

Krystyna Stec\*, Wojciech Masny\*

## DYNAMICZNE ODDZIAŁYWANIE WSTRZĄSÓW GÓROTWORU NA WYROBISKA KORYTARZOWE W ZALEŻNOŚCI OD ORIENTACJI PŁASZCZYZNY PĘKANIA W OGNISKU WSTRZĄSU

### Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki teoretycznego modelowania dynamicznego oddziaływania wstrząsów, o ścinającym mechanizmie ognisk, na wyrobisko korytarzowe. Przy wykorzystaniu programu FLAC 2D został opracowany model górotworu, w którym symulowano dynamiczne oddziaływanie sinusoidalnego impulsu przyłożonego do płaszczyzny utożsamianej z płaszczyzną pęknięcia w ognisku wstrząsu. Uzyskane teoretyczne wartości PPV, zarejestrowane w stropie wyrobiska, były zależne od kąta orientacji płaszczyzny pęknięcia i można je było skorelować z rozkładem radiacji fali sejsmicznej S. Najsilniejsze oddziaływanie na wyrobisko górnicze miał impuls dynamiczny przyłożony do płaszczyzny pęknięcia położonej poziomo względem stropu wyrobiska górniczego. Wynik ten był zgodny z radiacją sejsmiczną fali S przy poślizgowym modelu ogniska wstrząsu. Z kolei, najmniejsza radiacja sejsmiczna dla fali S względem poziomej płaszczyzny wyrobiska, występowała przy pionowym położeniu płaszczyzny pęknięcia w ognisku. W tym przypadku wartości PPV również były najmniejsze.

### Dynamic influence of rock mass tremors on roadways according to the orientation of the cracking plane in the tremor focus

#### Abstract

The article presents the results of theoretical modelling of the dynamic influence of tremors, with a shearing focus mechanism, on the roadway. Using the FLAC 2D programme, a rock mass model has been worked out, in which the dynamic influence of the sinusoidal impulse applied to the plane identified with the cracking plane in the tremor focus was simulated. The obtained theoretical PPV values, registered in the working's roof, were subject to the angle of orientation of the cracking plane and they could be correlated with the radiation distribution of the seismic wave S. The strongest influence on the mine working had the dynamic impulse applied to the cracking plane situated horizontally towards the roof of the mine working. The result was consistent with the seismic radiation of wave S in case of a sliding model of the tremor focus. In turn, the lowest seismic radiation for the wave S towards the horizontal plane of the working occurred in the case of the vertical position of the cracking plane in the focus. In this case the PPV values were also the lowest ones.

## 1. WPROWADZENIE

Eksploracja górnicza w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym powoduje naruszenie równowagi w rozkładzie pola naprężeń w ośrodku skalnym, przejawiające się występowaniem zjawisk dynamicznych w postaci wstrząsów górotworu, których następstwem mogą być tapnięcia. Wstrząsy te są jednym z podstawowych zagrożeń dla bezpieczeństwa pracy i ciągłości produkcji. Metoda sejsmologii górniczej, stosowana obecnie standardowo w polskim górnictwie węglowym, pomimo tego, że w ostatnich

\* Główny Instytut Górnictwa

latach opracowano kilka istotnych i nowych metod analizy danych, nie pozwala na pełną ocenę oraz prognozę stanu zagrożenia. W dalszym ciągu w kopalnianych stacjach sejsmologicznych określa się tylko miejsce wystąpienia zjawiska i jego energię, a nie analizuje się procesów destrukcyjnych, powstających w momencie zaistnienia wstrząsu. Metodą, która pozwala na określenie procesów zachodzących w ogniskach wstrząsów, jest metoda określania tzw. mechanizmu ogniska, w wyniku której między innymi otrzymuje się azymut i upad płaszczyzny pęknięcia. Parametry te mają wyraźny związek z warunkami geologiczno-górnictwicznymi oraz budową tektoniczną w rejonie prowadzonej eksploatacji. Nie wpływają natomiast bezpośrednio na ilościową ocenę stanu naprężeniowo-deformacyjnego w górotworze. Założono, że pomocne w takich przypadkach mogą być symulacje komputerowe, w których analizie poddaje się zachowanie obudów górniczych narażonych na oddziaływanie zjawisk dynamicznych.

Do rozwiązania analizowanego problemu wykorzystano program do modelowania numerycznego FLAC 2D (Itasca 2008b). W tym celu został opracowany model górotworu, w którym uwzględniono dynamiczne oddziaływanie na wyrobisko, sinusoidalnego impulsu przyłożonego na płaszczyznę utożsamianą z płaszczyzną pęknięcia w ogniskach wstrząsów. Płaszczyzna pęknięcia była usytuowana wariantowo pod kątem  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  w stosunku do stropu wyrobiska korytarzowego. Zarejestrowane w stropie wyrobiska PPV porównano z teoretycznym rozkładem radiacji sejsmicznej fali S dla poślizgowego modelu ogniska.

Wstępne wyniki obliczeń teoretycznych, dotyczących oddziaływania wstrząsów na wyrobisko, w zależności od typu mechanizmu ognisk, to nowe informacje wykorzystywane do poznania specyficznych cech sejsmiczności górniczej i jej oddziaływania na wyrobiska. Wyniki tych obliczeń powinny pozwolić w przyszłości na przeprowadzanie analiz bazujących na rzeczywistych parametrach płaszczyzn pęknięcia w ogniskach, otrzymywanych z analizy sejsmogramów wstrząsów.

## 2. PARAMETRY WEJŚCIOWE MODELU NUMERYCZNEGO

W przypadku modelowania zjawisk dynamicznych, całość symulacji jest wykonywana w dwóch etapach. W pierwszym etapie jest przeprowadzana analiza statyczna, tzn. oblicza się stan naprężeniowo-odkształceniowy, wynikający z usytuowania wyrobiska na odpowiedniej głębokości (Pilecki i in. 1999). W etapie tym, oprócz głębokości na jakiej wykonano wyrobisko, uwzględnia się także układ litologiczny warstw, parametry mechaniczne górotworu, kształt przekroju poprzecznego wyrobiska oraz ewentualnie parametry mechaniczne zastosowanej obudowy. W drugim etapie modelowania, tzn. w analizie dynamicznej, należy uwzględnić trzy najważniejsze aspekty (Itasca 2008b), tzn. impuls dynamiczny oraz warunki brzegowe, tłumienie w modelu, propagację fali w modelu.

Cyfrowe modelowanie propagacji fali sejsmicznej w górotworze polega zawsze na rozwiązaniu numerycznym równania ruchu (Walaszczyk, Hachaj, Barnat 2007, 2008)

$$M\ddot{q}(t + \Delta t) + C\dot{q}(t + \Delta t) + Kq(t + \Delta t) = R(t + \Delta t) \quad (1)$$

gdzie:

$M$  – macierz mas,

$C$  – macierz tłumienia,

$K$  – macierz sztywności,

$R$  – wektor obciążeń zewnętrznych,

$q, \dot{q}, \ddot{q}$  – przemieszczenia węzłowe i ich pierwsze oraz drugie pochodne określone dla czasu  $t + \Delta t$ ,

$\Delta t$  – krok całkowania.

Rozwiązanie równania ruchu (1) uzyskano dzięki zastosowaniu kodu FLAC, bazującego na metodzie różnic skończonych – MRS (*finite difference method* – FDM), tj. najstarszej metodzie numerycznej. Zalicza się ona do grupy metod ośrodka ciągłego, w której oprócz MRS występują także MES – metoda elementów skończonych oraz MEB – metoda elementów brzegowych (Jing, Hudson 2002).

Przy zmiennych parametrach, charakteryzujących kątowne usytuowanie płaszczyzn pęknięcia w fazie dynamicznej, zbudowano model górotworu jako ośrodek ciągły, w płaskim stanie odkształcenia, o wymiarach  $50 \times 75$  m i składający się z 15 000 elementów. Do obliczeń statycznych, na krawędziach bocznych przyjęto warunki przemieszczeniowe. Na obu bocznych krawędziach założono zerowe przemieszczenia poziome, zaś na dolnej – zerowe przemieszczenia pionowe. Na krawędzi górnej modelu przyłożono dodatkowo ciśnienie pionowe o wartości odpowiadającej obciążeniu nadkładu. Ostatecznie w obrębie modelowanego wyrobiska uzyskano pierwotne naprężenie pionowe rzędu 17,5 MPa, co odpowiada głębokości około 700 m. Dla górotworu przyjęto model konstytutywny ośrodka sprężysto-idealnie plastycznego z warunkiem wytrzymałościowym Coulomba-Mohra.

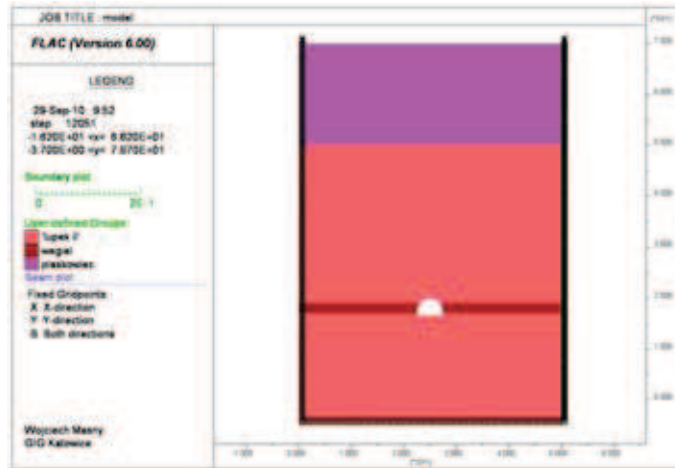
Na podstawie publikacji Kidybińskiego (1982) przyjęto parametry górotworu dla średnich wartości GZW (tab. 1). W obliczeniach uwzględniono wskaźnik osłabienia strukturalnego, wynoszący 0,56 (Zipf 2006).

**Tabela 1.** Przyjęte parametry wytrzymałościowe i odkształceniowe górotworu

Material	Gęstość objętościowa $\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Kąt tarcia wewnętrzny $\varphi$ stopnie	Kohezja $c$ MPa	Moduł Younga $E$ , GPa	Liczba Poissona $\nu$	Wytrzymałość na rozciąganie $R_t$ , MPa
Węgiel	1300	22	3,0	3,5	0,35	0,9
Łupek ilasty	2400	26	6,0	10	0,25	2,0
Piaskowiec	2450	31	11,0	14,0	0,25	3,6

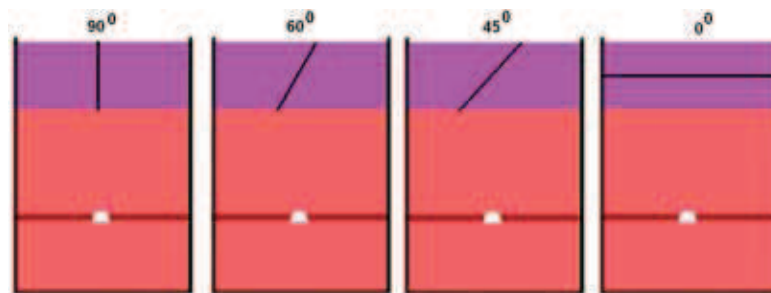
Układ warstw w całym toku modelowania pozostawał niezmienny i był zgodny z przedstawionym na rysunku 1. W obliczeniach przyjęto, że obudowę wyrobiska o szerokości 5,0 m i wysokości 3,5 m, będą stanowić odrzwia ŁP9/V29. W ociosach wyrobiska występowała dwumetrowa warstwa węgla.

Obliczenia numeryczne przeprowadzono dla czterech położań płaszczyzny pęknięcia usytuowanych w warstwie piaskowca (rys. 2). Wartości kątów upadu płaszczyzny pęknięcia odniesiono do spągu piaskowca.



Rys. 1. Model górotworu wraz z wyrobiskiem korytarzowym w obudowie ŁP

Fig. 1. Rock mass model together with roadway with ŁP support



Rys. 2. Usytuowanie płaszczyzn pęknięcia w warstwie piaskowca

Fig. 2. Situation of cracking planes in the sandstone layer

Dla każdego przedstawionego na rysunku 2 wariantu obliczeń, przyjęto te same założenia, tzn. impuls dynamiczny był przykładany w postaci sinusoidy, o maksymalnej początkowej prędkości drgań cząstek górotworu (PPV) równej 0,5 m/s zarówno dla składowej pionowej, jak i poziomej oraz częstotliwości impulsu źródłowego 30 Hz. Dodatkowo zastosowano 5% tłumienie Rayleigha dla częstotliwości 30 Hz. Czas trwania impulsu źródłowego wynosił 0,1 s, podczas gdy obliczenia kończono 1,0 s od ich rozpoczęcia.

W stropie wyrobiska korytarzowego założono punkt obserwacyjny, w którym monitorowano: prędkość drgań cząstek górotworu w kierunku poziomym –  $PPV_x$  [m/s] oraz prędkość drgań cząstek górotworu w kierunku pionowym –  $PPV_y$  [m/s]. Ponadto, dokonywano odczytów przemieszczenia stropu, spągu i ociosów, i na tej podstawie obliczano wartość konwergencji pionowej i poziomej. W celu oceny zachowania się bezpośredniego otoczenia wyrobiska wykorzystano metodę podaną przez Genisa i Gerceka (Gercek, Genis 1999; Genis, Gercek 2003). Autorzy Ci wprowadzili tzw. wskaźnik

stref uplastycznionych (*Index of Yield Zone*), który jest stosunkiem powierzchni obszaru uplastycznionego wokół wyrobiska do jego powierzchni przekroju poprzecznego.

W przypadku obudowy wyrobiska odczytywano wartości maksymalnego momentu gnącego, sił osiowych oraz poprzecznych w kształtowniku odrzwi. Znając te wartości można obliczyć naprężenia zredukowane według hipotezy energii odkształcenia postaciowego, opracowanej przez Hubera, Misesa i Hencky'ego (Szuścik, Kuczyński 1991). Dla powyżej podanych parametrów wzór przyjmuje postać

$$\sigma_{\text{red}} = \sqrt{\left(\frac{M_g}{W_x} + \frac{N}{A}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{A}\right)^2} \quad (2)$$

gdzie:

- $\sigma_{\text{red}}$  – naprężenia zredukowane, MPa;
- $M_g$  – moment gnący, Nm;
- $N$  – siła osiowa, N;
- $T$  – siła poprzeczna, N;
- $W_x$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginanie, m<sup>3</sup>;
- $A$  – pole przekroju poprzecznego, m<sup>2</sup>.

Wyznaczone za pomocą wzoru (2) naprężenia zredukowane nie mogą przekraczać naprężeń dopuszczalnych  $\sigma_{\text{dop}}$ , które dla kształtownika V29 wynoszą: 623,22 MPa (stal o właściwościach mechanicznych według PN-H-93441-1:2004).

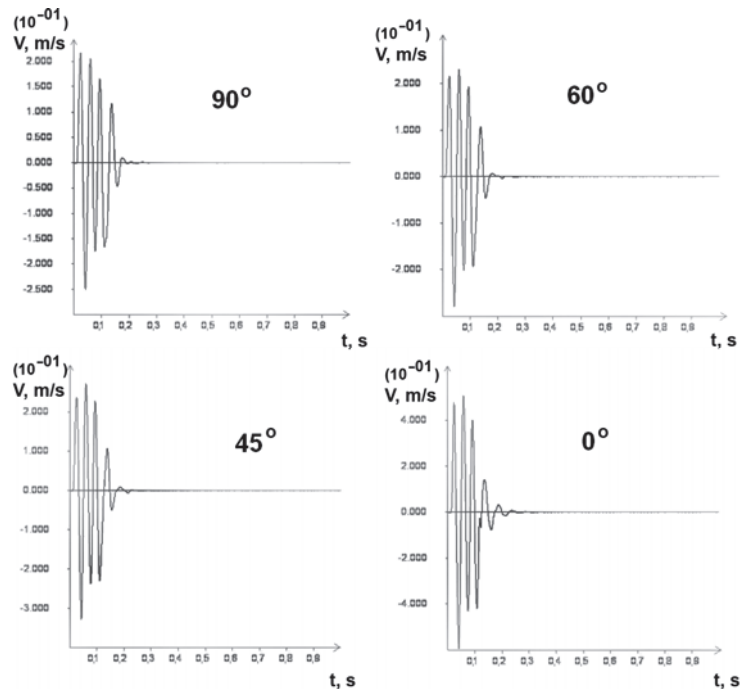
### 3. WYNIKI OBLICZEŃ NUMERYCZNYCH

W tabeli 2 zestawiono wyniki obliczeń numerycznych w postaci maksymalnych zarejestrowanych prędkości drgań cząstek górotworu zarówno składowej pionowej, jak i poziomej, w punkcie obserwacyjnym zlokalizowanym w stropie wyrobiska.

**Tabela 2.** Maksymalne wartości składowej pionowej i poziomej prędkości drgań cząstek górotworu

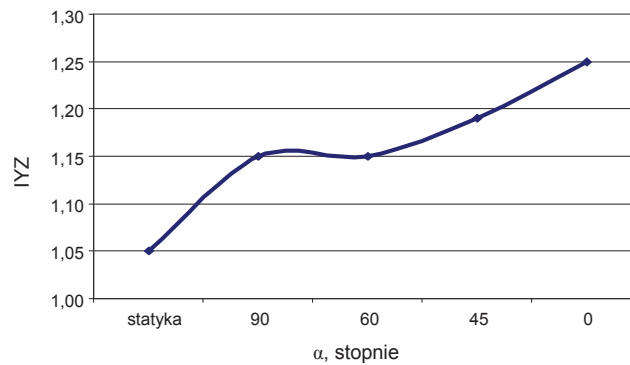
Upad płaszczyzny pęknięcia, stopień	Maksymalna składowa prędkości drgań cząstek ośrodka	
	pozioma PPV <sub>x</sub> , m/s	pionowa PPV <sub>y</sub> , m/s
90	0,296	0,251
60	0,276	0,279
45	0,294	0,327
0	0,316	0,594

Wynika z niej, że wartości PPV zarejestrowane w stropie wyrobiska są uzależnione od kąta upadu płaszczyzny pęknięcia, która była zlokalizowana w piaskowcu. Najmniejsze wartości były charakterystyczne dla przypadku płaszczyzny pionowej (upad = 90°). Niewielkie różnice występowały, gdy zamodelowana płaszczyzna miała kąt upadu 60°. Największe wartości natomiast zarejestrowano w przypadku poziomej lokalizacji płaszczyzny pęknięcia (upad = 0°) i były one, dla składowej pionowej, ponad 2,3 razy większe w stosunku do płaszczyzny pęknięcia usytuowanej pod kątem 90°. Przebiegi drgań składowej pionowej PPV, dla analizowanych przypadków, przedstawiono na rysunku 3.



**Rys. 3.** Przebieg drgań składowej pionowej dla analizowanych wariantów obliczeń  
**Fig. 3.** Course of vibrations of the vertical component for the analysed calculation variants

Jak można przypuszczać, takie różnice w wartościach PPV musiały mieć także określony wpływ na zachowanie się wyrobiska oraz górotworu go otaczającego. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany wskaźnika stref uplastycznionych w zależności od wariantu obliczeń numerycznych.



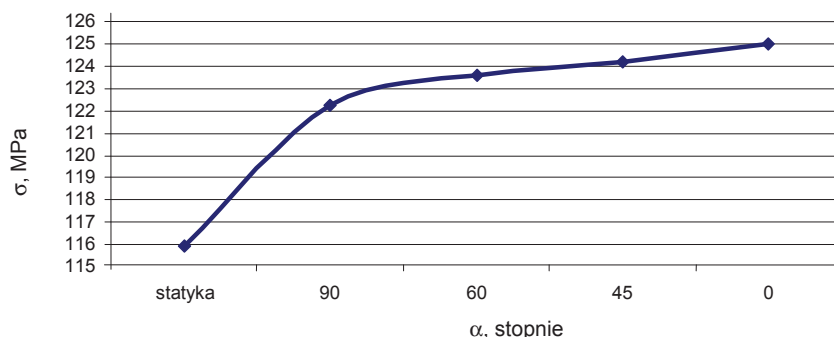
**Rys. 4.** Zmiany wskaźnika stref uplastycznionych dla analizowanych wariantów obliczeń:  $\alpha$  – kąt nachylenia płaszczyzny pęknięcia, IYZ – wskaźnik stref uplastycznionych

**Fig. 4.** Changes of the index of plasticised zones for the analysed calculation variants:  $\alpha$  – angle of inclination of the cracking plane, IYZ – index of plasticised zones

Największą wartość wskaźnika stref uplastycznionych, wynoszącą 1,25, uzyskano, kiedy w modelu zasymulowano poziomą płaszczyznę pękań. Była ona o ponad 19% większa w stosunku do uzyskanej z obliczeń statycznych. Nieco mniejszy wzrost spowodowało zadanie w modelu płaszczyzny o kącie upadu wynoszącym  $45^\circ$ , ponieważ obliczona wartość wskaźnika wyniosła 1,19. Najmniejsze zmiany w stosunku do fazy statycznej odnotowano w przypadku płaszczyzn usytuowanych pod kątem upadu  $60^\circ$  i  $90^\circ$ , bowiem wyniosły one około 10%. Na rysunku 4 widać także wyraźnie różnicę między dwoma skrajnymi przypadkami, tj. płaszczyzn usytuowanych pod kątem  $60^\circ$  i  $90^\circ$  oraz płaszczyzny poziomej. Jeżeli w drugim analizowanym przypadku w rezultacie obliczeń uzyskano wskaźnik 1,25, to przy wprowadzeniu płaszczyzny pionowej oraz odchylonej od poziomu o  $60^\circ$ , otrzymano wartość 1,15, co oznacza bezpośrednio różnicę 9%.

Wyniki obliczeń numerycznych w zakresie przemieszczeń rejestrowanych w stropie, spągu i ociosach wyrobiska również wykazały różne odpowiedzi modelu numerycznego, w zależności od usytuowania płaszczyzny pęknięcia. Zmiany te jednak nie były tak znaczne, jak w przypadku wspomnianego wcześniej wskaźnika stref uplastycznionych; i tak na przykład dla konwergencji poziomej, w przypadku płaszczyzny usytuowanej pod kątem  $0^\circ$  konwergencja była większa o 6% wtedy, kiedy przyjęto płaszczyznę pękań pod kątem  $90^\circ$ . Tak niewielkie zmiany mogły również wynikać z faktu, że w przypadku oddziaływania dynamicznego na wyrobiska korytarzowe występuje często, tzw. konwergencja dynamiczna, co oznacza, że końcowy stan przemieszczeń, tzn. po zakończeniu wstrząsu (w przypadku obliczeń numerycznych po 1 s, kiedy zakończono obliczenia, nie występowały już istotne zmiany), nie zawsze musi oznaczać maksymalną ich wartość. Takie zjawisko opisuje między innymi Merta (1999).

Wszystkie niekorzystne zjawiska, jakie występują podczas wstrząsu górotworu, tzn. przemieszczenia stropu, spągu i ociosów wyrobiska, a także propagacja zniszczeń, wpływają na zachowanie się obudowy wyrobiska korytarzowego. Wyniki obliczeń wartości naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi w zależności od kąta usytuowania płaszczyzny pęknięcia przedstawiono na rysunku 5.



**Rys. 5.** Maksymalne zmiany wartości naprężeń zredukowanych w kształtowniku obudowy dla analizowanych wariantów obliczeń:  $\sigma$  – naprężenia zredukowane w kształtowniku odrzwi,  $\alpha$  – kąt nachylenia płaszczyzny pęknięcia

**Fig. 5.** Maximum changes of values of stresses in the support section for the analysed calculation variants:  $\sigma$  – stresses reduced in the frame section,  $\alpha$  – angle of inclination of the cracking zone

Największa wartość naprężeń zredukowanych w kształtowniku odrzwi była charakterystyczna dla wariantu odwzorowania w modelu poziomej płaszczyzny pęknięcia. Wartość ta była o ponad 7% większa w stosunku do obliczeń statycznych, 1–3% w stosunku do sytuacji, kiedy płaszczyzna była nachylona pod kątem  $60^\circ$  i  $90^\circ$  oraz  $< 1\%$  w stosunku do płaszczyzny pęknięć nachylonej pod kątem  $45^\circ$ .

#### **4. ROZKŁAD RADIACJI SEJSMICZNEJ W ZALEŻNOŚCI OD POŁOŻENIA PŁASZCZYZNY PĘKANIA W OGNISKU WSTRZĄSU**

W oszacowaniu obciążeń dynamicznych wstrząsu na wyrobiska górnicze istotne jest poznanie charakteru propagacji fal sejsmicznych. Propagacja fal sejsmicznych w górotworze zależy od sposobu pęknięcia skał w ognisku wstrząsu. Na podstawie sejsmogramów wstrząsów można określić pole przemieszczeń lub pole prędkości na różnych kierunkach i w różnych odległościach od ogniska. Opis tego pola, za pomocą wybranych modeli ogniska, pozwala na opisywanie procesów zachodzących w ogniskach wstrząsów górotworu z zastosowaniem określonych parametrów fizycznych. Z reguły ekwiwalentem ogniska wstrząsu może być odpowiednia superpozycja pojedynczych sił lub par sił. Układ sił, występujących w ogniskach, odtwarza się na podstawie badań mechanizmu ogniska. Badania takie prowadzone od wielu lat pozwoliły na podzielenie wstrząsów górotworu na dwie grupy.

Pierwsza grupa charakteryzuje się eksplozywnym lub implozywnym typem mechanizmu ognisk; są to wstrząsy słabsze energetycznie, zlokalizowane w pokładzie w sąsiedztwie czynnych frontów eksploatacyjnych. Mechanizm ognisk tych wstrząsów odzwierciedla procesy związane z destrukcją pokładu lub bezpośredniego jego otoczenia (Wiejacz 2001; Stec, Drzewiecki 2000; Stec 2005). Najczęstszym typem mechanizmu ognisk w drugiej grupie wstrząsów, z reguły o energii powyżej  $10^5$  J, jest mechanizm poślizgowy z zaznaczającym się poziomym przesunięciem w ognisku wstrząsu. Azymuty płaszczyzn rozrywu i ich upady w przypadku tych zjawisk korelują z rozciągłością i upadem struktur tektonicznych, w pobliżu których były zlokalizowane ogniska wstrząsów lub rozciągłością frontu eksploatacyjnego. Zjawiska tego typu mogą występować w wyniku współdziałania naprężeń rezydualnych istniejących w analizowanym obszarze z naprężeniami wywołanymi pracami górniczymi (Gibowicz, Domański, Wiejacz 1996; Zuberek i in. 1996; Dubiński, Stec 2001; Stec, Błaszczuk 2008) lub też w wyniku zmian naprężeniowych zachodzących w położonych nad pokładem warstwach piaskowca, które pękają wraz z postępowaniem ściany (Stec, Wojtecki 2011).

Wieloletnie badania aktywności sejsmicznej w GZW wykazały, że wstrząsy wysokoenergetyczne, najniebezpieczniejsze dla wyrobisk górniczych, mają mechanizm ścinający odpowiadający działaniu podwójnej pary sił. W aspekcie badanego zagadnienia opisano radiację sejsmiczną równoważną podwójnej parze sił, odpowiadającą za powstawanie wstrząsów typu poślizgowego. Zastosowano metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego. W uproszczeniu można przyjąć, że tensor momentu sejsmicznego określa sposób radiacji energii ze źródła. Obserwuje się zazwyczaj pole przemieszczeń lub pole prędkości na różnych kierunkach i w różnych odległościach od ogniska. Opis tego pola za pomocą wybranych modeli ogniska pozwala na opisy-



wanie procesów wstrząsów górotworu określonymi parametrami fizycznymi. Z reguły reprezentantem ogniska wstrząsu może być odpowiednia superpozycja pojedynczych sił lub par sił.

Wektor przemieszczenia  $u_n(x, t)$  wywołany przez źródło sejsmiczne może być wyrażony przez tensor momentu  $M_{pq}$  i funkcję Greene'a,  $G_{np}$ . W roku 1849 Stokes podał jawną postać funkcji Greene'a, dla nieskończonego jednorodnego ośrodka, jako przemieszczenie  $u(x, t)$ , powodowane przez pojedynczą siłę  $F$  przyłożoną w punkcie  $\zeta = 0$  i w czasie  $\tau = 0$  oraz działającą w kierunku  $x_m$

$$u_n(x, t) = \frac{1}{4\pi\rho} (3\gamma_n\gamma_m - \delta_{nm}) \frac{1}{R^3} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau^\circ F(t - \tau) d\tau + \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \gamma_n\gamma_m \frac{1}{R} F\left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} (\gamma_n\gamma_m - \delta_{nm}) \frac{1}{R} F\left(t - \frac{R}{\beta}\right) \quad (3)$$

gdzie:

- $R$  – odległość od punktu obserwacji  $x$  do punktu przyłożenia siły,
- $\gamma_n, \gamma_m$  – cosinusy kierunkowe dla wektora  $x - \zeta$ ,
- $\delta$  – delta Kroneckera,
- $\alpha, \beta$  – prędkości fali P i fali S w ośrodku o gęstości  $\rho$ .

Pierwszy człon w powyższym równaniu opisuje tzw. bliskie pole, a drugi człon – tzw. pole dalekie (osobno dla fali P i dla fali S). Czynniki radiacji dla pola dalekiego wynosi dla tego modelu  $1/R$ , a dla pola bliskiego  $1/R^3$ .

Najczęściej przy silnych wstrząsach ma się do czynienia z radiacją równoważną podwójnej parze sił. Przy tym modelu ogniska i założeniu, że tensor momentu sejsmicznego  $M$  jest wartością stałą na całej powierzchni źródła, a jego liniowy rozmiar jest mały w porównaniu do długości fali, wektor przemieszczenia wywołany działaniem podwójnej pary sił opisanej tensorem  $M_{pq}$  w źródle można wyrazić równaniem (Aki, Richards 1980)

$$u_n(x, t) = RP^{\text{near}} \frac{1}{4\pi\rho} \frac{1}{R^4} \int_{R/\alpha}^{R/\beta} \tau M_{pq}(t - \tau) d\tau + RP^{\text{inter}(\alpha n)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^2} \frac{1}{R^2} M_{pq}\left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - RP^{\text{inter}(\beta n)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^2} \frac{1}{R^2} M_{pq}\left(t - \frac{R}{\beta}\right) + RP^{\text{far}(P)} \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq}\left(t - \frac{R}{\alpha}\right) - RP^{\text{far}(S)} \frac{1}{4\pi\rho\beta^3} \frac{1}{R} \frac{d}{dt} M_{pq}\left(t - \frac{R}{\beta}\right) \quad (4)$$

We wzorze tym  $RP^{\text{near}}$  jest wyrażeniem radiacji w bliskim polu, która z odległością zmienia się, jak  $1/R^4$ .  $RP^{\text{inter}(\alpha)}$  i  $RP^{\text{inter}(\beta)}$  są czynnikami radiacji w polu pośrednim, zmieniającymi się z odległością, jak  $1/R^2$ .  $RP^{\text{far}(P)}$  i  $RP^{\text{far}(S)}$  są czynnikami radiacji w polu dalekim dla fal P i S, charakteryzującym się zmniejszeniem, jak  $1/R$ . Praktycznie więc pole bliskie maleje wielokrotnie szybciej niż pole dalekie czy też pole pośrednie.

Czynniki radiacji są kombinacją cosinusów kierunkowych  $\gamma_j$ . I tak, dla przykładu poniżej podano rozwiązania dla prostych przypadków, gdy jest obliczane przemieszczenie w punkcie  $x$ , w odległości  $R$  od źródła i dla cosinusów kierunkowych  $\gamma_x$ ,  $\gamma_y$  i  $\gamma_z$ .

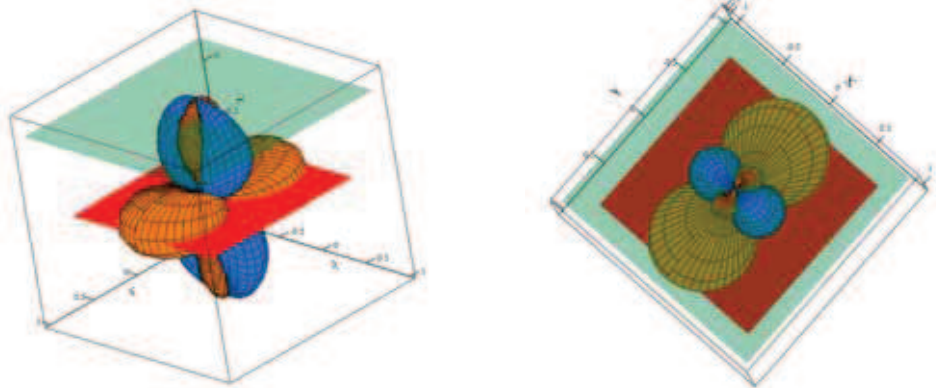
Czynnik radiacji w polu dalekim zależy od chwilowych pochodnych czasowych w czasie  $\tau = t - R/v$ , gdzie  $v = \alpha$  dla fal P oraz  $v = \beta$  dla fal S. Przykładowo, w dalekim polu dla fal P otrzymuje się

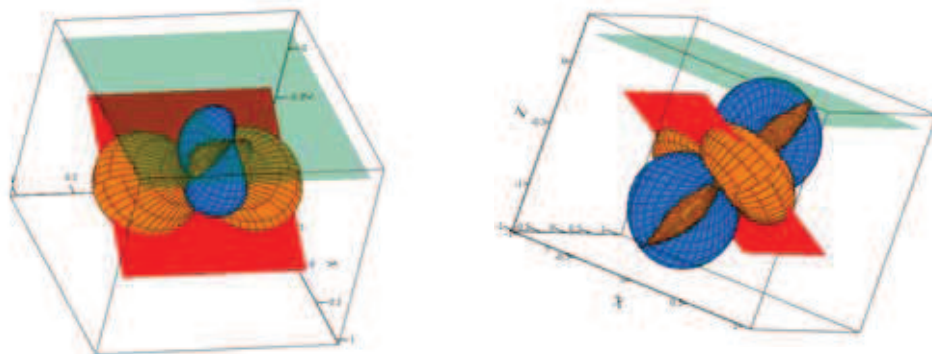
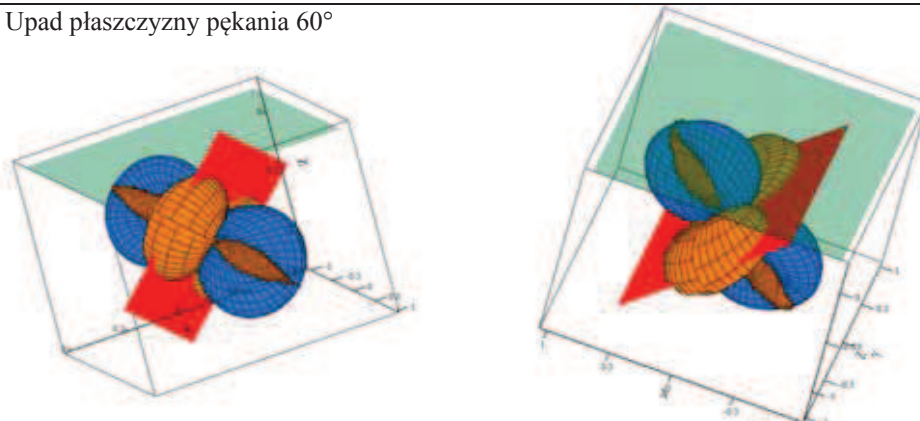
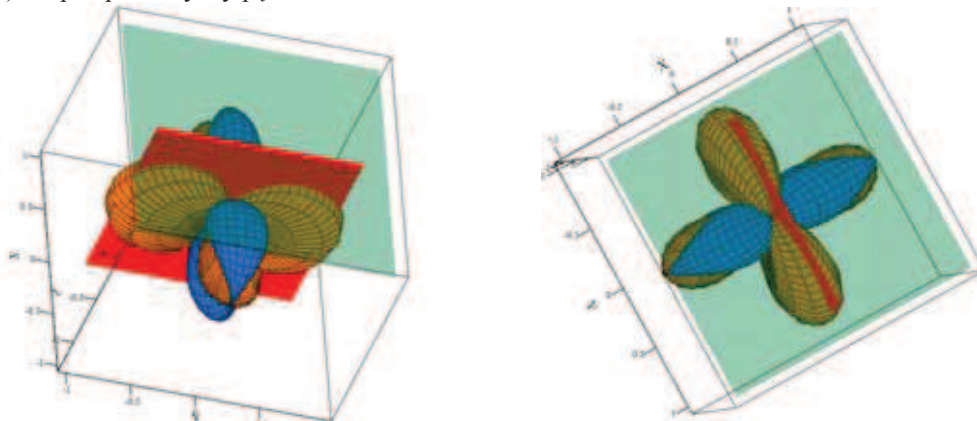
$$\begin{aligned} u_x^{\text{P(far)}}(x, t) &= \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \left\{ \frac{d}{dt} [M_{xz} + M_{zx}] \gamma_x \gamma_z \gamma_x + [M_{yz} + M_{zy}] \gamma_y \gamma_z \gamma_x \right\} = \\ &= \frac{1}{4\pi\rho\alpha^3} \frac{1}{R} \left\{ 2\mu A \gamma_x \left[ \gamma_x \gamma_z \frac{d}{dt} \left[ u_x \left( t - \frac{R}{\alpha} \right) \right] + \gamma_y \gamma_z \frac{d}{dt} \left[ u_y \left( t - \frac{R}{\alpha} \right) \right] \right] \right\} = \\ &= u_x^{\text{P}}(t) \gamma_x \{ \gamma_x \gamma_z + \gamma_y \gamma_z \} \end{aligned} \quad (5)$$

Składowa  $x$  pola przemieszczeń w punkcie obserwacji  $x$  jest w tym przypadku wynikiem działania podwójnej pary sił, pary (1,3) i pary (2,3). Z równania powyższego, po różniczkowaniu, można otrzymać prędkość drgań cząstek górotworu (to co jest rejestrowane przez sejsmometri).

Sposób rozchodzenia się fal sejsmicznych można przedstawić graficznie. W związku z tym opracowano algorytm z użyciem biblioteki do obrazowania przestrzennego o nazwie OpenGL (*Open Graphics Library*) i specjalistyczny program, który posłużył do wizualizacji przestrzennego obrazowania radiacji źródła sejsmicznego w strefie dalekiej dla mechanizmu podwójnej pary sił. Przy tym typie mechanizmu ogniska w procesach ścinania dominują fale poprzeczne S, dla których na rysunkach 6a–d przedstawiono przestrzenne obrazy radiacji dla płaszczyzn pęknięcia o upadzie  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  względem płaszczyzny poziomej.

a) Upad płaszczyzny pęknięcia  $0^\circ$



b) Upad płaszczyzny pęknięcia  $45^\circ$ c) Upad płaszczyzny pęknięcia  $60^\circ$ d) Upad płaszczyzny pęknięcia  $90^\circ$ 

**Rys. 6.** Wizualizacja radiacji sejsmicznej dla fali S dla płaszczyzny pęknięcia o upadzie  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $90^\circ$  względem płaszczyzny poziomej (kolor czerwony – płaszczyzna pęknięcia, kolor zielony – płaszczyzna pozioma)

**Fig. 6.** Visualisation of seismic radiation for the wave S for the cracking plane with dip  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$ , and  $90^\circ$  towards the horizontal plane (red colour – cracking plane, green colour – horizontal plane)

Wynika z nich, że rozchodzenie się fali sejsmicznej S z ogniska wstrząsu typu poślizgowego jest nierównomierne. W przestrzeni występują uprzywilejowane kierunki radiacji amplitud drgań emitowanych z ogniska wstrząsu. Ten efekt kierunkowości radiacji drgań ma wpływ na wartości amplitud prędkości drgań rejestrowanych w stropie wyrobiska górniczego.

Porównano wyniki obliczeń teoretycznych wartości PPV ze stropu wyrobiska z wizualizacją kierunku uprzywilejowanego rozprzestrzeniania się fali poprzecznej S wskazującą na kierunek głównego impulsu drgań wysyłanych ze źródła. Teoretyczne obliczenia wykonane dla modelu wykazały, że największe oddziaływanie na wyrobiska górnicze ma impuls dynamiczny przyłożony do poziomej płaszczyzny pęknięcia w stosunku do stropu wyrobiska górniczego. Z rysunku 6a wynika, że radiacja fali S ma największe oddziaływanie na równoległą do wyrobiska płaszczyznę pęknięcia (upad = 0°), co oznacza, że dociera do wyrobiska najwięcej energii sejsmicznej. Z kolei, mniejsza radiacja fali S w stosunku do płaszczyzny poziomej wyrobiska występuje przy pozostałych upadach 45° i 60° (rys. 6b, c), a najmniejsza jest przy pionowym położeniu płaszczyzny pęknięcia w ognisku (rys. 6d). W tym przypadku wartości PPV również były najmniejsze.

## 5. PODSUMOWANIE

Badania nad wpływem oddziaływania typów wstrząsów sejsmicznych, opisanych parametrami mechanizmu, na wyrobiska górnicze są zagadnieniem całkowicie nowym i nie ma na ten temat jakichkolwiek doniesień, szczególnie dotyczących rozwiązań ilościowych. Pewne nieliczne wzmianki o charakterze jakościowym bazują głównie na analizach tektonofizycznych.

Przeprowadzona wstępna analiza teoretycznego modelowania dynamicznego oddziaływania wstrząsów na wyrobisko chodnikowe wykazała jednoznaczny wpływ typu mechanizmu ogniska na sposób rozchodzenia się fal sejsmicznych. Na podstawie wyników obliczeń numerycznych można bowiem stwierdzić, że położenie płaszczyzny pęknięcia w ognisku wpływa na sposób radiacji sejsmicznej, z czego wynikały różne wartości PPV mierzone w stropie wyrobiska chodnikowego w modelu numerycznym. Z kolei, różne wartości maksymalnej prędkości drgań cząstek górotworu, które były charakterystyczne dla analizowanych orientacji płaszczyzn pęknięć, powodowały określone zmiany zarówno w górotworze otaczającym wyrobisko korytarzowe, jak i w samej obudowie. Można zatem stwierdzić, że typ mechanizmu ogniska może mieć znaczenie w przypadku oceny stateczności wyrobiska górniczego, poddanemu oddziaływaniu dynamicznemu wstrząsów górotworu.

Wyniki tych rozważań muszą zostać w przyszłości poparte badaniami, co w rezultacie może przyczynić się do pełniejszego wykorzystania metody sejsmologicznej w ocenie zagrożenia tąpnięciami.

*Niniejszy artykuł jest wynikiem projektu badawczego własnego MNiSW 3608/B/T02/2010/38 realizowanego w Głównym Instytucie Górnictwa w latach 2010–2013.*

**Literatura**

1. Aki K., Richards P.G. (1980): *Quantitative Seismology. Theory and Methods*. San Francisco, Freeman.
2. Dubiński J., Stec K. (2001): Relationship between focal mechanism parameters of mine tremors and local strata tectonics. W: *Dynamic rock mass response to mining*. Eds. G. Van Aswegen, R.J. Durrheim, W.D. Ortlepp. Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy, s. 113–118.
3. Genis M., Gercek H. (2003): A numerical study of seismic damage to deep underground openings. ISRM 2003 – *Technology Roadmap for Rock Mechanics*. Johannesburg, The South African Institute of Mining and Metallurgy, s. 351–355.
4. Gercek H., Genis M. (1999): Effect of anisotropic in situ stresses on the stability of underground opening. *Proc. of the 9<sup>th</sup> Int. Congress on Rock Mechanics*, Vol. 1. Rotterdam, Balkema, s. 367–370.
5. Gibowicz S.J., Domański B., Wiejacz P. (1996): The focal mechanism and source parameters of seismic events induced by mining. *Acta Montana*, ser. A No. 10 (102), s. 1–18.
6. Itasca (2008a): *FLAC<sup>2D</sup> Optional features: Dynamic analysis*. Minneapolis, Itasca Consulting Group.
7. Itasca (2008b): *FLAC<sup>2D</sup> Theory and background*. Minneapolis, Itasca Consulting Group.
8. Jing L., Hudson J.A. (2002): Numerical methods in rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* Vol. 39, s. 410–427.
9. Kidybiński A. (1982): *Podstawy geotechniki kopalnianej*. Katowice, Wydaw. „Śląsk”.
10. Kwiatek G. (2009): Foci – tensor momentu sejsmicznego – parametry spektralne – opis programu (publikacja internetowa).
11. Merta G. (1999): Parametry konwergencji dynamicznej wyrobiska korytarzowego. W: *Badania nad dynamiką obciążeń obudowy wyrobisk górniczych*. Monografia pod kierunkiem W. Konopko. Katowice, GIG, s. 59–68.
12. Pilecki Z., Pilecka E., Gołębiowski T., Gerlach Z. (1999): *Analiza dynamiczna oddziaływania wstrząsu górniczego na wyrobisko*. Publication of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences M-22 (310), s. 365–373.
13. Stec K. (2005): Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górniczych z obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. *Wiadomości Górnicze* nr 4, s. 168–174.
14. Stec K., Błaszczak E. (2008): Charakterystyka procesów zachodzących w ogniskach wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w czasie eksploatacji ściany 17 w pokładzie 361 w KWK „Knurów”. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi* t. 24, z. 2/3, s. 226–244.
15. Stec K., Drzewiecki J. (2000): Relationship between mine tremor focal mechanism and local mining and geological conditions. *Acta Montana*, ser. A No. 16 (118), s.189–202.
16. Stec K., Wojtecki Ł. (2011): Charakterystyka mechanizmu ognisk wstrząsów górotworu związanych z eksploatacją pokładu 510 ścianą 502 w Kopalni Węgla Kamiennego „Bieliszowice”. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 1, s. 61–78.
17. Szuścik W., Kuczyński J. (1991): *Wytrzymałość materiałów. Mechanika modelu ciała odkształcalnego i ciała rzeczywistego – Część 1*. Gliwice, Politechnika Śląska.
18. Walaszczyk J., Hachaj S., Barnat A. (2007): Matematyczny model drgań powierzchni terenu wywołanych robotami strzałowymi w kamieniołomie. *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej* nr 76, Seria Konferencje nr 42, s. 625–639.
19. Walaszczyk J., Hachaj S., Barnat A. (2008): Identyfikacja właściwości odkształceniowych górotworu w oparciu o numeryczną analizę wstrząsu związanego z wyburzeniem budowli. *Górnictwo i Geoinżynieria, Kwartalnik AGH* R. 32, z. 2, s. 307–319.

20. Wiejacz P. (2001): Badania mechanizmów wstrząsów górniczych w Polsce. W: Badania geofizyczne w kopalniach. Praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego, W.M. Zuberka. Kraków, IGSMiE PAN, s. 25–33.
21. Zipf R.K. (2006): Numerical Modeling Procedures for Practical Coal Mine Design. Proc. of the 41<sup>st</sup> U.S. Rock Mechanics Symposium, Golden, Colorado, s. 1–11.
22. Zuberek W.M., Teper L., Idziak A.F., Sagan G. (1996): Tectonophysical approach to the description of mining induced seismicity in the Upper Silesia. W: Tectonophysics in Mining Areas. Ed. A. Idziak. Katowice, Wydaw. UŚI, s. 79–98.

**Recenzent:** prof. dr hab. inż. Władysław Konopko