

*Antoni Kidybiński*

## POLE DYNAMICZNEGO WYTEŻENIA SKAŁ STROPOWYCH WYROBISKA KORYTARZOWEGO PO WSTRZĄSIE GÓROTWORU

### Streszczenie

W artykule omówiono – na podstawie modelowania w skali 1:1 metodą cząstkową – zmienne parametry pola wyteżenia górotworu stropowego nad wyrobiskiem korytarzowym w obudowie ŁP9 po wstrząsie górotworu, takie jak prędkość i kierunek chwilowych przemieszczeń, naprężenia dynamiczne, udział objętości zaangażowanej w ruchy poślizgowe (SF), makroporowatość oraz gradienty prędkości ruchu cząstek w kierunku pionowym i poziomym. Omówiono przebieg sumarycznej energii kinetycznej modelu w pełnym cyklu jego pracy i podano energię kinetyczną symulowanych na modelu wstrząsów stropowych. Zrealizowane badania modelowe tworzą podstawy do prognozowania dynamicznych obciążeń obudowy wyrobisk korytarzowych podczas wstrząsów górotworu.

### The field of dynamic effort of roof strata of a roadway resulted from induced mining tremor occurrence

#### Abstract

Parameters of roadway's roof strata dynamic effort are analysed as based on PFC2D (Particle Flow Code) modelling and namely velocity and direction of particle displacement, dynamic stress, sliding fraction (SF), changing porosity and (x,y) gradient of particle displacement velocities. Complete kinetic energy of the model in a full cycle of static/dynamic loading is also analysed as dependent of tremor's kinetic energy induced to the roof strata. Fundamentals for possible forecasting of yielding arch type of steel supports dynamic loads are presented as a result of these investigations.

## WPROWADZENIE

W miarę wzrostu stopnia wyeksploatowania złóż węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym coraz bardziej nasila się częstotliwość występowania oraz energia wstrząsów sejsmicznych, wywołanych robotami górniczymi (Dubiniński, Konopko 2000). Wstrząsy te w wielu przypadkach stwarzają istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa i ciągłości pracy załóg kopalnianych, jak również stateczności zabudowy mieszkalnej na powierzchni.

Podstawowym zagadnieniem górniczym, związanym z występowaniem wstrząsów indukowanych eksploatacją podziemną, jest utrzymanie stateczności i drożności wyrobisk (zarówno korytarzowych, jak i eksploatacyjnych) przez odpowiedni dobór, rozmieszczenie i wzajemne powiązanie elementów obudowy wyrobisk. Szczególne znaczenie ma także utrzymanie wyrobisk korytarzowych, stanowiących podstawowy szkielet strukturalny każdej kopalni.

Najczęściej stosowana obudowa łukowa tych wyrobisk (ŁP) jest poddawana statycznym i dynamicznym obciążeniom o różnej wielkości, kierunku i prędkości, a od

szczegółów jej zabudowy i konstrukcji zależy w znacznej mierze utrzymanie wymaganego poprzecznego przekroju wyrobiska. Podstawą dotychczasowych metod obliczania i doboru tej obudowy jest przede wszystkim analiza statycznego wyężenia skał stropu, ociosów i spągu, zaś wielkość prognozowanego obciążenia obudowy wynika głównie z wyznaczonych rozmiarów strefy niestatecznej w stropie.

W przypadku decydującego wpływu silnego wstrząsu sejsmicznego na stateczność wyrobiska, wymieniona wyżej metoda analizy statycznej nie jest w pełni wystarczająca, bowiem uszkodzenie bądź zniszczenie wyrobiska wraz z obudową, może nastąpić w bardzo krótkim czasie i być skutkiem wyłącznie dynamicznego oddziaływania otaczających wyrobisko mas skalnych.

W niniejszym artykule zostały zrelacjonowane wstępne badania autora – w ramach realizowanego przez GIG badawczego projektu rozwojowego MNiSW nr R09 007 01 – nad dynamicznymi czynnikami obciążenia obudowy i stateczności górotworu, a w szczególności nad parametrami pola dynamicznego wyężenia skał stropowych bezpośrednio sąsiadujących z wyrobiskiem. W celu umożliwienia późniejszych porównań charakteru pola wyężenia skał, przy różnych energiach wstrząsów, badania przeprowadzono wyłącznie dla wstrząsu o przyłożeniu liniowym i energii kinetycznej około  $3 \cdot 10^5$  J.

## 1. MODELOWANIE CZĄSTKOWE

Do niedawna metody numerycznej symulacji procesów mechanicznych polegały głównie na badaniu ośrodków ciągłych – z możliwością wyznaczania w nich stref zniszczenia wykazujących odmienne cechy mechaniczne niż otoczenie. Największą popularność zyskały: metoda elementów skończonych, metoda różnic skończonych oraz metoda elementów brzegowych (a właściwie – obciążen brzegowych). Wymienione metody są nadal modyfikowane i rozwijane, a także coraz bardziej uniwersalnie stosowane (FLAC, ANSYS i inne). Brak było natomiast możliwości modelowania ośrodków rozdrobnionych (lub skonsolidowanych z rozdrobnionych) do czasu, kiedy Cundall (1971) stworzył podstawy przyszłego programu obliczeniowego UDEC (*Universal Distinct Element Code*), a następnie programu PFC (*Particle Flow Code*), (Patyondy, Cundall 2004; ITASCA 2004). Ten ostatni umożliwia tworzenie płaskich (zbudowanych z dysków) lub przestrzennych (zbudowanych z kulek) modeli ośrodków stałych, dyspersyjnych lub mieszanych, przez wprowadzenie do modelu nie tylko podstawowych elementów struktury (o dowolnej wielkości), lecz także więzów stykowych i równoległych między tymi elementami – w postaci sił. Ponadto, elementy strukturalne (dyski, kulki), jak i częściowo więzy – mają określone cechy ośrodka rzeczywistego, na przykład odkształcalności (sztywności), wytrzymałości (sił granicznych), gęstości oraz współczynnika tarcia, zaś ich wzajemne upakowanie w modelowanym ośrodku może odpowiadać pierwotnej makroporowatości (w przypadku modelowania górotworu) lub porowatości (w przypadku modelowania próbek skalnych zbudowanych z ziarn mineralnych dowolnego kształtu). Górotwór – niezależnie od podstawowych parametrów mechanicznych skał – mogą charakteryzować szczeliny o zadanej długości, kierunku, ciągłości oraz zagęszczeniu, a także

sztwyne struktury blokowe, które tworzy się przez określenie zasięgu współrzędnych odpowiadających poszczególnym blokom w masywie skalnym (w ich początkowym położeniu). Przepływy płynu (gaz, ciecz) przez górotwór oraz zmiany temperatury mogą być realizowane przez zastosowanie dodatkowych podprogramów do kodu PFC, a mianowicie FLUID oraz THERMAL. Czynniki czasu jest realizowany w modelach przez rejestrację bieżącej liczby cykli przeliczania i odniesienie liczby cykli do rzeczywistych jednostek czasu (sekundy). Odnośnie do czasu należy dodać, że wspomniany stosunek nie jest wielkością stałą dla danego modelu, bowiem przy różnym stopniu skomplikowania obliczeń w różnych częściach liczonego programu – czas jednostkowy tych obliczeń może być różny. Ponadto w modelach prostych (o małej liczbie cząstek) obliczanie następuje szybciej niż w modelach dużych (np. kilkadziesiąt tysięcy elementów). Czas obliczeń zależy ponadto od prędkości pracy procesora komputerowego oraz – w pewnej mierze – od organizacji pamięci operacyjnej.

Stosunkowo niewielki stopień popularyzacji kodu PFC, szczególnie w warunkach krajowych, jest spowodowany – zdaniem autora – głównie tym, że do każdego modelu należy stworzyć własny, oddzielny program obliczeniowy w kodzie PFC, zaś przy bardziej złożonych funkcyjnie procedurach – dodatkowo wstawki w języku wewnętrznym FISH.

## 2. MODEL GÓROTWORU OTACZAJĄCEGO WYROBISKO

Do realizacji przedstawionych w niniejszym artykule obliczeń autor opracował w kodzie PFC2D program komputerowy DOŁP9\_4, który generuje w pamięci komputera model o wymiarach  $11 \times 11 \times 1$  m z wyrobiskiem w obudowie ŁP9. Między obrysem wyrobiska (w części stropowej i ociosowej) a zewnętrznym obrysem odrzwi obudowy, pozostawiono pierwotny odstęp 0,25 m (do wypełnienia przez osiadający górotwór stropowy i wyciskane ociosy), zwany w dalszej części strefą kontaktową. Profil geologiczny skał przedstawionych w modelu obejmuje (od dołu): 1,8 m grubości mułowca ( $R_{CL} = 60$  MPa), 2,0 m węgla kamiennego ( $R_{CL} = 20$  MPa) oraz 7,2 m iłowca ( $R_{CL} = 40$  MPa), gdzie  $R_{CL}$  oznacza wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie, badaną w warunkach laboratoryjnych (na próbkach).

Poza cechami sztywności, wytrzymałości, współczynnika tarcia i gęstości, odpowiadającymi wspomnianym skałom karbońskim, do modelu wprowadzono spękania poziome odpowiadające warstwowaniu skał – w stropie bezpośrednim oraz spągu wyrobiska, a także strukturę blokową górotworu w bezpośrednim otoczeniu przekroju wyrobiska, a ponadto – pole grawitacyjne odpowiadające przyspieszeniu ziemskiemu (w całym modelu).

Do wyrobiska wstawiono odrzwia ŁP9V25 – wytestowane statycznie i dynamicznie w odrębnym własnym programie komputerowym – a wykazujące cechy materiałowe stali normowej, obustronną zakładkę 0,6 m i równomiernie rozłożone obustronne siły dociskowe w złączach ciernych. Model górotworu otaczającego wyrobisko na drodze konsolidacji doprowadzono do makroporowatości 7,5%, co

odpowiada skałom zwięzłym niespękanym. Całość modelu obejmowała około 8200 elementów strukturalnych.

### 3. STATYCZNO-DYNAMICZNE OBCIĄŻENIE MODELU

Omówiony pokrótce model, obciążano kilkaset razy w celu otrzymania reakcji zarówno górotworu, jak i obudowy oraz zarejestrowania jej na wykresach. Obciążanie to powodowało każdorazowo trzyetapową reakcję, a mianowicie:

1. Osiadanie górotworu stropowego i dociśnięcie ociosów (wymuszeniem małej i stałej prędkości przemieszczenia górnej krawędzi modelu – odpowiadającym naciskowi warstw skalnych wyżej leżących – do czasu całkowitego wypełnienia strefy kontaktu).
2. Obciążenie statyczne (sposobem j.w.) realizowane w okresie zależnym od potrzeb rejestrowanego procesu.
3. Obciążenie dynamiczne (realizowane równomiernie rozłożoną i skierowaną ku dołowi siłą pionową, przyłożoną do cząstek całej górnej strefy modelu przez około 100 ms, następnie całkowite wyzerowanie tej siły). Wielkość siły odpowiadała masie pięciometrowej grubości warstwy skalnej nagle obciążającej (bez udaru) górną warstwę modelu.

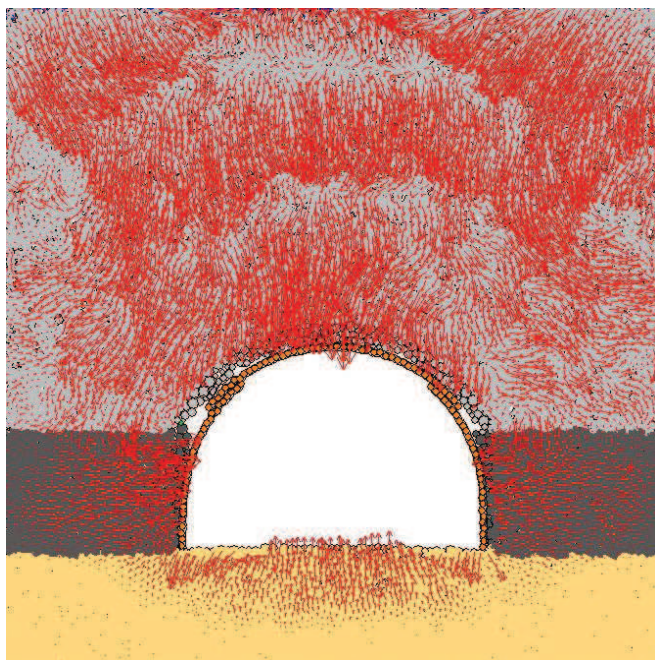
W czasie wielokrotnych badań modelu, podanym wyżej sposobem, stwierdzono całkowitą powtarzalność zjawisk w poszczególnych strefach i punktach modelu – do trzeciego miejsca po przecinku – rejestrowanych wartości. Dotyczyło to oczywiście identycznej procedury wymuszeniowej na modelu. Wielokrotność obciążania modelu była konieczna ze względu na jeden istniejący kanał rejestracyjny dostępny w programie obliczeniowym, co wymuszało odrębne uruchamianie pełnego przebiegu programu w celu uzyskania wykresu pełnego przebiegu danego parametru w jednym punkcie modelu (lub w jednym uśredniającym wynik kręgu pomiarowym).

### 4. POLE PRĘDKOŚCI PRZEMIESZCZENIA SKAŁ

Jakościowo-ilościowy obraz pola prędkości przemieszczeń jest możliwy do zapisania bezpośrednio na obrazie modelu w postaci strzałek barwnych, których kierunek wskazuje na trajektorię danej cząstki górotworu (nawet tkwiącej w strukturze blokowej), zaś długość jest proporcjonalna do prędkości przemieszczenia tej cząstki.

Model w momencie wejścia fali wstrząsu od strony jego górnej krawędzi przedstawiono na rysunku 1. Wynika z niego falisty charakter ruchu cząstek (fala zgęszczeniowo-rozgaźczeniowa) oraz reakcja (mały ruch ku górze) w środkowej partii rejonu górnej krawędzi. To ostatnie zjawisko można uważać za odchylenie od rzeczywistości górniczej, spowodowane skończoną (i niewielką) wysokością modelu. Na rysunku można stwierdzić ponadto początkową fazę ruchu środkowej części stropu bezpośrednio nad stropnicą oraz ruch spągu (ku górze) i ociosów węglowych – ku wyrobisku. Już na tym etapie dała zauważyć się drobna asymetria przemieszczeń pionowych (stropu) oraz poziomych (ociosu), polegająca na większej liczbie cząstek

będących w ruchu po lewej stronie modelu. Może to być związane z większym zsuwem odrzwi po tej stronie (0,24 m) w porównaniu z prawą stroną (0,12 m).



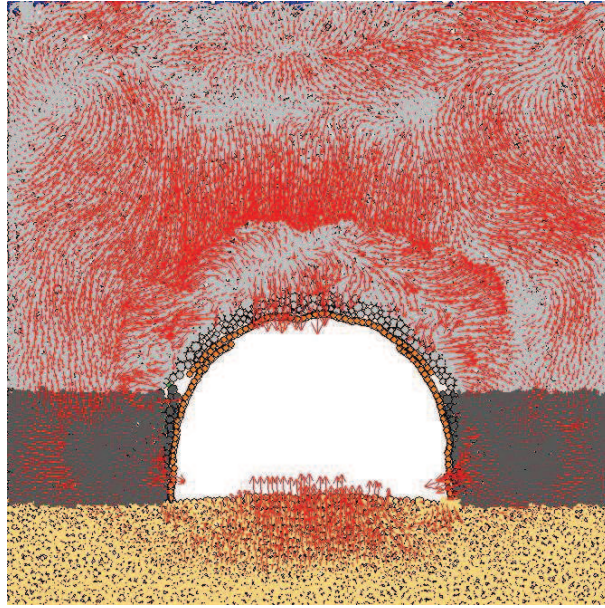
Rys. 1. Widok modelu (11×11×1 m) w momencie wejścia fali wstrząsu stropowego

Fig. 1. View of model (11×11×1 m) at the moment of roof tremor wave entry

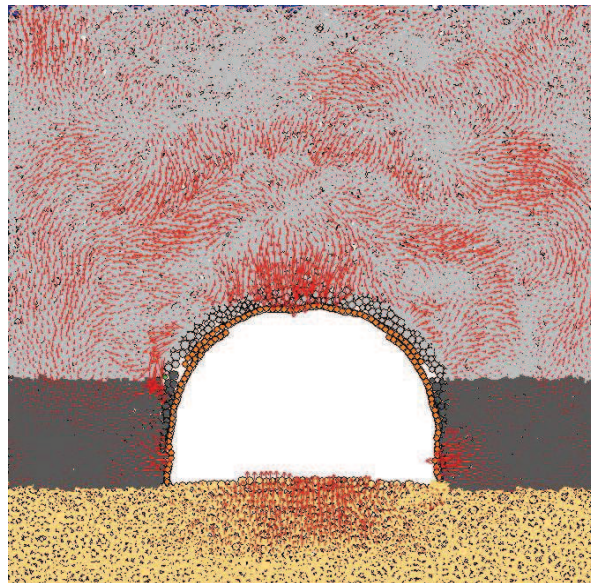
Należy zauważyć, że w tej fazie procesu deformacji modelu po wstrząsie elementy odrzwi zachowują właściwości sprężyste, zaś cząstki spągu znajdujące się pod stopami łuków ociosowych oraz ich najbliższe sąsiedztwo przemieszczają się minimalnie, lecz z dużą prędkością – ku dołowi.

Na rysunku 2 przedstawiono prędkość przemieszczenia cząstek górotworu po około 100 ms od chwili wejścia fali wstrząsu stropowego. Można na nim zauważyć powstanie w górotworze stropowym fali odbitej od górnej części obrysu wyrobiska i podążającej ku górze. Fala ta zderzyła się z podążającą ku dołowi kolejną fazą fali zgęszczeniowej – w wyniku czego na wysokości około 1,5 m nad stropnicą powstało chwilowe dynamiczne sklepienie sił. Wzrósł zsuw u odrzwi w złączach (do ok. 0,48 m w lewym i ok. 0,24 m w prawym), zaś w stropnicy i prawym łuku ociosowym wystąpiły drobne deformacje o charakterze plastycznym. Zarejestrowano również gwałtowny ruch dolnej części prawego ociosu ku wyrobisku i poszerzenie się strefy osiowego obciążenia stropnicy. O prawidłowej pracy odrzwi w tej fazie świadczy ciągły nacisk stóp łuków ociosowych na spąg, wyrażający się ruchem cząstek spągu w tych obszarach – ku dołowi. Na podkreślenie zasługuje również znaczny spadek sił kontaktowych (łańcuchy sił kontaktowych w barwach lokalnie występujących skał pokrywają cały model) w stosunku do sytuacji przedstawionej na rysunku 1, świadczący o ogólnym osłabieniu spągu – czego wyrazem jest wzrost powierzchni obszaru

spągu objętego ruchem wypiętrzającym. Podobne zjawisko zachodzi w ociosach, gdzie strefa intensywnego ruchu przesuwa się na obszar położony około 2 m w głębi ociosów.



**Rys. 2.** Widok modelu po upływie około 100 ms od wejścia fali wstrząsu stropowego  
**Fig. 2.** View of model after the passage of about 100 ms from the roof tremor wave entry



**Rys. 3.** Widok modelu po upływie około 300 ms od wejścia fali wstrząsu stropowego  
**Fig. 3.** View of model after the passage of about 300 ms from the roof tremor wave entry

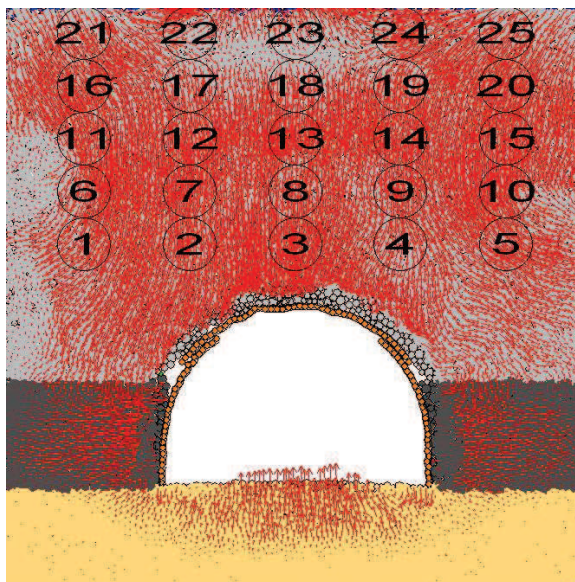
Na rysunku 3 przedstawiono końcową fazę oddziaływania wstrząsu na górotwór otaczający wyrobisko, która ma miejsce w modelu około 300 ms po wejściu fali wstrząsu stropowego. Na rysunku widać ogólny spadek intensywności ruchu cząstek górotworu, z zachowaniem obciążenia środkowej partii stropnicy i dalszy przyrost odkształceń plastycznych w elementach odrzwi. Całkowity zsuw lewego złącza w tej fazie wynosił 0,6 m, zaś prawego – 0,4 m.

## 5. SYSTEM POMIAROWY PARAMETRÓW DYNAMICZNEGO WYŁĘŻENIA GÓROTWORU

Pomiary i rejestracja parametrów wyłężenia górotworu w omawianym modelu obejmowały wiele specyficznych wielkości dla zjawisk dynamicznych. Różnią się one charakterem od parametrów wyłężenia statycznego, które – najogólniej ujmując – obejmują stosunek wielkości naprężeń maksymalnych do naprężeń krytycznych, w danym stanie naprężenia. W czasie pełnego cyklu badania modelu rejestrowano:

- ogólne pole prędkości i kierunek przemieszczeń dynamicznych cząstek górotworu (co omówiono powyżej),
- chwilowe maksymalne naprężenia dynamiczne w wybranych 25 punktach górotworu stropowego,
- chwilowy rozkład uśrednionego parametru SF (*Sliding Fraction*) w 25 strefach ograniczonych kręgami pomiarowymi,
- chwilowy rozkład uśrednionej makroporowatości górotworu w 25 strefach ograniczonych kręgami pomiarowymi,
- chwilowy rozkład gradientu prędkości ruchu pionowego i poziomego cząstek w liniowym profilu pionowym nad środkiem wyrobiska (24 punkty pomiarowe),
- ogólne zmiany energii kinetycznej całego wycinka górotworu (modelu).

Układ kręgów pomiarowych na modelu pokazano na rysunku 4. Punkty pomiarowe były usytuowane w centrach poszczególnych kręgów pomiarowych. Różne podejście do pomiarów (punkty lub kręgi) poszczególnych rejestrowanych parametrów wynikały z konieczności uśredniania niektórych wartości (stąd kręgi pomiarowe), jak również z możliwości i ograniczeń programistycznych. Można dodać, że w momencie tworzenia (generowania) cząstek modelu, każda z nich otrzymuje swój stały numer identyfikacyjny. Po procesie konsolidacji można wyznaczyć (wg współrzędnych) punkty, w których będzie prowadzona rejestracja poszczególnych parametrów. Program PFC, według wskazanych współrzędnych, odszukuje odpowiednie numery identyfikacyjne najbliższych podanych współrzędnych cząstek (wg ich geometrycznego środka), a następnie rejestruje przebieg danego parametru – w odniesieniu do wytypowanej cząstki modelu – w całym zaprogramowanym do rejestracji przedziale cykli obliczeniowych (pomimo niejednokrotnej zmiany położenia wytypowanej cząstki).



Rys. 4. Usytuowanie na modelu kręgów pomiarowych parametrów pola wyężenia

Fig. 4. Placement on the model of measurement circles of effort field parameters

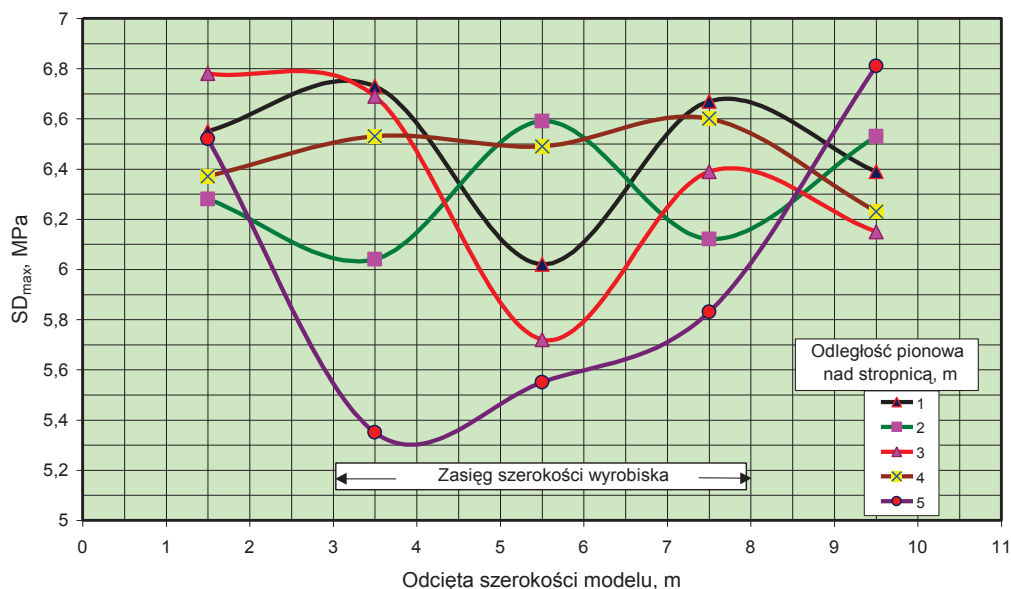
## 6. POLE DYNAMICZNYCH NAPRĘŻEŃ MAKSYMALNYCH

Dynamiczne naprężenia maksymalne w poszczególnych punktach określano z wykresów naprężeń składowych w kierunkach  $x$  oraz  $y$  (poziome i pionowe), wykonanych dla poszczególnych punktów, a następnie obliczano ich wypadkowe w płaszczyźnie modelu. Wykres tych naprężeń w stropie, w chwili około 100 ms po wejściu wstrząsu, pokazano na rysunku 5, gdzie poziomy wymiar wykresu odpowiada szerokości modelu, zaś poszczególne krzywe dotyczą odpowiednich poziomów nad górnym punktem stropnicy. Tak więc na przykład krzywa nr 1 dotyczy wysokości 1 m nad poziomem strzałki stropnicy (w jej początkowym położeniu) i oparta jest na wielkościach naprężenia zarejestrowanych w punktach nr 1, 2, 3, 4 i 5 itd. (rys. 4).

Z przedstawionego na rysunku 5 wykresu można wyciągnąć następujące wnioski, dotyczące rozkładu (pola) maksymalnych chwilowych naprężeń dynamicznych w górotworze stropowym badanego modelu:

- pomierzone wielkości naprężeń maksymalnych zawierają się w przedziale 5–7 MPa,
- największe i jednolite wielkości naprężeń sytuują się nad calizną węglową (punkty o współrzędnej  $x$  wynoszącej 1,5 oraz 9,5 m),
- nad osią podłużną wyrobiska ( $x = 5,5$  m) największy przyrost naprężenia zaobserwowano na wysokości 2,0 m nad stropnicą, natomiast spadek – na wysokości 1 m i 3 m nad stropnicą,
- najmniejsze wartości naprężenia stwierdzono w górnej części modelu, w obrębie współrzędnej  $x = 3–8$  m, co świadczy o chwilowym odprężeniu tego poziomu górotworu po przejściu w dół fali zgęszczeniowej.





Rys. 5. Rozkład maksymalnych chwilowych naprężeń dynamicznych w stropie około 100 ms po wstrząsie górotworu ( $E_k = 3 \times 10^5$  J)

Fig. 5. Distribution of maximum temporary dynamic stresses in the roof about 100 ms after the rock mass tremor ( $E_k = 3 \times 10^5$  J)

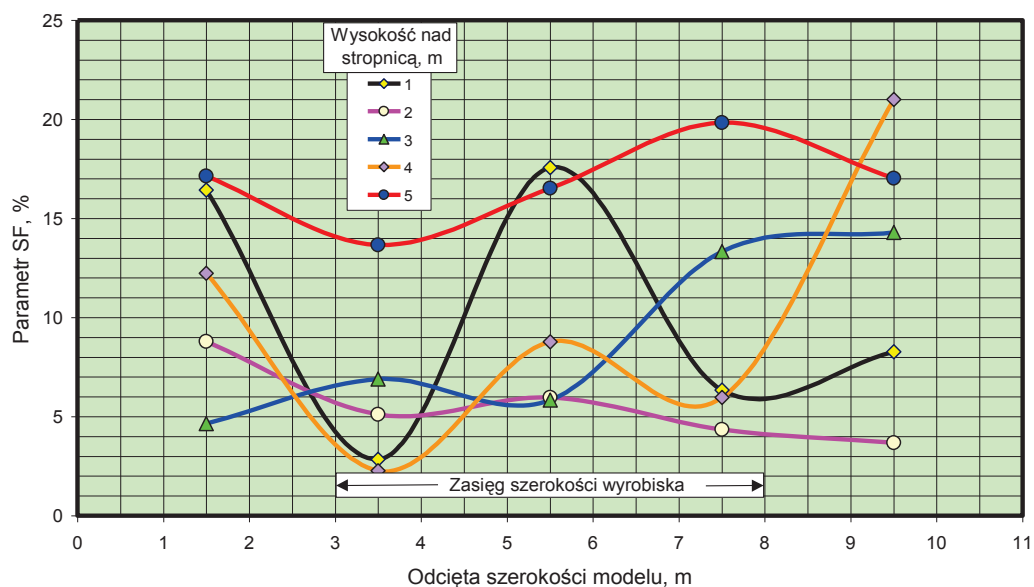
Można stwierdzić, że istnienie i wymiary wyrobiska wpływają w znacznym stopniu na wielkość naprężeń dynamicznych w skałach stropowych. Zaznacza się przy tym falowy charakter zmiany naprężeń w pionie. Przymyślnie, w chwili wykonania rejestracji poziomy w przybliżeniu front fali zgęszczeniowej, spowodowanej wstrząsem, znajdował się na wysokości około 2 m nad wyrobiskiem.

## 7. POLE INTENSYWNOŚCI RUCHÓW POŚLIZGOWYCH (PARAMETR SF)

Parametr SF (*Sliding Fraction*) był rejestrowany w modelu jako wielkość średnia każdego z jednometrowej średnicy kręgów pomiarowych (rys. 4). Oznacza on procentowy udział tych cząstek w badanym kręgu, które biorą w danej chwili udział w przemieszczeniach o charakterze poślizgowym. Charakteryzuje on więc znaczne międzycząstkowe przemieszczenia względne – co jest wyrazem odkształcenia postaciowego badanego ośrodka i stopnia jego wyciężenia. Rozkład przestrzenny chwilowych wartości SF pokazano na rysunku 6.

Z rysunku tego można wyciągnąć następujące wnioski:

- wielkość SF zmieniała się w modelu (część stropowa) w granicach od 2 do 21%,
- poziom największego i jednolitego udziału ruchów poślizgowych (14–20%) jest położony na wysokości 5 m nad stropnicą, co można tłumaczyć reakcją górnego pasa modelu na krótkie liniowe obciążenia dynamiczne,



**Rys. 6.** Rozkład przestrzenny chwilowych wartości parametru SF w stropie około 100 ms po wstrząsie górotworu  
**Fig. 6.** Spatial distribution of temporary SF parameter values in the roof about 100 ms after the rock mass tremor

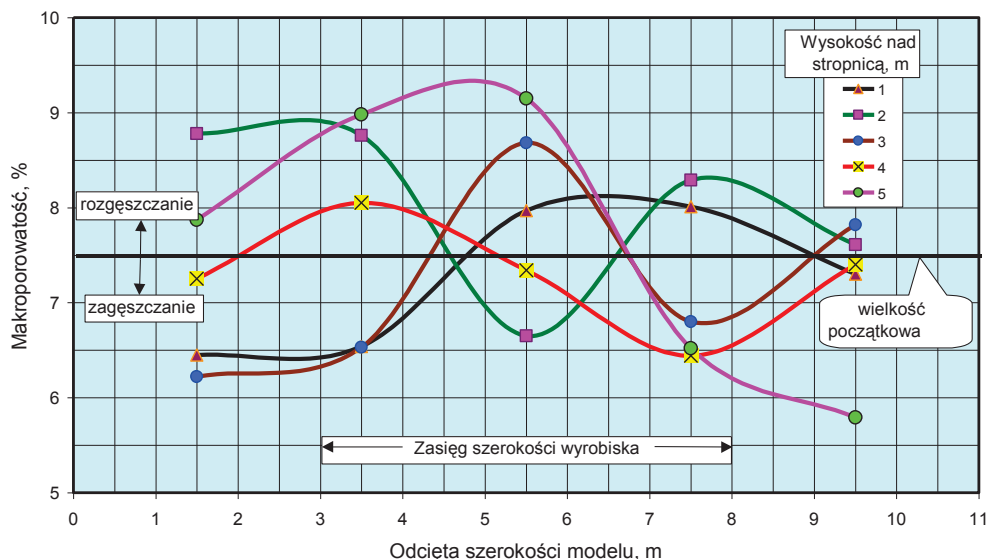
- najmniejsze udziały ruchów poślizgowych występują (w obrębie szerokości wyrobiska) w środkowym pasie wysokości modelu (2–4 m nad wyrobiskiem),
- największe zróżnicowanie SF występuje na wysokości około 1 m nad wyrobiskiem, z tym, że maksymalne wielkości (17,5%) występują nad osią podłużną wyrobiska.

## 8. POLE ZMIAN CHWILOWEJ MAKROPOROWATOŚCI GÓROTWORU STROPOWEGO

Makroporowatość modelowego górotworu stropowego mierzono w obrębie każdego z 25 kręgów pomiarowych (rys. 4). Należy przypomnieć, że średnia makroporowatość modelu nadana mu w czasie konsolidacji wynosiła 7,5% – co mieści się w przedziale pierwotnej naturalnej porowatości górotworu karbońskiego. Tak więc zmierzone różnice w stosunku do wymienionej wielkości można rozpatrywać obszarowo jako strefy chwilowego zagęszczenia lub rozrzedzenia górotworu stropowego. W drugim z wymienionych przypadków (rozrzedzenie) oznacza to całkowite lub częściowe zerwanie więzów międzycząstkowych górotworu – ze względu ma bardzo małą odporność skał na odkształcenia rozciągające – czyli powstanie w górotworze strefy spękanej (nieciągłej). Obraz zmian makroporowatości w modelu po wstrząsie górotworu pokazano na rysunku 7. Z rysunku tego wynikają następujące główne wnioski:

- wymuszone wstrząsem zmiany makroporowatości nie przekraczają 2% – zarówno po stronie rozrzedzenia, jak i zagęszczenia,

- zwraca uwagę asymetria pozioma omawianych zmian, szczególnie na poziomach 1 i 5 m nad wyrobiskiem, czyli na poziomie największego oraz najmniejszego oddziaływania wstrząsu,
- najbardziej regularne i symetryczne wpływy wstrząsu stwierdzono na wysokości 2 i 3 m nad obudową, z tym, że na wysokości 2 m nad osią wyrobiska było to zagęszczenie, zaś na wysokości 3 m – rozrzedzenie górotworu.



Rys. 7. Rozkład przestrzenny chwilowej makroporowatości skał stropowych około 100 ms po wstrząsie górotworu

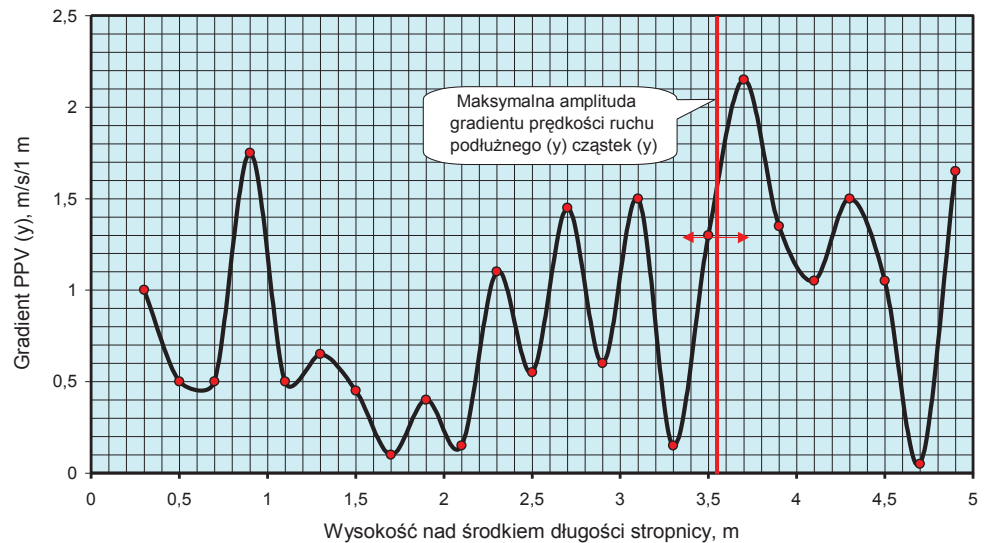
Fig. 7. Spatial distribution of temporary macroporosity of roof strata about 100 ms after the rock mass tremor

## 9. GRADIENT PRĘDKOŚCI RUCHU PODŁUŻNEGO I POPRZECZNEGO

W przypadku brył złożonych z ośrodków stałych, w całości będących w ruchu lub w całości poddanych oddziaływaniom zewnętrznym, kryterium prędkościowe stanu wyężenia – stosowane z powodzeniem dla większych obszarów górotworu (Kidybiński 1999) – wydaje się nie mieć zastosowania. Istotą wyężenia w tym przypadku mogą być natomiast ściśle lokalne **różnice** przemieszczeń, a zwłaszcza różnice prędkości tych przemieszczeń, one bowiem powodują największe chwilowe spiętrzenia lokalnych naprężeń generujących powstawanie pęknięć.

Mając to na uwadze w pionowym środkowym przekroju części stropowej modelowanego górotworu założono zagęszczony ciąg punktów pomiarowych i rejestrowano w nich występujące w czasie wstrząsu gradienty prędkości ruchu podłużnego cząstek (zgodnego z kierunkiem rozprzestrzeniania się fali podłużnej) i oddzielnie – poprzecznego ruchu cząstek (prostopadłego do tego kierunku) (rys. 8 i 9). Na obu rysunkach jest wyraźnie uwidoczniona zmienna amplituda skokowo zmieniających się wartości gradientu PPV (*Peak Particle Velocity*), z tym, że ruchy o amplitudzie maksymalnej w pierwszym przypadku sytuują się na wysokości około 3,5 m nad

wyrobiskiem, w drugim zaś – na wysokości około 1,5 m nad wyrobiskiem. Oznacza to, że największa jednostkowa energia powodująca uszkodzenie górotworu stropowego, wydziela się na wymienionych poziomach nad wyrobiskiem. Jeśli – co bardzo prawdopodobne – pionowo przemieszczająca się podłużna fala zgęszczeniowo-rozgaźczeniowa niesie ze sobą głównie energię powodującą rozwarstwienie skał stropowych, zaś fala poprzeczna – poziome siły dezintegrujące górotwór w tym kierunku, to można stwierdzić, że wymienione wyżej poziomy nad wyrobiskiem korytarzowym mają decydujące znaczenie w uszkodzaniu lub niszczeniu skalnego stropu wyrobiska w czasie stropowego wstrząsu górotworu. Dla szerokości wyrobiska wynoszącej około 5 m masa skał odniesiona do szerokości wyrobiska i poziomu 1,5 m nad obudową wynosi około 20 ton, zaś poziomu 3,5 m – około 45 ton. Odpowiada to maksymalnym siłom statycznego, chwilowego obciążenia pionowego wynoszącym odpowiednio 200 oraz 450 kN. Wartości te w przypadku przybliżonej interpretacji dynamicznej powinny być odnoszone do konkretnej energii kinetycznej wstrząsu stropowego (patrz p. 10).

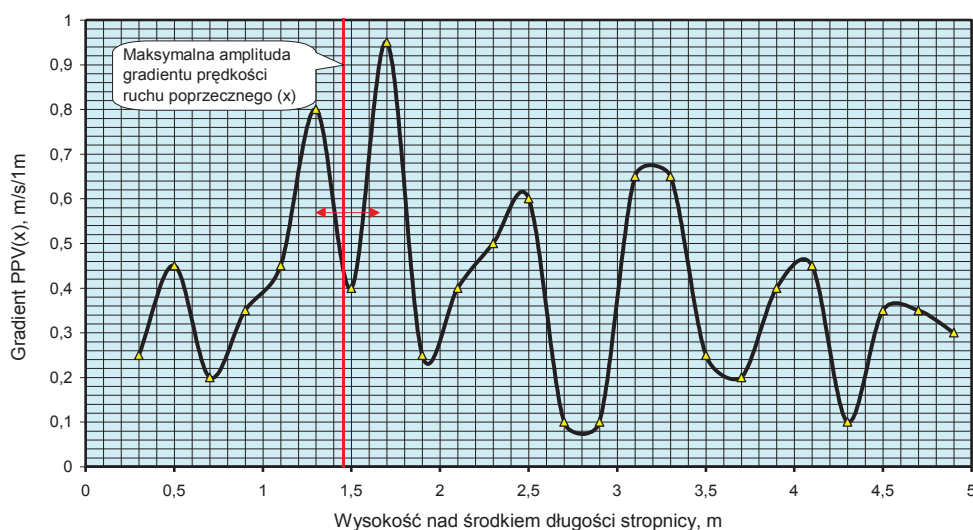


**Rys. 8.** Rozkład gradientu prędkości ruchu podłużnego (y) cząstek skał stropowych około 0,1 s po wstrząsie górotworu (pionowy przekrój osiowy)

**Fig. 8.** Distribution of the velocity gradient of longitudinal movement (y) of roof strata particles about 0.1 s after the rock mass tremor (vertical axial section)

Majcherczyk i współautorzy (2007) w publikacji będącej podsumowaniem długotrwałych pomiarów i obserwacji ekstensometrycznych i endoskopowych w otworach wiertniczych, wykonanych w stropach wyrobisk korytarzowych kopalni węgla, napisali: „Przeprowadzone pomiary wykazują, że warstwy takie (tzn. odspojone od masywu – przyp. autora) mają najczęściej grubość 1,5–3,5 m i mogą pracować niezależnie od innych pakietów skalnych...”. Cytowany fragment świadczy o zgodności wyników dynamicznego modelowania z wynikami pomiarów rozwar-

stwień górotworu stropowego, będących zapewne wynikiem zarówno ruchów statycznych, jak i sumy poprzednich oddziaływań dynamicznych na strop.



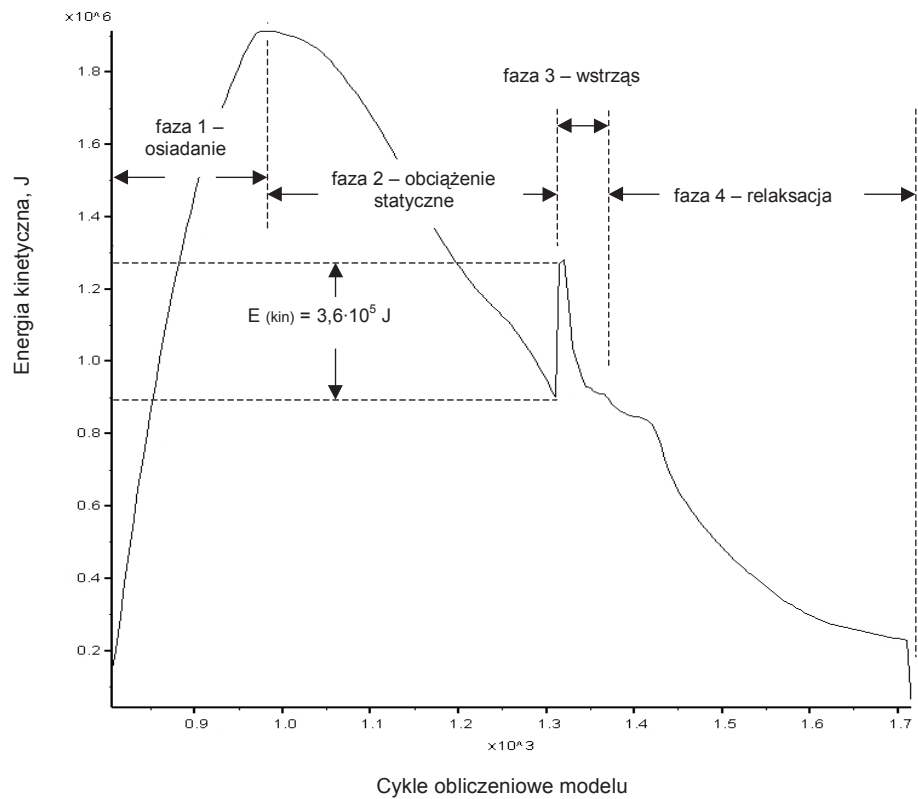
**Rys. 9.** Rozkład gradientu prędkości ruchu poprzecznego (x) cząstek skał stropowych około 100 ms po wstrząsie górotworu (pionowy przekrój osiowy)

**Fig. 9.** Distribution of the velocity gradient of transverse movement (x) of roof strata particles about 100 ms after the rock mass tremor (vertical axial section)

## 10. ENERGIA KINETYCZNA PRZEMIESZCZEŃ GÓROTWORU

Rozważania na temat statycznych, a zwłaszcza dynamicznych obciążeń obudowy wyrobisk korytarzowych przez otaczający górotwór powinny mieć odniesienie do energii kinetycznej zaistniałych wstrząsów. Jest ona stosunkowo łatwa do oszacowania w przypadku modelowego obciążenia udarem masy, bowiem jest ona proporcjonalna do wielkości masy udarowej oraz kwadratu prędkości przemieszczenia tej masy. W przypadku natomiast krótkiego w czasie impulsu siły równomiernie rozłożonej na górnych cząstkach rozpatrywanego górotworu stropowego (co ma miejsce w omawianym trybie modelowania) – ocena energii kinetycznej może być jedynie przybliżona. Dla omawianego modelu została ona przez autora oceniona analitycznie na około  $2,3 \cdot 10^5$  J.

W celu sprawdzenia tej wielkości zaprogramowano i zrealizowano – w pełnym cyklu obciążenia modelu – rejestrację całkowitej jego energii kinetycznej (rys. 10). Składa się ona – w początkowym okresie – z dużej lecz spokojnie wydzielanej, a następnie rozpraszanej – energii osiadania górotworu na obudowie (wypełniania przez odłamki i bryły skalne strefy kontaktu obudowa/górotwór) – faza 1 i 2, następnie – krótkiego impulsu energii wstrząsu – faza 3, zaś w końcu – spokojnego rozpraszania energii po wstrząsie – faza 4.



**Rys. 10.** Wykres przebiegu wydzielania się sumarycznej energii kinetycznej w czasie obciążania modelu

**Fig. 10.** Diagram of the run of summary kinetic energy release during model loading

Ocena energii kinetycznej tą drogą dała wynik  $3,6 \cdot 10^5 J$ . Uśredniając obie wartości energii można stwierdzić, że w przypadku każdego z realizowanych na omawianym modelu wstrząsów wynosiła średnio  $3 \cdot 10^5 J$ . Należy także wspomnieć, że energia kinetyczna wstrząsu w obrębie bliskiego otoczenia wyrobiska jest czymś odmiennym od energii sejsmicznej wstrząsu w jego ognisku (Dubiniński, Mutke, Barański 2006; Lurka, Stec 2006) bądź energii sejsmoakustycznej, pochodzącej ze zniszczenia więzów między dyskami modelu realizowanego w kodzie PFC (Hazzard, Young 2004).

## WNIOSKI

Modele cząstkowe górotworu otaczającego wyrobisko (w kodzie PFC) mogą być wykorzystywane do realistycznego – zdaniem autora – prognozowania parametrów pola dynamicznego wyteżenia górotworu otaczającego wyrobisko korytarzowe, a co z tego wynika – również dynamicznego obciążenia obudowy tego wyrobiska. Modele te bowiem są faktycznie realizowane w skali 1:1, z dużą dokładnością obliczeniową, mogą w pełni uwzględniać elementy podporności i podatności wybranego typu

obudowy (oraz materiału, z którego jest ona wykonana), jej geometrię, a także początkowy stan dezintegracji górotworu w jej otoczeniu.

Zrealizowane badania wykazały, że cykl głównych przemieszczeń górotworu zalegającego nad wyrobiskiem – po wstrząsie o energii kinetycznej około  $3 \cdot 10^5$  J (przyłożonym w czasie ok. 100 ms) trwa około 400–500 ms. W tym czasie (do 0,5 s) naprężenia dodatkowe w skałach stropowych oscylują w przedziale 5–7 MPa, 2–21% objętości skał stropowych jest poddawanych ruchom poślizgowym, wymuszone zmiany makroporowatości górotworu stropowego osiągają  $\pm 2\%$  w stosunku do średniej początkowej (w tym przypadku 7,5%), zaś amplituda gradientów prędkości ruchów cząstek skał wykazuje istnienie w stropie wyrobiska dwóch wyraźnych poziomów dezintegracji – na wysokości około 1,5 oraz 3,5 m nad wyrobiskiem. Otrzymane wykresy całkowitej energii kinetycznej modelu w pełnym cyklu obciążenia wskazują, że uszkodzenie skał stropowych nie zależy od sumarycznej energii kinetycznej lecz od gradientu jej przyrostu oraz spadku – w czasie.

#### Literatura

1. Cundall P.A. (1971): *Computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems*. Proc. Symp. ISRM, Vol. 1 (ref. II–8). Nancy.
2. Dubiński J., Konopko W. (2000): *Tapania, ocena, prognoza, zwalczanie*. Katowice, GIG.
3. Dubiński J., Mutke G., Barański A. (2006): *Nowe kryteria empirycznej oceny wpływu wstrząsów górniczych na powierzchnię w rejonie kopalń rybnickich*. XIII Międzyn. Konf. Nauk.-Techn. nt. Górnicze Zagrożenia Naturalne. Katowice, GIG, s. 38–51.
4. Hazzard J.F., Young R.P. (2004): *Dynamic modelling of induced seismicity*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41, s. 1365–1376.
5. ITASCA (2004): *PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions*. Theory and Background, Minneapolis.
6. Kidybiński A. (1999): *Kryteria uszkodzenia lub zniszczenia wyrobisk korytarzowych i komorowych wskutek wstrząsów*. Bezpieczeństwo i Ochrona Pracy w Górnictwie nr 5.
7. Lurka A., Stec K. (2006): *Określenie radiacji drgań sejsmicznych na podstawie parametrów ogniska wstrząsu określonego metodą tensora momentu sejsmicznego*. XIII Międzyn. Konf. Nauk.-Techn. nt. Górnicze Zagrożenia Naturalne. Katowice, GIG, s. 202–208.
8. Majcherczyk T., Małkowski P., Niedbalski Z. (2007): *Badania in situ dla oceny wpływu czasu na zasięg strefy spękań oraz rozwarstwienie skał stropowych w wybranych wyrobiskach korytarzowych*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej. Kraków, IGSMiE PAN s. 731–740.
9. Patyondy D.O., Cundall P.A. (2004): *A bonded-particle model for rock*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41.

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