

Antoni Kidybiński*

STREFY STATECZNOŚCI GÓROTWORU STROPOWEGO WYROBISKA KORYTARZOWEGO PRZY OBCIĄŻENIU STATYCZNO-DYNAMICZNYM

Streszczenie

W artykule omówiono strefowy układ stateczności jednorodnych skał stropowych wyrobiska korytarzowego w czasie wypełniania się bryłami skalnymi przestrzeni między stropnicą a obrysem wyrobiska, następnie obciążenia statycznego – związanego z ruchem skał wyżej leżących oraz obciążenia dynamicznego – zaistniałego wskutek wystąpienia wstrząsu stropowego. Przeanalizowano wartości parametrów stateczności, występujących w trzech strefach wysokościowych stropu, których granice poziome są określone maksymalną amplitudą przyśpieszenia drgań pionowych oraz poziomych stropu podczas wstrząsów górotworu – co determinuje formę uszkodzenia stropu w poszczególnych strefach. Analizowano zmiany makroporowatości górotworu, procentowego udziału ruchów poślizgowych, naprężenia normalnego (poziomego i pionowego) oraz ścinającego, a także pionowego obciążenia obudowy i jej elementów – w czasie cyklu obciążenia obejmującego etapy: ewolucji kontaktu, obciążenia statycznego oraz wstrząsu.

Badania zrealizowano metodą modelowania numerycznego w skali 1:1 za pomocą techniki spoistych modeli cząstkowych (*Bonded Particle Model*) dla wyrobiska z obudową ŁP9V25, przy użyciu programu opracowanego przez autora artykułu w kodzie PFC2D. Stanowiły one część większego projektu badawczo-rozwojowego MNiSW pt. „Klasyfikacja stateczności górotworu przy obciążeniach statyczno-dynamicznych wraz z metodą i instrukcją doboru stałoszczędnej obudowy wyrobisk korytarzowych w aktywnych sejsmicznie obszarach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego”.

Roof stability zones of longwall gateroad at joint static and dynamic load

Abstract

In the paper, a zone system was discussed of stability of homogeneous roof rocks of gateroad during self-filling the space between roof bar and outline of excavation with rock blocks, and then during the static load connected with the movement of higher lying rocks, as well as the dynamic load arising as a result of occurrence of roof tremor. Values of stability parameters were analysed, occurring in three heights' zones of roof, which horizontal borders are defined by maximal amplitude of acceleration of perpendicular as well as horizontal vibrations of the roof during bumps, what determines the form of roof damage in individual zones. Changes of rockmass macroporosity were analysed, proportional part of slip motions, normal stress (horizontal and vertical) and tangential, as well as perpendicular load of support and its elements during the time cycle of load including the following stages: development of contact, static load and the bump. Researches were realized with a numeric modeling method in scale 1:1 with the help of bonded particle models technique for excavation with ŁP9V25 support, with the use of program developed in code PFC2D by the author of present paper. They were part of larger research-development project of Ministry of Science and Higher Education, titled "Classification of rockmass stability at static-dynamic loads together with method and instruction of selection steel saving support of gateroads in seismically active areas of Upper-Silesian Coal Basin".

* Główny Instytut Górnictwa.

WPROWADZENIE

W miarę prowadzenia robót górniczych w kopalniach węgla Górnośląskiego Zagłębia Węglowego na coraz to głębszych poziomach – nasilają się przejawy ciśnienia górotworu w wyrobiskach korytarzowych, szczególnie zaś – okresowe wstrząsy górotworu. Staje się bowiem regułą, że statycznym obciążeniom obudowy wyrobisk korytarzowych towarzyszą – już nie sporadycznie, jak przy płytszej eksploatacji, lecz stale powtarzające się dynamiczne obciążenia obudowy, wywoływane wstrząsami górotworu.

W związku z tym nasuwa się wiele podstawowych pytań na temat mechanizmów superpozycji statycznych i dynamicznych obciążeń obudowy, szczególnie zaś mechanizmów naprężeniowo-przemieszczeniowych zjawisk, zachodzących przy równoczesnym występowaniu obciążeń statycznych i dynamicznych.

Od odpowiedzi na te pytania zależy w znacznej mierze efektywność przeciwdziałania skutkom zmiennych obciążeń obudowy, zaznaczających się w postaci nadmiernej jej deformacji oraz stopnia uszkodzenia lub zniszczenia otaczającego wyrobiska górotworu. Można dodać, że skały bezpośrednio otaczające przekrój poprzeczny wyrobiska ulegają – w procesie statyczno-dynamicznych obciążeń – znacznej dezintegracji (powstawanie bloków i odłamków skalnych), co powoduje, że na podstawie modelowania górotworu otaczającego wyrobisko, za pomocą modeli ośrodków ciągłych (takich jak modele elementów skończonych, różnic skończonych i obciążeń brzegowych), nie w pełni można odwzorować mechanizm stopniowego rozpadu górotworu bezpośrednio otaczającego wyrobisko górnicze.

Na tym tle korzystnie wyróżniają się modele numeryczne realizowane metodami **elementów odrębnych** (*distinct element methods*), a szczególnie metoda spoiстых modeli cząstkowych (*Bonded Particle Models*) – pozwalające na początkowe powiązanie wzajemne cząstek więzami stykowymi i równoległymi – do postaci odpowiadającej jednorodnej litej skale, następnie – ustalenie spękań i szczelin (*joints*) przez likwidację wspomnianych więzów wzdłuż linii bądź płaszczyzn odpowiadających naturalnej podzielności górotworu zbudowanego ze skał klastycznych (osadowych). Ponadto, metoda ta pozwala na tworzenie wokół modelowego wyrobiska sztywnych zgrupowań szeregu przyległych cząstek (*clumps*), na przykład – mających formę prostopadłościanów – co pozwala na wykorzystanie obserwacji górniczych w celu określenia wielkości i formy bloków skalnych tworzących się w czasie spontanicznego przemieszczania się spękanych skał w bezpośrednim sąsiedztwie przekroju wyrobiska. Wielkości więzów międzycząstkowych (mających wymiar siły oraz określoną sztywność) mogą być w metodzie BPM tak dobrane, aby ściśle odpowiadały właściwościom mechanicznym skał zbadanych w laboratorium.

W metodzie BPM korzysta się z kodu PFC2D (ITASCA 2004) lub PFC3D firmy ITASCA i, w przeciwieństwie do kodów różnic skończonych (np. programu FLAC), jest wymagane rozpisanie, do każdego postawionego zadania obliczeniowo-graficznego, kompletnego własnego programu operacyjnego w kodzie PFC z ewentualnymi wstawkami własnych funkcji w języku FISH. Podstawy wykorzystania tego kodu w mechanice skał stworzyli w 2004 roku P.O. Potyondy i P.A. Cundall (2004). Autor niniejszego artykułu opracował ostatnio, przy zastosowaniu kodu PFC2D,

metodykę modelowania wyrzutów metanu i węgla w przodku wyrobiska korytarzowego – jako procesu pęknięcia i przemieszczania się rozdrabniającego się węgla w złożu fluidalnym metanu (Kidybiński 2007a; 2007b; 2007c).

1. WYROBISKO W GÓROTWORZE KARBOŃSKIM

Próby zastosowania BPM do większych wycinków górotworu otaczających przekrój poprzeczny wyrobiska korytarzowego wykazały (Kidybiński 2007d; 2007e), że metoda ta z powodzeniem nadaje się do modelowania współdziałania podatnej łukowej obudowy stalowej (ŁP9V25) z otaczającym ją górotworem karbońskim, pod warunkiem zastosowania w modelach reprezentatywnych cech poszczególnych typów skał (iłowce, piaskowce, węgiel kamienny), odpowiedniego kryterium uplastycznienia stali w łukach obudowy oraz – co ważne – odpowiednich par sił dociskowych przyłożonych do cząstek tworzących złącza (zakładki) łuków ociosowych ze stropnicą – w celu zapewnienia zsuwej pracy złącz.

Przy modelowaniu przyjęto założenie, że łukowy wyłom w skałach stropowych przebiega w odległości 0,25 m od zewnętrznej krawędzi stropnicy, przeto ruch skał (oraz ich rozdrobnienie) przebiega w trzech etapach, a mianowicie:

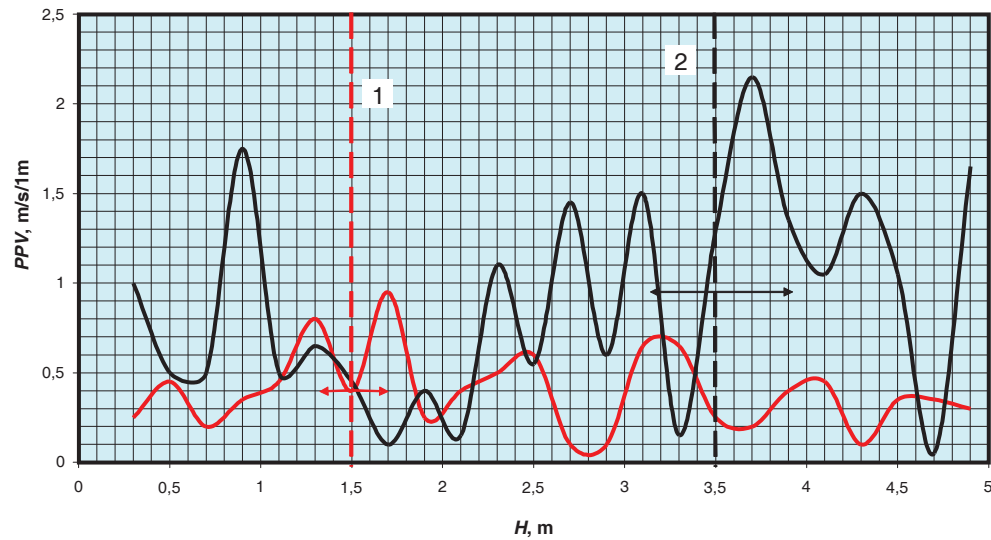
- 1) grawitacyjne wypełnienie pustki między obudową a skałami stropowymi przez pękające i rozdrabniające się bryły skalne (w tym przypadku – iłowca karbońskiego),
- 2) statyczny nacisk górotworu na elementy odrzwi spowodowany odspojeniem się od masywu i osiadaniami wyższych warstw stropu bezpośredniego (poza strefą znacznego rozdrobnienia), a także pękaniem węgla w ociosach i wynikającym z tego naciskiem poziomym na łuki ociosowe (zwłaszcza w ich górnej części),
- 3) skokowy przyrost obciążenia (głównie pionowego stropnicy) spowodowany transmisją energii kinetycznej w górotworze, wywołanej symulowanym wstrząsem sejsmicznym na górnej granicy modelu.

2. DYNAMICZNA NIEJEDNORODNOŚĆ GÓROTWORU STROPOWEGO

Podczas systematycznego, wielopunktowego rejestrowania w modelach wielu statycznych i dynamicznych parametrów górotworu, w przebiegu wymienionych wyżej trzech etapów deformacji górotworu zauważono znaczne różnice amplitudy dynamicznego przyspieszenia ruchu podłużnego (pionowego) i poprzecznego (poziomego), wywołanej falą deformacji stropu spowodowaną wstrząsem (rys. 1) (Kidybiński 2007d, e).

Z rysunku wynika, że maksymalna amplituda przyspieszenia ruchu podłużnego (y) występuje na wysokości 3,5 m nad kluczem stropnicy, zaś ruchu poprzecznego (x) – na wysokości (odpowiednio) wynoszącej 1,5 m. Mając na uwadze, że ruch pionowy podłużnej fali zgęszczeniowo-rozrzedzającej wywołuje w skałach osadowych przede wszystkim efekt **rozwarstwienia** skał stropowych – można przypuszczać, że pakiet o grubości 3,5 m stropu bezpośredniego podlega intensywnemu procesowi rozwarstwienia (oddzielenia od siebie) pojedynczych warstw, wykazujących na swoich granicach istotne zróżnicowanie litologiczne, na przykład większy udział frakcji ilastej

i pylastej w pierwotnych osadach. Fala poprzeczna (ścinająca) jest natomiast przyczyną wszechstronnego niszczenia struktury skał w warstwie o grubości około 1,5 m, położonej bezpośrednio nad wyrobiskiem.



Rys. 1. Gradient prędkości PPV ruchu podłużnego (y) oraz poprzecznego (x) skał stropowych bezpośrednio po wstrząsie górotworu (0,1 s): H – wysokość nad środkiem długości stropnicy, maksymalna amplituda przyspieszenia ruchu poprzecznego (x) – (1), podłużnego (y) – (2)

Fig. 1. Gradient of velocity PPV of longitudinal (y) and transverse (x) motion of roof rocks directly after the bump (0.1 s): H – height above the middle of roof bar length, maximal amplitude of acceleration of motion transverse (x) – (1), longitudinal (y) – (2)

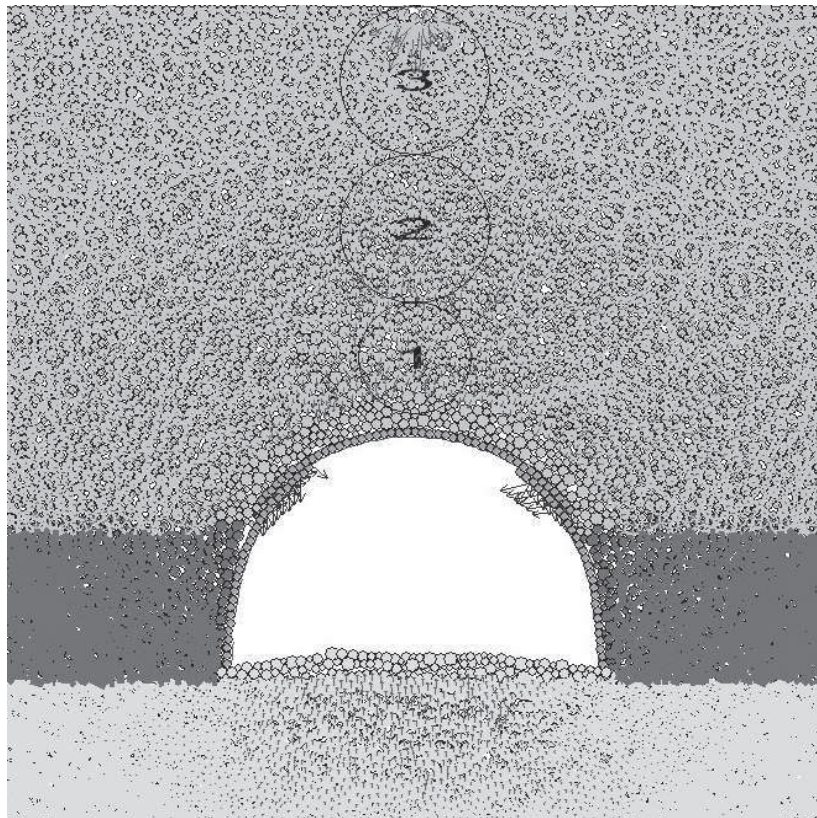
Jest charakterystyczne, że wymienione dwa poziomy nad wyrobiskiem (1,5 oraz 3,5 m) okazały się – jak wynika z pomiarów i obserwacji endoskopowych w otworach stropowych wykonanych przez zespół pracowników naukowych AGH w jednej z kopalń węglowych GZW (Majcherczyk, Małkowski, Niedbalski 2007) – poziomami najczęstszego występowania w stropach wyrobisk węglowych szczelin rozwarstwieniowych.

Można więc uznać, że pierwotnie jednorodne skały stropu bezpośredniego pokładów węglowych – pod wpływem osiadania nad wyrobiskami korytarzowymi oraz wstrząsów górotworu – przyjmują niejednorodną strukturę geomechaniczną, co może mieć istotny wpływ na ich odmienną **stateczność**.

3. STREFOWE BADANIA PARAMETRÓW STATECZNOŚCI STROPU

Do oceny zmienności w pionie parametrów stateczności jednorodnego geologicznie stropu autor opracował program symulacyjny i zbudował model numeryczny o wymiarach $11 \times 11 \times 1$ m, obejmujący w stropie łożysko o miąższości 7,0 m, poniżej pokład węglowy o miąższości 2,0 m oraz spąg mułowcowy o miąższości 2,0 m (rys. 2). Wyrobisko korytarzowe w modelu zostało wyposażone w obudowę łukową

ŁP9V25 ze złączami ciernymi zrealizowanymi przez przyłożenie do poszczególnych dysków tworzących złącze (zakładkę) pary sił przeciwsobnych, skierowanych prostopadle do lokalnego usytuowania w zakładce odcinka łuku ociosowego. Na rysunku 2 przedstawiono zaawansowaną fazę obciążenia statycznego (zaistniały zsuw w złączach po ok. 0,5 m), po wypełnieniu strefy kontaktowej górotwór – obudowa, wymuszeniu obciążenia statycznego, wstępnym wypiętrzeniu spągu oraz spękaniu górnych partii ociosów węglowych.



Rys. 2. Widok modelu w czasie wstrząsu stropowego: 1, 2, 3 – zasięgi kręgów pomiarowych
Fig. 2. View of model in time of roof tremor: 1, 2, 3 – range of measurement circles

Pionowe obciążenie jednostkowe modelu wynosiło około 5,0 MPa, zaś stal tworząca odrzwi obudowy znajdowała się jeszcze w fazie sprężystej. Model pokryto obrazem międzycząstkowych sił stykowych (*contact forces*) w kolorach odpowiadających oznaczeniom trzech zastosowanych w modelu skał, w celu uwidocznienia stref odprężonych w stropie, spągu i w ociosach – gdzie skały są rozdrobnione lub występują w postaci prostopadłościennych bloków. Czerwonymi strzałkami na rysunku zaznaczono wektory kierunków i prędkości przemieszczania się cząstek modelu – spowodowanego symulowanym wstrząsem stropowym o energii kinetycznej $3 \cdot 10^5$ J. Ponadto, na rysunku zaznaczono zasięgi trzech kręgów pomiarowych (1, 2 oraz 3),

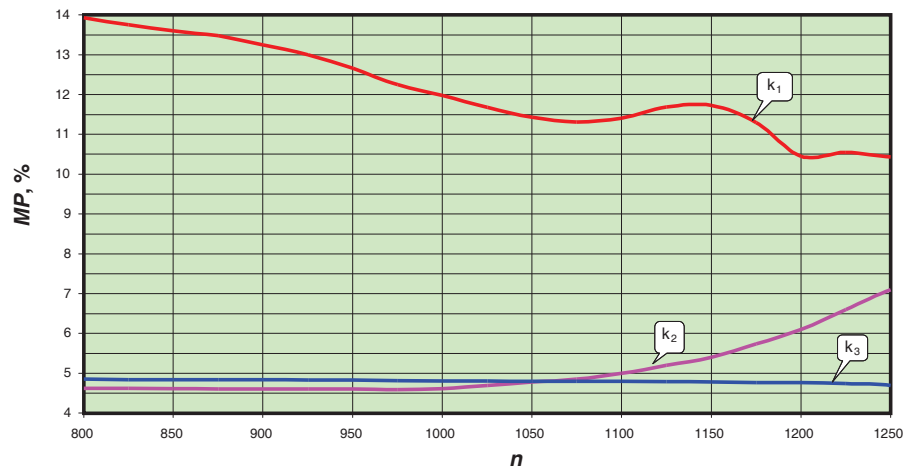
w których realizowano zapisy średnich, w każdym kręgu, wartości kilku wskaźników stateczności stropu. Pozycja kręgów pomiarowych odpowiada trzem omówionym powyżej zasięgom stref zróżnicowanego oddziaływania dynamicznego, a mianowicie 0–1,5, 1,5–3,5 oraz 3,5–5,5 m.

Z rysunku 2 (zasięg występowania czerwonych strzałek) wynika, że strefa bezpośredniego dynamicznego oddziaływania wstrząsu ogranicza się do wysokości dwóch pierwszych kręgów pomiarowych, czyli do odległości około 3,5 m ponad poziomem środka stropnicy w jej pierwotnym położeniu. Oznacza to, że skały stropowe występujące wyżej niż około 3,5 m nad stropem wyrobiska jedynie transmitują energię kinetyczną wstrząsu, same natomiast nie ulegają przemieszczeniu pod jej wpływem. W obrębie pokładu węglowego (ociosy wyrobiska) wstrząs wywołuje przemieszczenia głównie trójkątnych stref brzegowych, które uległy uprzednio spękaniu pod wpływem obciążeń statycznych.

Na rysunku 2 można ponadto zauważyć, że niespękane partie ociosów transmitują energię kinetyczną wstrząsu do warstwy tworzącej spąg, pod wpływem czego środkowa jego część ulega odprężeniu (spękaniu) oraz wypiętrzaniu do wyrobiska.

4. ZMIANY MAKROPOROWATOŚCI STROPU

Podstawowym parametrem charakteryzującym stateczność skał stropowych jest stopień ich zruszenia, wyrażony gradientem makroporowatości. Pierwotną konsolidację modelu realizowano do porowatości około 5–7%, zaś w czasie badania modelu ulegała ona strefowo (trzy kręgi pomiarowe) znacznemu zróżnicowaniu, co przedstawiono na rysunku 3. Najmniejsze zmiany makroporowatości modelowanego górotworu zachodziły w kręgu 3 (wysokość od 3,5 do 5,5 m nad obudową), gdzie praktycznie nie było żadnych zmian w stosunku do wielkości pierwotnej.



Rys. 3. Zakres makroporowatości MP stref wysokościowych stropu: n – cykle przeliczeniowe modelu; kręgi pomiarowe: k_1 – dolny, k_2 – środkowy, k_3 – górny

Fig. 3. Range of macroporosity MP of roof heights' zones: n – model computational cycles; measurement circles: k_1 – bottom, k_2 – central, k_3 – upper

W partii środkowej (krąg pomiarowy 2) powolny wzrost makroporowatości rozpoczął się już na końcowym etapie fazy wypełniania strefy kontaktu górotwór – obudowa (od cyklu 1000), następnie rozwijał się narastająco w fazie statycznego wymuszenia ruchu (do cyklu 1135) oraz wstrząsu (po cyklu 1135). Maksymalny przyrost makroporowatości w tej partii wysokości stropu wynosił około 2% i był spowodowany przemieszczaniem się części cząstek do kręgu dolnego – charakteryzującego się znacznie większą makroporowatością.

W partii dolnej (krąg pomiarowy 1) bardzo duża makroporowatość początkowa (14%) była spowodowana tym, że krąg ten obejmował początkowo część całkowicie pustej strefy kontaktu górotwór – obudowa. W miarę wypełniania się tej strefy makroporowatość monotonicznie zmniejszała się, aby następnie nieznacznie wzrosnąć – w czasie wstrząsu górotworu (około 1135 cyklu). Końcowa makroporowatość tej partii wynosiła 10,5% i była 3,5% większa od makroporowatości partii środkowej (krąg pomiarowy 2) oraz 5,8% większa od makroporowatości partii górnej (krąg pomiarowy 3).

Jeśli zdefiniuje się stateczność jako zdolność do samodzielnego utrzymywania się w pierwotnym położeniu (samonośność), to partię górną (ponad rzędną 3,5 m) należy uznać za całkowicie stateczną, partię środkową (w granicach rzędnej 1,5–3,5 m) – za stateczną w warunkach obciążeń statycznych oraz częściowo niestateczną w warunkach obciążeń dynamicznych (wstrząsów górotworu), natomiast partię dolną (poniżej rzędnej 1,5 m) – jako niestateczną w warunkach obciążeń zarówno statycznych, jak i statyczno-dynamicznych.

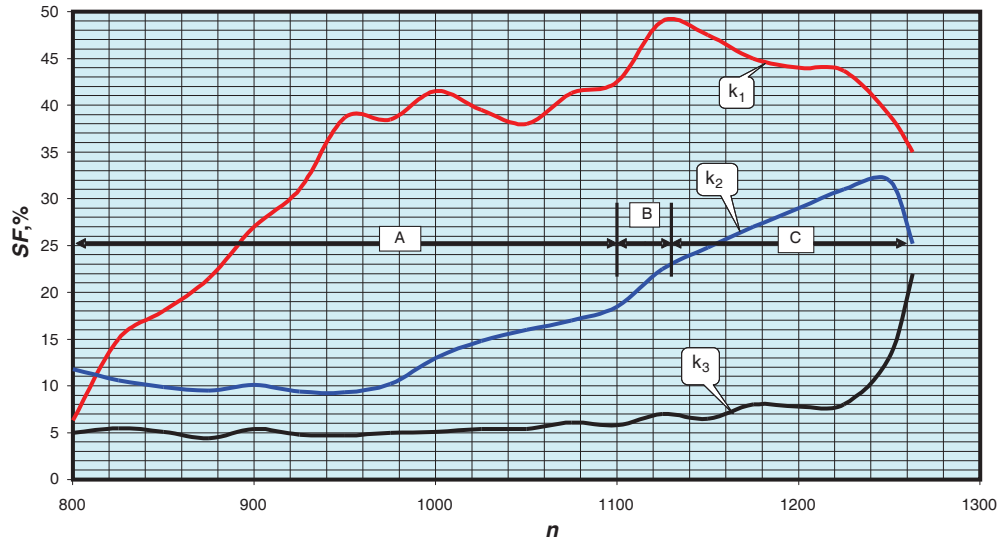
Należy dodać, że zarówno rozmiary kręgów pomiarowych (wysokość położenia poszczególnych partii pionowych stropu), jak i związane z tym przybliżone oceny stopnia stateczności, odnoszą się do wyrobiska o przekroju łukowym i szerokości przy spągu – około 5,0 m.

5. ZAKRES RUCHÓW POŚLIZGOWYCH

Jednym z możliwych do rejestracji parametrów pomiarowych w spoistych modelach cząstkowych (BPM) jest liczbowy udział – w mierzonej objętości modelowanego górotworu (w kręgu pomiarowym) – cząstek uczestniczących w ruchach o charakterze ścinająco-poślizgowym (funkcja *Sliding Fraction*) (ITASCA 2004). W systemie rejestrującym tę wielkość musi być określone położenie i średnica kręgu pomiarowego, zaś śledzona w całym przebiegu obliczania modelu wielkość SF jest wyrażona ułamkiem jedności, możliwym oczywiście do wyrażenia również w procentach całkowitej powierzchni kręgu pomiarowego zajmowanej przez cząstki. Wielkość SF jest wskaźnikiem chwilowej intensywności procesu niszczenia struktury górotworu w badanym obrębie pomiarowym, może być więc uważana za jeden z ważniejszych parametrów oceny chwilowej stateczności określonej części modelowanego górotworu.

Na rysunku 4 pokazano przebieg wielkości wskaźnika SF (w procentach) w przebiegu obliczeń modelu (od chwili skonsolidowania odrzwi obudowy do chwili wygaśnięcia wpływu wstrząsu na elementy modelu). Na rysunku zaznaczono trzy fazy czasowe obliczeń, a mianowicie: fazę wypełniania strefy kontaktu stropnica–górotwór (A), fazę stropowego obciążenia statycznego (B) oraz fazę oddziaływania stropowego

wstrząsu o energii kinetycznej $3 \cdot 10^5$ J (C). Można na nim zauważyć generalną tendencję wzrostu wielkości wskaźnika SF we wszystkich (trzech) kręgach pomiarowych z tym, że średnia prędkość przyrostu SF w poszczególnych kręgach jest zróżnicowana i zależna od odległości danego kręgu pomiarowego od wyrobiska. Skala cykli przeliczeniowych modelu jest w przybliżeniu proporcjonalna do czasu trwania obliczeń i dla stosowanej przez autora niniejszego artykułu konfiguracji komputera wynosi średnio około 6 cykli na sekundę (w programie „DOŁP9_MASAb”), czyli cały przedział osi odciętych na wykresie odpowiada w przybliżeniu okresowi czasu wynoszącemu 90 sekund.



Rys. 4. Zakres ruchów poślizgowych SF w strefach wysokościowych stropu: n – cykle przeliczeniowe modelu; kręgi pomiarowe: k_1 – dolny, k_2 – środkowy, k_3 – górny, A – wypełnianie strefy kontaktu stropnica – górotwór, B – stropowe obciążenie statyczne, C – stropowy wstrząs górotworu ($E_k = 3 \cdot 10^5$ J)

Fig. 4. Range of slip motions SF in roof heights' zones: n – model computational cycles; measurement circles: k_1 – bottom, k_2 – central, k_3 – top, A – filling of roof bar – rockmass contact zone, B – roof static load, C – roof bump ($E_k = 3 \cdot 10^5$ J)

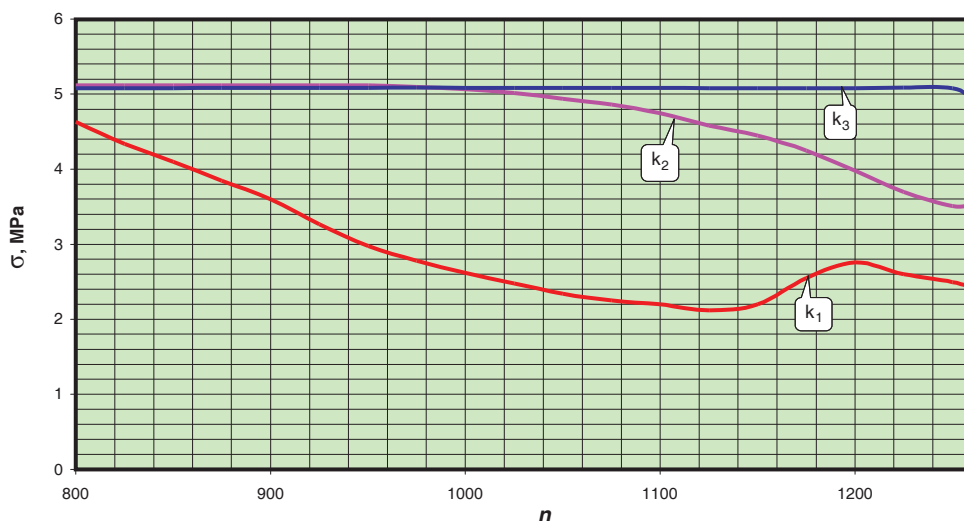
Jeśli przyjmie się, że miarą intensywnego niszczenia struktury jest w przybliżeniu 30% udział cząstek danej partii górotworu w ruchach o charakterze poślizgowym, to na rysunku 4 można zauważyć, że stan ten w odniesieniu do dolnej partii (krąg 1) występuje już we wczesnej fazie wypełniania strefy kontaktu stropnica–górotwór, w przypadku partii środkowej (krąg 2) proces ten zaczyna się w końcowej fazie oddziaływania wstrząsu, zaś w przypadku partii górnej (krąg 3) – nie występuje w ogóle.

6. PIONOWE I POZIOME NAPRĘŻENIE ŚCISKAJĄCE

Jak wspomniano powyżej – wartość pionowych naprężeń normalnych w modelowanym górotworze ustanowiono na około 5 MPa. Uznano bowiem, że model jest zbyt mały, aby można było przyjąć na jego granicach naprężenia pierwotne wynoszące – na

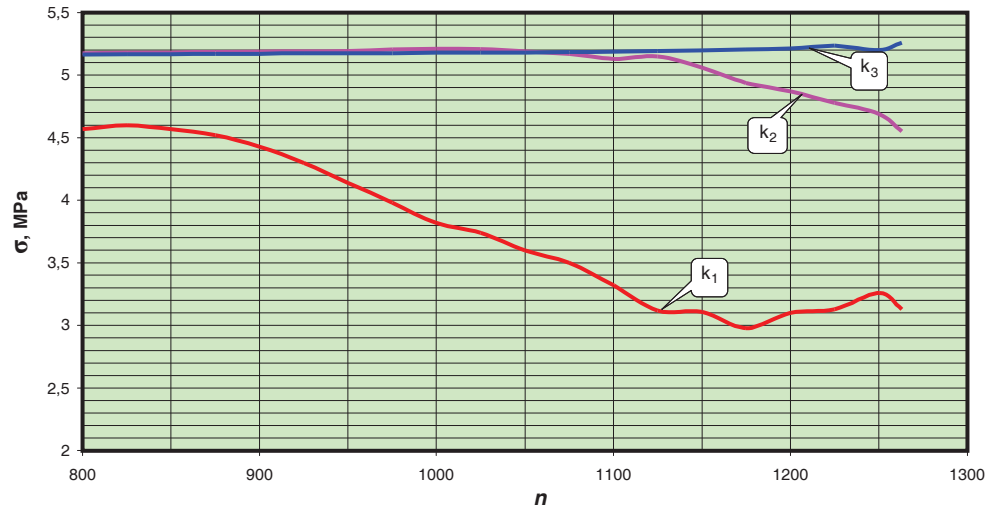
przykład – dla głębokości 500 m około 12 MPa. Oznacza to przyjęte założenie o odprężającym wpływie wyrobiska na całym obszarze badanego modelu, pomierzone więc wielkości naprężeń pionowych i poziomych należy traktować jako wartości względne. Dają one jednak pogląd na stopień odprężenia górotworu bezpośrednio otaczającego wyrobisko, w tym – stopień odprężenia w poszczególnych strefach wysokościowych analizowanego górotworu stropowego bezpośrednio nad wyrobiskiem.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów pionowej składowej normalnej stanu naprężeń ściskających w poszczególnych strefach wysokościowych stropu. Wynika z niego, że w górnym kręgu pomiarowym (3) naprężenia te były praktycznie niezmiennie – i wynosiły około 5 MPa. W kręgu środkowym (2) już w połowie przeliczeń modelu rozpoczęło się zmniejszanie wartości naprężeń z początkowej wynoszącej około 5 MPa do końcowej – około 3,5 MPa. Oznacza to, że brak wypełnienia wykładką (kamieniem lub workami z zaprawą) przestrzeni między stropnicą a obrysem górotworu stropowego powoduje istotne zmniejszanie wartości naprężeń w wyżej leżących warstwach stropowych, co – mając na uwadze współzależność naprężeń pionowych i poziomych (σ_v/σ_{hi}) – rysunek 6 – powoduje zmniejszanie samonośności wyżej leżących warstw stropowych.



Rys. 5. Pionowe naprężenie ściskające σ w strefach wysokościowych stropu: n – cykle przeliczeniowe modelu; kręgi pomiarowe: k_1 – dolny, k_2 – środkowy, k_3 – górny

Fig. 5. Vertical compressive stress σ in roof heights' zones: n – model computational cycles; measurement circles: k_1 – bottom, k_2 – central, k_3 – upper



Rys. 6. Zakres ściskającego naprężenia poziomego σ w strefach wysokościowych stropu: n – cykle przeliczeniowe modelu; kręgi pomiarowe: k_1 – dolny, k_2 – środkowy, k_3 – górny

Fig. 6. Range of horizontal compressive stress σ in roof heights' zones: n – model computational cycles; measurement circles: k_1 – bottom, k_2 – central, k_3 – upper

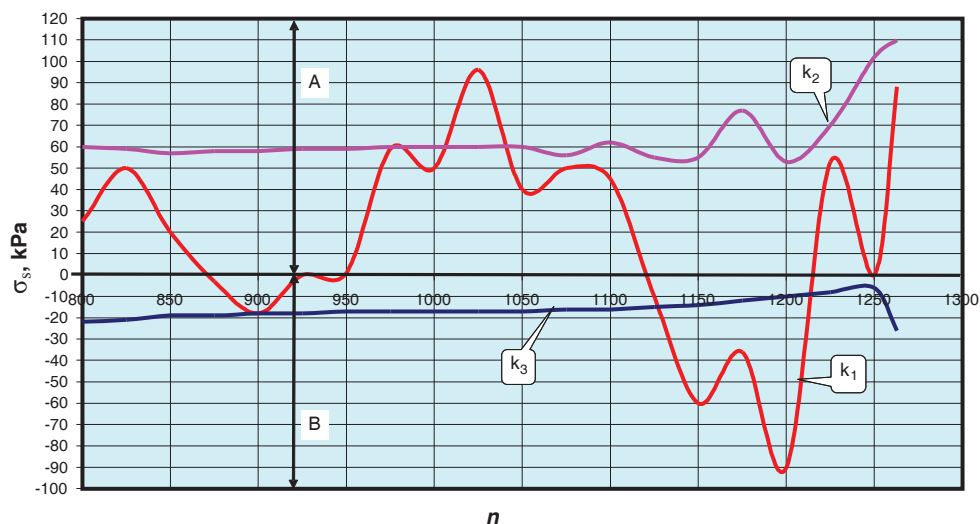
7. NAPRĘŻENIA ŚCINAJĄCE W SKAŁACH STROPOWYCH

W warunkach zarówno przestrzennego, jak i płaskiego stanu naprężeń w górotworze, szczególne znaczenie dla stateczności stropu w poszczególnych jego strefach wysokościowych mają naprężenia ścinające. Na rysunku 7 przedstawiono wyniki rejestracji naprężeń ścinających w kręgach pomiarowych 1, 2 oraz 3.

Na podstawie tego wykresu można wyciągnąć następujące wnioski:

- 1) w górnym kręgu pomiarowym (3) w całym przebiegu obliczeń modelu utrzymuje się mała (10–20 kPa) i stabilna wartość naprężenia ścinającego – z dużym udziałem składowej dociskowej (ściskającej), co powoduje, że górotwór w tym obszarze jest stateczny,
- 2) w środkowym kręgu pomiarowym (2) sytuacja jest podobna, z tym, że naprężenie jest większe (60 kPa), zaś udział składowej rozciągającej – pokaźny, co powoduje, że górotwór w tym obszarze jest równomiernie rozciągany, zaś wstrząs wywołuje dodatkowy (ok. 90%) wzrost naprężeń ścinających połączonych z rozciąganiem,
- 3) w dolnym kręgu pomiarowym (1) znaczne naprężenia ścinające (do 90 kPa) oscylują między rozciąganiem i ściskaniem, wskutek czego w fazie wypełniania ma się do czynienia w przewodzie ze ścinaniem rozciągającym, zaś w fazach obciążenia statycznego oraz wstrząsu (po 1100 cyklach) – ze ścinaniem w przewodzie ściskającym.

Końcowy okres oddziaływania wstrząsu na górotwór charakteryzuje się – w obszarze pierwszego kręgu pomiarowego – znów nawrotem ścinania z rozciąganiem.



Rys. 7. Naprężenia ścinające w strefach wysokościowych stropu: n – cykle przeliczeniowe modelu; A – ścinanie z rozciąganiem, B – ścinanie ze ściskaniem; kręgi pomiarowe: k_1 – dolny, k_2 – środkowy, k_3 – górny

Fig. 7. Shearing stress in roof heights' zones: n – model computational cycles; A – shearing with tension, B – shearing with compression; measurement circles: k_1 – bottom, k_2 – central, k_3 – upper

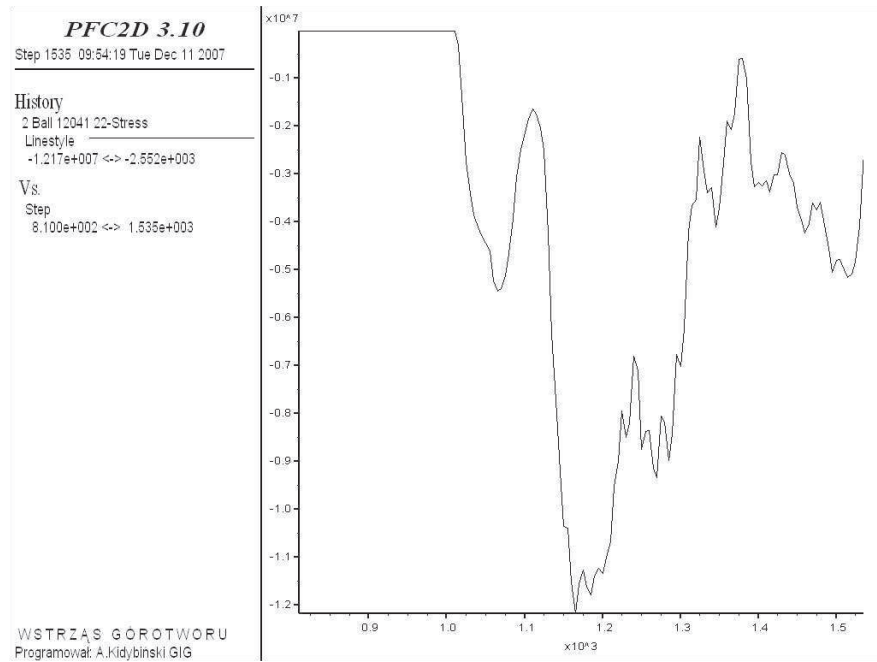
Można przeto stwierdzić, że główną przyczyną znikomej stateczności dolnej warstwy stropu bezpośredniego (o miąższości ok. 1,5 m) są zmienne – pod względem udziału czynników ściskającego i rozciągającego – procesy ścinania skał, co powoduje ich nieregularne rozdrobnienie na bloki wymagające podparcia przez obudowę.

8. ROLA OBUDOWY W PODTRZYMYWANIU SKAŁ STROPOWYCH

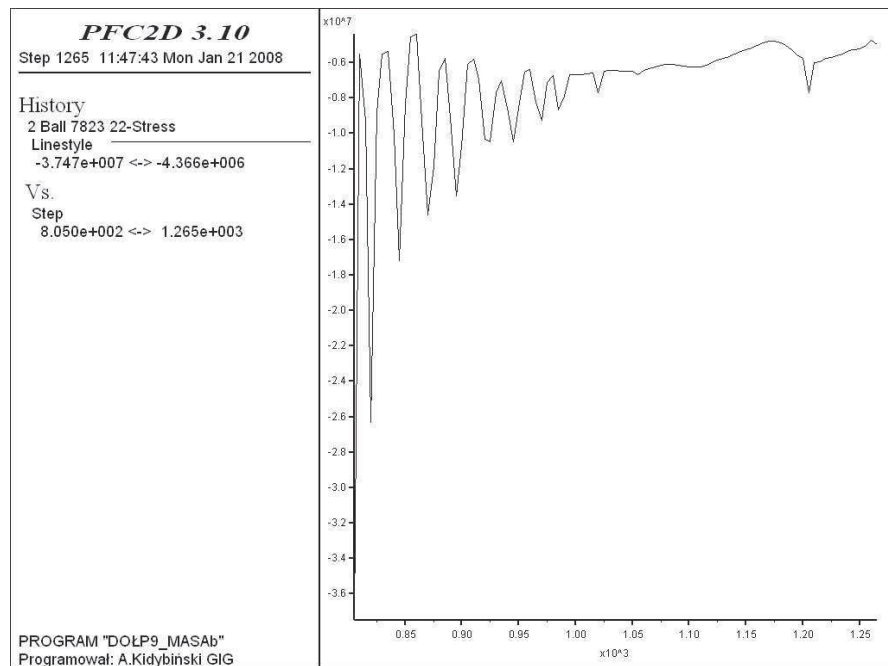
W spoistych modelach cząstkowych (BPM) dzięki temu, że z łączonych wzajemnie dysków (bądź kulek) tworzy się zarówno górotwór otaczający wyrobisko, jak i elementy obudowy – oczywiście nadając im inne więzy oraz właściwości materiałowe – można rejestrować naprężenia i przemieszczenia w dowolnej części wybranych elementów obudowy.

Dla przykładu, na rysunku 8, pokazano oryginalny zapis wartości naprężenia pionowego (ściskającego) w środkowym elemencie stropnicy – w całym cyklu obciążenia modelu. Wynika z niego, że naprężenie to zmienia się od wartości bliskich zero do 12,2 MPa, z tym, że wartość maksymalna występuje bezpośrednio po wstrząsie górotworu.

Część obciążenia spowodowana wypełnianiem przestrzeni między górotworem a stropnicą oraz obciążeniem statycznym – waha się w przedziale 1–5,5 MPa. Wahań siły obciążenia, wywołującej naprężenie pionowe w środku długości stropnicy, są spowodowane ruchami przyległego do stropnicy górotworu oraz zsuwną charakterystyką złącz odrzwi obudowy, która skutecznie ogranicza maksymalną koncentrację naprężeń w elementach obudowy. Zjawisko to przedstawiono na rysunku 9, na którym podano zapis wartości pionowego naprężenia ściskającego w skrajnym dolnym elemencie prawego łuku ociosowego odrzwi zastosowanych w modelu.



Rys. 8. Napężenie pionowe w stropnicy podczas statycznego oraz dynamicznego obciążenia (wstrząsu górotworu)
 Fig. 8. Vertical stress in roof bar during static and dynamic load (bump)



Rys. 9. Napężenie pionowe pod podstawą łuku ociosowego obudowy
 Fig. 9. Vertical stress under the basis of side section of roadway arch

Kolejne zanikające skoki wartości tego naprężenia pokazane na rysunku (od 37,4 do ok. 6 MPa) ilustrują skalę wielkości obciążenia całych odrzwi, ograniczoną z jednej strony siłą tarcia w złączach odrzwi, a z drugiej strony – wytrzymałością mułowcowego spągu w modelu. Wydaje się ponadto, że świadczą one o prawidłowej pracy złącz ciernych zamodelowanych w odrzwiach obudowy, bowiem wymienionym skokom jednostkowego obciążenia towarzyszy widoczny, skokowy zsuw złącz w modelowej obudowie wyrobiska. Wielkość zsuwu w złączu można oszacować wizualnie, zliczając liczbę dysków (o średnicy 12 cm) w zakładce i porównując ją z pierwotną długością zakładki (5 dysków = 60 cm).

WNIOSKI

1. Badania przeprowadzone na spoistym modelu cząstkowym wykazały, że jednorodny geologicznie górotwór stropowy wyrobiska korytarzowego wykazuje budowę strefową, z odmiennym zachowaniem się i parametrami geomechanicznymi poszczególnych stref – w zależności od przedziału ich odległości pionowej od wyrobiska.
2. Dla wyrobisk o przekroju poprzecznym półkolistym i szerokości maksymalnej około 5 m, wyposażonych w obudowę typu ŁP, poziome granice stref odmiennej stateczności są usytuowane w przybliżeniu na wysokości 1,5 oraz 3,5 m nad najwyższym punktem obrysu przekroju wyrobiska (Kidybiński 2007b; c).
3. Wydzielone dwie dolne strefy (do rzędnej ok. 3,5 m) wykazują po wstrząsie sejsmicznym duże chwilowe prędkości przemieszczenia cząstek górotworu, wynikające z oddziaływań dynamicznych, w wyżej zaś położonej strefie 3, po wstrząsie następuje jedynie bezprzemieszczeniowa transmisja energii sejsmicznej.
4. Równoczesna analiza zmian wartości makroporowatości górotworu oraz wskaźnika SF – w poszczególnych kręgach pomiarowych – wskazuje, że w kręgu 1 ze wzrostem makroporowatości maleje SF (od 44 do 6%) – co świadczy o tym, że w tej strefie dominuje zjawisko stopniowej **utraty styków** między cząstkami górotworu, natomiast w kręgu 2 – ze wzrostem makroporowatości (4,5–7%) następuje wzrost SF od 10 do 32% – co świadczy o dominacji w tej strefie zjawiska stopniowej **utraty więzów** między cząstkami górotworu i przechodzenia ich w ruch poślizgowy. Wniosek ten potwierdziły rejestracje średniej liczby styków (z sąsiednimi cząstkami) w kręgach 1, 2 oraz 3. W kręgu 1 początkowa średnia liczba styków (4,88) zmniejsza się szybko (cykle 800–1100) do 3,83 czyli o wartość 1,05, natomiast w kręgu 2 – utrzymuje się w tym okresie w wysokim przedziale 4,95–5,02 podobnie jak w kręgu 3 (stała wartość 5,0) – co sprzyja na tym obszarze (zwłaszcza w kręgu 3) bezprzemieszczeniowej transmisji energii sejsmicznych wstrząsów górotworu.
5. Dynamiczne obciążenia obudowy wyrobiska, spowodowane wstrząsem sejsmicznym, mogą **ponad dwukrotnie** przekraczać wartość maksymalnych obciążeń statycznych. Dużym plastycznym deformacjom odrzwi przeciwdziała prawidłowa praca złącz (zakładek), a zwłaszcza wczesne wypełnienie pustek między obrysem górotworu a obudową.

Literatura

1. ITASCA (2004): PFC2D Particle Flow Code in 2Dimensions. Theory and Background, Minneapolis.
2. Kidybiński A. (2007a): Model numeryczny wyrzutu węgla i gazu w pokładzie jednorodnym. *Przegląd Górniczy* nr 9, s. 1–5.
3. Kidybiński A. (2007b): Dynamika wyrzutu węgla i gazu w przodku chodnika w pokładzie jednorodnym – wg badań modelu cząstkowego. *Przegląd Górniczy* nr 11, s. 2–10.
4. Kidybiński A. (2007c): Wyrzut węgla i metanu w przodku chodnika w pokładzie z uskokiem – wg badań modelu cząstkowego. *Przegląd Górniczy* nr 12, s. 3–10.
5. Kidybiński A. (2007d): Obciążenie obudowy chodnikowej w trakcie wstrząsu górotworu – wg badań numerycznych modeli cząstkowych. *Przegląd Górniczy* nr 4, s. 9–14.
6. Kidybiński A. (2007e): Pole dynamicznego wyężenia skał stropowych wyrobiska korytarzowego po wstrząsie górotworu. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 2, s. 19–33.
7. 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.
8. Potyondy D.O., Cundall P.A. (2004): A bonded-particle model for rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 41, 8, s. 1329–1364.