

**Zeszyty Naukowe**Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk

rok 2017, nr 99, s. 185–198

Zbigniew BURTAN*, Dariusz CHLEBOWSKI*, Jerzy CIEŚLIK*, Andrzej ZORYCHTA**

Ocena zachowania się uskoku w sąsiedztwie eksploatacji w aspekcie zagrożenia sejsmicznego

Streszczenie: W artykule, na podstawie programu obliczeniowego bazującego na metodzie elementów skończonych, przeprowadzono numeryczne modelowanie eksploatacji w sąsiedztwie uskoku. Przyjęto, że uskok stanowi pojedyncza nieciągłość w postaci płaszczyzny zorientowanej pionowo, a warunki na stykających się powierzchniach definiuje prawo tarcia Coulomba. Rezultaty obliczeń dotyczyły reakcji uskoku na dodatkowe obciążenie wywołane eksploatacją górnictw, a także odnosiły się do wpływu zjawisk zachodzących w płaszczyźnie uskoku na bezpośrednie otoczenie pola eksploatacji. Zachowanie się uskoku analizowano w funkcji rozwoju eksploatacji opierając się na rozkładach naprężeń stycznych i poślizgu wraz z ich zasięgiem w płaszczyźnie uskoku oraz energii zdysypowanej wskutek tarcia. Z kolei wpływ uskoku na jego otoczenie oceniano na podstawie zmian gęstości całkowitej energii odkształcenia sprężystego. Rezultaty przeprowadzonego modelowania numerycznego pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących prowadzenia eksploatacji w sąsiedztwie dyslokacji tektonicznych w aspekcie kształtowania się poziomu zagrożenia sejsmicznego.

Słowa kluczowe: geomechanika, eksploatacja podziemna, uskoki, wstrząsy górnicze

An analysis of fault behavior in the proximity of mining operation in the context of seismic hazard

Abstract: This article concerns numerical modeling of the impact of mining operations on fault behavior, carried out on the basis of a calculation program based on the finite element method. It was assumed that the fault is a single discontinuity in the form of a vertically-oriented plane, and the conditions in which surfaces merge are defined by the right of the Coulomb friction. On the one hand, the calculations are related to the fault's response to additional weight resulting from mining operations, and on the other, they are related to the impact that occurrences in the fault's plane had on the immediate surroundings of the extraction center. The behavior of the fault was analyzed based on distributions in the plane of shear stress and slip, together with their range and energy dissipated due to friction. In turn, the impact of the fault on its immediate environment

* Dr hab. inż., ** Prof. dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: burtan@agh.edu.pl

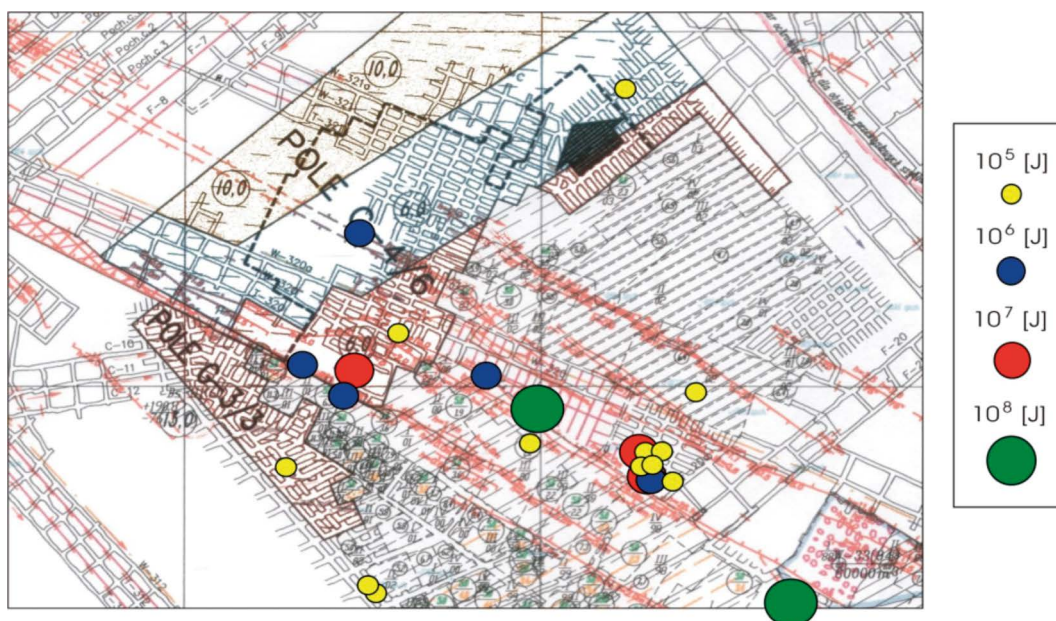
was analyzed based on variations in the total energy density of elasticity. The results of numerical modeling made it possible to draw conclusions concerning mining operation in the proximity of tectonic dislocations in the context of seismic hazard's levels.

Keywords: geomechanics, exploitation of underground, faults, mining tremors

Wprowadzenie

Znamienną cechą polskiego górnictwa węgla kamiennego i rud miedzi jest wysoki poziom indukowanej robotami górniczymi sejsmiczności górotworu, skutkujący dużym zagrożeniem tąpnięciami. Jedną z przyczyn występowania wysokoenergetycznych wstrząsów jest prowadzenie eksploatacji w rejonach uskoków. Dotyczy to zwłaszcza kopalń rud miedzi, w których dotychczasowej eksploatacji w sąsiedztwie dużych stref uskokowych towarzyszył wysoki poziom sejsmiczności, niejednokrotnie skutkujący występowaniem tąpnięć. Przykładem jest eksploatacja w oddziale G-4/6 w OZ/G Rudna w sąsiedztwie uskoku Rudna Główna, gdzie znaczna część wysokoenergetycznych wstrząsów (o energiach $\geq 10^5$ J), w tym wstrząsów skutkujących tąpnięciami, rozmieszczona była na liniach dyslokacji tektonicznych lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie (rys. 1) (Burtan i in. 2010).

W modelach definiujących warunki uaktywniania się uskoku wychodzi się z założenia, że proces ten jest konsekwencją utraty stateczności układu mechanicznego, jakim jest modelowany górotwór. Aktualnie za fizycznie najbardziej realistyczne uznaje się modele oparte na analizie ruchu mas skalnych przylegających do uskoku (Zuberek 1993; Zorychta 2001;



Rys. 1. Lokalizacja ognisk wstrząsów o energiach $\geq 10^5$ J w oddziale G-4/6 O/ZG Rudna

Fig 1. Location of tremors centres with energies $\geq 10^5$ J in the panel G-4/6 O/ZG Rudna

Goszcz 2004). Na płaszczyźnie uskoku występują zarówno siły normalne jak i styczne (siły tarcia), które zapewniają równowagę pomiędzy skrzydłami wiszącym i zrzuconym. Prowadzenie robót górniczych w rejonie uskoku stwarza możliwość jego uaktywnienia. W trakcie eksploatacji w sąsiedztwie uskoku, na płaszczyźnie uskokowej dochodzi do zmiany składowych stanu naprężenia, zarówno normalnej jak i stycznej, wynikiem czego masy skalne mogą przejść ze stanu równowagi trwałej do równowagi chwiejnej. Gdy wartość naprężeń stycznych powstających na uskoku jest większa od ich wartości krytycznej następuje poślizg, trwający do momentu ponownego osiągnięcia warunków równowagi. Przejawiający się poślizgiem ruch masy na płaszczyźnie uskokowej jest utożsamiany z uaktywnieniem się uskoku. Ruch ten w zależności od parametrów geomechanicznych panujących na uskoku, może odbywać się w sposób stabilny lub niestabilny i może skutkować wystąpieniem wstrząsu. Taki charakter zachowania się uskoku oraz wynikający z niego model mechaniczny pozwala na określenie warunków definiujących możliwość uaktywniania się zaburzenia uskokowego w sąsiedztwie prowadzonej eksploatacji.

Ocenę zachowania się uskoku pod wpływem eksploatacji oraz wpływ zjawisk zachodzących na uskoku na otoczenie pola eksploatacyjnego przeprowadzono z wykorzystaniem przestrzennych modeli numerycznych, bazujących na metodzie elementów skończonych. Przyjęto, że dyslokację tektoniczną reprezentuje pojedyncza nieciągłość w postaci płaszczyzny zorientowanej pionowo, a warunki na stykających się powierzchniach zdefiniowano za pomocą klasycznego prawa tarcia Coulomba. Ocena zachowania się uskoku w wyniku oddziaływania eksploatacji miała na celu wyjaśnienie, jakie są warunki jego uaktywnienia się, jaki będzie zasięg i charakter ewentualnego poślizgu w płaszczyźnie uskoku oraz jakie efekty związane z uaktywnieniem się uskoku mogą wystąpić w otoczeniu pola eksploatacyjnego.

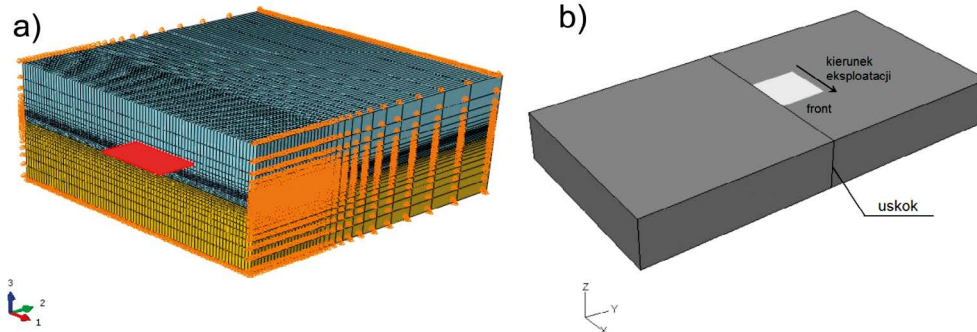
Zachowanie się uskoku analizowano w funkcji rozwoju eksploatacji opierając się na rozkładach naprężeń stycznych i poślizgu w płaszczyźnie uskoku oraz energii zdysypowanej wskutek tarcia. Z kolei wpływ uskoku na otoczenie pola eksploatacji oceniano na podstawie zmian gęstości całkowitej energii odkształcenia sprężystego.

1. Założenia obliczeń numerycznych

Przystępując do numerycznego modelowania wpływu eksploatacji na zachowanie się uskoku założono, że lokalizacja oraz geometria pól eksploatacyjnych może sprzyjać uaktywnianiu się uskoku, inicjując wstrząsy w górotworze.

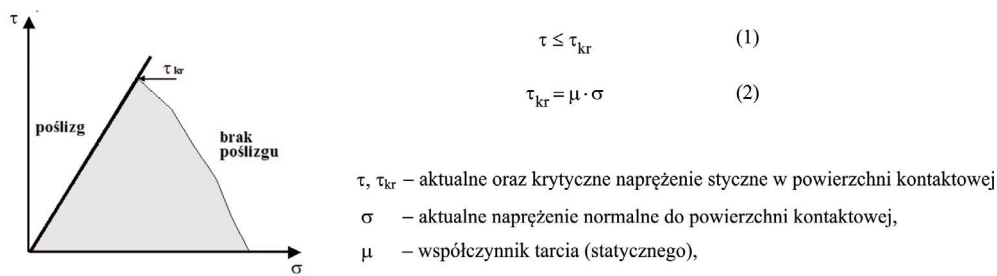
Ocenę możliwości uaktywnienia się uskoku wywołanego prowadzoną w jego sąsiedztwie eksploatacją górnictwem prowadzono na podstawie obliczeń na przestrzennych modelach numerycznych z wykorzystaniem metody elementów skończonych (Abaqus 2008; Burtan 2012). Warunki przyjęte w modelach odpowiadały parametrom eksploatacji systemem komorowo-filarowym i geologicznym uwarunkowaniom zalegania złoża rud miedzi w LGOM (Burtan 2012).

Przyjęto, że uskok stanowi pionową płaszczyznę nieciągłości, dzielącą model na dwie części (rys. 2), a warunki kontaktujących się powierzchni opisywał klasyczny model tarcia Coulomba (Abaqus 2008) (rys. 3).



Rys. 2. Geometria modelu z uskokiem, dyskretyzacja MES oraz warunki brzegowe obliczeń (a) i przykładowa geometria eksploatacji (b)

Fig. 2. Geometry of the model with fault FEM discretization and boundary conditions (a) and sample geometry of exploitation (b)



Rys. 3. Model kontaktu z warunkami fizycznymi Coulomba wykorzystany z obliczeniach

Fig. 3. Coulomb friction law used in numerical calculations

Warunek równowagi naprężeń stycznych na płaszczyźnie kontaktowej określa warunek równowagi lub poślizgu kontaktujących się części modelu. W sytuacji, gdy wartość naprężeń stycznych jest mniejsza od wartości krytycznej $\tau \leq \tau_{kr}$, poślizg nie następuje. W przypadku gdy $\tau > \tau_{kr}$, w rejonach modelu gdzie sytuacja ta ma miejsce, kontaktujące się części modelu przesuwać się względem siebie. Poślizg trwa do chwili ponownego osiągnięcia warunków równowagi.

W przypadku naprężeń normalnych w obliczeniach zdefiniowany był tzw. sztywny kontakt, w którym kontaktujące się powierzchnie nie mogą się przenikać, zaś rozdzielenie następuje bez reakcji normalnej do uskoku. Obliczenia takie prowadzone były w algorytmie przyrostowo-iteracyjnym Newtona-Raphsona, aż do uzyskania warunków równowagi sił w całym modelu.

We wszystkich wariantach obliczeniowych model numeryczny miał kształt prostopadłościanu o wymiarach $4 \text{ km} \times 2 \text{ km} \times 1 \text{ km}$, który odwzorowywał wycinek górotworu wraz z uskokiem i polem eksploatacyjnym. Model obejmował utwory złoże, stropu oraz spągu.

Do obliczeń przyjęto liniowo sprężysty model fizyczny dla wszystkich skał, a właściwości fizyczne poszczególnych warstw geologicznych przedstawiono w tabeli 1.

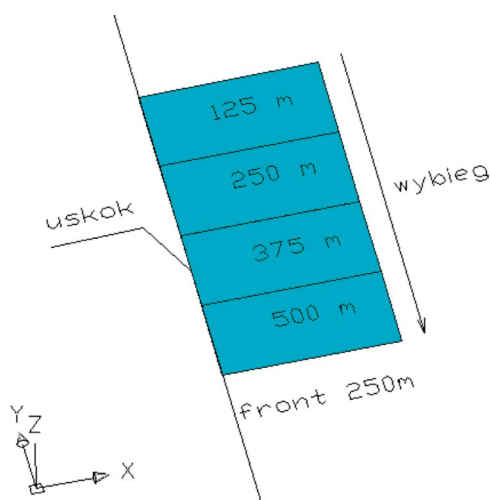
W modelu obliczeniowym przyjęto, że eksploatacja prowadzona będzie w jednym ze skrzydeł uskoku (rys. 1b). Ze względu na orientację uskoku (pionowa płaszczyzna) oraz fakt, iż nie modelowano zrzutu warstw geologicznych, stan naprężenia przed rozpoczęciem eksploatacji odpowiadał stanowi litostatycznemu.

TABELA 1. Właściwości fizyczne skał modelu liniowo-sprężystego przyjętego w obliczeniach

TABLE 1. Physical properties of the linear elastic model accepted for numerical calculations

Rodzaj skały	E [MPa]	ν [-]	ρ [kg/m ³]
Piaskowiec (spąg)	5 000	0,20	2 500
Dolomit (furta)	8 000	0,30	2 500
Dolomit (strop)	10 000	0,25	2 500
Anhydryt (strop)	20 000	0,25	2 500
Zroby (ugięcie stropu)	50	0,35	–
Zroby (podsadzka)	250	0,35	–

Analizując zachowanie się uskoku w sąsiedztwie prowadzonej eksploatacji i jego wpływ na otoczenie pola eksploatacyjnego przyjęto, że eksploatacja prowadzona będzie wzdłuż uskoku frontem o szerokości 250 m, a poszczególne etapy obliczeń dotyczyć będą wybiegów: 125 m, 250 m, 375 m i 500 m (rys. 4).



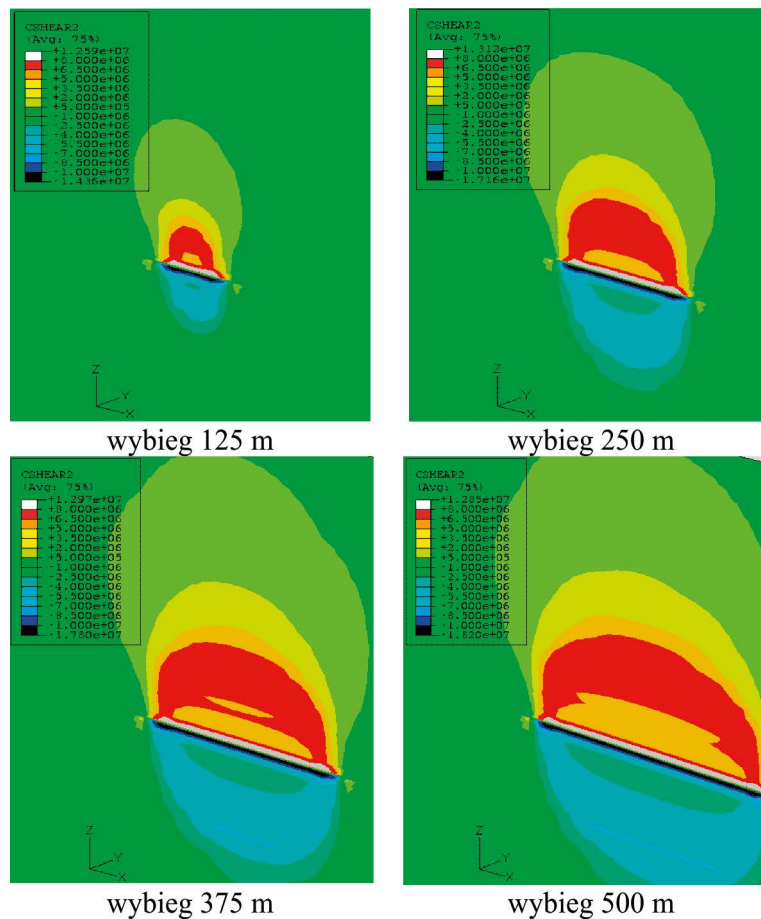
Rys. 4. Geometria pola eksploatacyjnego i przyjęte w obliczeniach warunki eksploatacji

Fig. 4. Geometry of exploitation and mining conditions used in calculations

3. Zachowanie się uskoku w wyniku oddziaływania eksploatacji

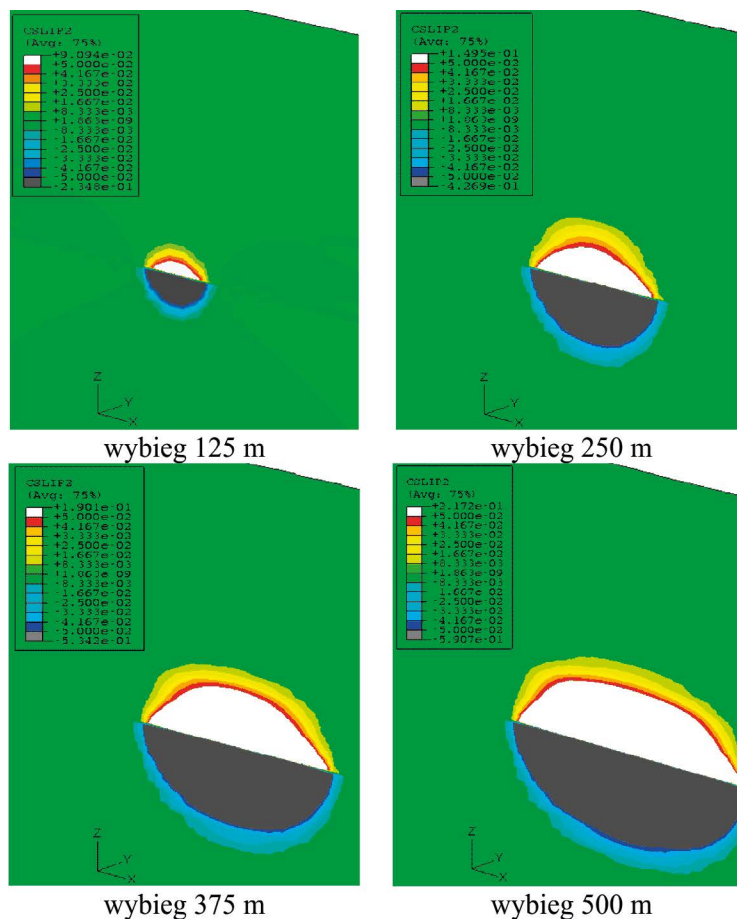
Rezultaty obliczeń – dotyczące stropu i spągu eksploatacji – ilustrują mapy pionowych naprężeń stycznych w płaszczyźnie uskoku (rys. 5) oraz odpowiadające im przemieszczenia (poślizg) skrzydeł uskoku względem siebie (rys. 6) dla kolejnych etapów eksploatacji. Z przedstawionych rozkładów wynika, że:

- naprężenia styczne w płaszczyźnie uskoku są największe bezpośrednio nad i pod zrobami,
- wraz z rozwojem eksploatacji zasięgi zmian naprężeń stycznych w stropie i spągu rosną; najmniejsze są dla wybiegu 125 m, a największe dla 500 m,
- eksploatacji wzdłuż uskoku od początku towarzyszy poślizg (przyjęty jako względne przemieszczenia skrzydeł uskoku większe od 0,05 m), którego zasięg do wybiegu 375 m rośnie, a po jego przekroczeniu stabilizuje się,



Rys. 5. Mapy pionowych naprężeń stycznych w kolejnych etapach eksploatacji

Fig. 5. Maps of vertical shear stresses in subsequent stages of exploitation



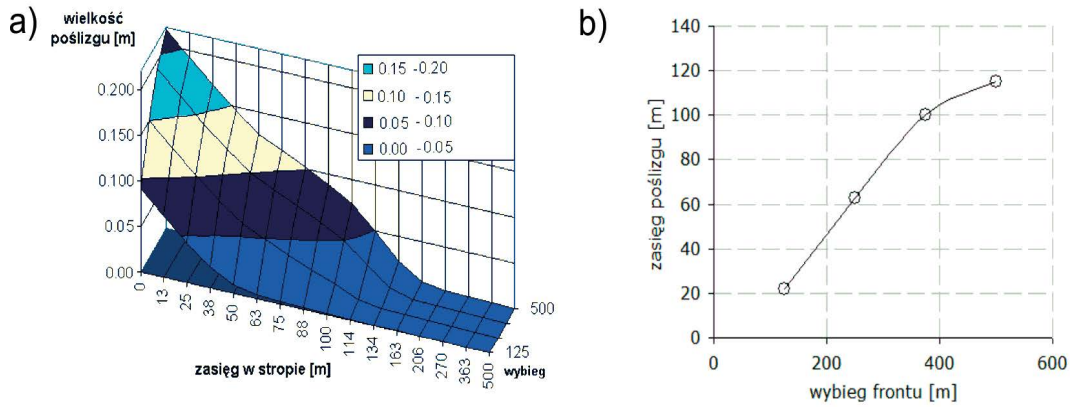
Rys. 6. Poślizg skrzydeł uskoku względem siebie w kolejnych etapach eksploatacji

Fig. 6. Slip of the fault walls relative to each other in subsequent stages of exploitation

- wartości pionowych naprężeń stycznych i poślizgów w płaszczyźnie uskoku w stropie eksploatacji są porównywalne z wartościami tych wielkości w spągu; w warstwach spągu zachodzą jakościowo podobne zjawiska jak w przypadku stropu.

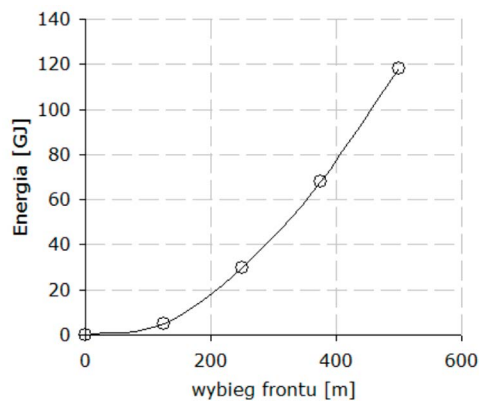
Wykresy wielkości i zasięgu poślizgu w funkcji wybiegu (położenia frontu eksploatacyjnego) przedstawiono na rysunku 7. Zależności te potwierdzają, że wielkość poślizgu wzrasta wraz z wybiegiem i jest większa dla dłuższych frontów eksploatacji. Zasięg poślizgu w początkowej fazie eksploatacji rośnie, zaś przy zaawansowanej eksploatacji stabilizuje się.

Istotne informacje o zachowaniu się uskoku wynikają z analizy energii dyssypowanej wskutek tarcia na płaszczyźnie uskoku. Z wykresu zmian energii w funkcji wybiegu frontu eksploatacyjnego (rys. 8) wynika, że w początkowej fazie eksploatacji do 250 m wybiegu zmienność efektów związanych z pracą wykonaną przez siły tarcia na płaszczyźnie uskoku



Rys 7. Wykres wielkości (a) i zasięgu (b) poślizgu w zależności od wybiegu frontu eksploatacji

Fig 7. Graph of size (a) and range (b) of the slip depending on the exploitation front runway



Rys. 8. Wykres energii zdyssypowanej wskutek efektu tarcia w płaszczyźnie uskoku

Fig. 8. Graph of energy dissipated due to shear effect in the fault plane

jest mniejsza niż przy dalszej eksploatacji, gdzie przyrost zmian energii jest w przybliżeniu proporcjonalny do wybiegu frontu eksploatacji.

Przedstawione wartości energii reprezentują efekty wywołane poślizgiem na całej powierzchni uskoku, przy czym analizowany poślizg na płaszczyźnie uskoku nie oznacza dynamicznego charakteru przesuwania się skrzydeł uskoku względem siebie. Obserwacje kopalniane i laboratoryjne wskazują, że często poślizg utworów skalnych na nieciągłościach odbywa się skokowo, czemu towarzyszy wstrząs. Wówczas energia wstrząsu będzie proporcjonalna do energii zdyssypowanej na tarcie w płaszczyźnie uskokowej.

4. Wpływ uskoku na otoczenie pola eksploatacyjnego

Numeryczną ocenę wpływu zjawisk zachodzących w płaszczyźnie uskoku na zachowanie bezpośredniego otoczenia pola eksploatacji przeprowadzono na podstawie zmian gęstości całkowitej energii sprężystej (Walczak 1977).

Wyniki obliczeń zaprezentowano w postaci map i wykresów rozkładu współczynnika koncentracji całkowitej energii sprężystej zdefiniowanej według wzoru:

$$A_c = \frac{1}{2E} \left[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y \cdot \sigma_z + \sigma_z \cdot \sigma_x) + 2 \cdot (1 + \nu) \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right] \quad (3)$$

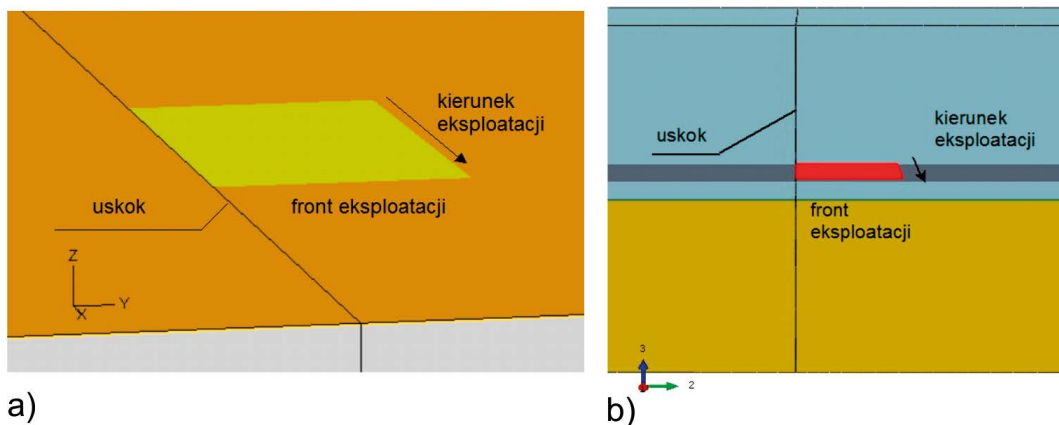
$$K_{A_c} = \frac{A_c}{A_c^p} \quad (4)$$

gdzie:

- A_c – gęstość energii całkowitej odkształcenia sprężystego,
- K_{A_c} – współczynnik koncentracji całkowitej energii sprężystej.

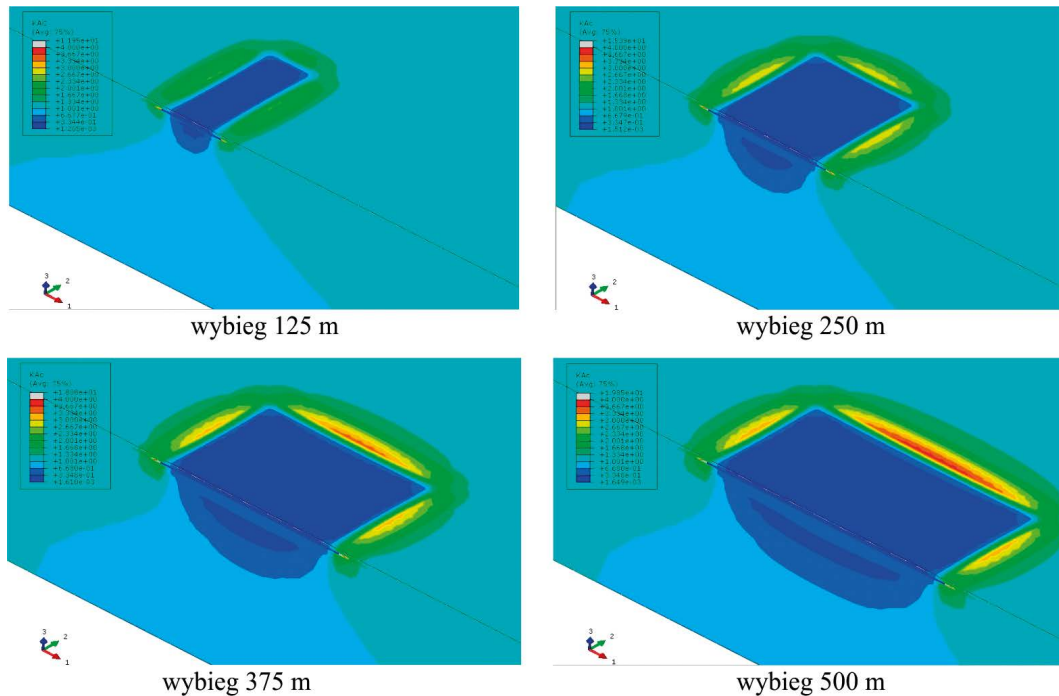
Indeksem p oznaczono energię, odpowiadającą pierwotnemu stanowi naprężenia. Wskaźnik gęstości energii analizowano w dwóch wzajemnie prostopadłych przekrojach. Przekrój poziomy znajdował się w stropie nad modelowaną eksploatacją (rys. 9a), zaś przekrój pionowy zorientowany został prostopadle do powierzchni uskoku (rys. 9b).

- z rozkładów wskaźnika gęstości całkowitej energii sprężystej (rys. 10 i 11) wynika, że:
 - wraz z rozwojem eksploatacji strefy o maksymalnych wartościach gęstości energii sytuują się w sąsiedztwie ociosów pola eksploatacyjnego;



Rys. 9. Przekroje poziomy (a) i pionowy (b) analizy wskaźnika gęstości energii sprężystej

Fig. 9. Horizontal (a) and vertical sections (b) of an analysis of elastic energy density's rate

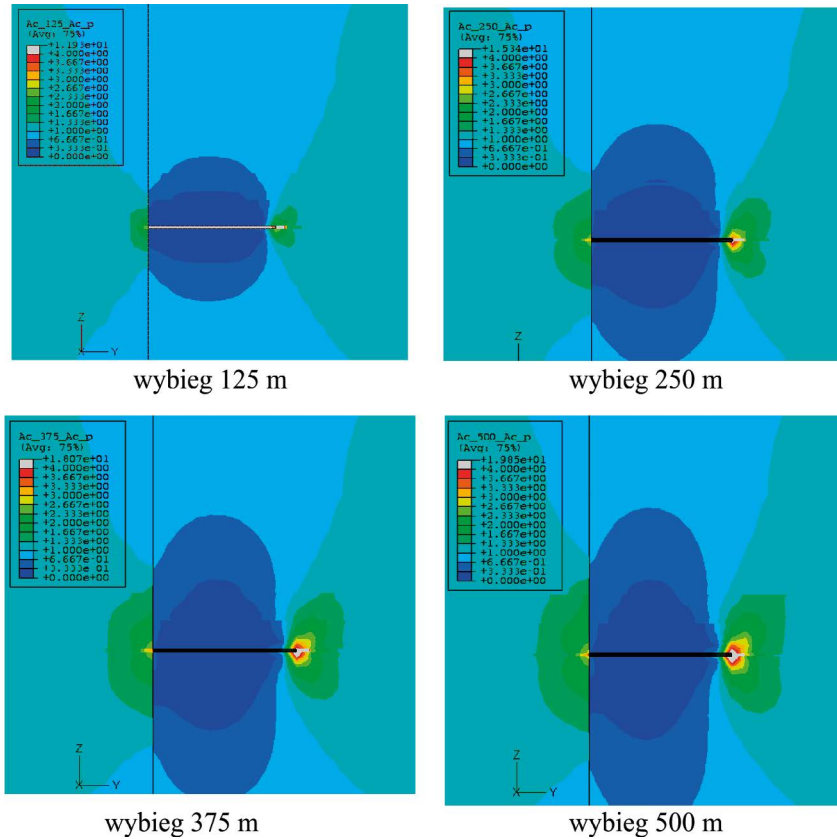


Rys. 10. Rozkład wskaźnika gęstości całkowitej energii sprężystej w otoczeniu pola eksploatacyjnego w przekroju poziomym

Fig. 10. Coach density ratio of the total elastic energy in the surroundings of the exploitation field in the horizontal section

- rozwój eksploatacji powoduje zmiany w rozkładach wskaźnika gęstości energii sprężystej w ociosach pola eksploatacji; przy wybiegu 125 m obszary o największej gęstości energii sprężystej znajdują się przed frontem eksploatacji (linia frontu stanowi dłuższy bok pola eksploatacji); po przekroczeniu wybiegu 250 m maksymalne wartości gęstości energii sprężystej występują w ociosie, będącym dłuższym bokiem pola eksploatacyjnego;
- w ociosie od strony uskoku występują znacznie mniejsze wartości gęstości energii sprężystej, co wynika z poślizgu na płaszczyźnie uskokowej, wskutek czego przylegająca do uskoku krawędź eksploatacji jest odciążona.

Podobne jakościowo zależności wynikają z wykresów wskaźnika gęstości energii sprężystej (rys. 12 i rys. 13). Gęstość energii sprężystej w czole frontu (w przekroju podłużnym pola eksploatacji – rys. 12) w początkowym etapie eksploatacji szybko wzrasta (wybieg 0–250 m), po czym dalsze zmiany nie są już duże, a wybieg frontu ma tutaj niewielki wpływ. Nieco odmienna sytuacja ma miejsce w przekroju poprzecznym (rys. 13), gdzie dopiero po uzyskaniu wybiegu 375 m wskaźnik gęstości energii sprężystej ulega mniejszym zmianom.



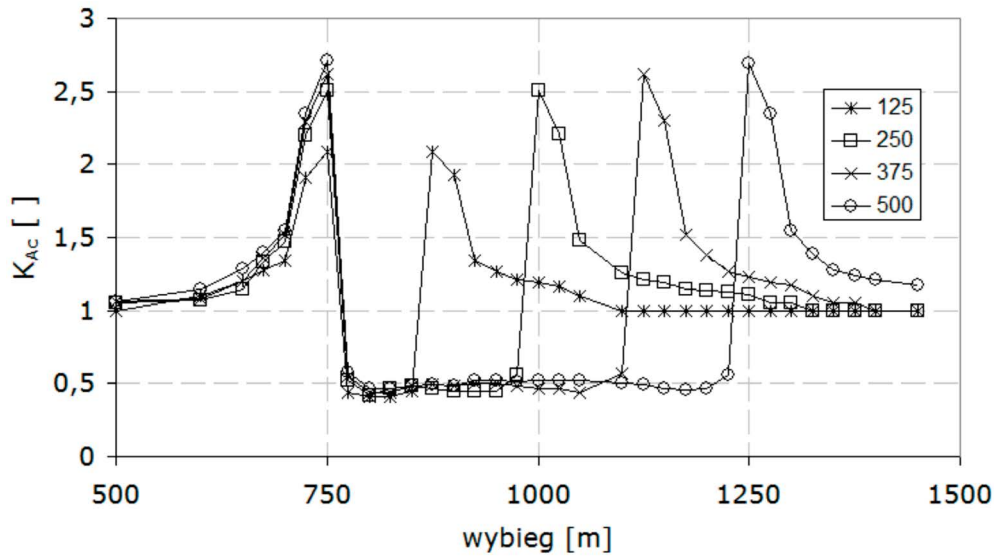
Rys. 11. Rozkład wskaźnika gęstości całkowitej energii sprężystej w otoczeniu pola eksploatacyjnego w przekrojach poziomym (a) i pionowym (b)

Fig. 11. Coach density ratio of the total elastic energy in the surroundings of the exploitation field in horizontal (a) and vertical sections (b)

Podsumowanie

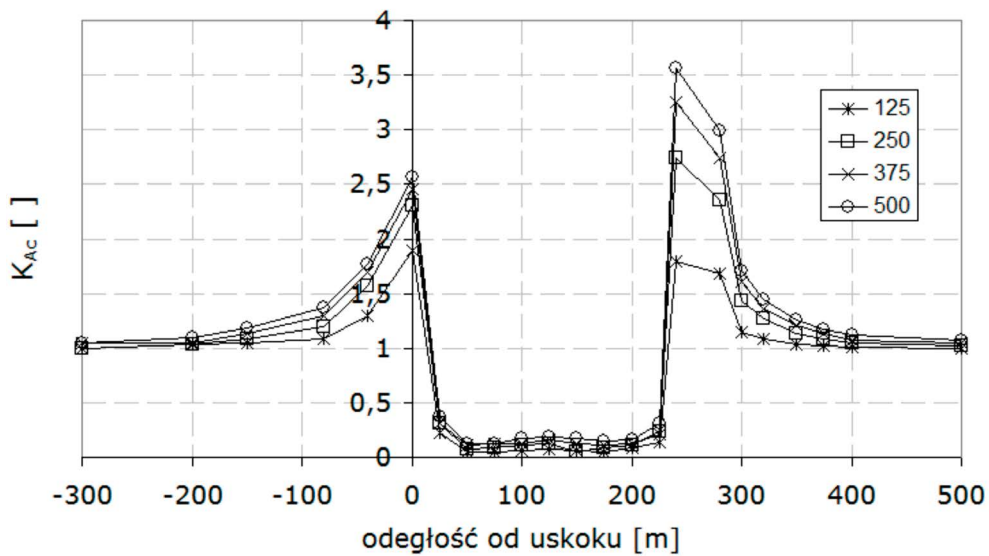
Na podstawie rezultatów przeprowadzonych obliczeń numerycznych, dotyczących zachowania się uskoku w sąsiedztwie prowadzonej eksploatacji, można sformułować następujące wnioski (Burtan 2012).

- Prowadzenie eksploatacji w rejonie uskoku może skutkować naruszeniem równowagi na powierzchni uskoku, stwarzając możliwość jego uaktywnienia i powstania wstrząsu.
- W warstwach stropu i spągu zachodzą jakościowo podobne relacje dotyczące zmian naprężeń stycznych i poślizgu.



Rys. 12. Wykresy wskaźnika gęstości energii sprężystej w stropie w przekroju podłużnym (równoległe do płaszczyzny uskoku)

Fig. 12. Charts rate of elastic energy density in the roof section longitudinal (parallel to the fault plane)



Rys. 13. Wykresy wskaźnika gęstości energii sprężystej w stropie w przekroju poprzecznym (prostopadłe do płaszczyzny uskoku)

Fig. 13. Charts rate of elastic energy density in the roof section transverse (perpendicular to the plane of the fault)

- Naprężenia styczne w płaszczyźnie uskoku mają największe wartości nad i pod zrobami prowadzonej eksploatacji. Wraz z rozwojem eksploatacji zasięg występowania zmian naprężeń stycznych rośnie.
- Wielkość i zasięg poślizgu w płaszczyźnie uskokowej wzrasta wraz z rozwojem eksploatacji, stabilizując się po osiągnięciu pewnego wybiegu.
- Miarą oceny zachowania się uskoku może być wielkość energii zdysypowanej na efekty tarcia w jego płaszczyźnie, która rośnie wraz z rozwojem eksploatacji. Wywołane poślizgiem przemieszczenia skał mogą odbywać się skokowo, stąd część tej energii może opisywać dynamiczny charakter tego zjawiska, przejawiający się powstaniem wstrząsu.
- Istnienie uskoku powoduje zmiany stanu naprężenia w otoczeniu pola eksploatacyjnego. W ociosie pola przylegającym do uskoku, w rezultacie poślizgu w płaszczyźnie uskokowej, gęstości energii sprężystej są znacznie mniejsze aniżeli w rejonie pozostałych krawędzi eksploatacyjnych. Przy wybiegach krótszych od szerokości frontu największe wartości gęstości mają miejsce w czole frontu, a przy wybiegach dłuższych w ociosie pola po przeciwnej stronie uskoku.

Reasumując można stwierdzić, że prowadzona z wykorzystaniem modeli numerycznych ocena zjawisk zachodzących w płaszczyźnie uskoku wskazuje na możliwość uaktywniania się uskoku wskutek prowadzonych w jego sąsiedztwie robót górniczych, a zachowanie się uskoku oraz jego wpływ na otoczenie pola eksploatacyjnego zależy od kierunku i geometrii prowadzonej eksploatacji. Stąd też odpowiedni projekt wybierania w sąsiedztwie uskoku może ograniczyć wielkość zagrożenia wstrząsami.

Artykuł zrealizowano w ramach działalności statutowej AGH Akademii Górniczo-Hutniczej nr 11.11.100.005.

Literatura

- Abaqus v6.8 2008. *Theory Manual*. Dassault Systèmes Simulia Corp. Providence. USA.
- Burtan, Z. 2012. Wpływ eksploatacji w rejonach zaburzeń uskokowych o dużych zrzutach na kształtowanie się zagrożenia sejsmicznego w kopalniach Legnicko Głogowskiego Okręgu Miedziowego. *Rozprawy Monograficzne* nr 247. Kraków: Wyd. AGH.
- Burtan i in. 2010 – Burtan, Z., Zorychta, A. i Chlebowski, D. 2010. Sejsmiczność tektoniczna jako przesłanka zmian w zasadach i rygorach prowadzenia robót górniczych w polu G-4/6 O/ZG „Rudna”. *Mat. Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2010*. Kraków.
- Goszcz, A. 2004. *Wybrane problemy zagrożenia sejsmicznego i zagrożenia tąpnięciami kopalniach podziemnych*. Biblioteka. Szkoły Podziemnej Eksploatacji Złóż. Kraków: Wyd. Nauka Technika.
- Walczak, J. 1977. *Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości*. Warszawa: PWN.
- Zorychta, A. 2001. Wpływ zaburzeń uskokowych na kształtowanie się stanu zagrożenia tąpnięciami w kopalniach LGOM. *Kwartalnik Cuprum* nr 21.
- Zuberek, W. 1993. Wpływ tektoniki na występowanie sejsmiczności indukowanej eksploatacją górnictwem. Sympozja i Konferencje nr 6. *Szkoła Podziemnej Eksploatacji złóż*. PAN, Kraków.

