2002 Nr kol. 1566

Andrzej JAWORSKI, Piotr BAŃKA Politechnika Śląska, Gliwice

WPŁYW ROBÓT GÓRNICZYCH NA ZMIANY POTENCJALNEJ ENERGII SPRĘŻYSTEJ W DEFORMOWANYCH WARSTWACH SKALNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki prac mających na celu określenie wpływu parametrów prowadzonych robót górniczych na zmiany analitycznie obliczanej właściwej energii sprężystej w deformowanych warstwach skalnych. Podano wyniki przeprowadzonych obliczeń testowych dla różnych sytuacji górniczych. Na przykładzie silnie zagrożonego wstrząsami rejonu eksploatacji przeanalizowano możliwość opisu zmian poziomu sejsmiczności indukowanej w oparciu o analitycznie obliczane wartości energii odkształcenia sprężystego.

INFLUENCE OF MINING WORKS ON CHANGES OF SPECIFIC ELASTIC ENERGY IN DEFORMATED ROCK LAYERS

Summary. The paper presents exemplary results of works aiming to determine the influence of parametrs of mining works on analitically calculated values of specific elastic energy in deformated rock layers. The results of numerical simulations for different mining situations were presented. Basing on the plans of mining works in the mining area subject to strong tremors, the possibility of determination the changes of the level of induced seismicity based on analitically calculated values of specific elastic energy was presented.

1. Wprowadzenie

Wieloletnie obserwacje oraz rezultaty licznych prac badawczych wskazują na silny związek poziomu sejsmiczności indukowanej z prowadzonymi robotami górniczymi. Odnosi się to głównie do parametrów bieżącej eksploatacji ścianowej, w tym do jej czasoprzestrzennego przebiegu i intensywności, ale także do dotychczasowego stanu wybrania złoża – usytuowania zaszłości eksploatacyjnych względem prowadzonych robót.

Wskazane czynniki (parametry) decydują o przebiegu ruchów mas skalnych budujących górotwór, a więc o zmianach w stanach odkształceń i naprężeń wywołujących zmianę energii potencjalnej. Dla prostego modelu ośrodka liniowo-sprężystego [1,7] jest możliwy bardzo efektywny opis tych zmian energetycznych zachodzących w całym obszarze górotworu obejmowanym wpływami eksploatacji dokonanej i przeprowadzanej (w układzie przestrzennym).

Przy tak silnej idealizacji ośrodka skalnego, dysponując jedynie wartościami najczęściej wyznaczanych stałych materiałowych (G, ν), można numerycznie bardzo szybko obliczać w całym obszarze wpływów przyrosty wszystkich składowych tensorów naprężenia i odkształcenia. Korzysta się tu z rozwiązań (Gil[5], Dymek[3]) przemieszczeniowego zadania brzegowego teorii sprężystości, przy czym algorytmy obliczeniowe umożliwiają wyznaczanie przyrostów generowanych czasoprzestrzennym rozwojem dowolnie wykształtowanej eksploatacji górniczej.

Opis zmian energetycznych dotyczy jedynie energii sprężystej akumulowanej w górotworze w następstwie naruszania go dowolnie wykształtowaną eksploatacją, nic nie mówi o jej dyssypacji i przemianach, a w konsekwencji nie określa ilości energii wyzwalanej w procesie niszczenia określonej objętości skał.

W procesie niszczenia ośrodka skalnego ta potencjalna energia sprężysta przechodzi w inne [4], praktycznie niewyznaczalne ilościowo rodzaje energii, w tym kinetyczną energię fal sprężystych utożsamianą z energią sejsmiczną rejestrowanych wstrząsów.

Tak więc, chociaż rozpatrujemy jedynie zależne od parametrów eksploatacji zmiany energii potencjalnej (energii odkształcenia sprężystego), to przekładają się one choć w nieznanym nam ilościowo stopniu na przebieg aktywności sejsmicznej.

Uzasadnia to poszukiwanie związków pomiędzy analitycznie szacowanymi zmianami energii potencjalnej a energią sejsmiczną wstrząsów – jedyną mierzalną, zresztą umownie, formą energii.

W skali lokalnej, a więc w określonym polu eksploatacyjnym, rozkład energii sejsmicznej jest zmienny na wybiegu ściany i silnie determinowany, co potwierdzają liczne badania, parametrami robót górniczych. Podobnie, co pokazują zamieszczone testy, w dużym stopniu zależne od tych parametrów są chwilowe wartości analitycznie obliczanej energii potencjalnej.

2. Metodyka wyznaczania przyrostów właściwej energii odkształcenia sprężystego w obszarach objętych wpływami eksploatacji

Efektywne wyznaczanie zmian właściwej energii sprężystej w rozległym obszarze górotworu objętym wpływami zaszłości i poddawanym wpływom bieżącej, często wielopokładowej eksploatacji, wymaga obliczania wszystkich składowych przestrzennego stanu naprężenia (odkształcenia) w kolejnych fazach jej rozwoju, w tym w jednostkowych przedziałach czasu – krokach postępu frontu eksploatacyjnego.

Stosunkowo proste wzory mechaniki ośrodków ciągłych – wspomniane [3,5] rozwiązania przestrzennego, przemieszczeniowego zadania teorii sprężystości – stanowią podstawę bardzo szybkich algorytmów obliczeniowych, umożliwiających wykonywanie wielowariantowych obliczeń nawet dla bardzo skomplikowanych, wielopokładowych układów zaszłości eksploatacyjnych.

Mimo silnej idealizacji własności mechanicznych górotworu (jednorodny, izotropowy ośrodek liniowo sprężysty) i prostemu, przemieszczeniowemu warunkowi brzegowemu, przy którym nad elementarnym wybraniem o bokach 2ax2b obniżenie pionowe ma stałą wielkość $W_{(x,y,o)}=W_o$, a nad calizną pokładu jest zerowe, wzory powyższe z powodzeniem stosowane są do prognozowania na wybiegach wyrobisk charakterystycznych naprężeniowych stref.

Już w stosunkowo nieznacznych odłegłościach pionowej i poziomej od krawędzi wybrania zanika osobliwość z tytułu nieciągłości warunku brzegowego i rozkłady naprężeń oraz przemieszczeń są zbliżone do opisywanych wzorami wyprowadzonymi przy ciągłym warunku brzegowym - Jaworski [6]. Ma to istotne znaczenie, gdyż składowe tensorów wyznacza się na poziomach wyżej zalegających, mocnych warstw skalnych. Dzięki przyjętym założeniom do omawianego rozwiązania można stosować zasadę superpozycji wpływów.

Sposób obliczania wielkości składowych tensora naprężeń i odkształceń podano szczegółowo w wielu pracach, m.in.[2].

Do wyznaczania zmian energii sprężystej można wprost zastosować znaną funkcję określającą potencjał sprężystości w najogólniejszym przypadku stanu naprężenia i odkształcenia

$$\phi = 0.5T_{\sigma}T_{\varepsilon},\tag{1}$$

gdzie:

 ϕ - energia właściwa odkształcenia sprężystego; [J/m³],

 T_{σ} - tensor stanu naprężenia,

 T_{ε} - tensor stanu odkształcenia.

Po rozpisaniu

$$\phi = \frac{1}{2} \left(\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx} \right)$$
(2)

Obliczane zmiany wielkości energii sprężystej są następstwem pracy odkształcenia wyrażonej jako iloczyn sił (naprężeń σ , τ) i odpowiadających im przesunięć (odkształceń ε , γ), przy czym [13] w punktach obliczeniowych wyznaczane są:

- $\Delta \phi_i$ przyrosty energii sprężystej w "elementarnych" przedziałach czasu Δt_i , w których określane są przyrosty naprężeń i odkształceń,
- $\sum \Delta \phi_i$ wartości chwilowe energii sprężystej dla rozpatrywanych zakresów eksploatacji w przedziałach czasu $\Delta T = n \Delta t_i$.

W obszarze górotworu nienaruszonego eksploatacją w określonej jednostkowej objętości złoża (otoczeniu punktu obliczeniowego) wielkość tak obliczonej energii sprężystej jako sumy właściwej energii odkształcenia objętościowego i postaciowego będzie stała, zależna od głębokości. Na głębokości 1000m ta potencjalna energia odkształcenia sprężystego (Φ_0 =const) osiągnie rząd 10⁵J. W obszarze oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych energia ta będzie także zależna od położenia rozpatrywanego punktu względem zrobów i krawędzi eksploatacji dokonanej i stała (Φ_z =const), jeśli pominąć relaksację naprężeń. Z uwagi na obserwowany z upływem czasu spadek intensywności oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych i relaksację naprężeń energia ta będzie zależna od czasu (Φ_z = $\Phi_{z(t)}$).

W punkcie obliczeniowym w zasięgu wpływów bieżącej eksploatacji energia chwilowa Φ_i będzie równa energii Φ_0 powiększonej lub pomniejszonej, w zależności od położenia frontu ścianowego względem tego punktu, o pewną wartość, zależną od parametrów przedmiotowej eksploatacji. Energia chwilowa w otoczeniu rozpatrywanego punktu będzie więc z upływem czasu narastać i spadać, a więc i przyrost $\Delta\Phi$ energii sprężystej na określony postęp frontu eksploatacyjnego będzie ulegał zmianom zależnym głównie od parametrów eksploatacyjnych.

Zmiany chwilowych wartości energii sprężystej w punkcie obliczeniowym w zależności od jego położenia względem postępującego frontu ścianowego i zaszłości eksploatacyjnych ilustrują wyniki obliczeń testowych – rys. 2, 3.

Ponadto, dla punktu położonego w osi symetrii ściany pokazano porównawczo przebieg tych zmian w układzie płaskim – układ, w którym określono naprężenia i odkształcenia pracuje w płaskim stanie odkształcenia.

Schemat sytuacji górniczej uwzględnianej w teście obliczeniowym przedstawia rys. 1, przy czym punkty P₀, P₁ i P₂ znajdują się 40m nad polem ściany o szerokości 200m i wybiegu 1000m prowadzonej na wysokość 4m z postępem dobowym wynoszącym 3m.



Rys.1. Schemat sytuacji górniczej uwzględnionej w obliczeniach testowych Fig.1. Scheme of mining situations investigated during the test calculations

W trakcie symulacji obliczano (oznaczenia na rys. 2, ilustrującym zmiany energetyczne w otoczeniu punktu P₀ położonego nad środkiem pola ścianowego poza zasięgiem wpływów zaszłości eksploatacyjnych):

 $\Delta \Phi_i$ – przyrosty (spadki) właściwej energii sprężystej w jednostkowych przedziałach czasu Δt (krokach postępu frontu),

 Φ_i – chwilowe wartości energii dla kolejnych kroków postępu frontu,

 $\Phi_{M(\Delta T)}$ – maksymalną wartość energii w rozpatrywanym przedziale czasu $\Delta T=n\Delta t$ dla zakresu

eksploatacji przeprowadzanej w przedziale czasu ΔT ,

 $\Delta \Phi_{M(\Delta T)}$ - maksymalny przyrost energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Sigma \Delta \Phi_i^+$ - sume chwilowych przyrostów energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Sigma \Delta \Phi_i^{-}$ - sumę chwilowych spadków energii w przedziale czasu ΔT ,

 $\Phi_{\rm K} = \Phi_0 + \Phi_Z$ – wartość końcową energii sprężystej po przeprowadzeniu rozpatrywanego zakresu eksploatacji.



- Rys.2. Zmiany właściwej energii sprężystej punkt P₀, położony w osi symetrii wyrobiska ścianowego – poza wpływami dokonanej eksploatacji górniczej
- Fig.2. Changes of specific elastic energy point P₀, placed on the line of symmetry of the longwall beyond the influence of past mining works



Rys.3. Chwilowe wartości właściwej energii sprężystej dla rozpatrywanych punktów Fig.3. Instantaneous values of specific elastic energy for examined points

Wyniki testu pokazują dużą zmienność chwilowych wartości energii potencjalnej w czasokresie, gdy górotwór w sąsiedztwie punktu obliczeniowego obejmowany jest wpływami postępującego frontu eksploatacyjnego. Widać także zmienność chwilowych wartości energii i pozostałych wyznaczanych wielkości w zależności od położenia punktu względem wytwarzanych zaszłości eksploatacyjnych.

Obliczając więc zmiany energii (w tym przypadku potencjalnej), zwłaszcza jeśli mają one być porównywane z silnie zmienną w lokalnej skali sejsmicznością indukowaną, wymogiem staje się, oprócz korzystania z rozwiązań przestrzennych, analizowanie tych zmian w krótkich interwałach czasu. Zbyt duże kroki obliczeń symulujące czasoprzestrzenny przebieg eksploatacji powodują pomijanie wartości ekstremalnych zarówno po stronie wzrostów, jak i spadków.

3. Parametry eksploatacji a zmiany wartości energii sprężystej

Istotnymi czynnikami różnicującymi zmiany energetyczne zachodzące w zasięgu wpływów prowadzonych robót górniczych są między innymi:

- głębokość eksploatacji,
- wysokość furty eksploatacyjnej,
- położenie rozpatrywanego obszaru górotworu względem wybieranego pokładu,
- wykształtowanie zaszłości eksploatacyjnych.

Przebieg tych zmian energetycznych (zróżnicowanie obliczanych wielkości) ilustrują wykresy na rys. 4 - 7, które podają wyniki symulacji numerycznych dla punktu położonego nad środkiem pola ścianowego w odległości pionowej wynoszącej 40m (również 80m – rys.6).

Zmiany właściwej energii sprężystej w trakcie przechodzenia frontem ścianowym pod równoległą do niego krawędzią wytworzoną nad środkiem pola w pokładzie zalegającym 100 i 150m powyżej pokładu wybieranego pokazuje wykres na rys.4.

Analiza wyników przeprowadzonych testów numerycznych pozwala stwierdzić, że analitycznie obliczane zmiany chwilowych wartości energii sprężystej oraz pozostałe rozpatrywane wskaźniki są w pełni wrażliwe na zmiany sytuacji górniczej, w jakiej prowadzone są roboty górnicze.



- Rys.4. Wartości chwilowe i przyrosty właściwej energii sprężystej dla różnych głębokości eksploatacji
- Fig.4. Instantaneous and increase values of specific elastic energy for diferent depth of excavation



- Rys.5. Wartości chwilowe i przyrosty właściwej energii sprężystej dla różnych wysokości eksploatacji
- Fig.5. Instantaneous and increase values of specific elastic energy for different height of excavation



- Rys.6. Wartości chwilowe i przyrosty właściwej energii sprężystej dla różnych odleglości od pokładu
- Fig.6. Instantaneous and increase values of specific elastic energy for different distances of the seam



Fig.7. Instantaneous and increase values of specific elastic energy for different vertical distances of mining edge

4. Opis poziomu sejsmiczności indukowanej przy wykorzystaniu obliczanych zmian energii odksztalcenia sprężystego

W deformowanych robotami górniczymi skałach dochodzi do silnych zmian energii potencjalnej, której jedynie część jest akumulowana w postaci odkształceń odwracalnych i w pewnych ograniczonych obszarach (ogniskach wstrząsów) przechodzi w energię kinetyczną pęknięcia – zniszczenia. Energia uwalniana w procesie niszczenia z obszaru ogniska wstrząsu przewyższa o co najmniej rząd obliczaną z sejsmogramów wstrząsów ich energię sejsmiczną.

Ilościowy opis przebiegu procesów naprężeniowo - deformacyjnych i przemian energetycznych związanych z dynamicznym niszczeniem określonej objętości skał w odniesieniu do tak złożonego, niejednorodnego ośrodka jak górotwór jest problemem otwartym.

Poszukiwanie więc relacji pomiędzy obliczanymi analitycznie przy idealizacji górotworu rzeczywistego zmianami energii potencjalnej a mierzalną umownie energią sejsmiczną (wielkościami zależnymi od parametrów robót górniczych) w odniesieniu do zastosowań praktycznych jest realne poprzez budowę odpowiednich modeli regresji [2,7,8].

Dysponując dla każdego z punktów $P_{(x,y,z)}$ siatki obliczeniowej generowanymi numerycznie tablicami:

- przyrostów ΔΦ⁺ i spadków ΔΦ⁻ właściwej energii sprężystej w jednostkowych przedziałach czasu Δt (krokach postępu frontu) i dłuższych jego interwałach ΔT=nΔt (odcinkach wybiegu),
- wartości parametrów charakteryzujących poziom sejsmiczności rejestrowanej w kolejnych przedziałach czasu – etapach rozwoju eksploatacji,

relację pomiędzy wielkościami obserwowanymi a obliczanymi można wyrazić za pomocą modelu regresji liniowej

$$\Delta\phi_{obs} = a_1 \sum_{i=1}^{n} \Delta\phi_{iobl}^{\dagger} + a_2 \sum_{i=1}^{n} \Delta\phi_{iobl}^{-} + \varepsilon, \qquad (3)$$

gdzie:

 $\Delta \phi_{obs}$ - sejsmiczność zarejestrowana w przedziale czasu $\Delta T=n\Delta t_i$,

 $\sum_{i=1}^{n} \Delta \phi_{i\,obl}^{-}, \sum_{i=1}^{n} \Delta \phi_{i\,obl}^{+}$ - obliczane analitycznie dla każdego z punktów siatki obliczeniowej

sumy chwilowych przyrostów bądź spadków właściwej energii sprężystej,

- n ilość przedziałów czasu Δt_i jednostkowych kroków postępu frontu ścianowego,
- ΔT porównawczy czasookres obliczeniowy, dla którego wyznaczane są parametry regresji,
- ε składnik losowy,
- a1, a2 parametry modelu regresji.

Rozkład wielkości przewidywanych wydatku energetycznego wstrząsów górniczych można, jak to pokazano w przykładzie obliczeniowym, przedstawiać w formie rozkładu warstwicowego, co pozwala analizować go na tle konturów eksploatacji, krawędzi i resztek.

Stopień zgodności rozkładu wartości przewidywanych z analogicznymi rozkładami wartości obserwowanych przesądza o celowości wykonywania na podstawie wyznaczonych współczynników regresji prognozy wyprzedzającej w rozpatrywanym rejonie eksploatacyjnym. Prognozę wyprzedzającą musi poprzedzać prognoza porównawcza.

Przykładowo, obliczając analitycznie przyrosty właściwej energii sprężystej w deformowanych warstwach piaskowca i porównując je z rejestrowaną sejsmicznością, zaprognozowano porównawczo, zgodnie z przyjętą metodologią, rozkład wydatku energetycznego wstrząsów na wybiegu konkretnego wyrobiska ścianowego.

Porównawcze obliczenia prognostyczne dotyczą rejonu pola zawałowej ściany M-8 prowadzonej w pokładzie 703/1-2-705 w obszarze górotworu objętym wpływami zaszłości eksploatacyjnych wytworzonych w przedmiotowym pokładzie oraz w zalegających około 240 i 340 m powyżej pokładach 626/2 i 624. Ściana M-8 to kolejne, piąte pole ścianowe wybrane w przedmiotowej partii pokładu. Wyniki obserwacji sejsmologicznych wskazują, że obok parametrów bieżącej eksploatacji na przebieg sejsmiczności ma wpływ wytworzony układ zaszłości eksploatacyjnych.

Ściana M-8 o długości frontu około 280m, wybiegu 1500m i wysokości od 2,3 do 3,0m, prowadzona była z postępem dobowym od 0,7 do 6,0m. Podobnie jak postęp dobowy, silną zmiennością cechowały się uzyskiwane postępy miesięczne – generalnie wynosiły one od 20 do 110 metrów.

Powyżej stropu bezpośredniego zalega około 20-metrowa warstwa piaskowca, a w dalszej odległości, bezpośrednio pod pokładem 626, występuje gruba 70m ława piaskowca o wytrzymałości na ściskanie około 70MPa, z załamywaniem której wiąże się sporadycznie obserwowane zjawiska sejsmiczne o energiach przekraczających rząd 10⁵J.

W okresie biegu ściany M-8 (III kwartał 2000r – III kwartał 2002r) wystąpiło ponad 3300 wstrząsów, przy czym lokalizowano zjawiska o energiach przekraczających rząd 10²J – 1980 wstrząsów o sumarycznej energii 5,7x10⁷J.

Kształtowanie się zarejestrowanej sejsmiczności ilustruje tabl. 1.

Tablica 1

Energia [J]	Ilość wstrząsów	Suma eng. [J]
10^3	1371	5.1e6
10^4	566	2.1e7
10^5	37	1.7e7
10^6	6	1.4e7
RAZEM	1980	5.7e7

Na rysunku 8a i 8b przedstawiono rozkłady obserwowanych i prognozowanych porównawczo (na podstawie zależności (1)) wartości wydatku energetycznego wstrząsów [J/m³] w rejonie pola ściany M-8.



Rys.8. Rozkład wartości obserwowanych (a) i prognozowanych (b) [J/m³] wydatku energetycznego wstrząsów indukowanych w rejonie ściany M-8
Fig.8. Distribution of observed (a) and predicted (b) values [J/m³] of energy release of tremors in the vinicity of longwall M-8

5. Podsumowanie

Aktualny stan oprogramowania, a także możliwości obliczeniowe komputerów pozwalają na efektywne wykonywanie prognoz zmian potencjalnej energii sprężystej w deformowanych warstwach skalnych przy praktycznie dowolnym wykształtowaniu dokonanej, aktualnie prowadzonej i projektowanej eksploatacji górniczej. Wyniki przeprowadzonych symulacji wykazują, że analitycznie obliczane wartości energii sprężystej są zależne od sytuacji górniczych, w jakich prowadzone są roboty górnicze.

Biorąc pod uwagę rezultaty obliczeń testowych zasadne wydają się próby korelowania ich z rejestrowanym poziomem sejsmiczności indukowanej.

LITERATURA

1. Białek J., Bańka P., Jaworski A.: Analityczne prognozowanie zmian energii sprężystej warstw skalnych. Z.N. Pol.Śl. s.Górnictwo z.239, Gliwice 1999.

- Jaworski A., Białek J., Drzęźla B., Bańka P., Kołodziejczyk P.: Badanie wpływu czasoprzestrzennych zmian energii odkształcenia górotworu na sejsmiczność indukowaną eksploatacją górniczą. Projekt badawczy KBN, Gliwice 1999.
- Dymek F.: Przemieszczeniowe zadania brzegowe przestrzennej teorii sprężystości i jego zastosowanie do zagadnień mechaniki górotworu. Archiwum Górnictwa, T. XIV, z.3, Warszawa 1969.
- Fairhurst C., Cornet F.: Rock fracture and fragmentation. Proc.22nd US Symp.on Rock Mechanics, MIT Cambridge Massachusetts, str.23-48.
- 5. Gil H.: The Theory of Strata Mechanics. PWN, Warszawa 1991.
- Jaworski A.: Wpływ ściśliwości calizny węglowej wybieranego pokładu na rozkład naprężeń i odkształceń w górotworze w sąsiedztwie czynnego frontu ścianowego. ZN Pol. Śl. s. Górnictwo, z. 138, Gliwice 1985.
- Jaworski A.: Możliwość wykorzystania analitycznych prognoz składowych przestrzennego stanu naprężenia do szacowania poziomu sejsmiczności indukowanej. Prace GIG, s. Konferencje nr 26, Katowice 1998.
- 8. Jaworski A.: Relationship between rock mass deformation and energy release of interdependent mining tremors in the area of Bytom Basin. Acta Montana No 9, 1996.

Recenzent: Dr inż. Adam Krzyżowski

Abstract

The paper presents exemplary results of works aiming to determine the influence of parameters of mining works on analiticaly calculated values of specific elastic energy in deformated rock layers. The authors provided general characteristics of the applied algorithms and computer programs used to carry out the calculations.

They presented exemplary calculations results involving the changes of specific elastic energy of strong rock layers. The influence of following mining parameters on changes of specific enastic energy were investigated: the depth of excavation, the height of excavation, different distances of the seam, different distances of mining edge. Basing on the plans of mining works in the mining area subject to strong tremors, the possibility of determination the changes of the level of induced seismicity based on analitically calculated values of specific elastic energy was presented.