Geomechaniczne aspekty projektowania przecinek ścianowych w warunkach eksploatacji pokładów grubych z podziałem na warstwy

Stanisław Duży

Streszczenie: Względy ekonomiczne powodują, że eksploatację pokładów grubych prowadzi się systemem ścianowym z zawałem stropu z góry w dół. Sytuacja taka powoduje, że kolejne warstwy zalegają pod zrobami zawałowymi. Do podstawowych różnic przy projektowaniu przecinek zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami można zaliczyć: odprężenie górotworu, obniżenie parametrów wytrzymałościowych i odkształceniowych masywu, a w szczególności ich zmienność, odmienny model procesów naprężeniowo-deformacyjnych górotworu w otoczeniu takiej przecinki, ograniczony zakres stosowania kotwienia itp. Przedstawiono sposób doboru obudowy oparty na określaniu obciążenia obudowy z wykorzystaniem podstaw ośrodka rozporowego, z uwzględnieniem zmienności warunków naturalnych i górniczych i zastosowaniem podstaw probabilistycznej analizy konstrukcji.

Słowa kluczowe: górnictwo, wyrobiska przygotowawcze, obudowa wyrobisk

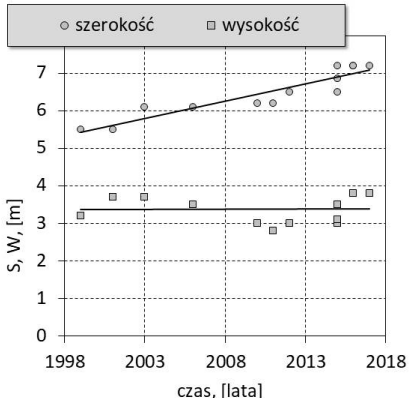
1. Wprowadzenie

Pokład o dużej miąższości, dla jego eksploatacji, najczęściej dzieli się na warstwy poziome lub pochyłe. Wybór podziału zależy od rodzaju, wielkości i położenia złoża w przestrzeni oraz technologii jego wybierania. Można je wybierać systemami długofrontowymi (ścianowe) lub krótkofrontowymi (systemy chodnikowe, ubierkowe, zabierkowe itp.) z zawałem stropu, podsadzką suchą lub podsadzką hydrauliczną, warstwami z góry do dołu, z dołu do góry lub w mieszanej kolejności. Dążenie do uzyskania jak najlepszego efektu ekonomicznego wymusza możliwie maksymalne obniżenie kosztów eksploatacji, co powoduje, że najczęściej stosowanym systemem eksploatacji pokładów grubych jest podział na warstwy równoległe do uwarstwienia i wybieranie ich systemem ścianowym z zawałem stropu, kolejno, począwszy od warstwy najwyższej (podstropowej) do najniższej (przyspągowej).

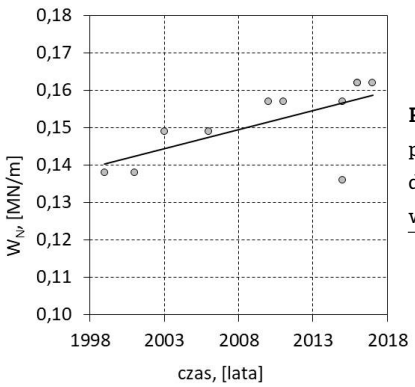
Stan taki powoduje, że wyrobisko przygotowawcze zlokalizowane w kolejnej warstwie znajdować się będzie w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów (w różnej odległości pod zrobami), a ocena stateczności wyrobiska w tych warunkach powinna uwzględniać podstawowe czynniki, takie jak odprężenie i degradacja masywu.

2. Główne zagrożenia występujące w wyrobiskach wykonywanych i utrzymywanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi

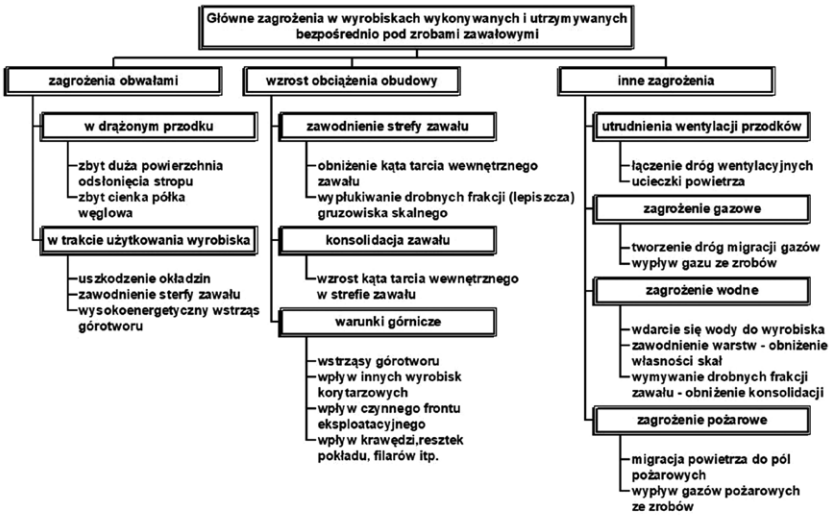
Analiza parametrów geometrycznych stosowanych w latach 1988–2017 obudów przecinek ścianowych zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami w opracowanych przez autora projektach wykazała systematyczny wzrost szerokości wyrobiska przy zbliżonej jego wysokości (rys. 1). Stosowane obudowy znacząco różniły się pod względem kształtu, masy kształtownika oraz gatunku stali, co powodowało równolegle wzrost ich podporności (rys. 2).



Rys. 1. Zmiany szerokości i wysokości przekroju poprzecznego wyrobisk w czasie



Rys. 2. Zmiany podporności obudowy wyrobisk w czasie



Rys. 3. Zagrożenia występujące w wyrobiskach przygotowawczych wykonywanych i utrzymywanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi [5, 6]

Projektowanie wyrobisk przygotowawczych zlokalizowanych w rejonie strefy zruszonego górotworu niesie ze sobą wiele zagrożeń, które należy uwzględnić. Na rys. 3 przedstawiono podstawowe zagrożenia występujące w wyrobiskach zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi [5, 6].

3. Warunki zalegania wyrobisk przygotowawczych w trakcie eksploatacji pokładu grubego z podziałem na warstwy

Zagadnienie doboru obudowy dla rozcinek ścian zlokalizowanych w kolejnej warstwie przewidzianej do eksploatacji może obejmować następujące przypadki [5]:

- wyrobiska zalegające bezpośrednio pod zrekonsolidowanymi zrobami;
- wyrobiska zalegające bezpośrednio pod niezrekonsolidowanymi zrobami;
- wyrobisko zlokalizowane w caliźnie poddanej odprężeniu eksploatacją podbierającą lub nadbierającą;
- wyrobiska zlokalizowane w caliźnie pod zrobami zawałowymi, jednak oddzielonymi od nich półką węglową.

Podstawowym czynnikiem decydującym o stateczności wyrobiska jest dobrze zaprojektowana obudowa, a podstawowym parametrem wejściowym do projektowania obudowy jest jej obciążenie. Obciążenie obudowy wyrobisk zależy od charakteru procesów naprężeniowo-deformacyjnych zachodzących w otoczeniu wyrobiska, które zależą m.in. od rodzaju i właściwości skał budujących masyw, lokalizacji wyrobiska, wielkości jego przekroju poprzecznego, rodzaju obudowy i technologii drążenia wyrobiska.

W zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny proces doboru i projektowania obudowy wyrobisk korytarzowych objęty jest szeregiem norm, zasad lub wytycznych, jednak nieuwzględniających warunków górotworu zdegradowanego.

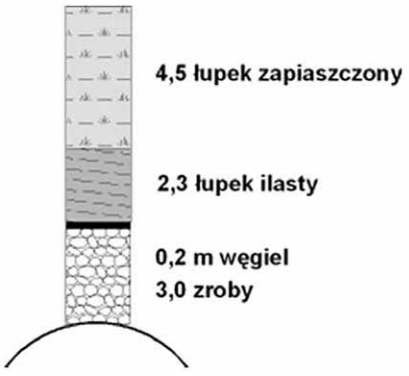
Dobór obudowy dla wyrobisk przygotowawczych zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami może być przeprowadzony w oparciu o [5, 6, 11, 13]:

a) metody empiryczne oparte o doświadczenia praktyczne;
b) metody analityczne oparte o model deformacji ośrodków rozdrobnionych lub spękanych;
c) metody modelowania numerycznego ośrodków sypkich lub ośrodków spękanych.

Wyrobisko korytarzowe zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów znajduje się w specyficznym układzie obciążenia, którego nie można opisać równaniami stosowanymi dla opisu górotworu zbudowanego ze skał zwięzłych. Zroby zawałowe nie zawsze podlegają procesowi rekonsolidacji i pozostają w stanie, który można opisać jako stan luźny [2, 3, 4, 12, 15]. Zasadę tę można również odnieść do przypadku pozostawienia półki węglowej. Półka ta przy prowadzeniu robót górniczych często ulega spękaniu prowadzącemu do jej zniszczenia [16].

4. Analiza właściwości skał i górotworu w otoczeniu wyrobisk górniczych w warunkach eksploatacji pokładu z podziałem na warstwy równoległe do uwarstwienia

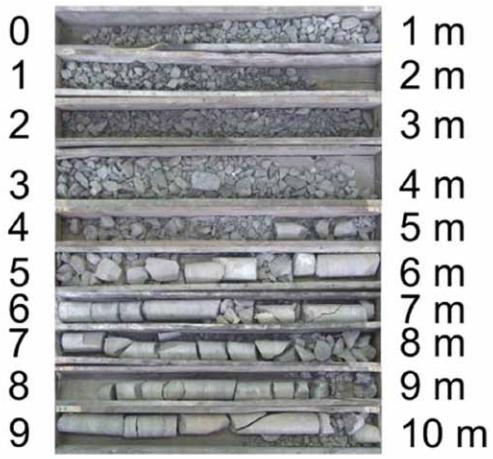
Właściwości skał i górotworu w otoczeniu wyrobisk górniczych w warunkach eksploatacji pokładu z podziałem na warstwy równoległe do uwarstwienia przedstawiono w oparciu o badania dołowe w pokładzie eksploatowanym systemem ścianowym z zawałem stropu z podziałem na 3 warstwy. Badania prowadzono w wyrobisku w warstwie II (środkowej) po wybraniu warstwy przystropowej. Na rys. 4 przedstawiono profil litologiczny górotworu w stropie projektowanego wyrobiska, a na rys. 5 pokazano widok pobranego rdzenia [3, 4].



Rys. 4. Profil geologiczny górotworu

W celu określenia właściwości górotworu przeprowadzono badania laboratoryjne i polowe. Badania laboratoryjne obejmowały określenie właściwości wytrzymałościowych skał budujących masyw w analizowanym rejonie, wykorzystując do tego celu pobrane rdzenie [3, 4].

Na podstawie przeprowadzonych badań i analizy wyników badań polowych stwierdzono, że w obrębie partii zachodniej wytrzymałość na ściskanie wynosi:



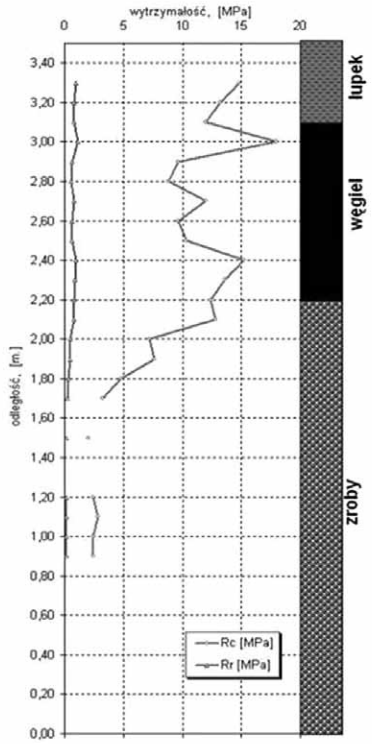
Rys. 5. Widok pobranego rdzenia

a) węgla:
$R_c^{śr}$ = 12,13 MPa; ν_{Rc} = 0,25; R_c^{obl} = 7,18 MPa;
b) iłowców:
$R_c^{śr}$ = 14,01 MPa; ν_{Rc} = 0,08; R_c^{obl} = 12,87 MPa;
c) scalonych zrobów:
$R_c^{śr}$ = 5,45 MPa; ν_{Rc} = 0,73; R_c^{obl} = 1,43 MPa.

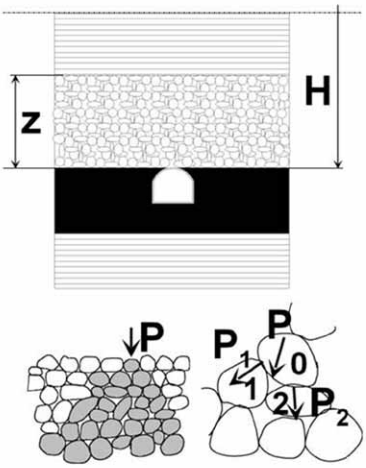
W analizowanym rejonie przeprowadzono również badania polowe wytrzymałości na ściskanie oraz wytrzymałości na rozciąganie skał zalegających w stropie dowierzchni do głębokości 3,5 m. Badania wytrzymałościowe wykonano metodą penetrometru otworowego. Profil penetrometryczny skał zalegających w stropie dowierzchni przedstawiono na rys. 6.

Wykorzystując przeprowadzoną analizę statystyczną własności wytrzymałościowych skał budujących poszczególne warstwy, dokonano oceny własności wytrzymałościowych masywu.

Porównując uzyskane wyniki badań własności wytrzymałościowych skał i górotworu, można stwierdzić, że:
- wytrzymałość skał pod wpływem prowadzonej eksploatacji górniczej zasadniczo nie uległa zmianie;
- znacznej zmianie uległy parametry opisujące jakość masywu skalnego – np. szczelinowatość, RQD itp.;
- występuje duża zmienność właściwości i jakości masywu skalnego.



Rys. 6. Profil wytrzymałościowy skał zalegających w stropie wyrobiska



Rys. 7. Schemat mechanizmu odprężenia górotworu pod zrobami zawałowymi [5, 9, 14]

4. Podstawowe zasady doboru obudowy wyrobisk korytarzowych zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi

4.1. Określenie odprężenia górotworu pod zrobami

Sytuację panującą w rejonie wyrobiska korytarzowego zlokalizowanego bezpośrednio pod zrobami można przedstawić w sposób podany na rys. 7 [5, 6, 9, 10]. Na rysunku tym przedstawiono ideę odprężenia górotworu, które występuje pod wybraną warstwą pokładu.

Uwzględnienie dyskretnej struktury skały zniszczonej możliwe jest albo przez badanie ośrodka zastępczego, albo przez zastosowanie metod probabilistycznych.

W rozwiązaniach tych ośrodek traktowany jest jako statystyczny układ elementów o dowolnym kształcie, nie powiązanych ze sobą, lecz wspartych na sobie w taki sposób, że pomiędzy nimi występują siły na stykach. Obciążenie zewnętrzne przekazuje się poprzez styki elementów w głąb ośrodka [14]. W zależności od kształtu bloków skalnych Kandaurow rozróżnia ośrodek bezrozporowy, w którym nie powstaje rozpór pomiędzy poszczególnymi blokami, oraz ośrodek rozporowy, w którym wskutek nieregularnego kształtu ziaren i dowolnego położenia styków powstają w ośrodku także siły poziome – tzw. rozpór.

Dla dowolnego obciążenia p_z rozłożonego na odcinku stropu warstwy luźnej obciążenie spągu tej warstwy wyrazić można wzorem:

$$\sigma_z = \frac{2}{z} \cdot \sqrt{\frac{1}{8 \cdot \pi \cdot tg^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)}} \cdot (H - z) \cdot \gamma \quad (1)$$

gdzie:
z – grubość warstwy zawału;
H – głębokość zalegania spągu strefy zawału;
γ – średni ciężar objętościowy skał nadległych;
φ – kąt tarcia wewnętrznego ośrodka.

Uwzględniając fakt, iż w miarę upływu czasu wielkość i rozkład naprężeń ulega zmianie w wyniku relaksacji naprężeń w pracy dla uwzględnienia wpływu czasu t na wielkość naprężeń wywołanych wpływem eksploatacji górniczej zastosowano zależność w postaci:

$$\sigma_z(t) = \sigma_z \cdot \left(0{,}55 \cdot e^{\frac{t}{0{,}9}} + 0{,}45\right) \quad (2)$$

4.2. Określenie obciążenia i podporności obudowy

W wyniku wykonania wyrobiska w jego otoczeniu powstanie strefa rozluzowania skał w kształcie elipsy (rys. 8). W strefie zawałowej utworzy się sklepienie w przypadku spełnienia następującego warunku:

$$\frac{2 \cdot S_r}{w} \geq \sqrt{\frac{K^2 \cdot (f^2 + K)}{K \cdot f^2 + 1}} \quad (3)$$

gdzie:
K – parametr obliczany z zależności:

$$K = \frac{p_x}{p_z} \quad (4)$$

S_r – rozpiętość wyrobiska – dla obudowy łukowej obliczana z zależności:

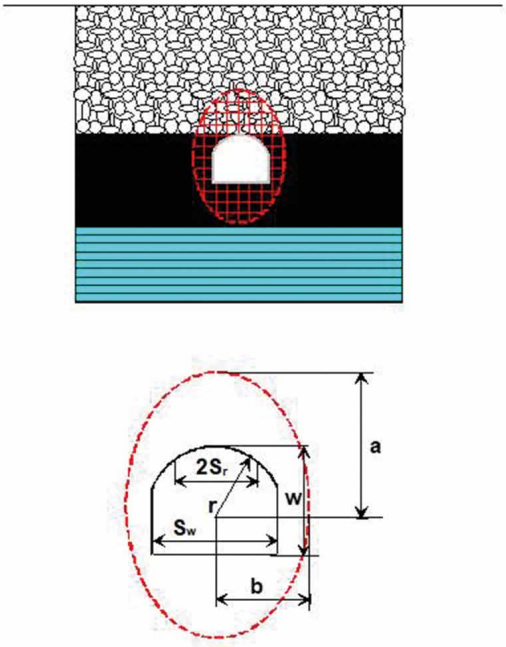
$$S_r = \frac{r}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

r – promień sklepienia obudowy wyrobiska;
p_x – naprężenie poziome w górotworze;
p_z – naprężenie pionowe w górotworze;
h – wysokość wyrobiska;
f – współczynnik tarcia górotworu określany z zależności:

$$f = tg\left(\varphi + k \cdot log\frac{R_c}{\sigma_z}\right) \quad (6)$$

φ – kąt tarcia wewnętrznego gruzowiska zawałowego;
k – współczynnik szorstkości (dla powierzchni bardzo szorstkich $k = 20$);
R_c – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie skał stropowych przed przejściem w stan zawału;
σ_z – naprężenie pionowe w górotworze.

W przypadku wytworzenia się w strefie zawału sklepienia obciążenie obudowy pochodzić będzie od ciężaru skał



Rys. 8. Schemat obliczania obciążenia obudowy w rejonie strefy naruszonego górotworu [5, 9, 10]

zawartych w obrębie strefy odprężonej w kształcie półelipsy. Wielkości półosi elipsy opisującej strefę odprężoną oblicza się ze wzorów:

$$a = \frac{S_r}{K \cdot f} \cdot \sqrt{1 + f^2 \cdot K} \quad (7)$$

$$b = \frac{S_r}{\sqrt{K} \cdot f} \cdot \sqrt{1 + f^2 \cdot K} \quad (8)$$

W przypadku niespełnienia warunku (3) wymiary strefy odprężonej określa się z warunku równowagi ociosów. Aby ociosy były w stanie równowagi, pionowa reakcja sklepienia ciśnień powinna być taka, aby wywołane przez nią tarcie zrównoważyło poziome siły ścinające na tej wysokości. Rozmiary strefy odprężonej określa się ze wzorów:

$$a = \frac{w}{2 \cdot f} \cdot \sqrt{f^2 + K} \quad (9)$$

$$b = \frac{w \cdot \sqrt{K}}{2 \cdot f} \cdot \sqrt{f^2 + K} \quad (10)$$

Obciążenie obudowy na 1 mb wyrobiska oblicza się ze wzoru:

$$Q_0 = \frac{2}{3} \cdot S \cdot (a - r) \cdot \gamma \quad (11)$$

Dla potrzeb projektowania obudowy często potrzebna jest wartość obliczeniowa jednostkowego obciążenia obudowy. Wielkość tę można obliczyć ze wzoru:

$$q_0 = 1{,}2 \cdot \frac{Q_0}{S} \quad (12)$$

Dobór obudowy wyrobisk korytarzowych zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi realizowany powinien być z zachowaniem następujących zasad:

- stosowana jest obudowa podporowa (najczęściej odrzwiowa);
- w obudowie odrzwiowej, ze względu na nierównomierność obciążenia obudowy, szczególną uwagę zwrócić należy na stabilizację odrzwi poprzez stosowanie na obwodzie obudowy większej liczby rozpór lub zabudowę dodatkowych podciągów;
- obudowa powinna osłaniać przestrzeń wyrobiska przed ewentualnym opadem zruszonej skały do wyrobiska (opinka ciągła lub nieciągła z odpowiednim zabezpieczeniem);
- obudowa powinna posiadać odpowiednie posadowienie zabezpieczające przed wbijaniem się odrzwi obudowy w podsadzkę;
- obudowa powinna izolować wyrobisko przed niekontrolowaną wymianą gazów, wody itp.

W świetle przeprowadzonych rozważań teoretycznych proponuje się zmodyfikowany tok postępowania przy określaniu odległości pomiędzy odrzwiami stalowej obudowy podatnej [7].

Etap I: Określenie odległości pomiędzy odrzwiami w stanie usztywnionym d_1:

$$d_1 = \frac{10^3 \cdot f_d \cdot (m+n_1)}{\left[\frac{M_{max}}{W_x} + \frac{N_0}{\varphi \cdot A}\right] \cdot n_1} \cdot 1m\,, \qquad [m] \tag{13}$$

gdzie:

f_d – wartość obliczeniowa wytrzymałości na rozciąganie stali, [MPa];
m – współczynnik Schaefera zależny od rodzaju przekroju kształtownika;
n_1 – współczynnik materiałowy wg Schaefera;
M_{max} – wartość ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla prognozowanego całkowitego obciążenia obliczeniowego, [kN × m];
N_0 – wartość siły osiowej w miejscu ekstremalnego momentu zginającego na obwodzie odrzwi obudowy dla prognozowanego całkowitego obciążenia obliczeniowego, [kN];
W_x – wartość wskaźnika zginania przekroju kształtownika odrzwi obudowy, [m^3];
φ – wartość współczynnika wyboczenia zależna od wielkości kształtownika i rozmiaru odrzwi wg PN-80/B-03200;
A – wartość przekroju poprzecznego kształtownika odrzwi obudowy, [m^2];
n_1 – współczynnik pracy obudowy ($n_1 \geq 1{,}0$).

Etap II: Dobór parametrów konstrukcyjnych złącza w oparciu o określoną wymaganą jego nośność:

$$N_z = 0{,}8 \cdot N \cdot d_1\,, \quad [kN] \tag{14}$$

gdzie:

N_Z – wartość nośności złącza odrzwi obudowy ŁP, [kN];
N – wartość siły osiowej w miejscu złącza odrzwi dla prognozowanego całkowitego obciążenia obliczeniowego, [kN/m];
d_1 – odległość między odrzwiami obudowy ŁP obliczona ze wzoru (1), [m].

Etap III: Dobór posadowienia odrzwi obudowy w oparciu o przybliżony warunek:

$$A_{min} = \frac{0{,}5 \cdot q_c \cdot S_w}{R_c}, \quad [m^2] \tag{15}$$

gdzie

A_{min} – wymagana wielkość powierzchni posadowienia łuku ociosowego odrzwi, [m^2];
q_c – obciążenie obliczeniowe odrzwi obudowy, [MN/m];
S_w – szerokość wyrobiska w świetle obudowy, [m];
R_c – wytrzymałość obliczeniowa na ściskanie skał spągowych, [MPa].

Prawidłowo dobrana obudowa spełnia warunki określone wzorami (13), (14) i (15). Przekształcając wzory (13), (14) i (15), można obliczyć:

- nośność odrzwi w stanie usztywnionym – P_1;
- nośność odrzwi w stanie podatnym – P_2;
- nośność odrzwi ze względu na posadowienie – P_3.

Jako wypadkową nośność obudowy zwykle przyjmuje się wartość najmniejszą z wymienionych powyżej.

4.3. Obciążenie i podporność obudowy jako zmienne losowe

Uwzględniając wykazaną powyżej zmienność danych przyjmowanych do obliczeń prognostycznych, można je potraktować jako zmienne losowe o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa, co pozwoli na określenie oddziaływania górotworu na obudowę wyrobiska również jako zmienną losową o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa.

Traktując dane z, H, φ i γ jako zmienne losowe o normalnym rozkładzie prawdopodobieństwa, wartość średnią i odchylenie standardowe naprężenia w spągu warstwy zawału można obliczyć, wykorzystując wzory aproksymacyjne [1, 8] i uzyskując wzory:

$$\bar{\sigma}_z = \frac{2}{\bar{z}} \cdot \sqrt{\frac{1}{8 \cdot \pi}} \cdot \frac{(\bar{H} - \bar{z}) \cdot \bar{\gamma}}{tg\left(45 - \frac{\bar{\varphi}}{2}\right)} \tag{16}$$

$$s_\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial z}\right)^2 \cdot s_z^2 + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial H}\right)^2 \cdot s_H^2 + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial \varphi}\right)^2 \cdot s_\varphi^2 + \left(\frac{\partial \sigma_z}{\partial \gamma}\right)^2 \cdot s_\gamma^2} \tag{17}$$

Po wykonaniu obliczeń uzyskuje się wielkość i rozkład obciążeń obudowy charakteryzowany przez [1, 8]:

- średnią wartość obciążenia obudowy wyrobiska – q_0;
- odchylenie standardowe obciążenia obudowy wyrobiska – s_q.

Wartość średnią i odchylenie standardowe obciążenia obudowy dla przyjętego modelu można określić ze wzorów [8, 9]:

$$\bar{q}_0 = \int_{\Omega_1} q_0(R_c, \gamma, H, z, \varphi, S_w, W_w) \cdot \cdot g(R_c, \gamma, H, z, \varphi, S_w, W_w) \cdot d\mu_1 \tag{18}$$

$$s_{q_0} = \sqrt{\int_{\Omega_1} [q_0(R_c, \gamma, H, z, \varphi, S_w, W_w) - \bar{q}_0]^2 \cdot \cdot g(R_c, \gamma, H, z, \varphi, S_w, W_w) \cdot d\mu_1} \tag{19}$$

$$d\mu_1 = dR_c \cdot d\gamma \cdot dH \cdot dz \cdot d\varphi \cdot dS_w \cdot dW_w \qquad \Omega_1, = R^7 \quad (20)$$

gdzie:
R_C – wytrzymałość na ściskanie skał w masywie w profilu charakterystycznym dla wyrobiska;
E – moduł sprężystości skał budujących masyw w profilu charakterystycznym dla wyrobiska;
σ_Z – naprężenie pionowe w masywie w rejonie projektowanego wyrobiska;
S_W – szerokość projektowanego wyrobiska w wyłomie;
W_W – wysokość projektowanego wyrobiska w wyłomie.

Do obliczeń nośności obudowy przyjmuje się wiele danych określanych z mniejszym lub większym przybliżeniem, do wykonania obudowy stosuje się elementy wykonane z określoną dokładnością, a jakość wykonania obudowy również jest niejednorodna. Stan ten prowadzi do sytuacji, w której większość danych można traktować jako zmienne losowe [1, 8].

Wartość średnią nośności obudowy oraz wartość odchylenia standardowego dla przyjętego modelu kryterium wytrzymałości kształtownika można określić ze wzorów:

$$\bar{P}_1 = \int_{\Omega_2} P_1(f_d, M_{max}, W_x, N_o, \varphi, A) \cdot \cdot f(f_d, M_{max}, W_x, N_o, \varphi, A) \cdot d\mu_2 \quad (21)$$

$$s_{P_1} = \sqrt{[P_1(f_d, M_{max}, W_x, N_o, \varphi, A) - \bar{P}_1]^2 \cdot \cdot f(f_d, M_{max}, W_x, N_o, \varphi, A) \cdot d\mu_2} \quad (22)$$

$$d\mu_2 = df_d \cdot dM_{max} \cdot dW_x \cdot dN_o \cdot d\varphi \cdot dA, \qquad \Omega_2 = R^6 \quad (23)$$

gdzie:
f_d – wytrzymałość na rozciąganie stali, z której wykonane są łuki odrzwi obudowy;
M_{max} – maksymalny moment zginający występujący w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi obudowy;
W – wskaźnik zginania przekroju profilu, z którego wykonane są odrzwia obudowy;
N_0 – siła osiowa występująca w najbardziej wytężonym przekroju odrzwi obudowy;
φ – współczynnik wyboczeniowy dla danego profilu oraz wielkości odrzwi;
A – przekrój poprzeczny profilu, z którego wykonane są odrzwia obudowy.

Wartość średnią nośności obudowy oraz wartość odchylenia standardowego dla przyjętego modelu kryterium nośności złącza można określić ze wzorów:

$$\bar{P}_2 = \int_{\Omega_3} P_2(N_z, d, N) \cdot f(N_z, d, N) \cdot d\mu_3 \quad (24)$$

$$s_{P_2} = \sqrt{[P_2(N_z, d, N) - \bar{P}_2]^2 \cdot f(N_z, d, N) \cdot d\mu_3} \quad (25)$$

$$d\mu_3 = dN_z \cdot dd \cdot dN, \qquad \Omega_3 = R^3 \quad (26)$$

gdzie
$\overline{N_Z}$ – średnia wartość nośności zamka odrzwi obudowy ŁP;
$\overline{N}$ – średnia wartość siły osiowej w miejscu zamka;
d – odległość między odrzwiami obudowy ŁP;
s_N – odchylenie standardowe nośności zamka odrzwi obudowy ŁP;
s_{Nz} – odchylenie standardowe siły osiowej w miejscu zamka.

Wartość średnią nośności obudowy oraz wartość odchylenia standardowego dla przyjętego modelu kryterium posadowienia obudowy można określić ze wzorów:

$$\bar{P}_3 = \int_{\Omega_4} P_3(N_z, A, S_w, R_c) \cdot f(N_z, A, S_w, R_c) \cdot d\mu_4 \quad (27)$$

$$s_{P_3} = \sqrt{[P_3(N_z, A, S_w, R_c) - \bar{P}_3]^2 \cdot f(N_z, A, S_w, R_c) \cdot d\mu_4} \quad (28)$$

$$d\mu_4 = dN_z \cdot dA \cdot dS_w \cdot dR_c \qquad \Omega_4 = R^4 \quad (29)$$

4.4. Ocena ryzyka utraty stateczności wyrobiska

Bezpieczeństwo konstrukcji, opierające się na idei „najsłabszego ogniwa", pozwala przyjąć za wartości progowe wartości obliczeniowe nośności P_0 i obciążenia q_0 obudowy. Wykorzystując metodę probabilistycznej analizy konstrukcji poziomu II, jako miarę bezpieczeństwa przyjmuje się probabilistyczny wskaźnik niezawodności β obliczany ze wzorów:

$$\boldsymbol{\beta} = \frac{\bar{P}_0 - \bar{q}_0}{\alpha_{P_0} \cdot s_{P_0} + \alpha_{q_0} \cdot s_{q_0}} \quad (30)$$

$$|\boldsymbol{\alpha}_{P_0}| = \frac{s_{P_0}}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}} \quad (31)$$

$$|\boldsymbol{\alpha}_{q_0}| = \frac{s_{q_0}}{\sqrt{s_{P_0}^2 + s_{q_0}^2}} \quad (32)$$

Wartość dystrybuanty współczynnika niezawodności $p(t)$ oznacza prawdopodobieństwo bezpieczeństwa konstrukcji obudowy, natomiast wartość $[1–p(t)]$ oznacza prawdopodobieństwo awarii konstrukcji (utraty stateczności przez obudowę).

W metodzie poziomu II wg [1, 8] na tym poziomie obliczeń stosuje się warunki typu:

$$p \le p_a \quad (33)$$

gdzie:
p – prawdopodobieństwo awarii;
p_a – akceptowany poziom prawdopodobieństwa awarii.

Przedstawiona powyżej metoda analizy szacowania bezpieczeństwa może być wykorzystana w prognozowaniu niezawodności nietypowych obiektów budowlanych, takich jak np. obiekty wymagające indywidualnego szacowania zapasu bezpieczeństwa ze względu na brak aktualnych norm czy przepisów, obiektów o nietypowym obciążeniu lub konstrukcji, których nośność określono metodami eksperymentalnymi (Biegus, 1999).

Tabela 1. Klasyfikacja warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych oraz stopni ryzyka jej utraty

Klasa warunków utrzymania stateczności wyrobiska	Stopień ryzyka utraty stateczności	Prawdopodobieństwo	Opis
I warunki dobre	I ryzyko małe	$P_o - q_o > 0$ i $p_a \leq 0{,}03$	Brak zagrożenia utratą stateczności.
II warunki zadowalające	II ryzyko nieznaczne	$P_o - q_o > 0$ i $p_a = 0{,}03 \div 0{,}10$	Istnieje możliwość wystąpienia deformacji wyrobiska bez konieczności wykonywania jego napraw.
III warunki dostateczne	III ryzyko średnie	$P_o - q_o > 0$ i $p_a = 0{,}10 \div 0{,}20$	W całym okresie użytkowania wyrobiska istnieje możliwość wystąpienia deformacji sporadycznie wymagających napraw.
IV warunki dopuszczalne	IV ryzyko duże	$P_o - q_o > 0$ i $p_a = 0{,}20 \div 0{,}35$	W całym okresie użytkowania wyrobiska wystąpią deformacje wymagające co najmniej 1 naprawy.
V warunki trudne	V ryzyko bardzo duże	$P_o - q_o > 0$ i $p_a = 0{,}35 \div 0{,}45$	W całym okresie użytkowania wyrobiska wystąpią jego deformacje i uszkodzenia, wymagające kilkukrotnych napraw.
VI warunki niedopuszczalne	VI ryzyko niedopuszczalne	$P_o - q_o \leq 0$ lub $p_a > 0{,}45$	Występuje zagrożenie zniszczenia wyrobiska w postaci zawału lub intensywnych deformacji wymagających częstych napraw.

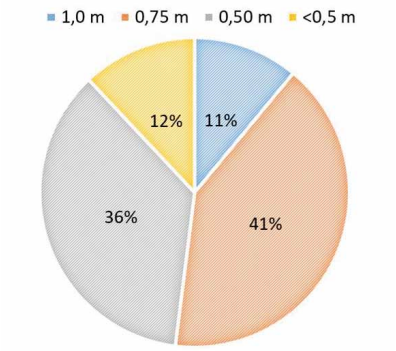
Na podstawie przeprowadzonej analizy i oceny zachowania się wyrobisk przygotowawczych w odniesieniu do obliczonego prawdopodobieństwa utraty stateczności wyróżniono następujące klasy warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych oraz stopnie ryzyka utraty stateczności, które przedstawiono w tabeli 1 [8]. W świetle tej klasyfikacji projektowane i utrzymywane wyrobisko powinno kwalifikować się do I, II lub III klasy warunków utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych.

5. Analiza oceny ryzyka utraty stateczności wyrobisk korytarzowych

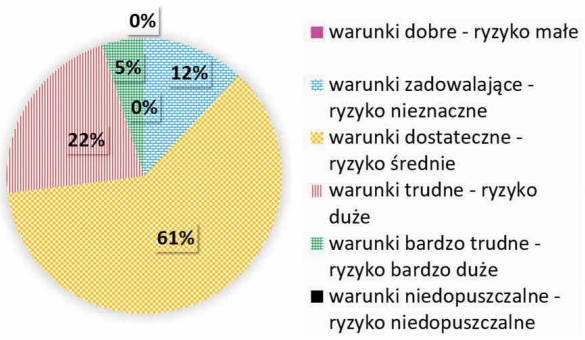
Na warunki utrzymania stateczności wyrobisk górniczych wpływ ma wiele czynników naturalnych i górniczych, co powoduje trudności w zdefiniowaniu jasnych i prostych kryteriów klasyfikacyjnych. Dodatkową trudność sprawia zmienność warunków naturalnych i górniczych. Biorąc pod uwagę zarówno złożoność zagadnienia, jak i wyniki przeprowadzonej analizy zachowania się ponad 25 wyrobisk przygotowawczych zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi, przyjęto, że miernikiem ryzyka utraty stateczności wyrobisk górniczych jest prawdopodobieństwo wystąpienia utraty stateczności.

Wykorzystano metodę probabilistyczną poziomu II, w której jako miernik niezawodności konstrukcji obudowy przyjęto prawdopodobieństwo utraty stateczności. Przeprowadzone analizy i obliczenia wykazały, że zastosowana w analizowanych wyrobiskach obudowa charakteryzowała się zmiennym prawdopodobieństwem wystąpienia utraty stateczności. Zmienność ta nie wynikała tylko z „oszczędnego" doboru obudowy, ale w znacznej mierze zależała od zmienności warunków naturalnych i górniczych. Na rys. 9 przedstawiono udział poszczególnych rozstawów odrzwi w analizowanych rozcinkach, a na rys. 10 kształtowanie się warunków utrzymania stateczności rozcinek ścian oraz stopni ryzyka jej utraty.

Dla analizowanych rozcinek ścian zlokalizowanych bezpośrednio pod zrobami zawałowymi prawdopodobieństwo utraty stateczności wyrobiska *p* osiągnęło wartości (rys. 10):



Rys. 9. Udział poszczególnych rozstawów odrzwi w analizowanych rozcinkach



Rys. 10. Kształtowanie się warunków utrzymania stateczności rozcinek ścian oraz stopni ryzyka jej utraty

- w przypadku 0% wyrobisk – $p_a < 0,05$;
- w przypadku 12% wyrobisk – $0,03 < p_a < 0,1$;
- w przypadku 61% wyrobisk – $0,1 < p_a < 0,2$;
- w przypadku 22% wyrobisk – $0,2 < p_a < 0,35$;
- w przypadku 5% wyrobisk – $0,35 < pa < 0,45$;
- w przypadku 0% wyrobisk – $p_a > 0,45$.

6. Podsumowanie

W oparciu o dotychczasowe doświadczenia można sformułować następujące stwierdzenia:

- wytrzymałość na ściskanie skał poddanych wpływom eksploatacji górniczej zasadniczo nie ulega zmianie, natomiast zmianie ulegają parametry opisujące jakość masywu – np. szczelinowatość, RQD itp., co w znaczącym stopniu wpływa na pogorszenie warunków utrzymania stateczności wyrobiska, lokalnie mogą występować strefy zruszenia warstwy pokładu oraz skał stropowych;
- wyrobiska korytarzowe drążone w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów, pomimo bezpośredniego kontaktu z rumowiskiem zawałowym, zwykle nie wymagają zastosowania obudowy o znacznie większej nośności niż w przypadku wyrobisk zlokalizowanych w caliźnie poza strefą wpływów eksploatacji;
- o warunkach utrzymania stateczności wyrobisk decyduje stopień odprężenia masywu oraz jego degradacji;
- w trakcie drążenia wyrobiska wymagana jest szczególna dyscyplina w zakresie wykonawstwa oraz niedopuszczanie do nadmiernego otwarcia nieosłoniętego stropu w czole drążonych wyrobisk;
- znacznie ograniczona w stosunku do warunków górotworu nieodprężonego jest potrzeba dodatkowego wzmacniania obudowy wyrobisk w przypadku występowania w ich bezpośrednim sąsiedztwie innych wyrobisk korytarzowych, co potwierdzają zaprezentowane pomiary gabarytów przekroju poprzecznego chodników eksploatacyjnych;
- duże zagrożenie może powodować występowanie lub niespodziewany dopływ wody do górotworu otaczającego wyrobisko;
- do doboru obudowy wyrobisk zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów powinno się stosować metody uwzględniające specyfikę ośrodka i zachodzących w nim procesów. Przyjmowany model obliczeniowy zależy od lokalizacji wyrobiska względem zrobów, zasobu informacji o warunkach geologiczno-górniczych, posiadanych sił i środków do realizacji zadania oraz kwalifikacji wykonawcy.

Literatura

[1] Biegus A.: *Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Wrocław 1999.

[2] Chudek M.: *Geomechanika z podstawami ochrony środowiska górniczego i powierzchni terenu*. Wyd. Pol. Śl., Gliwice 2002.

[3] Chudek M., Duży S., Bączek A., Dyduch G.: *Ocena rekonsolidacji zrobów w warunkach eksploatacji pokładu grubego z podziałem na warstwy*. „Przegląd Górniczy" 12/ 2010.

[4] Czempas A., Duży S.: *Stateczność wyrobisk korytarzowych w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą w świetle przeprowadzonych badań*. „Budownictwo Górnicze i Tunelowe" 2/2017.

[5] Duży S.: *Geomechaniczne aspekty utrzymania stateczności wyrobisk przygotowawczych w warunkach eksploatacji pokładów grubych z podziałem na warstwy*. „Gospodarka Surowcami Mineralnymi", tom 24, zeszyt 2/3, 2008.

[6] Duży S.: *Geomechaniczne aspekty projektowania przecinek ścianowych w warunkach eksploatacji pokładów grubych z podziałem na warstwy*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków 2019.

[7] Duży S.: *Dobór stalowej obudowy odrzwiowej podatnej wyrobisk korytarzowych w świetle metody stanów granicznych*. IV Polski Kongres Górniczy, Kraków 2015.

[8] Duży S.: *Studium niezawodności konstrukcji obudowy i stateczności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego z uwzględnieniem niepewności informacji*. ZN Politechniki Śląskiej, Górnictwo, z. 277, 2007.

[9] Duży S., Kleta H.: *Analiza geomechanicznych warunków utrzymania stateczności wyrobisk przygotowawczych zlokalizowanych w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów*. „Budownictwo Górnicze i Tunelowe" 1/2001.

[10] Gałczyński S.: *Ocena ciśnienia górotworu na obudowę wyrobisk chodnikowych i tunelowych metodami inżynierskimi*. Zeszyty Problemowe Górnictwa, tom 5, z. 2, Warszawa – Kraków 1977.

[11] Konopko W.: *O projektowaniu obudowy chodników drążonych pod gruzowiskiem zawałowym*. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie" 6(46)/1998.

[12] Konopko W.: *Destrukcja górotworu w otoczeniu eksploatacji ścianowej*. „Przegląd Górniczy" 2/2014.

[13] Nierobisz A., Prusek S.: *Zasady bezpiecznego prowadzenia wyrobisk korytarzowych pod zrobami zawałowymi i podsadzkowymi*. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie" 4(12)/1994.

[14] Kisiel I. (red.): *Mechanika skał i gruntów*. PWN, Warszawa 1982.

[15] Prusek S., Bock S., Masny W.: *Nowa metoda oceny stopnia rekonsolidacji zrobów zawałowych w aspekcie doboru obudowy wyrobisk korytarzowych*. „Górnictwo i Środowisko" 2009.

[16] Urbaś M., Cudny T., Ambroży A., Duży S.: *Utrzymanie wyrobisk korytarzowych wykonanych w bezpośrednim sąsiedztwie zrobów zawałowych warstw wyższych w świetle obserwacji dołowych*. „Budownictwo Górnicze i Tunelowe" 4/2002.

Stanisław Duży– Politechnika Śląska; Wydział Górnictwa, Inżynierii Bezpieczeństwa i Automatyki Przemysłowej; Katedra Geomechaniki i Budownictwa Podziemnego

artykuł recenzowany