ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1999
Seria: GÓRNICTWO z. 239 Nr kol. 1405

Jan BIAŁEK, Piotr BAŃKA, Andrzej JAWORSKI

ANALITYCZNE PROGNOZOWANIE ZMIAN ENERGII SPRĘŻYSTEJ WARSTW SKALNYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób obliczania przyrostów energii odkształcenia sprężystego w górotworze deformowanym wielopokładową eksploatacją górniczą. Podano wyniki symulacji numerycznych obrazujące zależność rejestrowanej sejsmiczności indukowanej od prognozowanych przyrostów energii sprężystej.

ANALYTICAL PREDICTION OF CHANGES OF ELASTIC STRAIN ENERGY IN ROCK LAYERS

Summary. The paper presents a method for calculating the increase of elastic strain energy in the rockmass subject to the deformation by multi-bed mining process. The results of numerical simulation illustrating the dependence of the recorded induced seismicity on the predicted increase of elastic energy was provided.

1.Wprowadzenie

Rozpoczęte kilkanaście lat temu [4] w Instytucie Eksploatacji Złóż Pol.Śl. badania wykazały istnienie zależności korelacyjnych pomiędzy procesami deformacyjnymi w górotworze (prognozowanymi analitycznie przyrostami wskaźników deformacji), zachodzącymi wskutek prowadzenia eksploatacji, a rejestrowaną aktywnością sejsmiczną [7]. Dalszy rozwój tych badań w zastosowaniu metod analitycznych do efektywnego prognozowania czasoprzestrzennych rozkładów składowych tensorów odkształcenia i naprężenia w naruszanym wielopokładową eksploatacją dużym obszarze górotworu staje się możliwy dzięki:

- zasadniczemu wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów,

- dysponowaniu stale uaktualnianymi zbiorami danych o rejestrowanych wstrząsach (kopalniane zbiory obejmujące okres kilku - kilkunastu lat) oraz danymi o czasoprzestrzennym przebiegu eksploatacji od pierwszej w danym obszarze poprzez bieżącą do projektowanej (np. zbiory danych utworzone w Instytucie Eksploatacji Złóż Pol.Śl. dla prawie wszystkich aktywnych sejsmicznie obszarów górotworu w GZW),
- opracowaniu algorytmów oraz pakietu programów komputerowych do prognozowania deformacji górotworu w oparciu o czasoprzestrzenny wariant teorii Budryka-Knothego [3] oraz do prognozowania deformacji i naprężeń w górotworze [5,8] w oparciu o rozwiązanie przemieszczeniowego problemu brzegowego liniowej torii sprężystości [9,12].

Oprogramowanie (Białek [5]) oparte jest na rozwiązaniach [9,12] określających rozkład naprężeń i odkształceń w półprzestrzeni (górotwór) wokół pustki (wyrobiska ścianowego) o kształcie prostokąta. Prognozy te pozwalają na uwzględnienie wpływów od praktycznie dowolnie skomplikowanej geometrii pól eksploatacyjnych, gdyż zmieniający się w czasie kształt parceli w pokładzie można opisać praktycznie dowolnym wielobokiem. Stosując zasadę liniowej superpozycji deformacji i naprężeń można więc ocenić przyrosty naprężeń odkształceń powodowane bieżącą eksploatacją prowadzoną w warunkach skomplikowanego układu zaszłości eksploatacyjnych. W konsekwencji można także określać (z dokładnością do przyjętego modelu ośrodka) zmienne w czasie i przestrzeni przyrosty właściwej energii sprężystej w obszarach górotworu (warstwach skalnych) obejmowanych deformacyjno-naprężeniowymi wpływami eksploatacji, a jak wiadomo, część tej energii może się uwalniać poprzez wstrząsy górnicze. Stwarza to możliwości ilościowego porównywania obliczanych zmian energetycznych górotworu z emisją sejsmiczną zaobserwowaną w rozpatrywanym czasie i obszarze.

Ustalane relacje pomiędzy obliczanymi zmianami energetycznymi a wskaźnikami obserwowanej sejsmiczności indukowanej powinny zdaniem autora mimo niedoskonałości przyjętego modelu umożliwiać sporządzanie dla prowadzonych w danym rejonie oraz sąsiednich projektowanych wybrań prognoz emisji sejsmicznej bardziej wiarygodnych od dotychczasowych. W dotychczasowych metodach prognozowania emisji sejsmicznej [4,7,14,1], jak już wspomniano, emisja ta była korelowana jedynie ze zmieniającymi się w czasie mierzalnymi wskaźnikami pionowych ruchów górotworu. Podkreślenia wymaga, że w szeregu przypadkach uzyskiwano widoczną zgodność pomiędzy prognozowaną i zarejestrowaną sejsmicznością.

2. Sposób szacowania sprężystej energii deformacji warstw skalnych

Do wyznaczania energii sprężystości można wprost zastosować znany wzór Clapeyrona określający potencjał sprężystości w najogólniejszym przypadku stanu naprężenia i odkształcenia

$$\phi = 0.5\, T_\sigma \cdot T_\varepsilon$$

gdzie: ϕ - energia właściwa odkształcenia sprężystego; [J/m^3],

T_σ - tensor stanu naprężenia,

T_ε - tensor stanu odkształcenia,

po rozpisaniu

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

gdzie przykładowo:

$\sigma_{x(x,y,z)} = \sigma_{xekspl} + p_x$ - naprężenie w kierunku osi X,

p_x - składowa pozioma naprężenia pierwotnego,

$\varepsilon_{x(x,y,z)} = \frac{1}{2G(1+\nu)}[\sigma_x - \nu(\sigma_z + \sigma_y)]$ - odkształcenie liniowe w kierunku osi X,

G - moduł sprężystości postaciowej,

ν - współczynnik Poissona.

Do wyznaczenia ilości tej energii w określonym punkcie obliczeniowym, jej przyrostów bądź spadków w trakcie rozwoju wielopokładowej eksploatacji niezbędna jest znajomość zmieniających się z upływem czasu składowych tensorów stanu naprężenia i odkształcenia. Jest to praktycznie możliwe, jeśli do obliczeń numerycznych zastosować - jak już wspomniano - wzory wyprowadzone (H. Gil, F. Dymek) przy założeniu przemieszczeniowych warunków brzegowych w stropie pokładu dla liniowo-sprężystego modelu górotworu.

Mimo silnej idealizacji własności mechanicznych górotworu (jednorodny, izotropowy ośrodek sprężysty) i dzięki prostemu, przemieszczeniowemu warunkowi brzegowemu, przy którym nad elementarnym wybieraniem o bokach 2ax2b obniżenie pionowe ma stałą wielkość $W_{(x,y,0)} = W_0$, a nad calizną pokładu jest zerowe, wzory powyższe z powodzeniem stosowane są do prognozowania na wybiegach wyrobisk charakterystycznych naprężeniowych stref.

Już w stosunkowo nieznacznych odległościach pionowej i poziomej od krawędzi wybrania zanika osobliwość z tytułu nieciągłości warunku brzegowego i rozkłady naprężeń oraz prze-

mieszczeń są zbliżone do opisywanych wzorami wyprowadzonymi przy ciągłym warunku brzegowym, zaś dzięki przyjętym założeniom do omawianego rozwiązania można stosować zasadę superpozycji wpływów.

Omawiane wzory opisujące składowe wektora przemieszczenia punktu oraz składowe tensorów stanu naprężenia i odkształcenia w punkcie $P_{(x,y,z)}$ są powszechnie znane, wielokrotnie przedstawiane, toteż z uwagi na objętość artykułu nie zostały przytoczone. Opracowany przez J. Białka [5] sposób obliczenia (przy zastosowaniu liniowej superpozycji) przyrostów naprężeń od eksploatacji bieżącej oraz układu zaszłości eksploatacyjnych, stosowany jest także do obliczania przyrostów odkształceń w kolejnych przedziałach czasu Δt (krokach postępu frontu eksploatacyjnego).

Algorytm obliczania wielkości składowych tensora naprężeń i odkształceń jest następujący:

1. Przeprowadzana jest dyskretyzacja prostokątnego obszaru obliczeniowego, zakładana jest siatka punktów obliczeniowych. Cały cykl obliczeń jest powtarzany dla wszystkich punktów siatki.
2. Obliczane są składowe p_x, p_y i p_z naprężenia pierwotnego. W oparciu o wprowadzoną wartość kroku czasowego Δt i czasowy zakres analizowanej eksploatacji ustalana jest ilość i_{max} odcinków czasu Δt. Program generuje w pamięci operacyjnej tablice Sx $(1..i_{max})$, Sy $(1..i_{max})$, ... Syz $(1..i_{max})$ oraz Ex $(1..i_{max})$, Ey $(1..i_{max})$, ...Eyz $(1..i_{max})$, w których będą zapamiętywane przyrosty w czasie kolejnych składowych tensorów stanu naprężenia i odkształcenia.
3. Dla każdej parceli eksploatacji wykonywane są następujące czynności:

   Cała parcela dzielona jest na elementarne pasy równolegle do przecinki ścianowej. Szerokość pasów odpowiada postępowi ściany w czasie Δt. Pasy te są trapezami. Gdy pasy te są dostatecznie wąskie, to odpowiadające im trapezy można zamienić na równoważne im prostokąty, do których znajdują zastosowanie wzory H. Gila [12].

   Korzystając z powyższych wzorów oraz wzorów na transformację składowych tensora naprężenia i odkształcenia, obliczamy przyrost naprężeń i odkształceń spowodowany eksploatacją kolejnych fragmentów parceli (kolejnych pasków). Dodajemy składowe tych przyrostów do przyrostów naprężeń i odkształceń spowodowanych przez inne ściany w tym samym przedziale czasu.

4. Ciągi przyrostów naprężeń i odkształceń, zawarte w tablicach Sx ($1..i_{max}$), Sy ($1..i_{max}$), ... Syz ($1..i_{max}$) oraz Ex ($1..i_{max}$), Ey ($1..i_{max}$), ...Eyz ($1..i_{max}$), przekształcane są w ciągi zmiennych w czasie składowych tensorów naprężeń i odkształceń. Do składowych σ_x, σ_y, σ_z dodawane są odpowiednie wartości składowych naprężenia pierwotnego p_x, p_y, i p_z.

Dla uwzględnienia faktu, że z upływem czasu maleje intensywność oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych, przyjęto, że składowe naprężenia podlegają zjawisku relaksacji według reologicznego modelu „standard", tzn. proces relaksacji przebiega zgodnie ze wzorem:

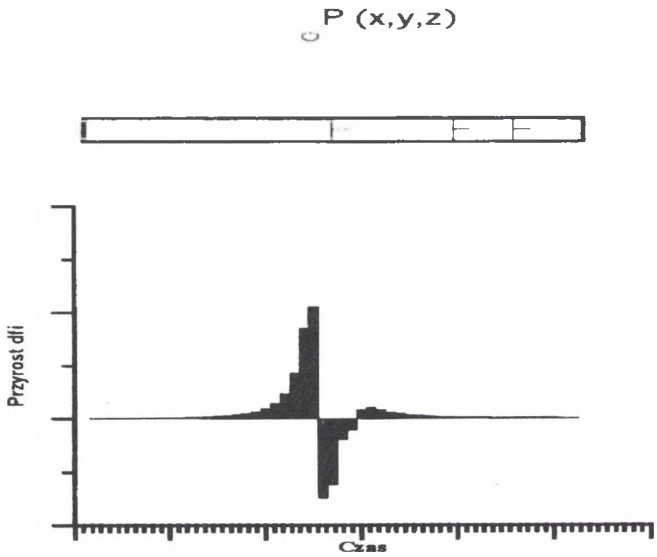
$$\sigma_{rel}(t) = a_{rel}\sigma(t) + (1 - a_{rel})\int_0^t \frac{\partial\sigma(\tau)}{\partial\tau}\exp\left(-\frac{t-\tau}{t_{rel}}\right)d\tau$$

gdzie:

σ_{rel} - obliczana wartość składowej naprężenia z uwzględnieniem procesu relaksacji,

$\sigma(t)$ - wartość składowej tensora stanu naprężenia w chwili t obliczona bez uwzględnienia zjawiska relaksacji,

a_{rel} - współczynnik określający, do jakiej wartości maleją naprężenia σ_{rel} po upływie długiego czasu.

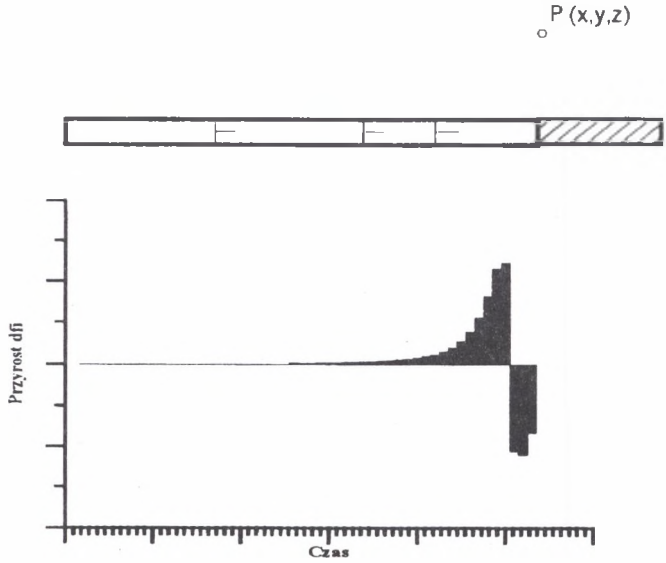


Rys.1. Kształtowanie się zmian energetycznych - punkt P(x,y,z) nad środkiem czynnego pola ścianowego
Fig.1. Changes of elastic energy - point P(x,y,z) above the centre of the wall

Rozpatrywane zmiany energetyczne zachodzące w deformowanych warstwach skalnych dla najprostszego przypadku przechodzenia długim, prostoliniowym frontem ścianowym pod punktem P (x,y,z) usytuowanym nad środkiem pola ilustruje rys.1.

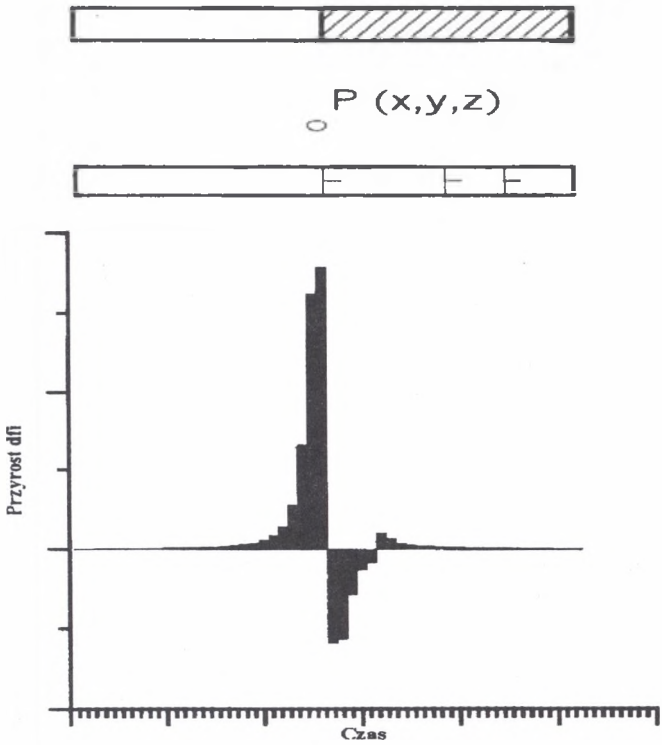
Na rysunkach 2 i 3 pokazano wyniki testu obliczeniowego - przyrosty $\Delta\phi_i$ [J/m^3] właściwej energii sprężystej odkształcenia dla dwóch typowych sytuacji górniczych, przy których obserwuje się na ogół silną zmienność w ilości i wydatku energetycznym indukowanych wstrząsów:

- dochodzenie frontem ścianowym do zrobów w tym samym pokładzie,
- przechodzenie frontem ścianowym pod krawędzią eksploatacji w zalegającym wyżej pokładzie.

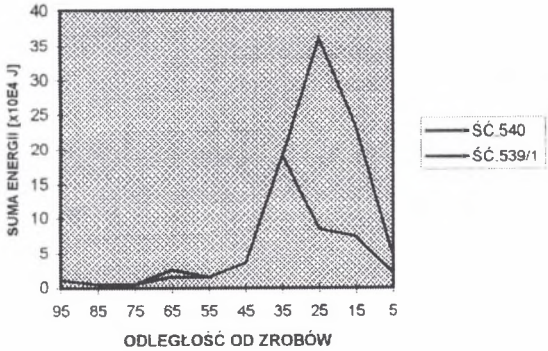


Rys.2. Kształtowanie się zmian właściwej energii sprężystej w trakcie zbliżania się ścianą do zrobów
Fig.2. Changes of elastic energy with wall advance approaching abandoned workings

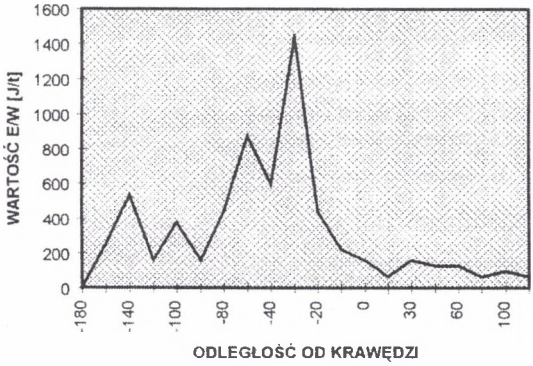
Przedstawione przykłady obliczeń testowych (rys.1, 2 i 3) wykazują, że przebiegi zmian energetycznych (obliczanych w przedziałach Δt_i przyrostów $\Delta\phi_i^+$ lub spadków $\Delta\phi_i^-$ właściwej energii sprężystej) jakościowo odpowiadają obserwowanym [11] zmianom rejestrowanej sejsmiczności.



Rys.3. Kształtowanie się zmian właściwej energii sprężystej w trakcie przechodzenia ścianą pod krawędzią eksploatacji
Fig.3. Changes of elastic energy with the wall being worked under the edge



Rys.4. Kształtowanie się sejsmiczności w trakcie dochodzenia ścianą do zrobów w tym samym pokładzie
Fig.4. Changes of elastic energy with wall advance approaching abandoned workings



Rys.5. Kształtowanie się sejsmiczności w trakcie przechodzenia ścianą pod krawędzią eksploatacji
Fig.5. Changes of the seismicity with the wall being worked under the edge

Na rysunkach 4 i 5 zaczerpniętych z pracy [11] pokazano zmiany zarejestrowanej sejsmiczności w analogicznych jak na rysunkach 2 i 3 sytuacjach górniczych.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono aktualny stan badań prowadzonych w Instytucie Eksploatacji Złóż Pol.Śl. nad możliwością szacowania zmian energii sprężystej w górotworze naruszonym eksploatacją.

Pokazana dla typowych sytuacji górniczych jakościowa zgodność pomiędzy analitycznie szacowanym przebiegiem zmian energetycznych a obserwowanym, silnie zmiennym w czasie poziomem sejsmiczności indukowanej [6,11] stwarza możliwość ilościowego porównywania obliczonych zmian energetycznych górotworu z emisją sejsmiczną obserwowaną w tym samym przedziale czasu i obszarze.

Ustalane relacje pomiędzy obliczanymi zmianami energetycznymi górotworu a wskaźnikami zaobserwowanej emisji sejsmicznej powinny pozwolić na sporządzanie oszacowań zmian w poziomie tej emisji na wybiegach projektowanych ścian. Zachodzą tu możliwości prognozowania tych zmian w czasoprzestrzeni (wyznaczanie obszarów wzmożonej sejsmiczności) oraz w funkcji czasu. Obok sumarycznego wydatku energetycznego wstrząsów i ich liczebności przypadających na dany obszar (siatka punktów obliczeniowych) bądź na jednostkę czasu (krok postępu frontu) możliwe jest także prognozowanie maksymalnej energii po-

tencjalnego wstrząsu w danym przedziale czasu. Wskazują na to między innymi wyniki dotychczasowych badań, gdzie poziom sejsmiczności wiązano jedynie z wybranymi - mierzalnymi wskaźnikami deformacji wstrząsogennych warstw skalnych [1,2,7,13].

LITERATURA

1. Bańka P., Jaworski A.: Prognozowanie czasowych zmian sejsmiczności indukowanej w oparciu o deformacje górotworu wywołane eksploatacją górniczą. ZN Pol.Śl. s. Górnictwo z. 236, Gliwice 1997.
2. Bańka P., Jaworski A.: Wpływ deformacji górotworu na maksymalne energie zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górniczą. ZN Pol.Śl. s. Górnictwo (w druku).
3. Białek J.: Proponowany na EMC do prognozowania wskaźników dynamicznych deformacji niecek osiadania. OTG nr 7, Katowice 1985.
4. Białek J., Jaworski A.: Próba oceny aktywności sejsmicznej na podstawie prognozowanych stanów deformacyjnych górotworu. ZN AGH, s. Górnictwo, z. 142, Kraków 1989.
5. Białek J.: Ocena wpływu koordynacji frontów ścianowych na zagrożenie tąpaniami i wstrząsami górniczymi w oparciu o obliczone ekstremalne w czasie naprężenia górotworu. IV Konferencja naukowo-techniczna - Tąpania 97, GIG, Katowice 1997.
6. Drzęźla B., Białek J., Jaworski A., Bańka P., Słapa W.: Rozkład ilości i energii wstrząsów górniczych w sąsiedztwie czynnych wyrobisk ścianowych. Publ.Inst.Acad.Sc.M-15 (235), Warszawa 1991.
7. Drzęźla B., Białek J., Jaworski A., Bańka P., Kołodziejczyk P.: Badanie związków sejsmiczności indukowanej eksploatacją górniczą z parametrami opisującymi deformacje ośrodka skalnego. Projekt badawczy KBN nr 90375901, Gliwice 1994.
8. Drzęźla B., Białek J., Jaworski A.: Metoda prognozowania rozkładów naprężeń w strefach oddziaływania zaszłości eksploatacyjnych. Publ.Inst.Geoph.Pol.Acad.Sc., M-10, 1998.
9. Dymek F.: Przemieszczeniowe zadania brzegowe przestrzennej teorii sprężystości i jego zastosowanie do zagadnień mechaniki górotworu. Archiwum Górnictwa, T. XIV, z. 3, Warszawa 1969.
10. Etryk W., Barański A.: Biuletyn Infor. o zagrożeniu tąpaniami w polskich kopalniach węgla kamiennego w 1995 r., PAWK, Katowice 1995.

11. Gerlach Z.: Empiryczne modele przewidywania stanu zwiększonego zagrożenia tąpaniami w oparciu o wyniki sejsmologii górniczej. Praca doktorska, Kraków 1990.
12. Gil H.: The Theory of Strata Mechanics. PWN, Warszawa 1991.
13. Jaworski A.: Związek pomiędzy deformacją górotworu a wydatkiem energetycznym wstrząsów z rejonu kopalń Bobrek i Miechowice. ZN Pol.Śl. s. Górnictwo, z. 225, Gliwice 1995.
14. 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: Prof.dr hab.inż. Józef Dubiński

Abstract

The paper presents a method for calculating the increase of elastic strain energy in the rockmass subject to the deformation by multi-bed mining process.

General characteristic of the applied calculation algorithms was provided, together with the results of numerical simulation illustrating the dependence of the recorded induced seismicity on the predicted increase of elastic energy.