

*Jan Walaszczyk\*, Lucyna Florkowska\*\**

## KOMPUTEROWA SYMULACJA STANU NAPRĘŻENIA W SĄSIEDZTWIE WYROBISKA GÓRNICZEGO Z UWZGLĘDNIENIEM PRZEPEŁYWU GAZU\*\*\*

---

### 1. Wstęp

W ostatnim czasie polskie górnictwo boryka się ze wzrostem zagrożeń naturalnych, do których należy również zagrożenie metanem. Jak podaje Główny Instytut Górnictwa [4], już ponad 80% węgla wydobywanych jest w Polsce w warunkach zagrożenia metanowego. Ma to związek zarówno ze zwiększaniem głębokości, jak i z narastającą koncentracją eksploatacji.

Migracja metanu z warstw spągowych, do pokładów pierwotnie niezawierających metanu oraz do wyrobisk stanowi poważne zagrożenie bezpieczeństwa. Migracja ta odbywa się najczęściej poprzez szczeliny i spękania górotworu, które mogą powstać, bądź uaktywnić się w wyniku naruszenia pierwotnego stanu równowagi masywu skalnego. W niniejszym artykule przedstawiono niektóre wyniki prac nad modelowaniem numerycznym zmian stanu naprężeń w górotworze, wywołanych podziemną eksploatacją węgla kamiennego, z uwzględnieniem występowania metanu.

### 2. Opis zagadnienia

Przedmiotem pracy prezentowanej w niniejszym artykule było wyznaczenie stanu naprężeń w otoczeniu wyrobiska górniczego, z uwzględnieniem oddziaływania ciśnienia metanu oraz procesu jego migracji, poprzez szczeliny, do warstw pierwotnie niemetanowych. Zagadnienie rozwiązywane było na drodze modelowania numerycznego, metodą elementów skończonych. Do obliczeń wykorzystano pakiet programów MES — Abaqus.

---

\* Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

\*\* Instytut Mechaniki Górotworu, Polska Akademia Nauk, Kraków

\*\*\* Praca finansowana ze środków MNiSWw ramach projektu badawczego nr 4 T12A 055 30

Istotą rozwiązania jest symulacja zjawisk zachodzący w otoczeniu wyrobiska podczas eksploatacji węgla kamiennego, w sytuacji, kiedy możliwa jest migracja metanu z niżej zalegającego pokładu.

Prowadzenie eksploatacji podziemnej zawsze wiąże się z naruszeniem dotychczasowego stanu równowagi, w jakim pozostaje górotwór otaczający złożę. Stan ten jest wypadkową wielu czynników, z których najistotniejsze, to:

- ciężar skał,
- budowa warstwowa,
- oddziaływanie płynów porowych,
- naprężenia tektoniczne,
- wcześniej prowadzone eksploatacje.

Każdy z wymienionych składników może w znaczący sposób zdeterminować ogólny stan naprężeń, który stanowi ich wypadkową. Chcąc wyznaczyć rozkład naprężeń wokół wyrobiska należy zatem na wstępie ustalić, jak wygląda stan masywu skalnego przed jego wykonaniem. Stan ten jest bowiem warunkiem początkowym analizy. Jego poprawne określenie nie jest jednak łatwe. Warto zauważyć, że spośród wymienionych czynników, tylko niektóre można wyznaczyć z zadowalającą dokładnością. Zwykle w obliczeniach uwzględnia się jedynie właściwości fizyczne poszczególnych warstw skalnych, wyznaczane na podstawie badań geotechnicznych, choć nie ulega wątpliwości, że poprzednie eksploatacje oraz ewentualne naprężenia geotechniczne (zwłaszcza w pobliżu fałdów i uskoków) mogą odgrywać znaczącą rolę. W prezentowanej w tym artykule analizie, w obliczeniach uwzględnione zostało także oddziaływanie metanu, który zdeponowany był pod ciśnieniem w jednej z warstw masywu. Metan miał możliwość przepływu w złożu i migracji poprzez spękania w górotworze. W ten sposób model zagadnienia obejmować miał nie tylko zmiany stanu naprężenia wywołane eksploatacją, ale również proces przepływu metanu i jego migracji poprzez szczeliny do wyrobiska, z niżej zalegającego pokładu metanowego.

Metan w pokładach węgla (tzw. MPW) występuje w złożach węgla kamiennego w postaci cząsteczek zasorbowanych na ziarnach węgla oraz w postaci wolnej, wypełniającej pory. Przepływ metanu przez węgiel jest procesem bardzo złożonym. Przyczyną tego są zarówno fizykochemiczne oddziaływania szkieletu z przepływającym gazem, jak również fakt, że węgiel jest ośrodkiem szczelinowato-porowatym, w którym struktura i geneza porów jest bardzo zróżnicowana. Mamy tu do czynienia z występowaniem kawern, szczelin, płaszczyzn łupliwości oraz makro- i mikroporów, wśród których wyróżnić można mikropory ślepe i przelotowe. Na zjawisko przepływu gazu przez węgiel składa się zatem [2]:

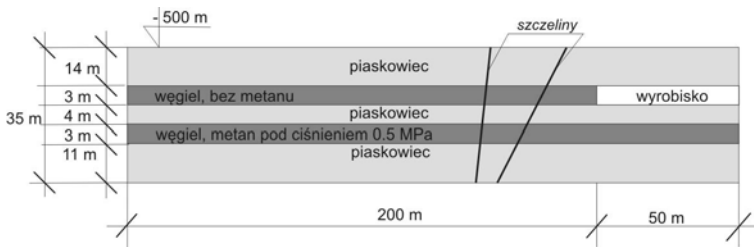
- dyfuzja w mikroporach i matrycy węgla,
- laminarny przepływ przez otwarte, zdemineralizowane mikroszczeliny i kawerny,
- przepływ lub dyfuzja przez mikroszczeliny, kawerny i płaszczyzny łupliwości blokowane częściowo przez diagenetyczne minerały oraz
- przepływ laminarny przez makroszczeliny.

Głównymi kanałami przepływu są jednakże kawerny, szczeliny i płaszczyzny łupliwości. Kiedy przepływający nimi płyn ma wysokie ciśnienie, dochodzi do poszerzania kanałów przepływowych. Mikropory ślepe wypełniane są na drodze dyfuzji, wskutek czego pęczniają, wywołując zwężanie kanałów przepływu. Zjawiska te powodują, że przepuszczalność węgla silnie zależy od rodzaju i ilości płynu [1].

Zarówno obecność metanu wolnego w makroporach, jak i metanu zasorbowanego na powierzchni ziaren, indukuje w węglu naprężenia. Wypełniający przestrzeń porową metan oddziałuje na ścianki szkieletu węglowego. Natomiast metan zasorbowany wywołuje pęcznienie substancji węglowej, co indukuje w ośrodku tzw. naprężenia stężeniowe [5]. Udział naprężeń stężeniowych wydaje się jednak nie odgrywać znaczącej roli w zmianie stanu naprężenia wokół wyrobiska. Dlatego też został pominięty w dalszych rozważaniach.

### 3. Model zagadnienia

Zagadnienie zamodelowane zostało, jako zadanie płaskie (2D). W sensie geometrycznym obszar zadania jest „tarczą”, pozostającą w płaskim stanie odkształcenia. „Tarcza” ta stanowi wycinek górotworu, otaczający dwa pokłady węgla kamiennego, zalegające na głębokości ok. 500 m (rys. 1). Przez wszystkie warstwy objęte modelem przechodzą dwie hipotetyczne płaszczyzny w których możliwe jest pęknięcie masywu i powstanie szczeliny. Do zamodelowania procesu powstawania szczelin użyto specjalnego typu elementów skończonych, dostępnych w kodzie Abaqusa [6], tzw. *cohesive elements*.



Rys. 1. Schemat zadania

W zadaniu przyjęto przemieszczeniowe warunki brzegowe, które uniemożliwiają przemieszczenia poziome na brzegach pionowych oraz przemieszczenia pionowe na dolnym brzegu. Tarcza obciążona jest przyłożonym od góry ciśnieniem, symulującym ciężar nadkładu, ciężarem własnym poszczególnych warstw oraz ciśnieniem metanu w pokładzie dolnym. Warunki początkowe stanowią naprężenia geostatyczne (związane z ciężarem własnym oraz ciśnieniem porowym), ciśnienie metanu w złożu (o wartości 0,5 MPa) oraz początkowa wartość współczynnika filtracji węgla.

Przyjęto, dla uproszczenia obliczeń, że węgle i piaskowce w poszczególnych warstwach modelu mają identyczne właściwości fizyczne. Piaskowce opisano modelem ciała idealnie

sprężystego, izotropowego. Założono, że są nieprzepuszczalne. Parametry prawa Hooke'a oraz wartość gęstości przyjęto dla piaskowców następująco:

- moduł sprężystości piaskowca  $E_p = 9$  GPa,
- współczynnik Poissona piaskowca  $\nu_p = 0,25$ ,
- gęstość piaskowca  $\rho_p = 2\,500$  kg/m<sup>3</sup>.

Węgiel zamodelowany został, jako liniowo sprężysty, izotropowy ośrodek porowaty, nasycony metanem, z możliwością jego przepływu przez pory. Przyjęte wartości parametrów materiałowych dla węgla zestawiono w tabeli 1.

**TABELA 1**  
**Przyjęte do obliczeń właściwości węgla i metanu**

Parametr	Jednostka	Przyjęta wartość
Gęstość węgla	kg/m <sup>3</sup>	1 600
Porowatość początkowa węgla	%	2,00
Początkowy wskaźnik porowatości węgla	—	0,020408
Współczynnik filtracji węgla	m/s	$7,2 \cdot 10^{-9}$
Moduł Younga węgla	Pa	$3 \cdot 10^9$
Współczynnik Poissona węgla	—	0,25
Współczynnik lepkości dynamicznej metanu	N·m/s <sup>2</sup>	$10,9 \cdot 10^{-6}$

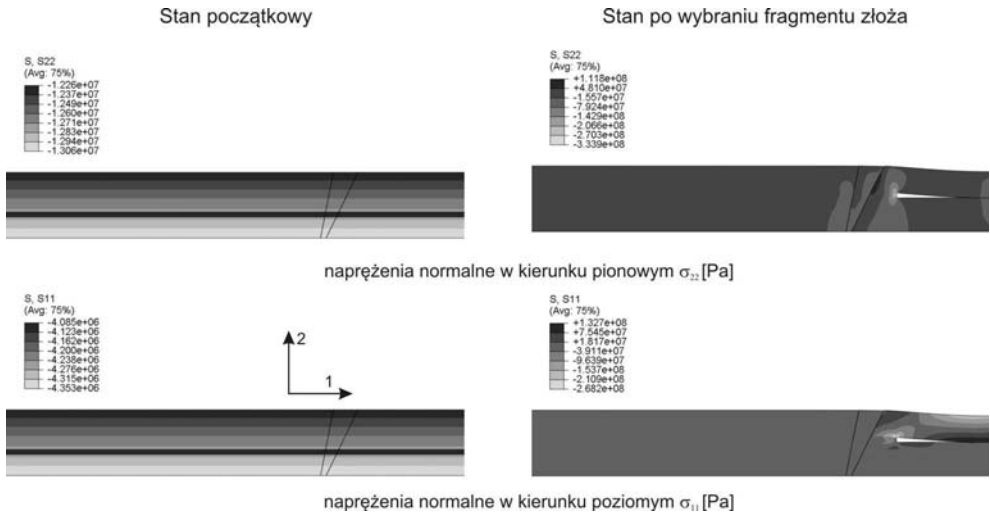
Metan zamodelowano jako gaz ściśliwy, o ciężarze właściwym (w warunkach normalnych)  $\gamma_{\text{CH}_4} = 7,024$  N/m<sup>3</sup> i lepkości dynamicznej  $\mu = 10,9 \cdot 10^{-6}$  Pa·s, którego przepływ przez pory i szczeliny opisany jest prawem Forchheimera [6].

Warto w tym miejscu podkreślić, że wpływ sorpcji na zmianę właściwości węgla uwzględniony został tylko w przypadku współczynnika filtracji, który przyjęto dla węgla nasyconego metanem pod ciśnieniem. Pozostałe parametry materiałowe przyjęte w pracy nie uwzględniają oddziaływania sorpcji.

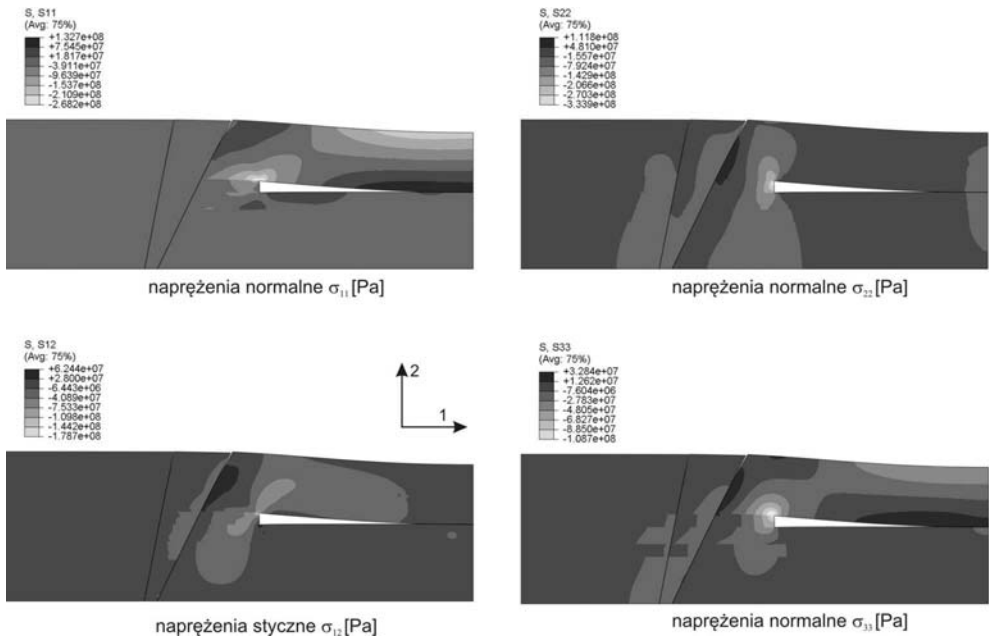
Obliczenia numeryczne wykonane zostały w Laboratorium Obliczeń Numerycznych Mechaniki Ośrodków Wielofazowych Instytutu Mechaniki Górotworu PAN.

#### **4. Analiza uzyskanych wyników**

Początkowo cały obszar zadania znajdował się w stanie naprężeń geostatycznych. W dolnej warstwie węgla, zmagazynowany był metan, który zalegał tam pod ciśnieniem 0,5 MPa. Układ ten pozostawał w równowadze do momentu, gdy, poprzez usunięcie grupy elementów, zamodelowane zostało wybranie części pokładu. Stan naprężeń normalnych w masywie skalnym przed i po wybraniu fragmentu złoża pokazano na rysunku 2. Widoczny jest warstwowy układ naprężeń, odpowiadający budowie masywu i wpływ ciśnienia porowego w dolnym pokładzie węgla. Wybranie części pokładu spowodowało zniszczenie masywu w założonych płaszczyznach.

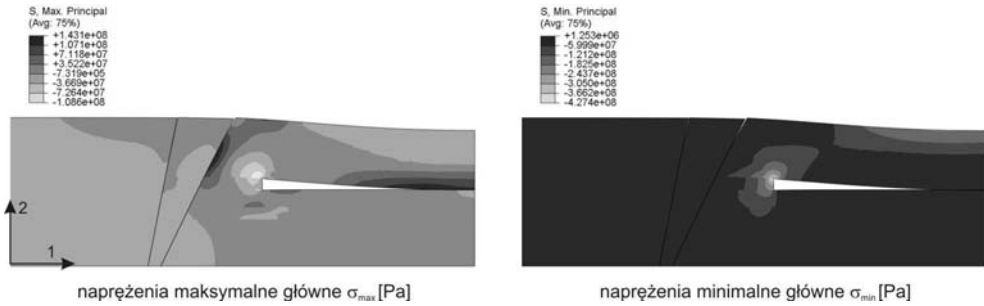


**Rys. 2.** Naprężenia normalne w masywie skalnym przed i po wybraniu fragmentu złoża



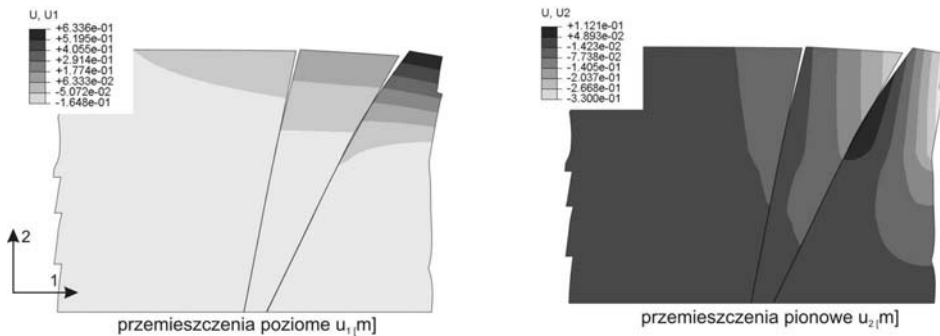
**Rys. 3.** Wyznaczony stan naprężeń wokół wyrobiska

Na rysunku 3 przedstawiony został stan naprężeń w otoczeniu wyrobiska i szczelin, natomiast na rysunku 4 maksymalne i minimalne naprężenia główne w tym rejonie. Na prezentowanych rozkładach widoczne są koncentracje naprężeń zarówno wokół wyrobiska, jak i w pobliżu pęknięć (szczelin).



**Rys. 4.** Rozkład maksymalnych i minimalnych naprężeń głównych wywołany wybraniem fragmentu złoża

Zniszczenie materiału skalnego i rozwarcie szczeliny widoczne jest na rysunku 5, gdzie pokazano przemieszczenia poziome i pionowe. Przez rozwartą szczelinę nastąpił przepływ metanu z pokładu dolnego do, pierwotnie nie zawierającego metanu, pokładu górnego oraz do wyrobiska.

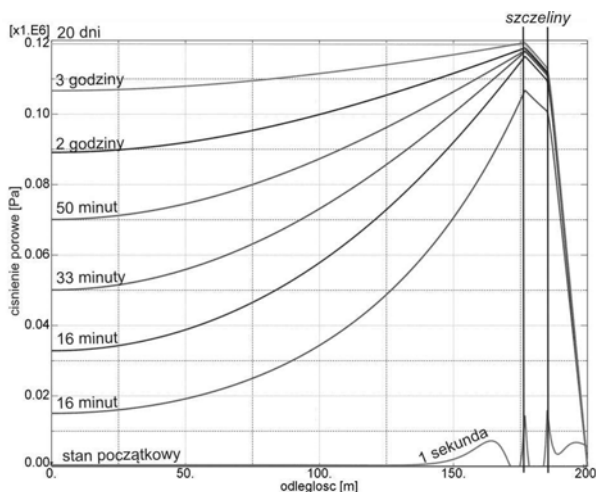


**Rys. 5.** Przemieszczenia w otoczeniu szczelin spowodowane eksploatacją

Na rysunku 6 przedstawiono rozkład ciśnienia porowego metanu w pokładzie górnym. W stanie początkowym ciśnienie to było zerowe. W momencie wybrania fragmentu złoża nastąpiło pęknięcie skał masywu i migracja metanu przez powstałą szczelinę z pokładu dolnego. Na wykresie sporządzonym dla 1 sekundy widoczne są „piki”, obrazujące wpływ metanu w pory węgla. Jednocześnie wykonanie wyrobiska powoduje nagły wypływ metanu do tegoż wyrobiska. Jest on jednak ograniczony przepuszczalnością skały, stąd widoczne na wykresie spiętrzenie ciśnienia, wskutek chwilowego zablokowania się porów. Na kolejnych krzywych efekt ten już nie występuje. Widoczny jest równomierny spadek ciśnienia porowego przy ścianie wyrobiska.

## 5. Podsumowanie

W pracy zawarto wyniki analizy numerycznej obejmującej naruszenie równowagi górotworu, wskutek prowadzenia eksploatacji górniczej w pokładzie węgla. W analizie uwzględniono możliwość spękania masywu skalnego i migracji metanu w górotworze.



Rys. 5. Przemieszczenia w otoczeniu szczelin spowodowane eksploatacją

Fakt pojawiania się metanu w wyrobiskach i zrobach pokładów uważanych za niemetanowe bywa obserwowany w polskich kopalniach i wiąże się zawsze z ogromnym zagrożeniem. Dlatego też możliwość symulacji zjawisk i procesów związanych z tym zagadnieniem wydaje się cenna. Obliczenia tego rodzaju są stosunkowo trudne, z uwagi na konieczność modelowania zniszczenia z powstawaniem nieciągłości. Interesujące są wyniki analiz wykonywanych przy użyciu kodu metody elementów odrębnych UDEC [3]. Jak wykazano na zaprezentowanym przykładzie obliczeniowym, modelowanie zniszczenia masywu skalnego i towarzyszących mu procesów przepływu metanu możliwe jest również przy zastosowaniu metody elementów skończonych. Należy podkreślić, że uzyskanie wiarygodnych wyników obliczeń uwarunkowane jest zarówno poprawnym wyznaczeniem właściwości skał, zwłaszcza w odniesieniu do inicjacji i przebiegu zniszczenia jak i odpowiednim rozpoznaniem istniejącego stanu naprężeń i ciśnienia metanu.

#### LITERATURA

- [1] Dyrka L., Żółcińska J.: Eksperymentalne badania przepływu gazu o zróżnicowanych zdolnościach sorpcyjnych w skałach. Prace IMG PAN, 1997
- [2] Gamson P.D., Beamish B.B., Johnson D.P.: Coal Microstructure and Micropermeability and their Effects on Natural Gas Recovery. Fuel, 702 1993. s. 87–99
- [3] Kwaśniewski M., Lasek S.: Analiza numeryczna migracji metanu z warstw spągowych do wyrobiska ścianowego. Górnictwo i Geoinżynieria, 3/1, 2007
- [4] Oświadczenie Głównego Instytutu Górnictwa z dn. 22.09.2009, NETTG.pl Portal Trybuny Górniczej, <http://www.nettg.pl/Artykuly/Analizy-i-Komentarze/Drukuj/GIG:-80-procent-wydobycia-z-pokladow-metanowych>, 27568, 2009
- [5] Ryncarz T.: Zarys fizyki górotworu. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1993, s. 184–189
- [6] Theory Manual ABAQUS