

Ryszard Wosz*

ROZWARSTWIENIE STROPU W WYNIKU EKSPLOATACJI SYSTEMEM KOMOROWO-FILAROWYM Z UGIĘCIEM STROPU ZŁOŻA RUD MIEDZI W LGOM**

1. Wstęp

Eksploatacja złoża miedzi w LGOM jest prowadzona systemem komorowo-filarowym, przy czym za optymalny z punktu widzenia minimalnego generowania zjawisk dynamicznych należy uznać system komorowo-filarowy z ugięciem stropu. Technologia systemu zakłada rozcięcie i eksploatację złoża w taki sposób, że strop, w miarę oddalania się od linii frontu, jest podparty na coraz mniejszych filarach. Skutkiem powyższego jest to, że obniżenie stropu następuje w sposób „łagodny” na całym obszarze prowadzonej eksploatacji. Podstawowym zadaniem, w celu opracowania fizycznego lub matematycznego modelu takiego ośrodka, jest systematyczne realizowanie cząstkowych prac badawczych, w tym pomiarów *in situ*, które pozwolą określić podstawowe jego cechy fizyczne, mechaniczne oraz zachodzące w nim procesy energetyczne. W ramach tych prac dotychczas dokonano próby opisu ugięcia warstwy stropu bezpośredniego i zasadniczego nad eksploatowanym złożem, opisano wielkość pracy i równoważnej jej energii kinetycznej, jaka może zostać uwolniona w wyniku zerwania się warstwy stropu zasadniczego [5]. Opisano model górotworu, w którym uwzględniono siły kontaktu warstwy stropu zasadniczego i wyżej leżącego nadkładu oraz oszacowano wpływ współczynnika oporu na wielkość zakumulowanej w stropie energii sprężystej [6]. W kolejnych pracach poświęconych temu problemowi opracowano hipotetyczny model ugięcia i zniszczenia wspornika zawisającego stropu zasadniczego [7]. Na bazie opracowanego modelu opisano wyężenie górotworu w warstwie stropu zasadniczego, dla różnych faz rozwoju eksploatacji [8].

Prezentowany artykuł jest kolejną próbą opisanego mechanizmu prowadzącego do rozwarstwienia stropu zbudowanego z dwóch różnych, pod względem fizyko-mechanicznym,

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Artykuł opracowano w ramach badań statutowych, nr umowy 11.11.100.588, finansowanych przez KBN

ośrodków skalnych (dolomit i anhydryt) w warunkach LGOM. W tym celu przeanalizowano wariantowo dwa hipotetyczne obszary, w których mogłoby dojść do rozwarstwienia stropu tj.: obszar pierwszy przed frontem eksploatacyjnym i obszar drugi za frontem eksploatacyjnym.

2. Założenia i opis przyjętego modelu obliczeniowego

W profilu geologicznym złoża rud miedzi w LGOM występują dwie zasadnicze warstwy stropowe, strop bezpośredni, zbudowany z dolomitu wapnistego i strop zasadniczy, zbudowany z anhydrytu. Z obserwacji prowadzonych w czasie eksploatacji wynika, że w niektórych obszarach dochodzi do rozczepienia się warstw i powstania pustek międzywarstwowych. Można hipotetycznie założyć, że są one wynikiem różnicy sztywności warstw stropu bezpośredniego i zasadniczego, w następstwie czego następuje lokalnie zmniejszanie nacisku warstwy stropu zasadniczego na warstwę stropu bezpośredniego. Sztywniejsza warstwa stropu zasadniczego traci podparcie ze strony warstwy stropu bezpośredniego i zawiązuje wspornik. Pęknięcie i zerwanie wspornika jest zjawiskiem dynamicznym mogącym zainicjować wstrząsy lub nawet tąpnięcia.

Do obliczeń i analiz przyjęto model górotworu w postaci belki spoczywającej na sprężystym podłożu. W równaniu opisującym linię osi ugiętej belki uwzględniono wpływ zarówno momentu zginającego, jak i siły ścinającej, na jej krzywiznę [3].

Równanie linii ugięcia osi belki stropu ma postać:

— dla części nad złożem, $x \geq 0$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{k \cdot c_1}{G \cdot F} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{c_1}{E \cdot I} w = \frac{p_z}{E \cdot I} \quad (1)$$

— dla części nad filarami, $x \leq 0$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{k \cdot c_2}{G \cdot F} \cdot \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{c_2}{E \cdot I} w = \frac{p_z + c_2 \cdot w_0}{E \cdot I} \quad (2)$$

gdzie:

- w — funkcja obniżenia,
- w_0 — wielkość obniżenia nad czołem eksploatacyjnym,
- k — współczynnik kształtu przekroju belki stropowej, dla przekroju prostokątnego $k = 1, 2$ [1],
- c_1 — współczynnik oporu właściwego złoża,
- c_2 — współczynnik oporu właściwego filarów,

- p_z — składowa pionowa ciśnienia pierwotnego,
- G — współczynnik sprężystości postaciowej warstwy stropowej,
- E — współczynnik sprężystości podłużnej warstwy stropowej,
- F — przekrój poprzeczny warstwy stropowej,
- I — moment bezwładności przekroju warstwy stropowej.

W celu przeprowadzenia obliczeń przyjęto, że średnia głębokość eksploatacji wynosi 1000 m. Współczynniki oporu właściwego złoża i stropu bezpośredniego oszacowano posilując się wynikami z pracy [2, 9]. Parametry wytrzymałościowe (R_c) i odkształceniowe (współczynnik Poissona ν) złoża i warstw stropowych przyjęto za [4]. Wartości współczynników eksploatacji a przyjęto porównawczo jak dla ścianowego systemu eksploatacji pokładu węgla kamiennego z podsadzką płynną od 0,15 do 0,20.

Poniżej zestawiono liczbowe wartości parametrów przyjętych do obliczeń:

- głębokość $H = 1000$ m,
- średni ciężar objętościowy nadkładu $\gamma_n = 20 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,
- wartość współczynnika oporu właściwego złoża $c_1 = 1267 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$,
- wartość współczynnika oporu właściwego filarów $c_2^B = 33 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$,
- wartość współczynnika oporu właściwego filarów i stropu bezpośredniego $c_2^Z = 44 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$,
- wartość współczynnika osiadania (eksploatacji) dla stropu bezpośredniego $a = 0,2$,
- wartość współczynnika osiadania (eksploatacji) dla stropu zasadniczego $a = 0,15$.

Wartości parametrów geomechanicznych opisujących własności złoża, warstwy stropu bezpośredniego i stropu zasadniczego zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Wartości parametrów geomechanicznych warstw stropu bezpośredniego, zasadniczego i złoża [5]

	Grubość m	Średni moduł sprężystości E GPa	Współczynnik Poissona ν
złoże	3	38	0,22
strop bezpośredni	20	44	0,24
strop zasadniczy	60	50	0,24

Dla wartości parametrów przyjętych do obliczeń otrzymano ujemną wartość wyróżnika Δ równania charakterystycznego i w konsekwencji rozwiązania całek w postaci krzywych falistych.

Całką ogólną równania (1) jest funkcja

$$w(x) = \frac{p_z \cdot m}{E_{c1}} + e^{-\beta_1 \cdot x} (A_2 \cos \beta_2 \cdot x + A_4 \sin \beta_2 \cdot x) \quad (3)$$

Całką ogólną równania (2) jest funkcja

$$w(x) = w_0 + \frac{p_z \cdot m}{E_{c2}} + e^{\alpha_1 \cdot x} (B_1 \cos \alpha_2 \cdot x + B_3 \sin \alpha_2 \cdot x) \quad (4)$$

gdzie:

- m — miąższość złoza,
- $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ — pierwiastki równania charakterystycznego,
- E_{c1}, E_{c2} — współczynniki sprężystości złoza i filarów,
- A_2, A_4, B_1, B_3 — stałe całkowania.

Biorąc pod uwagę występowanie punktu przegięcia na osi ugiętej belki, w pracy przyjęto hipotetycznie dwa warianty lokalizacji obszaru, w którym mógłby zacząć się proces rozczepiania warstw stropowych. W pierwszym wariantcie, który odpowiadałby fazie rozruchu eksploatacji, czyli powstawania wspornika belki, rozwarcie stropów, przez co należy tutaj rozumieć raczej zmniejszenie nacisku stropu zasadniczego na strop bezpośredni niż rzeczywiste rozczepienie obydwu warstw, mogłoby wystąpić przed frontem eksploatacyjnym, w drugim — za frontem. Za kryterium lokalizacji przedmiotowego obszaru autor przyjął geometryczny warunek równości funkcji pierwszej pochodnej linii obniżenia obydwu warstw stropowych

$$\frac{dw^Z(x)}{dx} = \frac{dw^B(x)}{dx} \quad (5)$$

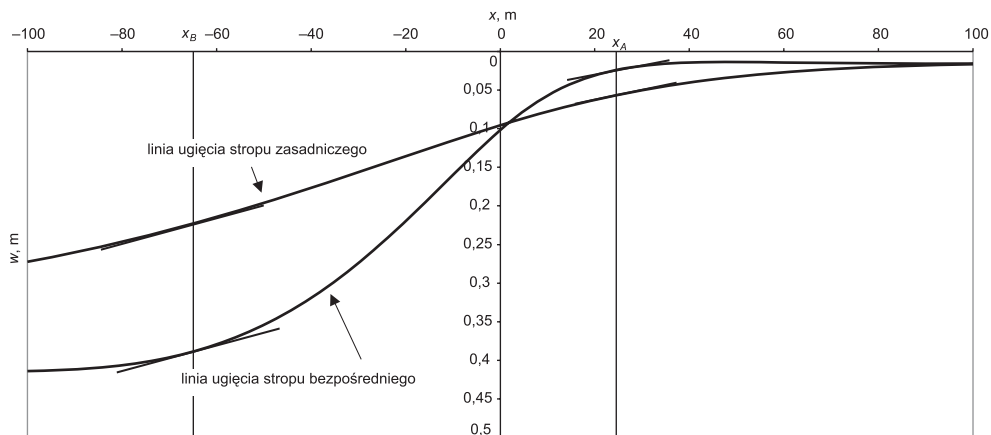
gdzie:

- $w^Z(x)$ — funkcja obniżenia stropu zasadniczego,
- $w^B(x)$ — funkcja obniżenia stropu bezpośredniego.

3. Obliczenia i wyniki

Z rozwiązania równania (5), dla części stropów znajdujących się nad złożem, otrzymano współrzędną $x_A = 24,5279$ m, a dla części stropów znajdujących się nad filarami $x_B = -64,9408$ m. Początek układu osi współrzędnych przyjęto w punkcie oznaczającym czoło frontu eksploatacyjnego, traktując odległości w stronę filarów za ujemne.

Na rysunku 1 pokazano porównawczo krzywe ugięcia warstw stropowych nad złożem i nad filarami z zaznaczeniem punktów A i B.



Rys. 1. Współrzędne x_A i x_B punktów o jednakowej wartości funkcji pierwszej pochodnej linii ugięcia obydwu belek stropowych

Po ustaleniu położenia punktów o jednakowej wartości funkcji pierwszej pochodnej linii ugięć przystąpiono do wyznaczenia równań linii osi belek stropowych, przechodzących przez punkty A i B. W celu napisania równania linii ugięcia osi obydwu stropów wyznaczono nowe wartości stałych całkowania A_2, A_4, B_1 i B_3 w równaniach (3) i (4), przy czym stałe A_2 i A_4 w przedziale współrzędnych $x_A \leq x \leq \infty$ i stałe B_1 i B_3 w przedziale współrzędnych $x_B \leq x \leq 0$, powinny spełniać równania linii obydwu stropów.

Spełnienie w punktach A i B warunku (5) zrealizowano poprzez porównanie wartości funkcji i pierwszej pochodnej funkcji linii ugięcia belek stropowych.

Z rozwiązania układu równań:

$$\begin{aligned}
 w^Z(x_A) &= w^B(x_A) \\
 (w^Z)'(x_A) &= (w^B)'(x_A) \\
 w^Z(x_B) &= w^B(x_B) \\
 (w^Z)'(x_B) &= (w^B)'(x_B)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

otrzymano wartości stałych A_2, A_4 oraz B_1 i B_3 .

Następnie zostały obliczone wartości obniżenia obydwu belek w punkcie o współrzędnej $x = 0$, czyli nad czołem frontu eksploatacyjnego oraz obliczono pozostałe dwie stałe do równań linii ugięcia osi belek nad filarami. W sumie należało obliczyć jeszcze sześć stałych: $w_0^B, w_0^Z, B_1^B, B_1^Z, B_3^B, B_3^Z$.

Wymienione stałe obliczono z warunku równości wartości funkcji i wartości pierwszej i drugiej pochodnej funkcji w punkcie $x = 0$.

Powyższe warunki zapisano w postaci następujących równań:

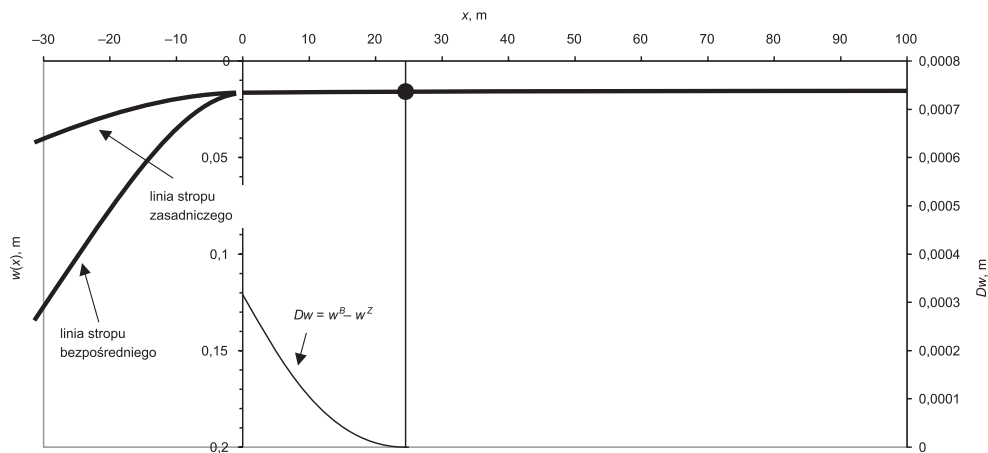
$$\begin{aligned}
 w^Z(0) &= w^B(0) \\
 (w^Z)'(0) &= (w^B)'(0) \\
 (w^Z)''(0) &= (w^B)''(0) \\
 (w^Z)'''(x_B) &= (w^B)'''(x_B)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Wzory do obliczenia stałych przedstawiono w zapisie ogólnym:

$$\begin{aligned}
 A_2^B &= f(A_2^Z, A_4^Z, A_4^B, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 A_4^B &= f(A_2^Z, A_4^Z, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 A_2^Z &= f(A_4^Z, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 A_4^Z &= f(p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 B_1^B &= f(B_3^Z, B_1^Z, B_3^Z, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 B_3^B &= f(B_1^Z, B_3^Z, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 B_1^Z &= f(B_3^Z, p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B) \\
 B_3^Z &= f(p_z, m, E_{c_1}, E_{c_2}, \beta_1^Z, \beta_2^Z, \alpha_1^Z, \alpha_2^Z, \beta_1^B, \beta_2^B, \alpha_1^B, \alpha_2^B)
 \end{aligned} \tag{8}$$

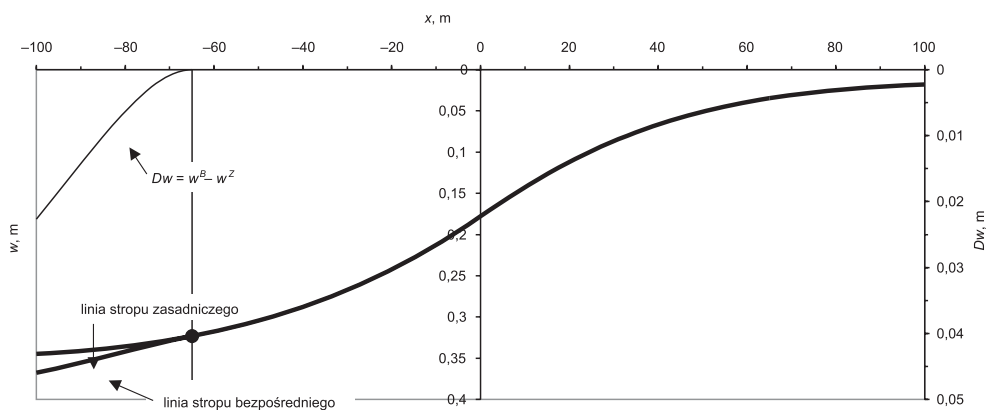
gdzie indeks górny B oznacza wartość parametru dla stropu bezpośredniego, indeks górny Z oznacza wartość parametru dla stropu zasadniczego.

Po obliczeniu stałych sporządzono wykresy linii ugięcia belek obydwu stropów. Na rysunku 2 przedstawiono linie ugięcia belki stropu zasadniczego i stropu bezpośredniego oraz położenie punktu A, jako przypuszczalnego miejsca inicjacji procesu rozczepiania się warstw stropowych przed frontem eksploatacyjnym. Na odcinku $0 \leq x \leq x_A$ różnica w obniżeniach stropów jest mierzona w dziesiątych częściach milimetra, dlatego na rysunku przedstawiono pomocniczy wykres Δw . W odległości 30 m od czoła frontu w stronę zrobów różnica w przemieszczeniu się stropów wynosi około 10 cm.



Rys. 2. Wykres linii ugięcia belek stropowych — wariant dla punktu A

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy obniżenia stropów w przypadku, gdy rozwarstwienie powstałoby w punkcie B, za frontem eksploatacyjnym. Na odcinku około 35 m, licząc od punktu B w stronę zrobów, różnica obniżeń stropów Δw sięga wartości 2,5 cm.



Rys. 3. Wykres linii ugięcia belek stropowych — wariant dla punktu B

4. Wnioski

Monolityczność warstw stropowych oraz duże zróżnicowanie wartości parametrów opisujących ich sztywność są przyczyną odmiennego zachowania się pod wpływem prowadzonej eksploatacji górniczej.

Dla warunków LGOM prowadzenie eksploatacji złoża rud miedzi systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu, może powodować rozwarstwienie górotworu na granicy stropu bezpośredniego i zasadniczego w dwóch obszarach. Pierwszy obszar rozwarstwień może tworzyć się podczas uruchamiania nowego pola eksploatacyjnego, przed frontem w odległości około 25 m w stronę calizny, natomiast drugi obszar może powstać za frontem, w odległości około 65 m, w kierunku zrobów.

Interpretacja ilościowa wyników byłaby na tym etapie badań niewątpliwie ryzykowna, niemniej z obliczeń wynika, że strop zasadniczy, zbudowany z anhydrytu, ulega mniejszym odkształceniom niż strop bezpośredni zbudowany z dolomitu wapnistego, w wyniku czego możliwe jest powstanie szczeliny podziału obu wyróżnionych stropów. Proces ten może prowadzić do zjawiska zawisania stropu zasadniczego nad stropem bezpośrednim i po przekroczeniu skrajnego wyężenia do jego zerwania. Wyzwolenie energii sprężystej, zakumulowanej przez strop zasadniczy może, w przypadku jego zerwania bądź propagacji szczeliny podziału stropów, powodować bardzo silne zjawiska dynamiczne jak wstrząsy i tapnięcia.

W perspektywie planowanych badań należy uwzględnić dążenie do bardziej precyzyjnego określenia, na podstawie dostępnych wyników badań lub oszacowania, wartości parametrów opisujących własności górotworu.

LITERATURA

- [1] *Kłeczek Z.*: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994
- [2] *Korman S.*: Wartości współczynników sprężystości w górotworze. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1955
- [3] *Ozog T.*: Ugięcie stropu przy uwzględnieniu sił ścinających. AGH 1964 (praca doktorska)
- [4] Praca zbiorowa: Monografia KGHM Polska Miedź S.A. Wydawnictwo CBPM „Cuprum”, Lubin 1996
- [5] *Wosz R.*: Ugięcie stropu bezpośredniego i zasadniczego przy eksploatacji złoża systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu. Kwartalnik Górnictwo, z. 4, Kraków 2000
- [6] *Wosz R.*: Ugięcie stropu zasadniczego przy eksploatacji złoża systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu z uwzględnieniem siły oporu na kontakcie warstw. Kwartalnik „Górnictwo”, z. 2, Kraków 2002.
- [7] *Wosz R.*: Ugięcie stropu bezpośredniego i zasadniczego przy eksploatacji złoża systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu — równanie linii ugięcia wspornika stropu zasadniczego. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, z. 2, Kraków 2003
- [8] *Wosz R.*: Wpływ sposobu ugięcia warstw stropowych na koncentrację wyężenia górotworu. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, z. 3-4, Kraków 2003.
- [9] *Znański J.*: Strefa trompetera i jej oddziaływanie na wyrobisko górnicze. Przegląd Górniczo-Hutniczy. 1963