

Ryszard Wosz*

UGIĘCIE STROPU NAD EKSPLOATOWANYM ZŁOŻEM RUD MIEDZI LGOM — WPŁYW WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA EKSPLOATACJI NA POWSTANIE STREF ODCIĄŻENIA MIĘDZY WARSTWAMI STROPOWYMI**

1. Wstęp

Struktura złoża rud miedzi w LGOM daje możliwość zbudowania uproszczonego modelu opisującego wzajemne oddziaływanie warstw stropowych oraz ich obniżenie. Nad złożem zalegają dwa kompleksy warstw, które ze względu na ich miąższość i sztywność, można podzielić na dwie warstwy stropowe:

- 1) strop bezpośredni,
- 2) strop zasadniczy.

Strop bezpośredni stanowi płyta spoczywająca na złożu w części przed frontem eksploatacyjnym i na filarach — za frontem. Od góry belka jest obciążona nadkładem w postaci pionowej składowej p_z tensora naprężenia pierwotnego. Jeśli przyjąć, że analizowany górotwór charakteryzuje się własnościami ośrodka sprężystego, to jego własności opisują następujące parametry:

- współczynnik oporu właściwego złoża c_1 ,
- współczynnik oporu właściwego zrobów c_2 ,
- współczynnik odkształcalności podłużnej E warstwy stropowej,
- współczynnik Poissona ν .

W skonstruowanym modelu geomechanicznym o wartości krzywizny osi płyty decyduje moment zginający i siła ścinająca (T. Ozog [4]). W pracy przedstawiono wyniki obli-

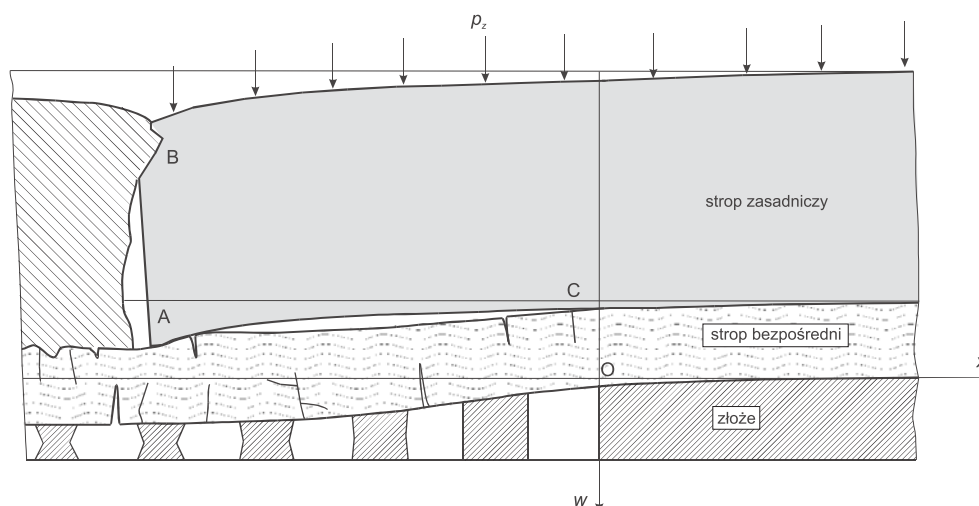
* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Praca wykonana w ramach badań statutowych, nr umowy w AGH 11.11.100.588

czeń ugięć osi płyty stropu bezpośredniego i stropu zasadniczego, z których wynika, że istnieje możliwość powstania stref zmniejszonego nacisku stropu zasadniczego na strop bezpośredni, co w skrajnym przypadku może prowadzić do powstania pustek międzywarstwowych. Brak podparcia lub zmniejszone podparcie stropu zasadniczego może być przyczyną jego zawisania i generowania zjawisk dynamicznych w postaci wstrząsów górotworu.

2. Założenia i cel pracy

Przyczyną gromadzenia w górotworze potencjalnej energii sprężystej jest jego sprężyste odkształcanie się, które jest wynikiem powstawania pustek eksploatacyjnych i stref odciążenia w następstwie eksploatacji złoża. Dwuwarstwowa struktura stropu zalegającego nad złożem rud miedzi w LGOM pozwala postawić hipotezę o tworzeniu się stref dekoncentracji i koncentracji obciążenia w miejscach stykania się obydwu warstw stropowych. W skrajnych przypadkach można dopuścić przypuszczenie o powstawaniu pustek międzywarstwą stropu bezpośredniego i stropu zasadniczego. Strop bezpośredni ma mniejszą sztywność zginania EI , wskutek czego może tworzyć krzywizny o mniejszej wartości promienia w stosunku do stropu zasadniczego. Poza tym coraz mniejsze podparcie ze strony podbieranych filarów wpływa na jego częściowe spękanie i opadanie do zrobów. W wyniku tego procesu strop zasadniczy zaczyna zawisać nad zrobami. Tworzy się model belki utwierdzonej na jednym końcu, a na drugim swobodnej, czyli w nomenklaturze wytrzymałościowej — wspornik. Dalszy postęp eksploatacji będzie powodował wydłużanie się części belki, aż do chwili zetknięcia się końca belki ze zrobami lub utraty stateczności i zerwania wspornika. Hipotetyczny model, w wariancie podparcia końca belki, przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Hipoteczny model zachowania się warstw stropowych przy eksploatacji złoża systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu

W pracy [10, 12] obliczono szacunkowo, że proces zetknięcia się stropu zasadniczego ze zrobami rozpocznie się przy długości belki wynoszącej około 30 m, a wyężenie, obliczone według hipotezy Hubera, osiągnie wartość graniczną 66 MPa przy długości wspornika rzędu 50 m.

W niniejszej pracy przedstawiono próbę opisu sytuacji technologicznej, polegającej na wybieraniu złoza etapami. W pierwszym etapie pole eksploatacyjne rozcinane jest komorami i formowane są pełnowymiarowe filary międzykomorowe. W drugim — następuje podcinanie filarów i zmniejszanie ich objętości i podporności. Dla każdego etapu można przyjąć inną wartość współczynnika eksploatacji złoza. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń wielkości ugięć obydwu belek stropowych w zależności od wartości współczynnika eksploatacji złoza i kompleksowego współczynnika, obliczonego dla układu dwóch warstw stanowiących podparcie dla stropu zasadniczego, mianowicie złoza i stropu bezpośredniego. Kompleksowy współczynnik eksploatacji $a_{kompleks}$ zdefiniowano jako średnia ważona współczynników z obydwu warstw, gdzie wagą jest miąższość warstwy

$$a_{kompleks} = \frac{a_{zozo} m_{zozo} + a_{bezp} m_{bezp}}{m_{zozo} + m_{bezp}} \quad (1)$$

Intensywność eksploatacji, w sensie stopnia podebrania filarów, z pewnością będzie miała wpływ na wielkość podparcia stropu zasadniczego ze strony warstwy stropu bezpośredniego i złoza.

3. Konstrukcja i parametry modelu obliczeniowego

Model składa się z dwóch części. Pierwsza obejmuje zakres współrzędnych od zera do $+\infty$, co odpowiada odcinkowi stropu zalegającego nad złożem, druga od zera do $-\infty$ obejmuje odcinek nad filarami. W punkcie $x = 0$ obydwie krzywe muszą spełniać warunek zgodności wartości funkcji i wartości jej pochodnych do czwartej włącznie. Różniczkowe równanie osi ugiętej belki stropowej ma postać:

— w części nad złożem, gdy $x \geq 0$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{kc_1}{GF} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{c_1}{EI} w = \frac{p_z}{EI} \quad (2a)$$

— w części nad filarami (zrobami), gdy $x \leq 0$

$$\frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{kc_2}{GF} \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{c_2}{EI} w = \frac{p_z + c_2 w_0}{EI} \quad (2b)$$

gdzie:

w — funkcja obniżenia,

k — współczynnik kształtu przekroju belki stropowej, dla przekroju prostokątnego $k = 1, 2$ [1],

- c_1 — współczynnik oporu właściwego złoza,
- c_2 — współczynnik oporu właściwego filarów (zrobów),
- p_z — składowa pionowa tensora naprężenia 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_0 — wartość ugięcia nad czołem eksploatacji, $w(0) = w_0$.

Do obliczeń przyjęto następujące wartości parametrów eksploatacji oraz parametrów opisujących własności górotworu:

- głębokość $H = 1000$ m,
- grubość warstwy stropu zasadniczego $h = 60$ m,
- grubość warstwy stropu bezpośredniego $h = 20$ m,
- średni ciężar objętościowy nadkładu $\gamma_n = 20$ kN m⁻³,
- średni ciężar objętościowy warstwy stropu zasadniczego $\gamma_s = 25$ kN m⁻³,
- wartość współczynnika oporu właściwego złoza $c_1 = 1267$ MPa m⁻¹,
- zależnie od przyjętej wartości współczynnika eksploatacji a wartość współczynnika oporu właściwego filarów (zrobów) $c_2 = 17 \div 33$ MPa m⁻¹.

Pozostałe wartości zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

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

	Grubość [m]	Średnia wartość modułu sprężystości E [GPa]	Współczynnik Poissona ν
Złoże	3	38	0,22
Strop bezpośredni	20	44	0,24
Strop zasadniczy	60	50	0,24

W zależności od znaku wyróżnika Δ równania charakterystycznego, rozwiązaniem równań (2a) i (2b) mogą być dwie postacie funkcji: wykładnicza lub krzywa falista. W przedstawianym rozwiązaniu, przy wyżej wymienionych wartościach parametrów, wyróżnik równania charakterystycznego Δ ma wartość ujemną, czyli rozwiązaniem obydwu części krzywej ugięcia jest linia falista opisana wzorami:

- w części nad złożem, gdy $x \geq 0$

$$w = p_z \frac{m}{E_{c_1}} + e^{-\beta_1 x} (A_2 \cos \beta_2 x + A_4 \sin \beta_2 x) \quad (3a)$$

— w części nad filarami (zrobami), gdy $x \leq 0$

$$w = w_0 + p_z \frac{m}{E_{c_2}} + e^{\alpha_1 x} (B_1 \cos \alpha_2 x + B_3 \sin \alpha_2 x) \quad (3b)$$

gdzie:

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \operatorname{Re}(r_{1,3}), \\ \beta_2 &= \operatorname{Im}(r_{1,3}), \\ \alpha_1 &= \operatorname{Re}(r_{2,4}), \\ \alpha_2 &= \operatorname{Im}(r_{2,4}), \\ r_{1,3} &= \beta_1 \pm \beta_2 i, \\ r_{2,4} &= \alpha_1 \pm \alpha_2 i \end{aligned} \right\} \text{— pierwiastki zespolone równania charakterystycznego,}$$

A_2, A_4, B_1, B_3 — stałe całkowania.

Uwzględniając warunki brzegowe (równość wartości funkcji i ich pochodnych w punkcie $x = 0$), obliczono stałe całkowania i ugięcie w_0 :

$$A_2 = \frac{p_z \cdot m}{E_{c_2}} \frac{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) (4\alpha_1 \beta_1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 3\beta_1^2 - \beta_2^2)}{(\beta_1^2 + \beta_2^2) (\beta_1^2 + \beta_2^2 + 3\alpha_1^2 - \alpha_2^2 + 4\alpha_1 \beta_1)} \quad (4)$$

$$A_4 = \frac{p_z \cdot m}{E_{c_2}} \frac{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) [\beta_1 (\alpha_1^2 + \alpha_2^2) - 3\beta_1 \beta_2^2 + \beta_1^3 + 2\alpha_1 (\beta_1^2 - \beta_2^2)]}{\beta_2 (\beta_1^2 + \beta_2^2) (\beta_1^2 + \beta_2^2 + 3\alpha_1^2 - \alpha_2^2 + 4\alpha_1 \beta_1)} \quad (5)$$

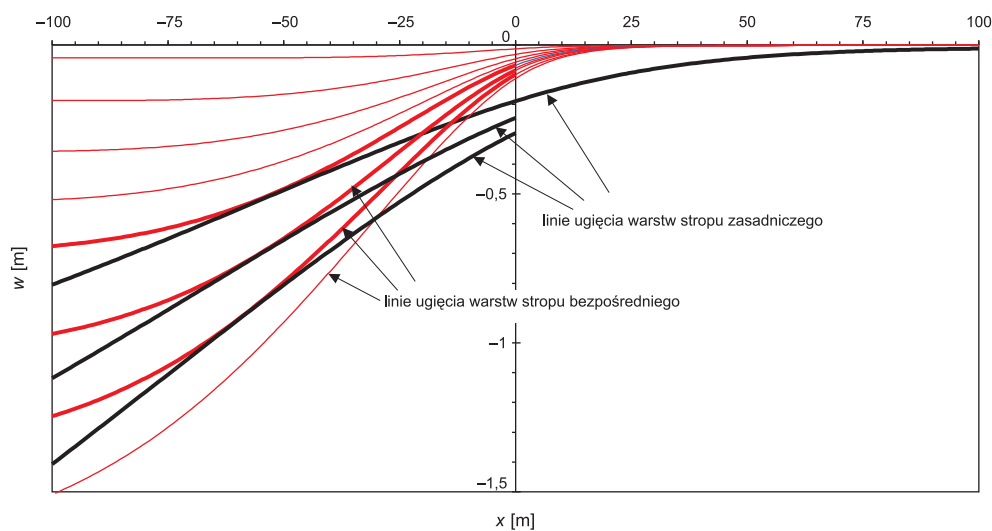
$$B_1 = -\frac{p_z \cdot m}{E_{c_2}} \quad (6)$$

$$B_3 = \frac{p_z \cdot m}{E_{c_2}} \frac{\alpha_1^3 - 3\alpha_1 \alpha_2^2 - 2\beta_1 \alpha_2^2 + 2\beta_1 \alpha_1^2 + \alpha_1 \beta_1^2 + \alpha_1 \beta_2^2}{\alpha_2 (\beta_1^2 + \beta_2^2 + 3\alpha_1^2 - \alpha_2^2 + 4\alpha_1 \beta_1)} \quad (7)$$

$$w_0 = p_z \left[\frac{m}{E_{c_1}} + \frac{m}{E_{c_2}} \frac{(\alpha_1^2 + \alpha_2^2) (4\alpha_1 \beta_1 + \alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 3\beta_1^2 - \beta_2^2)}{(\beta_1^2 + \beta_2^2) (\beta_1^2 + \beta_2^2 + 3\alpha_1^2 - \alpha_2^2 + 4\alpha_1 \beta_1)} \right] \quad (8)$$

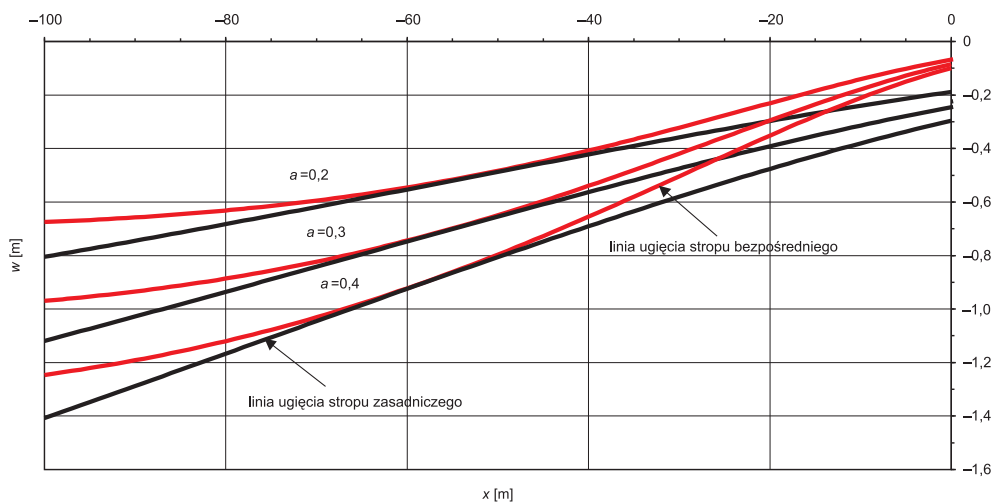
4. Obliczenia i wyniki

Do oceny wpływu przyjęto trzy wartości współczynnika eksploatacji złoża: $a = 0,2$, $a = 0,3$ i $a = 0,4$. Poszczególne liczby dobrano tak, aby obrazowały fazy pracy filarów międzykomorowych. Pierwsza wartość dotyczy pracy filarów z pełną podpornością, a ostatnia — pracy z podpornością mniejszą, np. pozniszczeniową. Zjawisko zróżnicowanego nacisku stropu zasadniczego na strop bezpośredni zinterpretowano następująco. Gdy linia ugięcia warstwy stropu zasadniczego na rysunku znajduje się poniżej linii warstwy stropu bezpośredniego (fizycznie sytuacja niemożliwa do wystąpienia), to uważa się, że warstwy mają pełny kontakt na całej analizowanej długości. Sytuację, gdy linie ugięć na rysunku przylegają styecznie lub przecinają się, interpretuje się jako początek zjawiska odciążania warstwy stropu bezpośredniego na obszarze styczności lub między punktami sieciowej. Aby wyznaczyć geometryczne położenie obydwu belek stropowych odpowiadające sytuacji rozpoczęcia procesu odciążania, wyznaczono krzywe ugięcia belki stropu bezpośredniego dla zakresu wartości współczynnika eksploatacji złoża od $a = 0,01$ do $a = 0,5$. Na rysunku 2 pokazano układ linii ugięcia warstwy stropu bezpośredniego oraz zasadniczego dla $a = 0,2, 0,3$ i $0,4$.



Rys. 2. Linie ugięcia stropu bezpośredniego (szary kolor) i zasadniczego (kolor czarny) w strefie nad zrobami

Obliczono, że proces zawisania stropu zasadniczego zacznie się rozwijać przy wartościach współczynnika eksploatacji złoża i współczynnika obniżenia stropu bezpośredniego, odpowiednio: $a = 0,2$ i $a_{bezp} = 0,028$, $a = 0,3$ i $a_{bezp} = 0,050$ oraz $a = 0,4$ i $a_{bezp} = 0,075$ co daje następujące wartości kompleksowego współczynnika eksploatacji: $a_{kompleks} = 0,0504$, $0,0826$ i $0,1174$. (rys. 3).



Rys. 3. Linie ugięcia stropu bezpośredniego (kolor szary) i zasadniczego (kolor czarny) w strefie nad zrobami

Jako kryterium przyjęto osiągnięcie przez linie ugięcia stropu bezpośredniego i zasadniczego styczności. Podcinanie filarów jako proces niewątpliwie korzystny z ekonomicznego punktu widzenia (eksploatacja udostępnionego złoża w postaci filarów) może powodować odciążanie warstwy stropu bezpośredniego z możliwością wystąpienia zjawiska zawisania stropu zasadniczego. Aby sprawdzić dynamikę przyrostu obniżeń warstw stropowych wraz ze zmianą wartości współczynników eksploatacji, sporządzono rysunek 4, na którym pokazano wykresy różnic wartości obniżeń stropu bezpośredniego i zasadniczego

$$\Delta w = w_{bezp} - w_{zasad} \quad (9)$$

oraz wykresy względnych przyrostów tych różnic

$$\frac{\Delta w}{w} = \frac{w_{bezp} - w_{zasad}}{w} \quad (10)$$

wraz ze zmianą wartości współczynników eksploatacji: a , a_{bezp} i $a_{kompleks}$.

W zakresie odległości od czoła frontu eksploatacyjnego do współrzędnej około -55 m można zauważyć malejącą do zera tendencję wartości funkcji:

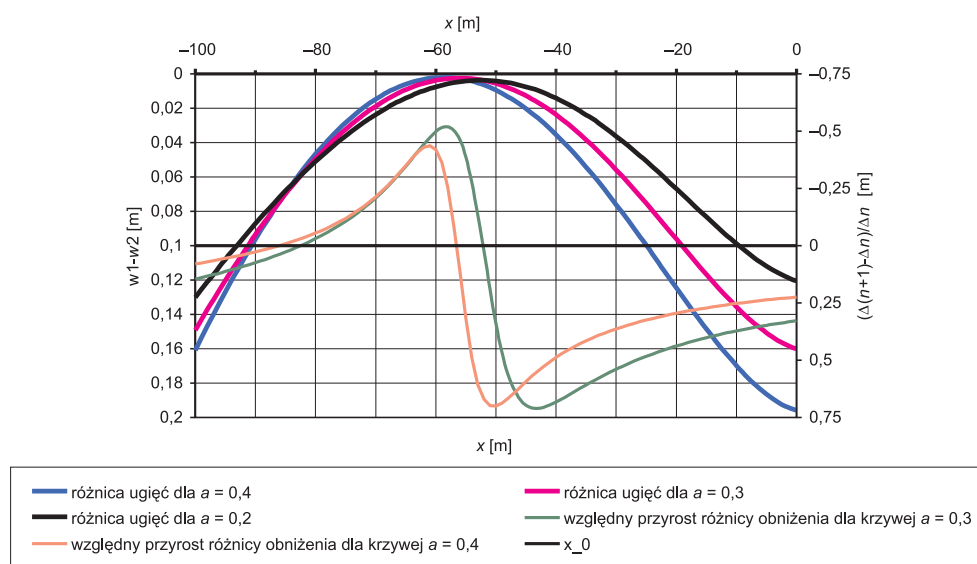
$$\Delta w = w_{bezp} - w_{zasad} \quad \text{dla } a = 0,2, a_{bezp} = 0,028 \text{ i } a_{kompleks} = 0,0504 \quad (11)$$

$$\Delta w = w_{bezp} - w_{zasad} \quad \text{dla } a = 0,3, a_{bezp} = 0,050 \text{ i } a_{kompleks} = 0,0826 \quad (12)$$

$$\Delta w = w_{bezp} - w_{zasad} \quad \text{dla } a = 0,4, a_{bezp} = 0,075 \text{ i } a_{kompleks} = 0,1174 \quad (13)$$

opisujących różnice obniżeń. Na długości odcinka o współrzędnych (0, -51 m), przyrosty Δw maleją do zera, przy czym zera krzywych (13) i (12) oraz (12) i (11) są przesunięte o około 5 m.

Z fizycznego punktu widzenia można to zinterpretować faktem, że w bezpośrednim sąsiedztwie czoła frontu występują największe różnice w obniżeniach obydwu warstw stropowych, prowadzące być może do zmniejszenia wzajemnego nacisku i ich rozwarstwienia. W dalszej odległości różnice są ujemne, co oznaczałoby, że warstwy wywierają na siebie pełny nacisk lub w przypadku spękania stropu bezpośredniego nastąpiło oparcie stropu zasadniczego o zroby.



Rys. 4. Różnice w wartościach ugięć warstwy stropu bezpośredniego i zasadniczego w zależności od wartości współczynnika eksploatacji a

5. Wnioski

W wyniku dokonanej analizy ugięcia stropu nad eksploatowanym złożem rud miedzi LGOM można stwierdzić, że:

- 1) Z powodu różnic w wartościach sztywności EI istnieje możliwość powstawania stref koncentracji i dekoncentracji nacisku warstwy stropu zasadniczego na warstwę stropu bezpośredniego, co może prowadzić do zawisania stropu zasadniczego. Niepodparty lub słabo podparty strop zasadniczy poddany będzie dodatkowym obciążeniami w postaci momentów zginających i sił ścinających, mogących spowodować powstanie lokalnych stref zniszczenia jego ciągłości i zerwanie.

- 2) Na podstawie dotychczasowych obserwacji można wnioskować, że efekt zniszczenia belki stropu zasadniczego będzie miał charakter dynamiczny, z wyzwoleniem dużej ilości energii, której dyssypacja będzie powodować propagację fal sprężystych wywołujących wstrząsy i ewentualnie tąpnięcia.
- 3) Zmiana wartości współczynnika eksploatacji może odzwierciedlać proces zmniejszania podporności filarów w wyniku ich podbierania. W praktyce jest to ciągły proces przejścia do stanu opisanego większą wartością współczynnika.
- 4) W miarę wzrostu wartości współczynnika eksploatacji następuje wydłużanie się odcinka belki stropu zasadniczego o zmniejszonym podparciu ze strony belki stropu bezpośredniego (przesuwanie się punktu o zerowej różnicy obniżeń obydwu stropów w stronę zrobów) (rys. 4).

LITERATURA

- [1] *Kłeczek Z.*: Geomechanika górnicza. Katowice, Śląskie Wydawnictwo Techniczne 1994
- [2] *Kłeczek Z.*: Koncepcja zwalczania zagrożenia wysokoenergetycznymi wstrząsami górotworu w kopalniach LGOM. Wrocław, CUPRUM, nr 15, 2000
- [3] *Kłeczek Z., Zorychta A.*: Wstrząsy górotworu i tąpnięcia w kopalniach rud miedzi LGOM. Międzynarodowa Konferencja Naukowa GÓRNICTWO 2000. Gliwice, 1999
- [4] *Ozog T.*: Ugięcie stropu przy uwzględnieniu sił ścinających. AGH, 1964 (praca doktorska)
- [5] Praca zbiorowa: Monografia KGHM Polska Miedź S.A. Lubin, Wydawnictwo CBPM „Cuprum” 1996
- [6] *Salustowicz A.*: Mechanika górotworu. Katowice, Wydawnictwo Górnico-Hutnicze 1955
- [7] *Walczak J.*: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. Warszawa, PWN 1977
- [8] *Wosz R.*: Ugięcie stropu bezpośredniego i zasadniczego przy eksploatacji złoża systemem komorowo-filarowym z ugięciem stropu. Kwartalnik Górnictwo, z. 4, 2000
- [9] *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, 2002
- [10] *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, 2003
- [11] *Wosz R.*: Wpływ sposobu ugięcia warstw stropowych na koncentrację wyężenia górotworu. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, z. 3–4, 2003
- [12] *Wosz R.*: Ugięcie stropu bezpośredniego i zasadniczego nad eksploatowanym złożem — wytrzymałościowy warunek zniszczenia według hipotezy Burzyńskiego. Kwartalnik Górnictwo i Geoinżynieria, z. 2, 2004