

Tomasz CISEK, Jan PĘCIAK, Marek WESOŁOWSKI

SPÓSÓB WYZNACZANIA ZASIĘGU STREF TRWAŁYCH ZNISZCZEŃ W CALIŹNIE WĘGLOWEJ POWSTAJĄCYCH W TRAKCIE EKSPLOATACJI

Streszczenie. W artykule przedstawiony został sposób wyznaczania zasięgu stref trwałych zniszczeń w caliźnie węglowej podczas prowadzenia eksploatacji. W tym celu zasymulowano komputerowo eksploatację górnictwem w płaskiej tarczy ośrodka górnictwa. Jako kryterium zniszczenia przyjęto przekroczenie przez wartość naprężeń eksploatacyjnych wytrzymałości na ściskanie calizny węglowej. Ponadto w pracy podjęto próbę określenia gabarytów filara węglowego pozostawionego przy podchodzeniu eksploatacji górnictwa do starych zrobów.

A WAY OF DETERMINATION OF STABLE FAILURE ZONES RANGE IN SOLID COAL WHICH OCCURS DURING MINING

Summary. The paper presents a way of determination of stable failure zones range in solid coal which occurs during mining. Authors used computer methods to simulate two dimensional mining exploitation. The overflow of a coal mass compression strength by exploitation stress was taken as a failure criterion. Problem of coal pillar size determination in case of approach with working front to abandoned workings was also considered.

1. Wstęp

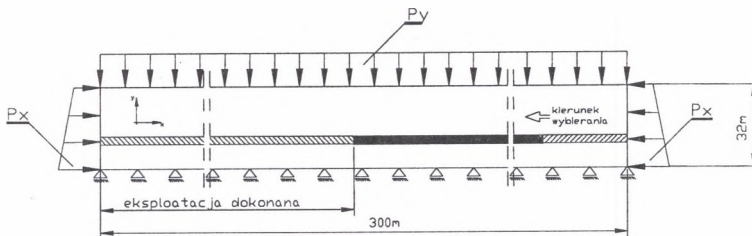
W dobie coraz powszechniej występującego zagrożenia sejsmicznego, a także w trosce o minimalizację strat zasobów podziemnego zakładu górnictwa, praktyka zmusza nas do prowadzenia eksploatacji w sąsiedztwie starych zrobów. Czyste wybieranie złoża zapobiega bowiem w znacznej mierze niebezpiecznym koncentracjom naprężeń w sąsiedztwie czynnych wyrobisk zarówno eksploatacyjnych, jak i przygotowawczych. Rozpatrując zbliżanie się frontem wybierania do krawędzi uprzednio zakończonej eksploatacji natrafiamy na problem wyznaczenia zasięgu stref trwałych zniszczeń w eksploatowanym pokładzie lub warstwie

zarówno w sąsiedztwie czynnego frontu, jak i krawędzi eksploatacji dokonanej [8, 9]. Powstaje przy tym konieczność odpowiedzi na niezwykle istotne pytanie o rozmiary filara, jaki należy pozostawić w złożu, aby nie spowodować wystąpienia niebezpiecznego w skutkach tapnięcia, a jednocześnie, aby filar ten nie pozostał resztką będącą w przyszłości przyczyną niebezpiecznej koncentracji naprężeń. Z punktu widzenia geomechaniki problem ten sprowadza się do przeanalizowania zasięgu pól koncentracji naprężeń, pochodzących od czynnego frontu oraz od krawędzi eksploatacji dokonanej i stwierdzenia, w którym momencie zaczną się wzajemnie na siebie nakładać. Powoduje to bowiem wzrost naprężeń eksploatacyjnych, aż do przekroczenia przez nie wytrzymałości calizny węglowej.

Dotychczasowe próby rozwiązania powyższego problemu opierały się głównie na znalezieniu równań funkcji opisujących rozkład naprężeń pionowych w stropie rozpatrywanego pokładu pochodzących zarówno od krawędzi czynnego frontu, krawędzi starych zrobów, jak i samego naprężenia pierwotnego [6]. Następnie wyznaczano średnią całkowitą z powyższych funkcji i rozwiązywano powstałe równanie ze względu na wymiar filara.

2. Model górotworu

Określenie wielkości oraz rozkładu naprężeń towarzyszących postępującej eksploatacji górniczej wymagało zbudowania numerycznego modelu górotworu. Model ten w postaci tarczy płaskiej o wymiarach 300 m x 32 m (L x H) stanowi strukturalne oraz fizykalne odwzorowanie rzeczywistego ośrodka skalnego. Wspomniana tarcza płaska obejmuje swym zasięgiem rejon eksploatacji, prowadzonej w pokładzie węgla o miąższości 2 m. Powyżej pokładu zalegającego na głębokości 560 m zamodelowano jednorodną warstwę stropową o miąższości 20 m. Spąg eksploатованого pokładu stanowi modelowa warstwa o miąższości 10 m. Schemat modelowej tarczy górotworu przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Model tarczy górotworu
Fig. 1. Rock mass shield model

Biorąc pod uwagę fakt, iż rzeczywisty ośrodek skalny składa się z kilkudziesięciu warstw o zróżnicowanej miąższości, przyjęto zasadę, że zespół kilku cienkich warstw składa się na jedną warstwę modelową, traktowaną jako ekwiwalentny, jednorodny ośrodek transwersalnie izotropowy. Warstwom skalnym stanowiącym modelowy układ górotworu przyporządkowany został nieliniowy model sprężysto-lepki o charakterystyce naprężeniowej oraz odkształceniowej zgodnie z modelem standard [2] oraz [4].

Celem uproszczenia procesu budowy fizycznego modelu górotworu założono, że brak jest zaburzeń geologicznych wpływających na uzyskane wyniki symulacji komputerowej.

Tarcza modelowa górotworu podzielona została pod względem prowadzonej eksploatacji na dwie części. Lewą część tarczy górotworu stanowi rejon eksploatacji dokonanej. Prowadzona w tej części eksploatacja polegała na wybieraniu pokładu węgla z podsadzką hydrauliczną. Prawa część tarczy modelowej stanowi rejon aktualnie prowadzonej eksploatacji. Podobnie jak w przypadku lewego skrzydła wybieranie odbywa się z zastosowaniem podsadzki hydraulicznej.

Wartości parametrów materiałowych charakteryzujących poszczególne warstwy numerycznego modelu górotworu zostały w całości teoretycznie określone przez autorów poniższego opracowania. Zestawienie parametrów materiałowych warstw skalnych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Stałe materiałowe warstw skalnych w modelu tarczy górotworu

Warstwa	Gęstość objętościowa ρ [kg/m ³]	Współczynnik Poissona ν [-]	Moduł Younga E [MPa]	Wytrzymałość na ściskanie R_c [MPa]	Ścisłość
Strop	2450	0,15	10000	32	-
Pokład	1400	0.25	1150	18	-
Podsadzka	900	0.3	160	-	0,16
Spąg	2500	0,19	9000	35	-

Dla przeprowadzenia numerycznych obliczeń wyodrębnione warstwy modelowej tarczy górotworu podzielone zostały na prostokątne elementy o wymiarach zależnych od gabarytów rozpatrywanej warstwy skalnej. Wymiary elementów przyporządkowanych kolejnym warstwom tarczy zestawione zostały w tabeli 2.

Tabela 2

Wymiary elementów siatki

Rodzaj warstwy	Wymiary elementu (L x H)
Warstwy stropowe	5 x 5 m
Pokład	5 x 2m
Podsadzka	5 x 2m
Spąg	5 x 5m

Zgodnie z tabelą 2 warstwa stropowa, spągowa oraz pokład węgla opisane zostały przez prostokątne elementy. Całkowita liczba elementów wynosi 420, natomiast sumaryczna liczba węzłów wynosi 488.

Węzły siatki elementów, które znajdują się na bocznych krawędziach modelowej tarczy górotworu, mają możliwość przemieszczania się zgodnie z kierunkiem Y (kierunek Y odpowiada głębokości górotworu). Węzły znajdujące się na dolnej krawędzi siatki (kierunek poziomy zgodny z kierunkiem X) utwierdzone są we wszystkich kierunkach. Pozostałe punkty węzłowe znajdujące się wewnątrz siatki górotworu mogą się przemieszczać we wszystkich kierunkach płaszczyzny X-Y.

Ustalając warunki brzegowe przyjęto, że tarcza górotworu obciążona jest ciśnieniem pierwotnym p_y wynikającym z ciężaru warstw nadległych i odpowiadającym głębokości górnej krawędzi siatki (538 m). Ponadto ciśnienie pionowe pierwotne zwiększone zostało o siły masowe wynikające z ciężaru warstw tworzących tarczę górotworu.

Poziome naprężenia (zgodne z kierunkiem osi X) stanowią część naprężenia pionowego i zgodnie z klasyczną teorią zależne są od współczynnika Poissona przypisanego poszczególniej warstwie.

Pierwotnemu stanowi naprężeń w tak zamodelowanej tarczy górotworu odpowiada stan przed rozpoczęciem jakichkolwiek robót górniczych. Poziome i regularne zaleganie warstw skalnych budujących strop, spąg oraz regularna budowa pokładu węgla pozwoliły na wyeliminowanie składowej naprężeń pochodzących od zaburzeń tektonicznych.

Oznaczone w ten sposób wielkości naprężeń pierwotnych dla modelu tarczy górotworu przedstawionego na rys. 1. wynoszą odpowiednio:

$$p_y = 14,02 \text{ MPa}, \quad (\text{spąg pokładu})$$

$$p_x = 4,67 \text{ MPa}. \quad (\text{spąg pokładu})$$

Obudowę wyrobiska ścianowego z uwagi na duży stopień skomplikowania podparcia stropu oraz spągu zamodelowano jako element o parametrach zbliżonych do parametrów obudowy.

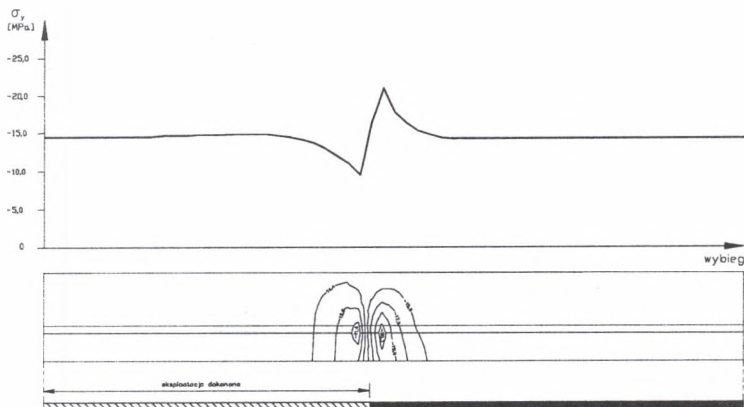
Określenie pól naprężeń towarzyszących postępującej eksploatacji górniczej wymagało zasymulowania czterech kolejnych stadiów tworzenia modelu numerycznego:

- stadium pierwsze - modelowanie warunków początkowych,
- stadium drugie - wykonanie wyrobisk przygotowawczych,
- stadium trzecie - prowadzenie eksploatacji w skrzydle lewym,
- stadium czwarte - prowadzenie eksploatacji w skrzydle prawym.

Etap pierwszy obejmował szereg czynności mających na celu odwzorowanie pierwotnego stanu naprężeń panujących w ośrodku skalnym, przy jednoczesnym ustabilizowaniu się górotworu.

Drugie stadium tworzenia modelu górotworu obejmowało wykonanie wyrobisk przygotowawczych. W przypadku gdy model górotworu stanowi płaską tarczę, wykonanie wyrobisk przygotowawczych sprowadza się jedynie do wykonania przecinki ścianowej.

Trzecie stadium przygotowania modelu do prowadzenia symulacji komputerowej obejmowało prowadzenie eksploatacji górniczej w lewym skrzydle modelu. Eksploatację prowadzono z podsadzką hydrauliczną o współczynniku ściśliwości $a=0,16$. Dobowy postęp wyrobiska ścianowego wynosił ok. 5 m/dobę. Przyjęto, że od momentu zakończenia eksploatacji w lewym skrzydle upłynęło w przybliżeniu 6 miesięcy. Wielkość naprężeń powstałych w wyniku tej eksploatacji należy traktować jako warunki początkowe dla prowadzenia dalszej symulacji. Wielkość oraz rozkład naprężeń powstałych od tej krawędzi przedstawia rys.2.



Rys.2. Naprężenia powstałe po wyeksploatowaniu lewego skrzydła tarczy
Fig.2. Tensions which originate after left side shield exploitation

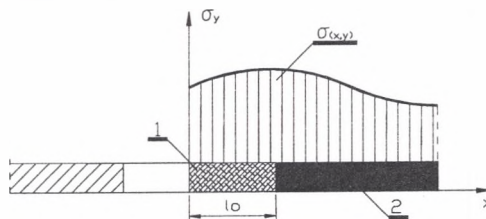
Czwarty etap polega na prowadzeniu właściwej eksploatacji w prawej części tarczy. Prowadzona eksploatacja polega na wybieraniu pokładu węgla wyrobiskiem ścianowym z podszadką hydrauliczną. Wielkość dobowego postępu ustalona została na 5 m/dobę. W celu uproszczenia założono, że wartość dobowego postępu wyrobiska ścianowego jest stała. Wartość współczynnika ściśliwości dla podszadki hydraulicznej w prawym skrzydle eksploatacyjnym przyjęto jako $a=0,16$.

Opisany powyżej etapowy system budowy modelu górotworu oraz procesów i zmian w nim zachodzących pozwoli na możliwie dokładne odwzorowanie rzeczywistych warunków.

3. Naprężenia eksploatacyjne

Celem określenia optymalnych gabarytów filara węglowego pozostawionego podczas eksploatacji pokładu węgla zasymulowano komputerowo bieg wyrobiska ścianowego. Symulacja wybierania polegała na stopniowym zbliżaniu się wyrobiska ścianowego do modelowych zrobów górniczych. Opis modelu ośrodka skalnego przedstawiono w poprzednim rozdziale. Jako stare zroby górnicze zamodelowano część pokładu, w której prowadzona była eksploatacja z zastosowaniem podszadki hydraulicznej. Przyjęto, że od momentu zakończenia eksploatacji w tej części modelu upłynął okres 6 miesięcy. Wielkość naprężeń powstałych wskutek tej eksploatacji przedstawiono na rys. 2.

Określając wielkość filara węglowego lub też wielkość zasięgu spękań wewnątrz calizny węglowej l_0 podczas prowadzenia eksploatacji górniczej, przyjęto założenie, że siłą niszczącą eksploatowany pokład są pionowe naprężenia σ_y , których wartość przekracza wytrzymałość na ściskanie calizny węglowej (rys. 3.). Powyższe założenie zgodne jest z większością rozwiązań powyższego problemu [6, 9].

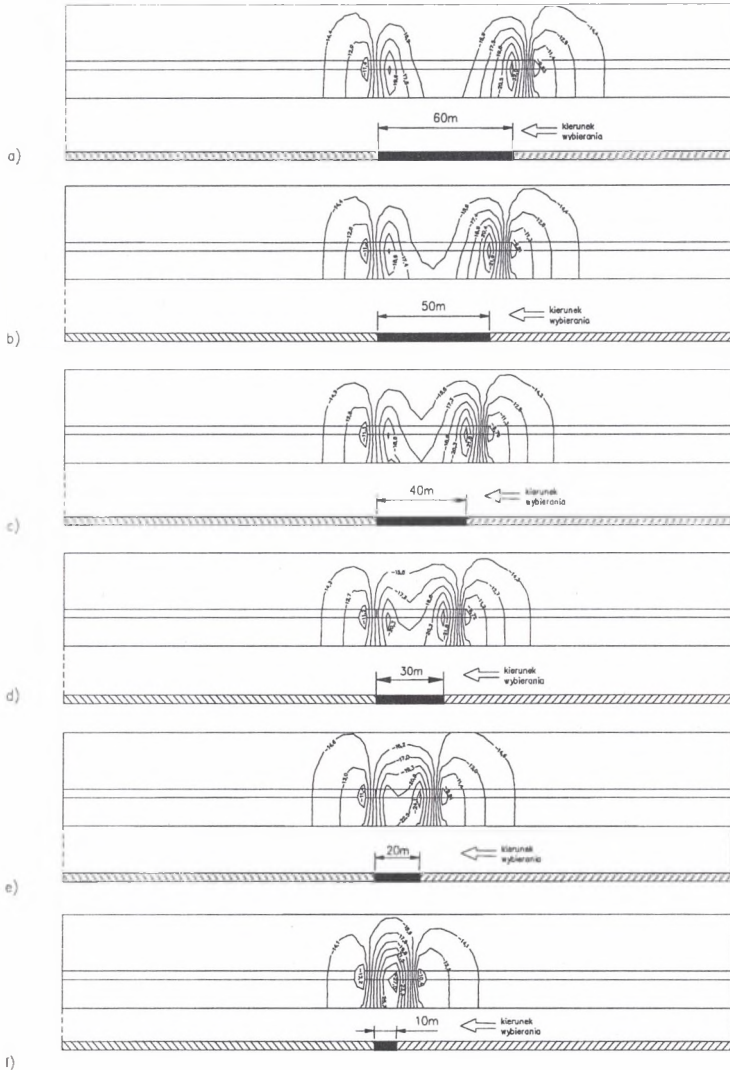


Rys.3. Założenia wyjściowe do wyznaczenia zasięgu spękań calizny węglowej: 1 - strefa spękań, 2 - calizna węglowa

Fig.3. Initial assumptions to determination a fractures range in solid coal: 1 - fracture's zone, 2 - solid coal

Zgodnie z przyjętym schematem obliczeniowym przedstawionym na rys.3 wielkość strefy spękań l_0 , a więc zasięgu kruchej zniszczenia lub uplastycznienia, zależy od wytrzymałości pokładu na ściskanie oraz od wielkości naprężeń eksploatacyjnych σ_y .

Analizę otrzymanych wyników symulacji komputerowej rozpoczęto od momentu, w którym ruchomy front wybierania znajdował się w odległości 100 m od krawędzi zrobów. Pomiar naprężeń pionowych σ_y prowadzono wzdłuż linii, jaką wyznacza strop pokładu.



Rys.4. Strefy koncentracji naprężeń eksploatacyjnych: a) - f) - kolejne stadia eksploatacji
 Fig.4. Exploitation's stress concentration zones: a) - f) - following stages of exploitation

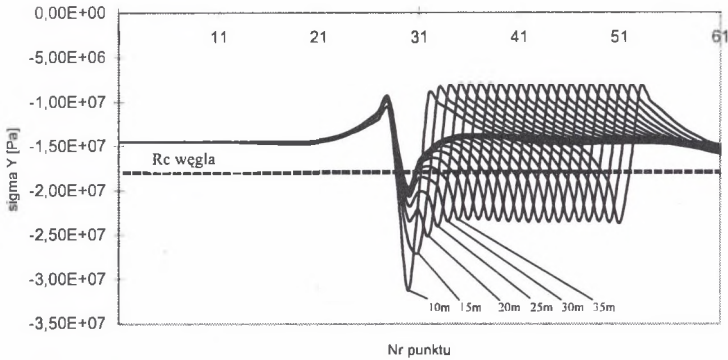
Pełny charakter zmian zachodzących w ośrodku skalnym podczas prowadzenia eksploatacji, a szczególnie podczas zbliżania się frontu wybierania do linii zrobów, przedstawia rozkład pól koncentracji naprężeń σ_y (rys.4.). Przedstawione wartości naprężeń charakteryzujące odpowiednio stałą i ruchomą krawędź pokładu wykazują wyraźną asymetrię. Przyczyną takiego stanu jest zjawisko relaksacji naprężeń. Naprężenia związane z krawędzią stałą uległy w znacznym stopniu redukcji wskutek czasu, jaki upłynął od momentu zakończenia wybierania w skrzydle lewym.

Znacznie większą wartość osiągają naprężenia związane z postępującym frontem eksploatacyjnym. Ciągłe zmiany położenia frontu wybierania uniemożliwiają redukcję naprężeń wskutek relaksacji. Asymetrię naprężeń dla ruchomej i stałej krawędzi pokładu (filara węglowego) obserwuje się do momentu, gdy ich wzajemna odległość wynosi 55-60 m (rys.4a).

Zgodnie z przyjętym założeniem należy stwierdzić, że w sąsiedztwie wyrobiska ścianowego osiągnięty został krytyczny dla pokładu poziom naprężeń, czyli w pokładzie wyróżnić możemy strefę kruche go zniszczenia. Wielkość tej strefy wynosi ok. 15 m (wartość wyznaczona dla przyjętej wartości R_c). Maksymalna wartość naprężeń pionowych $\sigma_y=24$ [MPa] w pokładzie obserwuje się w odległości ok. 5 m przed czołem ściany. Podobnie należy określić zasięg trwałych zniszczeń w części pokładu sąsiadującej ze starymi zrobami (krawędź stała). Pomimo iż naprężenia pionowe stabilizują się tutaj na znacznie mniejszym poziomie niż dla krawędzi ruchomej, to jednak zasięg strefy zniszczeń trwałych l_0 ukształtował się bezpośrednio po zatrzymaniu eksploatacji.

Dalsze prowadzenie eksploatacji wyrobiskiem ścianowym w filarze węglowym prowadzi do wzajemnego nakładania się pól koncentracji (rys.4c do 4f). Wynikiem takiego nakładania jest wzrost naprężeń eksploatacyjnych. Wzrost ten jest coraz bardziej widoczny w miarę zmniejszania się gabarytów filara węglowego. Jak wynika z rys. 4d, krytyczną długością pozostawionej części pokładu węgla jest długość 30-35 m. Dla tej długości naprężenia pionowe σ_y osiągają wartość ekstremalną (wielkość naprężeń przekracza wytrzymałość pokładu na ściskanie $R_c=18$ [MPa]). Można więc przyjąć, że długość filara równa 30 m jest długością, przy której cały filar objęty jest trwałym zniszczeniem materiału węglowego.

Na rysunku 5 przedstawione zostały wyniki naprężeń pionowych (wielkość i ich rozkład) pomierzone wzdłuż linii, jaką wyznacza strop pokładu węgla. Przedstawiona na rysunku linia przerywana oznacza wytrzymałość węgla w pokładzie.



Rys.5. Rozkład naprężeń pionowych w zależności od szerokości filara węglowego
 Fig.5. Vertical stress pattern depending on coal pillar width

Jak wyraźnie widać, wielkość naprężeń towarzyszących postępującej eksploatacji znacznie przekracza wytrzymałość węgla. Należy więc stwierdzić, iż właśnie te naprężenia decydują o pojawieniu się przed czołem ściany strefy spękań. Skrócenie filara węglowego do długości ok. 35 m powoduje, że naprężenia koncentrujące się nad krawędzią zrobów i krawędzią ruchomego frontu wybierania nakładają się na siebie. Dalsze prowadzenie eksploatacji w filarze węglowym prowadzi do gwałtownego wzrostu naprężeń pionowych. Symulację komputerową zakończono, gdy wzajemna odległość pomiędzy krawędziami pokładu wynosiła 10 m. Otrzymana wartość naprężeń pionowych dla tak krótkiego filara węglowego dwukrotnie przewyższa wielkość przyjętego p_z .

4. Podsumowanie

W powyższej pracy przedstawione zostały wyniki symulacji komputerowej prowadzonej w płaskiej tarczy górotworu o wymiarach 300 m x 32 m. Zamodelowano eksploatację pokładu węgla zalegającego na głębokości 560 m przez wyrobisko ścianowe. Symulacja komputerowa obejmowała dwa zasadnicze stadia eksploatacji pokładu węgla z podszadką hydrauliczną. Stadium pierwsze polegało na prowadzeniu eksploatacji w lewym skrzydle tarczy. Stadium drugie obejmowało eksploatację górniczą w prawym skrzydle tarczy. Prowadzenie wybierania prawego skrzydła modelowej tarczy górotworu rozpoczęto z półrocznym opóźnieniem w stosunku do lewej części tarczy.

W celu wyznaczenia optymalnych gabarytów filara węglowego pozostawionego podczas zbliżania się frontu wybierania do linii starych zrobów przyjęto założenie, że kryterium niszcącym pokład węgla jest przekroczenie przez pionowe naprężenia eksploatacyjne σ , wytrzymałości na ściskanie węgla. Warstwom skalnym przypisany został model mechaniczny nieliniowego ośrodka zgodny z modelem Zenera-Standard.

Przedmiotem przedstawionej w powyższej pracy symulacji komputerowej było określenie stref trwałych zniszczeń struktury pokładu węgla oraz wyznaczenie optymalnych wymiarów filara węglowego z uwagi na wielkość naprężeń eksploatacyjnych.

Analiza wyników symulacji komputerowej wykazała, że wartość strefy zniszczeń trwałych wyznaczona dla pokładu węgla o granicznej wytrzymałości na ściskanie równej 18 MPa wynosi około 15 m. Podobnie wyznaczona została wartość strefy zniszczeń znajdującej się przy krawędzi starych zrobów.

Wyznaczając optymalne gabaryty filara węglowego należy stwierdzić, iż decydujący wpływ na zachowanie się calizny węglowej ma wartość naprężeń pionowych będących wynikiem sumowania się wpływów dwóch krawędzi. Wyznaczona w ten sposób długość filara węglowego wynosi ok. 35 m.

W niniejszej symulacji komputerowej nie zostały uwzględnione sobotnio-niedzielne przestoje ściany. Autorzy poniższego opracowania uznali jednak, iż zmiany relaksacyjne naprężeń podczas wspomnianych postojów wyrobiska ścianowego są zbyt małe, by decydowały o zasięgu stref spękań w caliznie węglowej.

LITERATURA

1. Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1968.
2. Drzęźła B.: Podstawy teoretyczne wyznaczania parametrów teorii ruchu górotworu nad eksploatacją górnictw. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria Górnictwo z.87, Gliwice 1978.
3. Filcek H., Kłeczek Z., Zorychta A.: Poglądy i rozwiązania dotyczące tapani w kopalniach węgla kamiennego. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo z.125, 1984.
4. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A.: Metody komputerowe w geomechanice górnictwa. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.

5. Gil H.: Analityczna metoda prognozowania i zwalczania tąpnięć w kopalniach. Przegląd Górniczy 1977, nr 9.
6. Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice 1994.
7. Kwaśniewski M., Wang J.: Analiza numeryczna deformacji górotworu wywołanych eksploatacją górnictwem. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej. 1996.
8. Sałstowicz A.: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1968.
9. Zorychta A.: Kryterium powstawania tąpnięć przy eksploatacji pokładu węgla kamiennego. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo z. 123, 1984.

Recenzent: Dr inż. Zenon Duda

Abstract

Leaving unmined pieces of coal seam is one of the reasons of rockburst hazard and causes mine inventory losses. In that situation a coal pillar size determination in case of approach with working front to abandoned workings makes a problem. Authors used a Finite element method to numeric simulation of two dimensional mining in an abandoned workings neighbourhood. Computer simulation results analysis shows, that dimension of stable failure zones in solid of coal considering quantity of exploitation stress is about 15 m, which causes that optimum size of coal pillar average 35 m. The above simulation was made for coal seam with a maximum compression strength equal 18 MPa.