$ w górotworze w granicach sprężystości nie jest stała dla każdego $r > a$.
Przebieg naprężeń $\sigma_r + \sigma_t$ określa funkcja, której ekstremum występuje dla $r = 2a$, co udowodniono w pracy [6].

Celem określenia wartości naprężeń obwodowych σ_t i radialnych σ_r w masywie górotworu w odległości r od osi szybu rozpatrzono stan równowagi obciążeń i naprężeń pierwotnych dla $p_x = p_y$ działających na wycinek pierścienia górotworu (rys. 3 i 4). Wycinek ten o minimalnym kącie współśrodkowym α posiada kształt zbliżony do trapezu, którego boki $2y_1$, $2y_2$ mogą być przyjęte jako odcinki proste zamiast łuków okręgów o promieniach a i r.



Rys. 3. Schemat obciążeń i naprężeń występujących w otoczeniu szybu

Fig. 3. Scheme of loads and stresses occuring around the shaft

Wykorzystując (rys. 4) możemy napisać równanie:

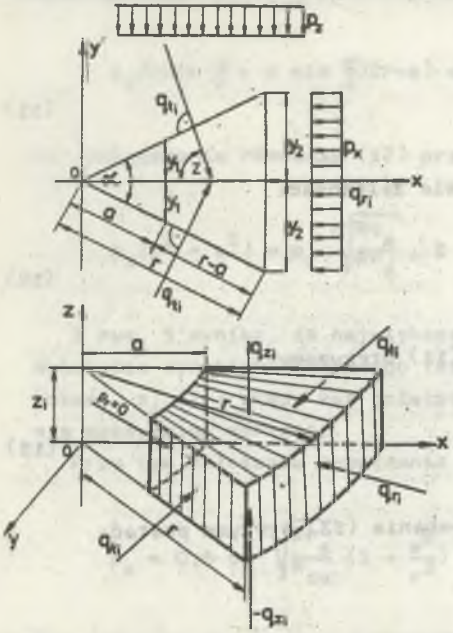
$$q_{ri} = 2_{y2} \cdot p_x \cdot z_i$$
$$q_{ri} = 2r \cdot \sin\frac{\alpha}{2}\, p_x \cdot z_i \tag{5}$$

Z rzutu sił na oś x mamy:

$$2q_{ti} \cdot \cos(90 - \frac{\alpha}{2}) = 2_r \cdot \sin\frac{\alpha}{2}\, p_x \cdot z_i \tag{6}$$
$$q_{ti} = r \cdot p_x \cdot z_i$$

gdzie:

z_i - grubość wycinka pierścienia górotworu (rys. 4).



Rys. 4. Obciążenia działające na wycinek pierścienia górotworu i naprężenia w nim występujące w otoczeniu szybu

Fig. 4. Load acting on rock ring sector and stresses occuring in it around the shaft

Naprężenia obwodowa średnie przy obciążeniu (6) wynoszą:

$$\sigma_t = \frac{q_{ti}}{(r-a)\cdot z_i} = p_x \frac{r}{r-a} =$$

$$= p_x \frac{1}{1-\frac{a}{r}} \qquad (7)$$

Natomiast naprężenia radialne średnie przy obciążeniu (5) ujmuje równanie:

$$\sigma_{ri} = \frac{q_{ri}}{2_{yi}\cdot z_i} = p_x \qquad (8)$$

Jak wynika z rys. 4, na wycinek górotworu działają obciążenia pionowe q_{zi} pochodzące od naprężeń pionowych p_z, które determinują pojawienie się naprężeń poziomych pochodzących od obciążeń poziomych q_{ti} i q_{ri}.

Maksymalne wartości naprężeń pionowych (rys. 3) które podano w pracy [6, 7], występują dla $r = 2a$ od środka szybu. Obciążenia pionowe q_{zi} powodują, że naprężenia radialne i obwodowe w pierścieniu o grubości $r - a$ (rys. 4) nie są stałe jak w przypadku ciśnienia jednorodnego poziomego p (Lame). Znając wartości wytrzymałości warstw na ściskanie R_{cs} i rozciąganie R_{rs}, które zostały zruszone przez wykonane w nich wyrobisko pionowe o przekroju kołowym, można wyznaczyć zależność naprężenia poziomego p_x od pionowego p_z w górotworze naruszonym, a tym samym zależność obciążenia poziomego q_{ri} od obciążenia pionowego q_{zi}.

Według kryterium Coulomba-Mohra równania równowagi granicznej naprężeń w strefie odprężonej określa równanie stycznej:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}\delta + c \qquad (9)$$

(dla danej głębokości H Rr_s, Rc_s = const oraz δ = const).

Pozorny kąt tarcia wewnętrznego górotworu w tej strefie jest:

$$\operatorname{tg}\varphi_p = \frac{p_z}{p_x} = \frac{\tau}{\sigma} \qquad (10)$$

Stąd po uwzględnieniu (9) otrzymamy:

$$\frac{p_z}{p_x} = \frac{\sigma \operatorname{tg}\delta + c}{\sigma} = \operatorname{tg}\delta + \frac{c}{\sigma} \tag{11}$$

Nachylenie prostej (9) do poziomu określa zależność:

$$\delta = \arcsin \frac{Rc_s - Rr_s}{Rc_s + Rr_s} \tag{12}$$

Wykorzystując związek (12) w równaniu (11) otrzymamy:

$$\frac{p_z}{p_x} = \operatorname{tg}\left(\sin \frac{Rc_s - Rr_s}{Rc_s + Rr_s}\right) + \frac{c}{\sigma} \tag{13}$$

Wiadomo, że stała $c = \frac{\sigma}{\cos\delta}$, a stąd równanie (13) otrzyma postać:

$$\frac{p_z}{p_x} = \operatorname{tg}\left(\sin \frac{Rc_s - Rr_s}{Rc_s + Rr_s}\right) + \frac{1}{\cos\delta}$$

$$\operatorname{tg}\delta + \frac{1}{\cos\delta} = \frac{\sin\delta}{\cos\delta} + \frac{1}{\cos\delta} = \frac{1}{\cos\delta}(\sin\delta + 1)$$

Uwzględniając z równania (12), że:

$$\frac{Rc_s - Rr_s}{Rc_s + Rr_s} = \sin\delta \quad \text{oraz zakładając, że} \quad \sin^2\delta + \cos^2\delta = 1$$

otrzymamy po przekształceniach:

$$\frac{p_z}{p_x} = \sqrt{\frac{Rc_s}{Rr_s}} \quad \text{a stąd} \tag{14}$$

$$p_x = p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \tag{15}$$

Korzystając z równania (15) oraz z rys. 4 możemy napisać wzór:

$$p_z \left(\frac{2y_2 + 2y_1}{2}\right)(r-a) = p_x \sqrt{\frac{Rc_s}{Rr_s}} \cdot 2y_2 \cdot z_1 \tag{16}$$

$$p_z(r\sin\frac{\alpha}{2} + a\sin\frac{\alpha}{2})(r-a) = p_x\sqrt{\frac{Rc_s}{Rr_s}} \cdot 2\,r\sin\frac{\alpha}{2} \cdot z_i \tag{17}$$

Po uproszczeniu równania (17) przez $\sin\frac{\alpha}{2}$ mamy:

$$p_z(r^2 - a^2) = p_x\sqrt{\frac{Rc_s}{Rr_s}} \cdot 2\,r \cdot z_i \tag{18}$$

Z rys. 3 wynika, że największe naprężenia poziome wystąpią, gdy przez wykonanie wyrobiska pionowego (szybu) górotwór odsłonięty zostanie na głębokość $z_i = r$; wtedy kąt działania naprężeń ścinających $\xi = 45^o$ osiągnie maksymalną wartość.

Przy tym założeniu naprężenie poziome z równania (18) wyniesie:

$$p_x = 0{,}5\,p_z\sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \tag{19}$$

Jak wynika z zależności (8), naprężenia radialne:

$$\sigma_r = p_x = 0{,}5\,p_z\sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \tag{20}$$

Pamiętając, że naprężenia obwodowe są równe:

$$\sigma_t = \frac{q\,t_i}{(r-a)\cdot z_i}$$

z rzutu sił na oś x (rys. 3 i 4) otrzymamy:

$$2\,q\,t_i \cdot \sin\frac{\alpha}{2} = p_x \cdot 2\,r\sin\frac{\alpha}{2} \cdot z_i \tag{21}$$

stąd:

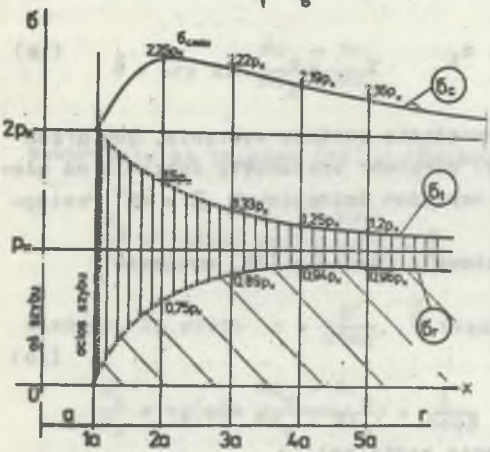
$$q\,t_i = p_x \cdot r \cdot z_i \tag{22}$$

Naprężenia obwodowe przy uwzględnieniu (22) będą:

$$\sigma_t = \frac{p_x \cdot r \cdot z_i}{(r-a)\cdot z_i} = 0{,}5\,p_z\sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\,\frac{\left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right)\cdot r}{(r-a)} \tag{23}$$

$$\sigma_t = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, \frac{(1 + \frac{a}{r})(1 - \frac{a}{r}) \cdot r}{(r - a)}$$

$$\sigma_t = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, (1 + \frac{a}{r}) \tag{24}$$



Rys. 5. Przebieg graficzny zmiany naprężeń obwodowych, radialnych i całkowitych w górotworze w otoczeniu szybu

Fig. 5. Diagram of changes of circumforential radial and total stresses in the rock around the shaft

Przebieg graficzny zmiany naprężeń radialnych (20) i obwodowych (24) dla różnych wartości r przedstawiono na rys. 5, z którego wynika, że w odległości r = 2a od osi szybu naprężenia radialne i obwodowe osiągają wartość maksymalną. Sumując naprężenia radialne i obwodowe w granicach sprężystości, otrzymamy zależności:

$$\sigma_c = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, (1 - \frac{a^2}{r^2} + 1 + \frac{a}{r})$$

$$\sigma_c = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, (2 - \frac{a^2}{r^2} + \frac{a}{r}) \tag{25}$$

Funkcja (25) osiąga ekstremum, gdy:

$$\frac{d\sigma_c}{dr} = 0 \quad \text{oraz gdy} \quad \frac{d^2\sigma_c}{dr^2} < 0$$

Wobec tego:

$$\frac{d\sigma_c}{dr} = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, (\frac{2\, a^2}{r^3} - \frac{a}{r^2})$$

$$\frac{d\sigma_c}{dr} = p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\, (\frac{a^2}{r^3} - \frac{0{,}5\, a}{r^2}) \tag{26}$$

$$\frac{d\sigma_c}{dr} = 0, \quad \text{jeżeli:}$$

$$\frac{a^2}{r^3} - \frac{0{,}5\, a}{r^2} = 0, \text{ a stąd:} \tag{27}$$

$$r = 2a \tag{28}$$

Funkcja $\sigma_c = f(r)$ osiąga max w punkcie $r = 2a$, gdy:

$$\frac{d^2\sigma_c}{dr^2} < 0 \tag{29}$$

Czyli:

$$\frac{d^2\sigma_c}{dr^2} = p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \left(\frac{-3\ a^2}{r^4} + \frac{a}{r^3}\right) < 0 \tag{30}$$

$$\frac{d^2\sigma_c}{dr^2} = p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \left(\frac{-3\ \cdot\ a^2}{(2\ a)^4} + \frac{a}{(2\ a)^3}\right)$$

$$\frac{d^2\sigma_c}{dr^2} = -\frac{p_z}{16} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \cdot \frac{1}{a^2} < 0 \tag{31}$$

Wartości naprężeń maksymalnych radialnych, obwodowych i całkowitych dla $r = 2a$ są następujące:

$$\sigma_{r_{max}} = 0{,}5\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \left(1 - \frac{a^2}{4a^2}\right) \tag{32}$$

$$\sigma_{r_{max}} = 0{,}375\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}, \quad \text{MPa} \tag{33}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 0{,}5\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \left(1 + \frac{a}{2a}\right) \tag{34}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 0{,}75\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}, \quad \text{MPa} \tag{35}$$

$$\sigma_{c_{max}} = 1{,}125\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}, \quad \text{MPa} \tag{36}$$

$$\sigma_{c_{max}} = 2{,}25\ p_x \tag{37}$$

$$\sigma_{r_{max}} = \sigma_{t_{max}} \left(1 - \frac{a}{r}\right) \tag{38}$$

$$\sigma_{r_{max}} = 0,5\ \sigma_{t_{max}} \tag{39}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 2\ \sigma_{r_{max}} \tag{40}$$

Analizując wzory (20), (24) i (25) z uwzględnieniem odległości r, otrzymamy następujące wartości naprężeń (tabl. 1).

Tablica 1

Rozkład naprężeń w górotworze w zależności od odległości r

Naprężenia	r		
	a	2a	3a
σ_r	0	0,75 p_x	0,89 p_x
σ_t	2 p_x	1,5 p_x	1,33 p_x
$\sigma_{c_{max}}$	2 p_x	2,25 p_x	2,22 p_x

3. WYKRES GRAFICZNY NAPRĘŻEŃ WYSTĘPUJĄCYCH W OTOCZENIU WYŁOMU SZYBU

Wykorzystując wartości naprężeń obliczone wzorami (12), (17) i (23), wykreślono ich przebieg, który pokazano na rys. 5. Krzywa $\sigma_c = f(r)$ posiada maksimum dla r = 2a. W tablicy 2 podano naprężenie $\sigma_{c_{max}} = \sigma_{t_{max}} + \sigma_{r_{max}}$ dla warunków w GZW i LZW.

Tablica 2

Wielkości naprężenia w otoczeniu szybu dla warunków GZW i LZW

H (m)	p_z MPa	GZW			LZW		
		Rc_s MPa	Rr MPa	σCG MPa	Rc_s MPa	Rr MPa	σCL MPa
200	4,4	30	1,5	1,1	10	1,0	1,57
400	9,2	40	2,0	2,3	15	1,5	3,30
600	14,2	50	2,5	3,6	20	2,0	5,15
800	20,0	60	3,0	5,0	30	3,0	7,20
1000	25,0	80	4,0	6,2	40	4,0	9,00

4. GRUBOŚĆ OBUDOWY SZYBU

4.1. Stosowane dotychczas wzory na obliczanie obudowy szybu

- Według Serlo:

$$d = \frac{p_{sz} \cdot a_o}{Rc_o - p_{sz}}, \ m \tag{41}$$

gdzie:

p_{sz} - ciśnienie na obudowę, MPa,
a_o - promień szybu w świetle obudowy,
Rc_o - wytrzymałość obudowy na ściskanie.

- Według Moohra:

$$d = \frac{a_o \cdot p_{sz}}{Rc_o} \sqrt{1 + \nu^2 - \nu} \tag{42}$$

gdzie:

$$\nu = \frac{1}{m} \tag{43}$$

- Według Lamego:

$$d = a_o \cdot \left(\sqrt{\frac{Rc_o}{Rc_o - 2\, p_{sz}}} - 1 \right), \ m \tag{44}$$

- Według Heise:

$$d = \frac{p_{sz} \cdot a_o}{Rc_o}, \ m \tag{45}$$

- Według Protodiakonowa:

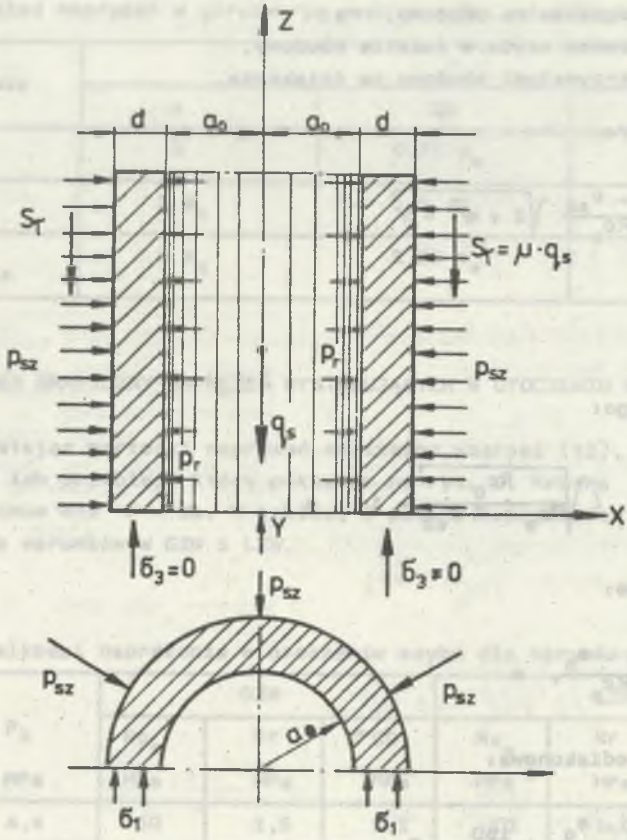
$$d = \frac{p_{sz} \cdot a_o}{Rc_o - p_{sz}} + \frac{150}{Rc_o}, \ m \tag{46}$$

- Według Hubera:

$$d = a_o \left(\sqrt{\frac{Rc_o}{Rc_o - p_{sz}\sqrt{3}}} - 1 \right), \ m \tag{47}$$

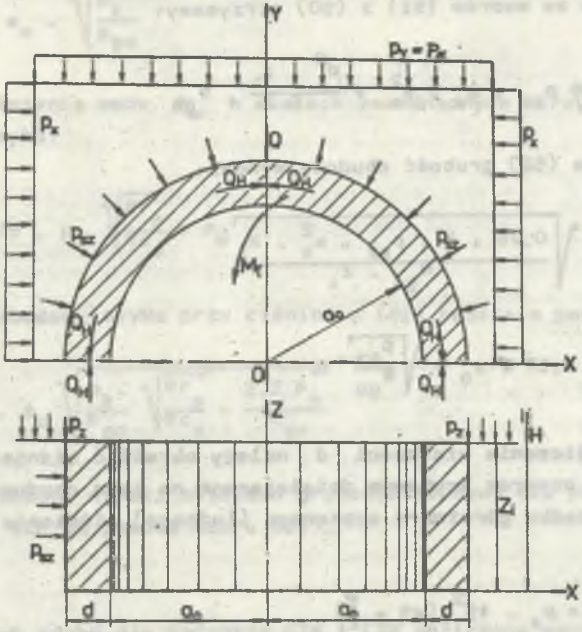
4.2. Wzory na obliczenie grubości d obudowy szybu w warunkach górotworu karbońskiego o warstwowej budowie

Grubość obudowy d szybu wyprowadzono przy najniekorzystniejszym warunku, który w praktyce często ma miejsce, a mianowicie przy występowaniu pustek poza obudową (spowodowanych wymyciem przez wodę, niedokładnym powiązaniu obudowy z górotworem). W tych przypadkach istnieje możliwość wystąpienia momentu zginającego (rys. 6, 7), który determinuje optymalną grubość obudowy.



Rys. 6. Schemat do obliczeń
Fig. 6. Scheme de calculation

Z warunków równowagi momentu M_z - łamiącego pierścień obudowy o wysokość z_i w połowie jej średnicy (rys. 6, 7) pod wpływem ciśnienia poziomego p_{sz} i momentu utrzymującego równowagę M_u można wyliczyć grubość obudowy szybu.



Rys. 7. Schemat do obliczeń

Fig. 7. Scheme de calculation

Tak więc:

$$M_u = W_x \cdot Rg_o$$

przy czym z rys. 7 otrzymamy:

$$\frac{Q}{2} = p_{sz} \cdot z_i \cdot \frac{\pi}{2} \cdot a_o \tag{48}$$

gdzie:

z_i - jednostkowa wysokość odcinka obudowy szybu.

Natomiast moment łamiący wynosi:

$$M_ł = \frac{Q}{2} \cdot a_o = \frac{p_{sz}}{2} \cdot z_i \cdot \frac{\pi}{2} \cdot a_o^2 \tag{49}$$

$$M_ł = \frac{p_{sz}}{4} \cdot z_i \cdot \pi \cdot a_o^2 \tag{50}$$

Moment utrzymujący w równowadze przekrój czynny obudowy szybu o grubości d wynosi:

$$M_u = W_x \cdot Rg_o = \frac{d^2 \cdot z_i}{6} \cdot Rg_o \tag{51}$$

Przy czym ze wzorów (51) i (50) otrzymamy:

$$0{,}78\ p_{sz} \cdot z_i \cdot a_o^2 = \frac{d^2 \cdot z_i}{6} \cdot R_{go} \tag{52}$$

Z równania (52) grubość obudowy wynosi:

$$d = \sqrt{\frac{0{,}78 \cdot 6 \cdot p_{sz} \cdot a_o^2 \cdot z_i}{R_{go} \cdot z_i}} \tag{53}$$

$$d = 2{,}17 \cdot a_o \cdot \sqrt{\frac{p_{sz}}{R_{go}}} \tag{54}$$

W celu obliczenia wielkości d należy określić ciśnienie górotworu naruszonego otworem szybowym działającego na jego obudowę.

W przypadku górotworu spękanego (luźnego) ciśnienie na obudowie szybu wynosi:

$$p_{sz} = p_z \cdot tg^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \tag{55}$$

Wzór (54) przy uwzględnieniu ciśnienia (55) przyjmie postać:

$$d_\varphi = 2{,}17 \cdot a_o \cdot tg \left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}}} \tag{56}$$

Przyjmując, że wytężenie górotworu stosownie do podanej zależności (8) W jest maksymalne w odległości r = 2a, oraz zakładając wartość ciśnienia p_{sz} równą naprężeniu σ_r, które wywołuje maksymalną wartość tych naprężeń, otrzymamy:

$$p_{sz} = 0{,}375\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \tag{57}$$

Wzór (54) przy tym założeniu (57) oraz stosunku $Rc_s \approx 20\ Rr_s$ w GZW będzie:

$$d = 2{,}17 \cdot a_o \sqrt{\frac{0{,}375\ p_z}{R_{go}} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}} \tag{58}$$

$$d = 1{,}33 \cdot a_o \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}} \tag{59}$$

$$d = 0{,}63 \cdot a_o \cdot \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}}} \tag{60}$$

Uwzględniając ciśnienie wody P_w w skałach zawodnionych otrzymamy ciśnienie na obudowę szybu:

$$p_{sz_w} = 0{,}375 \cdot p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} + P_w \tag{61}$$

Wzór na grubość obudowy szybu przy ciśnieniu (61) będzie w postaci:

$$d_w = 1{,}33 \cdot a_o \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} + \frac{2{,}7\, P_w}{R_{go}}} \tag{62}$$

W tablicy 3 zestawiono wyniki obliczeń grubości obudowy dla zmiennych parametrów w GZW i LZW za pomocą wzoru (59).

Tablica 3

Grubość obudowy szybu dla warunków GZW i LZW obliczona wzorem (59)

$a_o = 3{,}5$ m $R_{go} = 80$ MPa dla betonu

H	p_z	GZW			LZW		
		Rc_s	R_r	d	Rc_s	R_r	d
m	MPa	MPa	MPa	m	MPa	MPa	m
200	4,4	30	1,5	0,52	10	1,0	0,62
400	9,2	40	2,0	0,72	15	1,5	0,85
600	14,1	50	2,5	0,95	20	2,0	1,10
800	20,0	60	3,0	1,10	30	3,0	1,30
1000	25,0	80	4,0	1,26	40	4,0	1,50

5. PROJEKTOWANIE GRUBOSCI OBUDOWY SZYBU

W każdych warunkach górniczo-geologicznych mogą być stosowane wzory podane w niniejszej pracy (56) i (57), która uzależniają grubość obudowy szybu d od głębokości H, czyli p_z oraz od wytrzymałości skał otaczających Rc_s i Rr_s. Długość odcinka szybu h_i o stałej grubości obudowy d (54) lub d_w (62) wyznaczyć można z wykresu ciśnienia p_{sz} określonego wzorem (48) dla każdej warstwy o znanej wytrzymałości R_r i R_c.

Ciśnienie pierwotne $p_z = \gamma_s \cdot H$ określone powinno być przy uwzględnieniu średniej wartości γ_s określonej wzorem:

$$\gamma_s = \frac{\gamma_1 \cdot m_1 + \gamma_2 m_2 + \gamma_3 m_3 + \ldots + \gamma_n m_n}{m_1 + m_2 + m_3 + \ldots m_n} \tag{63}$$

gdzie:

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_n$ - ciężar objętościowy skał poszczególnej warstwy, KN/m^3,

m_1, m_2, m_n - grubość poszczególnej warstwy, m.

Długość odcinka h_i i d_i = constans nie powinna przekraczać 50 m w skałach słabych i średniozwięzłych (łupki ilaste, łupki piaszczyste) i 80 m w piaskowcach.

Długość h_i należy wyznaczyć od stopy górnej do stopy dolnej odcinka szybu. Właściwa wielkość stóp szybowych, zwłaszcza w górotworze mrożonym, jest konieczna dla utrzymania obudowy szybu przy rozmrażaniu.

Odcinek szybu h_i o stałej d obliczonej wzorem (54) i (62) powinien obejmować najsłabsze warstwy o najmniejszej wartości wytrzymałości, a stopy szybowe powinny być założone w najmocniejszych skałach.

Obliczenia grubości obudowy d dokonuje się dla największego ciśnienia występującego w warstwie najbliższej dolnej stopy danego odcinka h_i ze względu na ciśnienie p_z, które z głębokością H_i rośnie.

W przypadku występowania warstw wodonośnych o ciśnieniu wody, p_w grubość obudowy określa się wzorem (62) dla odcinka szybu, wzdłuż którego występuje warstwa wodonośna.

6. GRUBOŚĆ OBUDOWY SZYBU PODDANEJ ZGINANIU

Zjawisko zginania obudowy szybu zachodzi przy prowadzeniu eksploatacji w jego filarze ochronnym. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto, że na obudowę szybową działa obciążenie p_x przy odciążeniu jej z drugiej strony (rys. 8).

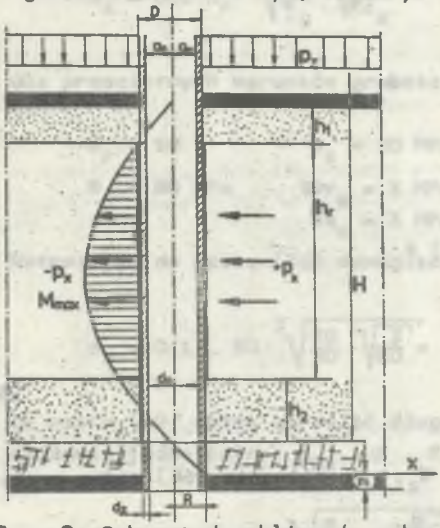
W warunkach naturalnych górotwór po stronie odciążonej szybu wskutek wyeksploatowania złoża jest bardziej podatny na przemieszczenia w kierunku działania momentu gnącego (rys. 8) przy równoczesnym oporze tego ośrodka. Dlatego, gdy przewiduje się w przyszłości eksploatację, należy ustalić potrzebną jej grubość z uwagi na zginanie.

Ciśnienie p_x na długości h_r (rys. 8) daje obciążenie:

$$q_o = p_x \cdot h_r = 0{,}375\, p_z \cdot h_r \sqrt{\frac{R_{r_s}}{R_{c_s}}}$$

$$q_o = 0{,}375\ p_z \cdot h_r \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}},\ \text{MPa} \tag{64}$$

Jeżeli obudowa szybu o wytrzymałości na zginanie R_g wykonana zostanie w górotworze warstwowym, w którym zalegają warstwy mocnego piaskowca stanowić będą utwierdzenie odcinka szybu jako belki obciążonej jednostajnie q_o, wówczas na odcinku tym działa maksymalny moment zginający M_{max} równy:



Rys. 8. Schemat do obliczeń grubości obudowy szybu poddanej momentowi zginającemu

Fig. 8. Scheme for calculation of shaft lining subjected to bending moment

$$M_{max} = \frac{q_o \cdot L^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{0{,}375\ p_z \cdot h_r \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}} \cdot h_r^2}{8}$$

$$M_{max} = \frac{p_z \cdot h_r^3 \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{21} \tag{65}$$

Moment utrzymujący równowagę szybu wynosi:

$$M_u = W_x \cdot R_g$$

gdzie:

W_x - wskaźnik wytrzymałości przekroju poprzecznego obudowy szybu,

$$W_x = \frac{\pi(D^4 - d_o^4)}{32\ D} = \frac{\pi}{32}\left(D^3 - \frac{d_o^4}{D}\right),$$

$$W_x \cong 0{,}1\ (D^3 - d_o^3),$$

D - średnica zewnętrzna szybu, m,

D = 2 R, R - promień zewnętrzny,

d_o - średnica w świetle obudowy,

$d_o = 2\ a_o$, a_o - promień szybu w świetle obudowy

$R - a_o = d_z$ - grubość obudowy szybu.

Uwzględniając powyższe, otrzymamy wzór:

$$W_x = 0{,}1 \cdot \left[(2R)^3 - (2a_o)^3\right]$$

$$W_x = 0{,}8\ (R^3 - a_o^3)$$

R_g - wytrzymałość obudowy na zginanie, (MPa).

W granicznym stanie równowagi pomiędzy górotworem i szybem zachodzi zależność:

$$\frac{p_z \cdot h_r^3 \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{21} = W_x \cdot R_g$$

$$\frac{p_z \cdot h_r^3 \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{21} = 0{,}8\ (R^3 - a_o^3)\ R_g$$

$$R^3 - a_o^3 = \frac{p_z \cdot h_r^3 \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{0{,}8 \cdot 21\ R_g} \tag{66}$$

Ponieważ promień zewnętrzny $R = a_o + d_z$, to równanie (66) można przekształcić:

$$(a_o + d_z)^3 - a_o^3 = \frac{p_z \cdot h_r^3 \cdot \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{17\ R_g} \tag{67}$$

Lewa strona równania (67) po rozwinięciu ma postać:

$$(a_o + d_z)^3 - a_o^3 = 3\ a_o^2 \cdot d_z + 3\ a_o\ d_z^2 + d_z^3 \tag{68}$$

Promień szybu w świetle obudowy a_o można wyrazić n-krotnością grubości obudowy d_z, czyli $a_o = n \cdot d_z$. Dla stosowanych średnic szybów w praktyce maksymalna wartość $n = 4$, a zatem równanie (68) można wyrazić w postaci:

$$(a_o + d_z)^3 - a_o^3 = d_z^3\ (3n^2 + 3n + 1)$$

$$(a_o + d_z)^3 - a_o^3 = d_z^3\ (3 \cdot 4^2 + 3 \cdot 4 + 1)$$

$$(a_o + d_z)^3 - a_o^3 = d_z^3 \cdot 61 \tag{69}$$

Po wykorzystaniu w równaniu (67) zależności (69) otrzymamy wzór na obliczenie grubości obudowy szybu przy działaniu momentu zginającego:

$$d_z = 0{,}1\, h_r \sqrt[3]{\frac{p_z}{R_g} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}} \tag{70}$$

Dla przeciętnych warunków grubości obudowy będzie:

$h_r = 50$ m $\quad p_z = 20$ MPa

$R_g = 80$ MPa $\quad Rv_s = 3$ MPa

$Re_s = 3$ MPa

Wstawiając do wzoru (70) dane liczbowe, otrzymamy:

$$d_z = 0{,}1 \cdot 50 \sqrt[3]{\frac{20}{80} \sqrt{\frac{3}{60}}} = 1{,}9 \text{ m}$$

Ze wzoru (70) można określić długość odcinka szybu h_r przejmującego obciążenie jednostajne $p_{sz} \cdot \pi \cdot R$ na długości h_r:

$$h_r = 10 \cdot d_z \cdot \sqrt[3]{\frac{R_g}{p_z} \cdot \sqrt{\frac{Rc_s}{Rr_s}}}, \text{ m} \tag{71}$$

Wzór (71) wskazuje na to, że im większa głębokość i ciśnienie p_z, tym odcinek h_r powinien być mniejszy, że gdy grubość obudowy d_z rośnie, wówczas odcinek h_r szybu poddawany zginaniu może być większy.

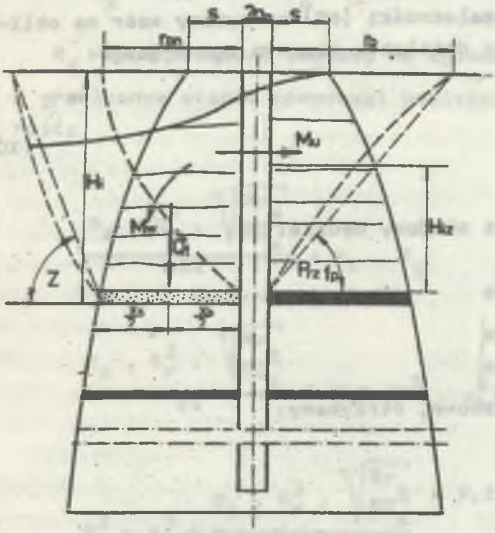
7. GRUBOSC OBUDOWY SZYBU PODDANEJ SCINANIU

Grubość obudowy szybu można uzależnić również od momentu zginającego (wywracającego M_w), którego działanie ujawnić się może przy zachwianiu stateczności filara ochronnego dla szybu (rys. 8).

Na rys. 9 pokazano jednostronną eksploatację pokładu zalegającego w filarze szybu na głębokości H_i uważając taką eksploatację za najbardziej niekorzystną. Wówczas obciążenie Q_f pochodzące od połowy ciężaru filara wyniesie:

$$Q_f = \frac{1}{2} \frac{\pi \cdot x_b^2 \cdot H_i}{3} \cdot \gamma_{śr}$$

i wywołuje działanie momentu wywracającego M_w. Moment ten można wyliczyć ze wzoru:



Rys. 9. Działanie momentu utrzymującego i wywracającego w filarze ochronnym szybu przy jednostronnej eksploatacji pokładu w filarze

Fig. 9. Action of fixing and overturning moment in a projecting pillar of the shaft at one side exploitation of bed in the pillar

$$M_w = Q_f \cdot \frac{x_b}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\pi \cdot x_b^2 \cdot H_i}{3} \cdot \gamma_{śr} \cdot \frac{x_b}{2}$$

$$M_w = \frac{\pi \cdot x_b^3 \cdot H_i}{12} \cdot \gamma_{śr} \qquad (72)$$

Moment utrzymujący filar w równowadze pochodzi od sił utrzymujących w równowadze poszczególne warstwy górotworu w ich przekroju o wytrzymałości Rr_s.

Moment ten określa wzór:

$$M_u = \frac{2 \cdot \pi \cdot x_b \cdot H_i}{2} Rr_s \frac{H_i}{2} \qquad (73)$$

Różnica tych momentów będzie stanowiła o zachowaniu się szybu. W przypadku gdy:

1) $M_u > M_w$ - istnieje stabilność górotworu w filarze szybu i nie zachodzi deformacja rury szybowej,

2) $M_w > M_u$ - następuje deformacja górotworu w pozostawionej części filara szybowego i z nią również następuje deformacja rury szybowej.

Rozpatrzmy przypadek 2).

Wiadomo, że w przeciętnych warunkach w GZW eksploatacja w filarze wywołuje deformację rury szybowej na różnych odcinkach od powierzchni przy różnych głębokościach H_{ik}.

Stąd w rozpatrywanym przypadku należy określić głębokość H_{ik}, przy której $M_w = M_u$.

Porównując równanie (72) i (73), otrzymamy:

$$\frac{\pi \cdot x_b^3 \cdot H_{ik}}{12} \gamma_{iv} = \frac{\pi}{2} \cdot x_b \cdot H_{ik}^2 \cdot Rv_s$$

Po uproszczeniu wyrazów identycznych otrzymamy:

$$H_{ik} = \frac{x_b^2 \cdot \gamma_{śr}}{6 \cdot Rr_s}, \qquad (74)$$

Z pracy [3, 4] wartość x_b jest równa:

$$x_b = 0{,}86\sqrt{\frac{H_i \cdot Rr_s}{\gamma_{śr}}} \tag{75}$$

Jeżeli do wzoru (74) wstawimy wartość (75), wówczas otrzymamy:

$$H_{ik} = 0{,}125 \cdot H_i$$

Tak więc deformacja górotworu przed czołem frontu eksploatacyjnego w filarze wynika z działania zasięgu wpływów, których wysokość i odległość określa kąt zasięgu eksploatacji Z, który wynosi [3, 4]:

$$tgZ = 0{,}5 \cdot \frac{H_i \cdot \gamma_{śr}}{R_{rs}} \tag{76}$$

Wysokość określoną przez kąt zasięgu Z jest wysokością, do której następuje deformacja górotworu i rury szybowej ponad eksploatowanym pokładem:

$$\frac{H_{iz}}{x_b} = tgZ, \quad \text{skąd}$$

$$H_{iz} = 0{,}5\,\frac{H_i \cdot \gamma_{śr}}{Rr_s} \cdot 0{,}86\sqrt{\frac{H_i \cdot Rr_s}{\gamma_{śr}}}$$

$$H_{iz} = 0{,}43 \cdot H_i\sqrt{\frac{p_z}{Rr_s}}, \quad =$$

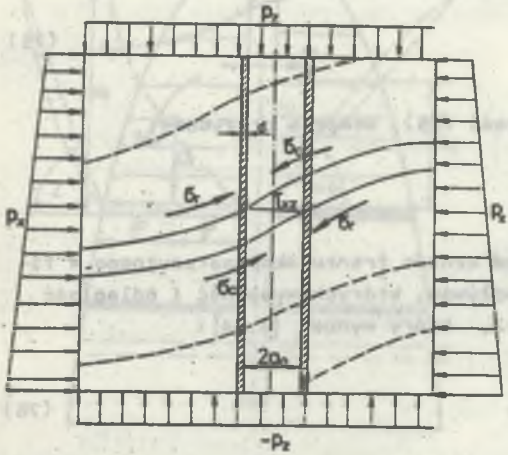
Wysokość H_{iz} nad pokładem eksploatowanym jednostronnie w filarze szybu (rys. 9) jest miejscem, przez który przechodzi punkt przegięcia krzywej osiadania górotworu (rys. 10) w którym występują naprężenia ścinające τ_{xz} (rys. 11). Z rys. 11 wynika, że:

$$\frac{\sigma_z - \sigma_x}{\tau_{zx}} = tgZ, \quad \text{stąd}$$

$$\tau_{zx} = \tau_{xz} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{tgZ} \tag{77}$$

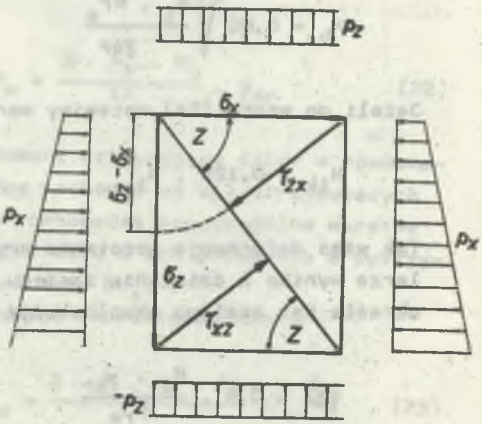
Ponieważ w górotworze nienaruszonym naprężenie $\sigma_z = p_z$ oraz $\sigma_x = p_x$, dlatego równość (77) można napisać następująco:

$$\tau_{xz} = \frac{p_z - p_x}{0{,}5\,\frac{p_z}{Rr_s}} = 2\,Rr_s\left(1 - \frac{p_x}{p_z}\right) \tag{78}$$



Rys. 10. Przebieg deformacji górotworu przez szyb z naprężeniem ścinającym

Fig. 10. Rock deformation across the shaft with tangential stress



Rys. 11. Schemat do obliczeń

Fig. 11. Scheme for calculation

Pamiętając, że przy działaniu jednokierunkowym ciśnienie wynosi:

$$p_x = p_z\sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

wówczas z równania (78) otrzymamy:

$$\tau_{xz} = \frac{p_z - p_z\cdot\sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}{0{,}5\,\frac{p_z}{Rr_s}} = \frac{p_z\left(1 - \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\right)}{0{,}5\,\frac{p_z}{Rr_s}}$$

stąd

$$\tau_{xz} = 2\,Rr_s\left(1 - \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\right) \tag{79}$$

Analiza wzoru (78) wykazuje następujące wartości ekstremalne

1) Jeżeli $p_x = p_z$, to wówczas $\tau_{xz} = 0$, czyli mamy do czynienia ze stanem kołowo-symetrycznym.

2) Jeżeli

$$p_x = 0, \quad p_z \neq 0, \tag{80}$$

co można obserwować przy mocnych piaskowcach, to wówczas:

$$\tau_{xz} = 2\,Rr_s \tag{81}$$

3) Gdy $p_x = 0{,}7\,p_z$; stan naprężenia spotykamy w LZW, to wówczas

$$\tau_{xz} = 0{,}6\,Rr_s \tag{82}$$

W punkcie przegięcia krzywej osiadania warstw górotworu (rys. 10), który przechodzi przez szyb, występują naprężenia ścinające τ_{xz} na wysokości H_{iz} (rys. 10).
Równanie równowagi szybu w tym miejscu ma postać:

$$\tau_{xz} \cdot \pi(R^2 - a_o^2) = 2\pi\,R \cdot d \cdot R_d \tag{83}$$

gdzie:

R_d - wytrzymałość obudowy szybu na ścinanie.

Z równania (83) po uwzględnianiu zależności (79) otrzymamy grubość obudowy szybu ze względu na ścinanie:

$$d = \frac{\tau_{xz} \cdot \pi(R^2 - a_o^2)}{2\pi \cdot R \cdot R_d}$$

$$d = \frac{Rr_s}{R_d}\left(R - \frac{a_o^2}{R}\right)\left(1 - \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\right) \tag{84}$$

lub

$$d = \frac{Rr_s}{R_d}\left(R - \frac{a_o^2}{R}\right)\left(1 - \frac{p_x}{p_z}\right) \tag{85}$$

<u>Przykład</u>

Przyjmując, że:

$Rr_s = 3$ MPa, $R_d = 10{,}0$ MPa

$R = 6$ m, $a_o = 3$ m, $p_x = 0{,}1\,p_z$

oraz uwzględniając je we wzorze (85), otrzymamy:

$$d = \frac{3}{10,0}\left(6 - \frac{3^2}{6}\right)\left(1 - \frac{0,1\,p_z}{p_z}\right) = 1,2 \text{ cm}$$

$$d = 1,2 \text{ m}.$$

Grubość obudowy szybu ze względu na naprężenia ścinające jest nieznacznie mniejsza dla tych samych warunków w przypadku działania momentu zginającego lub występujących ciśnień p_x, p_y i p_z.

Obserwowana w praktyce górniczej deformacja rury szybowej podczas eksploatacji w filarach ochronnych spowodowana jest działaniem jednocześnie występujących naprężeń ścinających, zginających i ściskających i w związku z tym należałoby dla takich przypadków zwiększać wytrzymałość obudowy szybu podczas jej projektowania.

9. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

9.1. Naprężenia występujące w otoczeniu szybu określone były za pomocą wzorów, które nie uwzględniały bezpośrednio wytrzymałości skał otaczających. Wielkość naprężeń radialnych i obwodowych $\sigma_r + \sigma_t = 2\,p_x$ podaje się dotychczas przy założeniu, że $\sigma_r = 0$ na obwodzie wyłomu (ociosu). Odległość maksymalnych naprężeń za ociosem szybu oceniana była empirycznie. Podana funkcja σ_c w punkcie $r = 2a$ osiąga maksimum, a naprężenia wartość $\sigma_{c\,max}$.
Podana funkcja σ_c po raz pierwszy opisuje w sposób oryginalny zmianę naprężeń za ociosem wyłomu szybu w każdym punkcie r.

9.2. Podane w niniejszej pracy maksymalne naprężenia $\sigma_{c\,max} = 2,25\,p_x$ i ich odległość występowania w odległości $r = 2a$ od środka wyłomu szybu wyprowadzone zostały metodą analityczną z uwzględnieniem wpływu ciśnienia pionowego oraz wytrzymałości skał otaczających szyb. Zależności te służące do obliczania wielkości obciążeń i naprężeń w otoczeniu rury szybowej pozwoliły wyprowadzić wzór na obliczenia grubości obudowy szybu w każdych warunkach górniczo-geologicznych.

9.3. Ponieważ eksploatacja w pobliżu szybu lub pod nim może wywołać naprężenia zginające lub ścinające, przeanalizowane zostały te przypadki, które powinny być uwzględniane przy projektowaniu obudowy szybu.

LITERATURA

[1] Chudek M.: Mechanika górotworu. Wyd. Śląsk, Pol. Śl. Gliwice 1981.

[2] Chudek M., Stefański L.: Obciążenia i naprężenia występujące w otoczeniu wyrobiska ścianowego oraz nacisk stropu na obudowę funkcjami własności geotechnicznych górotworu i głębokości. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Górnictwo z. 128, Gliwice 1983.

[3] Chudek M., Stefański L.: Loads and stress occuring in the orogen in the vicinity of wall headings remains of coal seams and pillars in underground mines.

[4] Chudek M., Stefański L.: Teoretyczne ujęcie wpływu eksploatacji górniczej na wielkość deformacji powierzchni przy uwzględnieniu warstwowej budowy górotworu. Zeszyty Naukowe Pol. Śl. s. Górnictwo z.145, Gliwice 1987. W druku.

[5] Chudek M.: Zagadnienie grubości i stanu naprężeń kołowej obudowy betonowej szybów w zależności od ciśnienia wody przepływającej przez nią ruchem laminarnym. Archiwum Górnictwa T. X z. 1, 1964, s. 43-83.

[6] Galanka J.: Jak obliczać ciśnienie górotworu na obudowę szybów w skałach zwięzłych niezawodnionych. Materiały niepublikowane.

[7] Praca zbiorowa: Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi. Wyd. Śląsk, Katowice 1982.

[8] Sałustowicz A.: Zarys mechaniki górotworu. Wyd. Śląsk, Katowice 1968.

[9] Chudek M., Podgórski K., Kleta H.: Współpraca budowli podziemnych z górotworem objętym wpływem eksploatacji górniczej. Wyd. PAN Ossolineum, 1982.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Kazimierz RUŁKA

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1987 r.

НАГРУЗКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИЕ В ОКРУЖЕНИИ СТВОЛА, А ТАКЖЕ ТОЛЩИНА ЕГО КРЕПИ КАК ФУНКЦИЯ ГЛУБИНЫ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНОГО МАССИВА

Р е з ю м е

В работе выведена функция напряжений, действующих в окружении ствола и указано максимальное расстояние этих величин от центра выработки. На этой основе определена толщина крепи ствола, зависящая от его диаметра, глубины и крепости горных пород.

Рассмотрены также иные случаи нагрузок, действующих на крепь ствола, названных сгибанием и сдвигом крепи. Конечные формулы для расчета напряжений и толщины крепи ствола рис. 3, 5, 8, 10 в границах упругости имеют вид:

напряжения тангенциальное нормальное σ_t, радиальное σ_r и общее σ_o в горном массиве в окружении ствола (от откоса вглубь горного массива) составляют:

$$\sigma_t = 0{,}5\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\ (1 + \frac{a}{r})$$

$$\sigma_r = 0{,}5\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\ (1 + \frac{a^2}{r^2})$$

где:

Rr_s, Rc_s - средние прочности пород на растяжение и сжимание.

Максимальное значение напряжений для $r = 2a$ составляет:

$$\sigma_{r_{max}} = 0{,}375\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 0{,}75\ p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

$$\sigma_{c_{max}} = 2{,}25\ p_x$$

Толщину крепи можно рассчитать по формулам:

- для проходки ствола в горном массиве не охваченном влиянием эксплуатации

$$d = 1{,}33\ a_o \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}}}\ \sqrt[4]{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

- для условий сгибания крепи ствола

$$d_z = \frac{h_r}{g}\ \sqrt[3]{\frac{p_z}{R_g}}\ \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

- для условий сдвига крепи ствола

$$d = \frac{Rr_s}{R_d}\ (R - \frac{a_o^2}{R})(1 - \frac{p_x}{p_z})$$

LOADS AND STRESSES ACTING AROUND THE SHAFT AND THICKNESS OF SHAFT LINING AS A FUNCTION OF DEPTH AND GEOMECHANICAL PROPERTIES OF ROCK MASS

S u m m a r y

A function of stresses occuring around the shaft has been derived and a distance of their maximum value from the middle of the heading has been given. On this basis the thickness of shaft lining dependent on its inside diameter, depth and strength of the rocks around have been defined.

Other cases of loads acting on the shaft lining caused by bending and cutting of the lining have been also considered. Final formulae for calculating of stresses and shaft lining thickness (Fig. 3, 5, 8, 10) within elasticity limits are the following:

Circumferential stress σ_t, radial stress σ_r and total stress σ_c in a rock mass around the shaft (from the side wall inside the rock) are the following:

$$\sigma_t = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\left(1 + \frac{a}{r}\right)$$

$$\sigma_r = 0{,}5\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right)$$

where:

Rr_s, Rc_s - mean tensile strength and comprehensive strength of the rocks.

Value of maximum stresses for $r = 2a$ is:

$$\sigma_{r_{max}} = 0{,}375\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

$$\sigma_{t_{max}} = 0{,}75\, p_z \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

$$\sigma_{c_{max}} = 2{,}25\, p_x$$

Lining thickness can be calculated from the formulae

- for shaft sinking in the rock without exploitation outflows

$$d = 1{,}33\, a_o \sqrt{\frac{p_z}{R_{go}}} \sqrt[4]{\frac{Rr_s}{Rc_s}}$$

- for conditions of shaft lining bending

$$d_z = \frac{h_r}{g} \sqrt[3]{\frac{p_z}{R_g} \sqrt{\frac{Rr_s}{Rc_s}}}$$