

mgr ŁUKASZ WOJTECKI
Kompania Węglowa S. A.,
Oddział KWK Bielszowice, Ruda Śląska
mgr GRAŻYNA DZIK
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

Profilowanie sejsmiczne ociosów chodników węglowych w wersji kinematycznej i tłumieniowej

Metoda profilowania sejsmicznego umożliwia rozpoznanie stanu naprężeń w pokładzie węgla, w strefie przyociosowej wyrobisk chodnikowych. Standardowo parametrem brany pod uwagę w tych badaniach jest prędkość podłużnej fali sejsmicznej. Obecnie coraz większe zainteresowanie wzbudza wykorzystanie parametrów związanych z tłumieniem fal sejsmicznych do oceny stanu naprężeń w górotworze. Współczynnik tłumienia jest parametrem bardziej czułym na zmianę stanu naprężeń w górotworze spękanym w porównaniu do prędkości fali sejsmicznej, co ma istotne znaczenie w kontekście drążenia wyrobisk chodnikowych na coraz większych głębokościach. W artykule przedstawiono wyniki profilowań sejsmicznych w wersji kinematycznej i tłumieniowej, wykonanych w wyrobiskach chodnikowych wydrążonych w pokładzie 506 w KWK Bielszowice.

1. WSTĘP

Jednym z najpoważniejszych zagrożeń naturalnych, występujących obecnie w podziemnych zakładach górniczych wydobywających węgiel kamienny, są tąpnięcia. W praktyce górniczej przeważają tąpnięcia o charakterze mieszanym, czyli stropowo-pokładowym, spowodowane nałożeniem się impulsu obciążenia dynamicznego wygenerowanego przez pęknięcie sztywnych, zwięzłych warstw skał stropowych na silnie naprężone, przyociosowe części pokładu węgla. Występowanie tąpnięć typu mieszanego jest ściśle związane ze stanem naprężeń występującym w pokładzie. Generalnie wzrost naprężeń w górotworze związany jest z pierwszym etapem tąpnięcia, czyli z akumulacją energii sprężystej. Określenie stanu naprężeń w pokładzie ma zatem ogromne znaczenie dla poprawnej oceny stanu zagrożenia tąpnięciami.

W kopalniach węgla kamiennego do określania stanu naprężeń w pokładzie wykorzystuje się

głównie badania sejsmiczne w wersji kinematycznej, tj. profilowanie sejsmiczne w wyrobiskach chodnikowych oraz prześwietlenie sejsmiczne między wyrobiskami. Mierzonym parametrem jest prędkość fal sejsmicznych określonego typu (głównie podłużnej fali sejsmicznej P). Rozkład naprężeń istniejących w górotworze oraz jego własności fizyko mechaniczne mają swoje odzwierciedlenie w wartości prędkości fal sejsmicznych [1,2]. Prędkość fali sejsmicznej nie jest jedynym parametrem, który może zostać wyznaczony w trakcie dołowych badań sejsmicznych. Obecnie coraz większe zainteresowanie wzbudzają parametry związane z tłumieniem fal sejsmicznych, tj. współczynnik tłumienia, współczynnik transmisji amplitudy oraz współczynnik dobroci [6,7,8,9,3,10]. Znajomość tłumienia może być przydatna dla dokładniejszego określenia właściwości mechanicznych ośrodka [10]. Proces tłumienia fal jest jednak dość złożony, ponieważ tłumienie nie zależy jedynie od stanu naprężeń, ale również od porowatości ośrodka oraz wypełnienia porów płynami złożo-

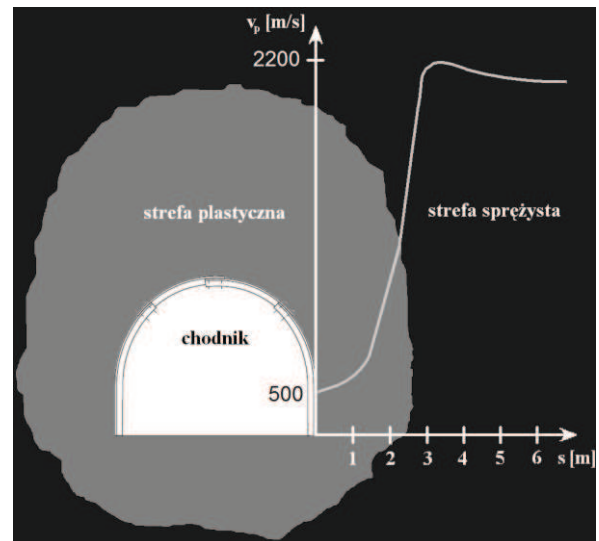
wymi. Parametry związane z tłumieniem fal sejsmicznych są bardziej wrażliwe na zmiany stanu naprężenia i deformacji w pokładzie węgla w porównaniu do prędkości fali podłużnej P [10].

W artykule przedstawiono wyniki profilowań sejsmicznych wykonanych w wyrobiskach chodnikowych w pokładzie 506, tj. w chodnikach: 2w badawczym i 3w badawczym oraz wentylacyjnym, a także w pochylni odstawczej, na głębokościach przekraczających w większości 1000 m. W procesie interpretacji wyznaczono prędkości podłużnej fali sejsmicznej P i odpowiadające im anomalie sejsmiczne, a także określono wartości parametrów związanych z tłumieniem podłużnej fali sejsmicznej P w przyociosowej części pokładu 506. Określono również położenie granicy między strefą spękaną i pokładem nienaruszonym robotami górnictwami.

2. PROFILOWANIE SEJSMICZNE W WERSJI KINEMATYCZNEJ W WYROBISKACH CHODNIKOWYCH

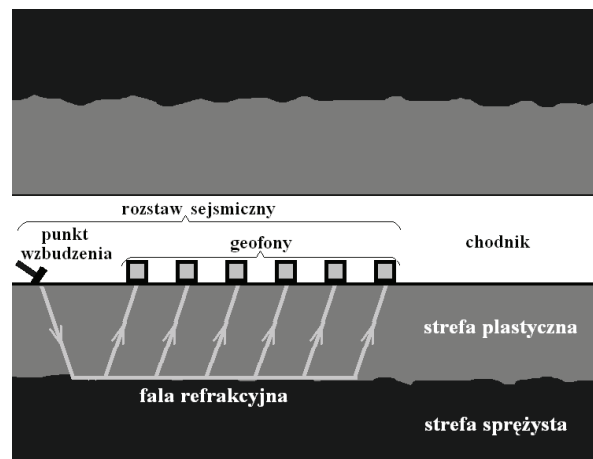
W trakcie drażenia wyrobiska chodnikowego wokół niego powstaje strefa silnie spękana (tzw. strefa plastyczna). Wskutek przeobrażeń strukturalnych strefa spękań posiada inne właściwości sprężyste niż niespękany maszyn skalny. To sprawia, że przestrzeń wokół wyrobiska chodnikowego można traktować jako układ dwóch ośrodków o różnych właściwościach [4], między którymi występuje granica refrakcyjna. Strefa plastyczna charakteryzuje się określonym gradientem prędkości. Najmniejsza wartość prędkości fali występuje przy ociosie chodnika i rośnie w miarę oddalania się od niego. Rozchodzące się w strefie spękannej fale są falami refragowanymi. W strefie sprężystej na granicy ze strefą plastyczną występuje maksimum naprężeń obwodowych i najkorzystniejsze warunki propagacji fali refrakcyjnej [10]. Przykładowa charakterystyka prędkości podłużnej fali sejsmicznej P w funkcji odległości od ociosu wyrobiska została przedstawiona na rysunku 1.

W trakcie profilowania sejsmicznego, w ociosie wydrążonego wyrobiska chodnikowego, na kotwach instalowane są geofony. Czujniki te rozmieszczane są w jednej linii, a odległość między nimi uzależniona jest od miąższości pokładu [1,2]. W profilowaniach sejsmicznych wykonywanych w KWK Bielszowice odległość ta wynosiła przeważnie 2-2,5 m, przy czym standardowo wykorzystywanych było 8-10 geofonów. W podobnej odległości od pierwszego geofonu, na tej samej linii co geofony, znajduje się punkt wzbudzenia



Rys. 1. Prędkość podłużnej fali sejsmicznej P w funkcji odległości od ociosu wyrobiska

zenia fal sejsmicznych. Utworzony w ten sposób układ pomiarowy stanowi rozstaw sejsmiczny. Wzbudzenie fal sejsmicznych odbywa się poprzez uderzenie mechaniczne młotem w ocios wyrobiska. Wzbudzona fala sejsmiczna rozprzestrzenia się w górotworze i dociera do granicy między strefą plastyczną a sprężystą. Ze względu na to, że prędkość fali w strefie spękannej jest mniejsza niż w strefie nienaruszonej robotami górnictwami, możliwe jest powstanie fali refrakcyjnej. Schemat profilowania sejsmicznego wraz ze sposobem propagacji refrakcyjnej fali sejsmicznej wzdłuż ociosu wyrobiska chodnikowego został przedstawiony na rysunku 2.

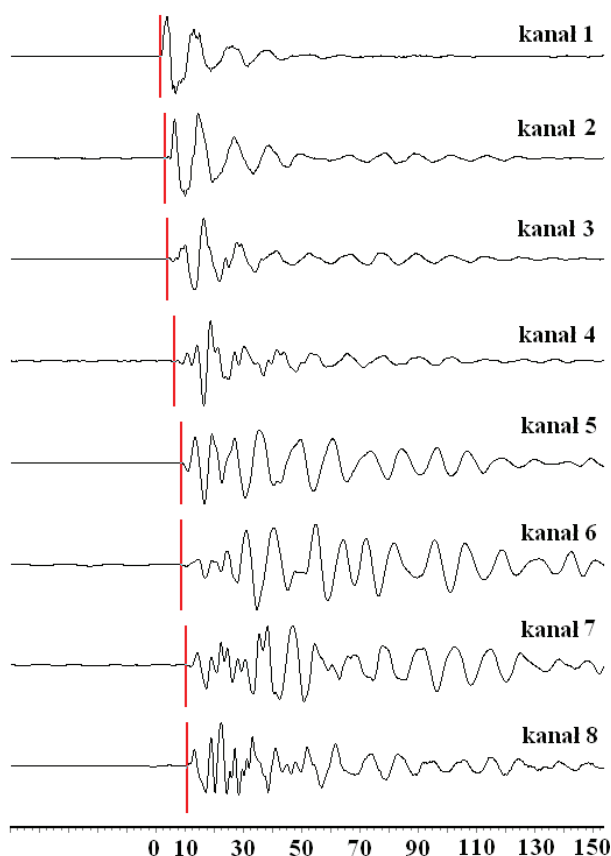


Rys. 2. Schemat profilowania sejsmicznego i propagacji refrakcyjnej fali sejsmicznej wzdłuż ociosu chodnika

Geofony znajdujące się najbliżej punktu wzbudzenia rejestrują falę bezpośrednią (refragowaną), rozchodzącą się wyłącznie w strefie spękannej. Z kolei

fala refrakcyjna jest rejestrowana przez geofony znajdujące się w strefie plastycznej, w większej odległości od punktu wzbudzenia.

W przypadku małego stopnia spękań ociosowych i braku w związku z tym wyraźnej granicy refrakcyjnej, do pewnej długości bazy pomiarowej rejestrowane są wyłącznie fale refragowane [2]. Przykładowy obraz falowy uzyskany w ramach jednego z profilowań sejsmicznych wykonanych w KWK Bielszowice w pokładzie 506 został przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Obraz falowy uzyskany podczas jednego z profilowań w pokładzie 506. Próbkowanie z taktiem 0,2 ms

Interpretacja hodografu w przypadku każdego rozstawu sejsmicznego polega przede wszystkim na określeniu prędkości fali refrakcyjnej (prędkości fali w przyociosowej części pokładu, nienaruszonej robotami górniczymi), w oparciu o którą można określić wartość anomalii sejsmicznej. Strefy podwyższonych naprężeń generują dodatnie anomalie prędkości rozchodzenia się fali sejsmicznej. Na podstawie wartości tych anomalii możliwe jest określenie stanu naprężeń w pokładzie zgodnie z sejsmiczną skalą oceny wzrostu naprężeń dla kopalń GZW [1,2]. Poza prędkością fali refrakcyjnej w każdym rozstawie sejsmicznym istnieje możliwość określenia prędkości fali bezpo-

średniej (tj. średniej prędkości fali refragowanej) oraz grubości spękannej warstwy przyociosowej zgodnie z następującym wzorem:

$$h_0 = \frac{t_0 v_0}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{v_1}\right)^2}} \quad (1)$$

gdzie:

- h_0 – grubość spękannej warstwy przyociosowej [m],
- t_0 – wartość odciętej wyznaczana przez gałąź hodografu o większej prędkości [s],
- v_0 – średnia prędkość fali refragowanej w warstwie plastycznej [m/s],
- v_1 – prędkość fali refrakcyjnej [m/s].

3. PROFILOWANIE SEJSMICZNE W WERSJI TŁUMIENIOWEJ W WYROBISKACH CHODNIKOWYCH

Profilowanie sejsmiczne w wersji tłumieniowej polega na określaniu spadku amplitudy podłużnej fali sejsmicznej P, propagującej po granicy między strefą plastyczną i sprężystą. Zanikanie amplitudy fali sejsmicznej spowodowane jest geometrycznym rozchodzeniem się fali (zwiększaniem się powierzchni frontu falowego) oraz przez to, że górotwór, w którym rozchodzi się fala, nie jest ośrodkiem idealnie sprężystym (energia sejsmiczna jest rozpraszana oraz absorbowana). Istnieje wiele mechanizmów relaksacyjnych związanych z tym, że górotwór nie jest ośrodkiem idealnie sprężystym, w ich wyniku dochodzi do tłumienia fali sejsmicznej. Generalnie dla fal o niskich częstotliwościach (do około 100 Hz) tłumienie uwarunkowane jest głównie lepkiem tarcim, wynikającym ze względnego ruchu medium nasycającego i szkieletu mineralnego oraz niejednorodnościami w budowie szkieletu mineralnego [5]. W przypadku pomiarów sejsmicznych, w intensywnie spękannej strefie ociosowej wyrobisk chodnikowych w pokładzie węgla, największy wpływ na tłumienie fal sejsmicznych ma pochłanianie związane z efektem tarcia na powierzchniach mikrospękań i rozluźnionych kontaktach międzyziarnowych [8]. Dla takiego sposobu tłumienia stan naprężeń w górotworze ma istotne znaczenie. Istotne znaczenie ma również ruch medium wypełniającego pory, szczególnie na kontaktach tego medium ze szkieletem mineralnym. Dla rozchodzącej się w ośrodku niesprężystym fali sejsmicznej zanik amplitudy wraz z odległością od źródła opisuje zależność:

$$A = A_0 e^{-\alpha r} \quad (2)$$

gdzie:

A – amplituda fali w odległości r od źródła,

A_0 – amplituda fali w źródle,

α – współczynnik tłumienia fali [1/m],

r – odległość od źródła [m].

Oprócz współczynnika tłumienia α , właściwości tłumiące ośrodka można opisać poprzez współczynnik transmisji amplitudy d (odwrotność współczynnika tłumienia) oraz współczynnik dobroci Q [–]. Współczynniki te wiążą ze sobą następująca zależność:

$$Q = \frac{\pi f}{\alpha v} = \frac{\pi df}{v} \quad (3)$$

gdzie:

f – częstotliwość fali sejsmicznej [Hz],

v – prędkość fali sejsmicznej [m/s].

Wzrost naprężeń w strefie sprężystej, np. w rejonie krawędzi eksploatacyjnych, wytworzonych w pokładach sąsiednich czy uskoków, powoduje zaciskanie porów i mikrospekkań. Efektem tego jest wzrost sprężystości ośrodka, co przejawia się mniejszym tłumieniem amplitudy fali sejsmicznej [10]. Współczynnik tłumienia podłużnej fali sejsmicznej jest parametrem zdecydowanie bardziej czułym na zmiany stanu naprężeń w porównaniu do prędkości fali, co zostało potwierdzone przeprowadzonymi badaniami laboratoryjnymi [11,13].

3.1. Metodyka pomiarowa i przetwarzania danych

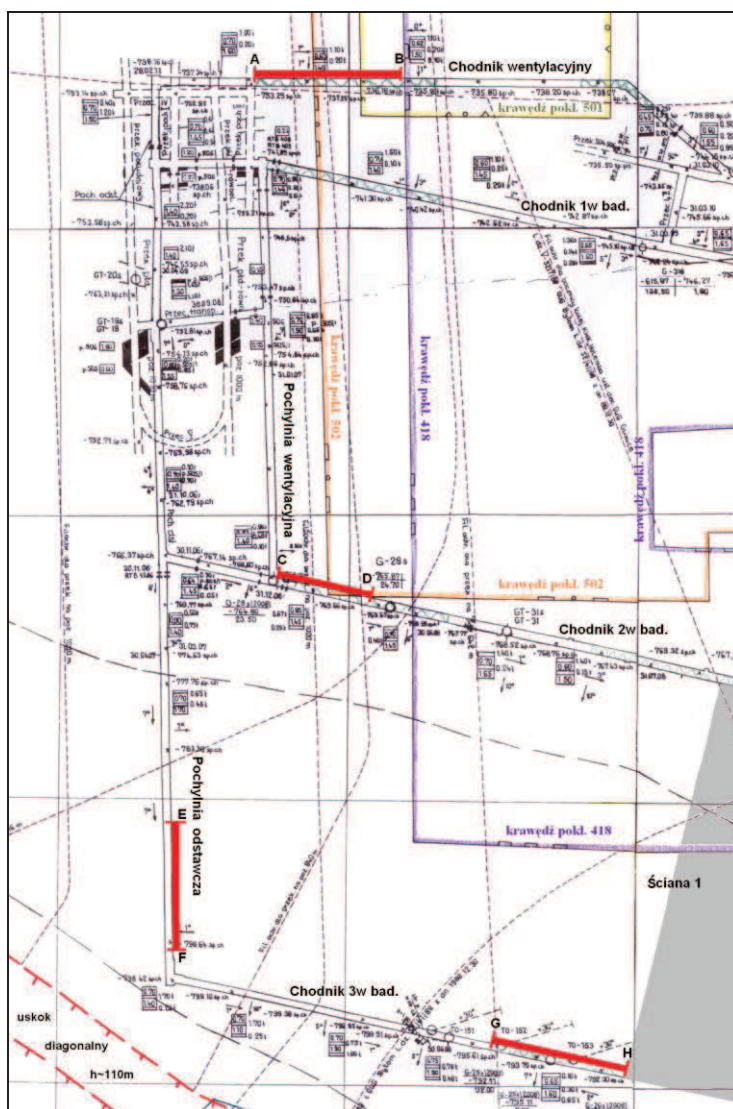
We współpracy z Instytutem Technik Innowacyjnych EMAG w KWK Bielszowice została podjęta próba wyznaczenia wartości współczynnika tłumienia w przyociosowej części pokładu wydrążonych wyrobisk chodnikowych przy wykorzystaniu metody profilowania sejsmicznego. Profile pomiarowe zostały zlokalizowane w wyrobiskach chodnikowych wydrążonych w pokładzie 506, na głębokości 980-1055 m, tj. w chodnikach 2w badawczym i 3w badawczym (przyścianowych ściany 1) oraz wentylacyjnym, a także w pochylni odstawczej. Czynniki, które zadecydowały o wyborze miejsc przeprowadzenia badań były: głębokość zalegania pokładu 506 oraz sytuacja górniczo-geologiczna. Stan naprężeń w pokładzie 506 był monitorowany w tym rejonie już wcześniej [12], jednak wyłącznie przy wykorzystaniu metod sejsmicznych w wersji kinematycznej.

Sposób wyznaczenia współczynnika tłumienia w przypadku każdego rozstawu sejsmicznego polegał na odczytaniu maksymalnej wartości amplitudy fali refrakcyjnej we wszystkich kanałach, w których fala ta została zarejestrowana. Kolejno amplitudy te znormalizowano względem największej z nich, po czym obliczano ich logarytm naturalny. Tak przygotowane dane nanoszono na wykres, w którym na osi odciętych znajdowała się odległość od punktu wzbudzenia, a na osi rzędnych logarytm naturalny znormalizowanej amplitudy fali refrakcyjnej. Współczynnik kierunkowy dopasowanej do punktów pomiarowych metodą regresji liniowej prostej stanowi współczynnik tłumienia α . Metoda wyznaczenia współczynnika tłumienia była analogiczna do tej, jaką przedstawili Z. Pilecki i J. Kłosiński [8].

4. WARUNKI GEOLOGICZNO-GÓRNICZE W REJONIE BADAŃ

W rejonie wyrobisk objętych badaniami pokład 506 zalega na głębokości od około 980 m do około 1055 m. Grubość pokładu 506 w tym rejonie waha się w granicach od 1,4 do 1,8 m, a upad od 5° do 12°. W stropie zalega łupek ilasty o grubości 0,6-1,2 m, nad którym występuje pokład 505/1 o grubości 0,6-0,75 m, a nad nim łupek ilasty przechodzący w łupek piaszczysty. W kierunku na wschód grubość warstwy łupka ilastego oddzielającego pokłady 506 i 505/1 stopniowo maleje tak, że oba pokłady łączą się w jeden. W spągu pokładu 506 występuje cienka warstwa łupku ilastego, pod którą występuje łupek piaszczysty. Do czynników wpływających na stan zagrożenia tąpnięciami w rejonie badań niewątpliwie można zaliczyć:

- dużą głębokość zalegania pokładu 506 (dochodzącą do 1055 m),
- skłonność pokładu 506 do tępnięć (współczynnik wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie R_C w rejonie badań wynosi 16,8 MPa),
- zaleganie w stropie zwięzłych skał, zdolnych do akumulowania energii sprężystej,
- zaleganie nad pokładem 504 (tj. w odległości około 30 m nad pokładem 506) wstrząsogennych ław piaszkowca,
- występowanie krawędzi eksploatacyjnych wytworzonych w pokładach 418, 501 i 502, zalegających odpowiednio 141 m, 96 m i 82 m nad pokładem 506 (dotyczy chodnika wentylacyjnego i częściowo chodnika 2w badawczego),



Rys. 4. Mapa wyrobisk w pokładzie 506 z zaznaczonymi profilami pomiarowymi

- lokalizację wyrobisk w filarze dla przekopów południowych (dotyczy pochylni odstawczej oraz częściowo chodnika wentylacyjnego i chodnika 2w badawczego),
- bliską obecność uskoku diagonalnego o zrzucie około 110 m (dotyczy rejonu skrzyżowania pochylni odstawczej z chodnikiem 3w badawczym),
- wpływ ciśnienia eksploatacyjnego związanego z prowadzeniem ściany 1 (w trakcie prowadzenia badań dotyczy wyłącznie chodnika 3w badawczego).

Profilowania sejsmiczne zostały wykonane w miejscach, gdzie potencjalnie może występować wzrost naprężeń w pokładzie (ze względu na krawędzie eksploatacyjne w pokładach sąsiednich, ciśnienie eksploatacyjne przed frontem prowadzonej ściany lub obecność filara czy uskoku i związanych z nimi dodatkowych naprężeń). Mapa wyrobisk w pokładzie 506 wraz z lokalizacją profili pomiarowych została przedstawiona na rysunku 4.

5. WYNIKI BADAŃ

Przeprowadzone w wyrobiskach chodnikowych w pokładzie 506 badania sejsmiczne metodą profilowania pozwoliły na określenie w ich rejonie rozkładów prędkości i współczynnika tłumienia podłużnej fali sejsmicznej oraz zasięgu strefy spękanej. Łączna długość profili pomiarowych w wyrobiskach chodnikowych w pokładzie 506 wyniosła około 360 m. Przedmiotowe badania były wykonywane w różnych warunkach geologiczno-górnicznych, co znalazło swoje odzwierciedlenie szczególnie w rozkładach współczynnika tłumienia podłużnej fali sejsmicznej.

5.1. Profil w chodniku wentylacyjnym w pokładzie 506 (A – B)

Chodnik wentylacyjny został objęty badaniami z uwagi na występowanie w jego rejonie krawędzi

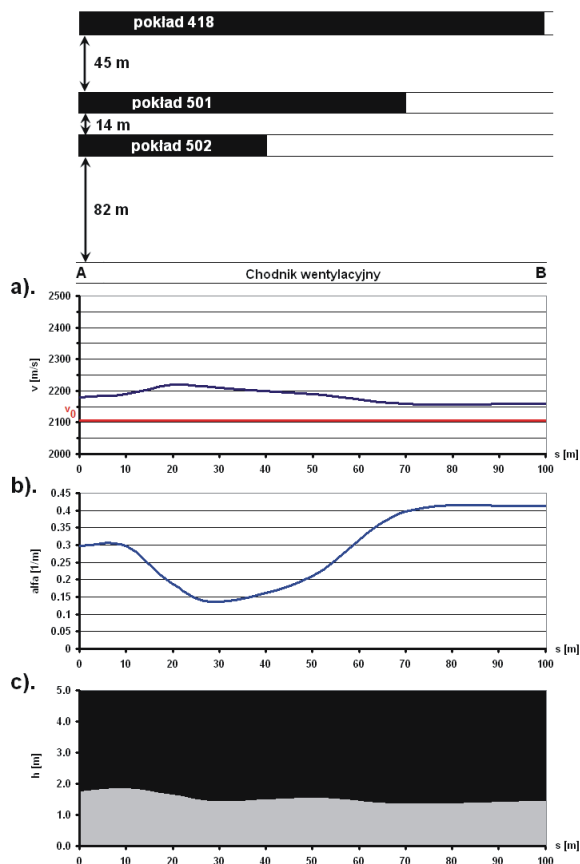
eksploatacyjnych, wytworzonych w pokładach 418, 501 i 502, odpowiednio 141 m, 96 m i 82 m nad pokładem 506 oraz z uwagi na fakt, że częściowo był on drążony w filarze dla przekopów południowych. Eksploatacja pokładów 418, 501 i 502 w tym rejonie była prowadzona w latach 90. ubiegłego wieku. Profil pomiarowy został zlokalizowany w odległości 60-160 m od skrzyżowania z pochylnią odstawczą. Badania objęły 40-metrowy odcinek pod nie wybranymi pokładami 418, 501 i 502 oraz 60-metrowy odcinek, na którym występowały krawędzie eksploatacyjne pokładów wyżej zalegających. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 5.

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej uzyskane w chodniku wentylacyjnym zawierały się w przedziale od 2160 m/s do 2220 m/s (rys. 5a). Nie stwierdzono występowania stref anomalnych prędkości podłużnej fali sejsmicznej. Wartości anomalii sejsmicznej, określone dla głębokości 980 m ($v_0 = 2106$ m/s) zawierały się w przedziale od +2,6% do +5,4%. Na większości objętego badaniami odcinka chodnika wentylacyjnego, zgodnie z sejsmiczną skalą oceny wzrostu naprężeń, poziom naprężeń był na poziomie normalnym dla tej głębokości (anomalna sejsmiczna mniejsza od 5%). Jedynie około 20 m na zachód od krawędzi pokładu 502 na krótkim odcinku stwierdzono słaby wzrost naprężeń (prawdopodobny wzrost naprężeń od 20% do 60%). Odprężenia pod wybranymi pokładami 418, 501, 502, zgodnie z sejsmicznymi kryteriami naprężeń, nie stwierdzono.

Współczynnik tłumienia podłużnej fali sejsmicznej w tym profilu zawierał się w przedziale od $0,14 \text{ m}^{-1}$ do $0,41 \text{ m}^{-1}$. Najniższe wartości współczynnika tłumienia (poniżej $0,15 \text{ m}^{-1}$) występowały w rejonie krawędzi eksploatacyjnej wytworzonej w pokładzie 502 (pod niewybranym pokładem 502), około 85-95 m od wlotu do chodnika wentylacyjnego (5-15 m na zachód od krawędzi eksploatacyjnej pokładu 502). Dalej w kierunku skrzyżowania z pochylnią odstawczą (w filarze dla przekopów południowych) wartość współczynnika tłumienia wzrastała, osiągając maksymalnie około $0,3 \text{ m}^{-1}$. W części pokładu 506, pod wybranymi pokładami 418, 501 i 502 i poza filarem dla przekopów południowych, wartość współczynnika tłumienia wzrastała do około $0,4 \text{ m}^{-1}$ (rys. 5.1. b). W rejonie krawędzi eksploatacyjnej wytworzonej w pokładzie 502 zanotowano blisko 3-krotny spadek współczynnika tłumienia w porównaniu do części pokładu 506 pod wybranymi pokładami 418, 501 i 502 oraz spadek 2,2 razy w porównaniu do części pokładu 506, nad którą nie była prowadzona eksploatacja w pokładach wyżej zalegających.

Badania sejsmiczne były prowadzone w chodniku wentylacyjnym w trakcie jego drążenia. Krótki czas,

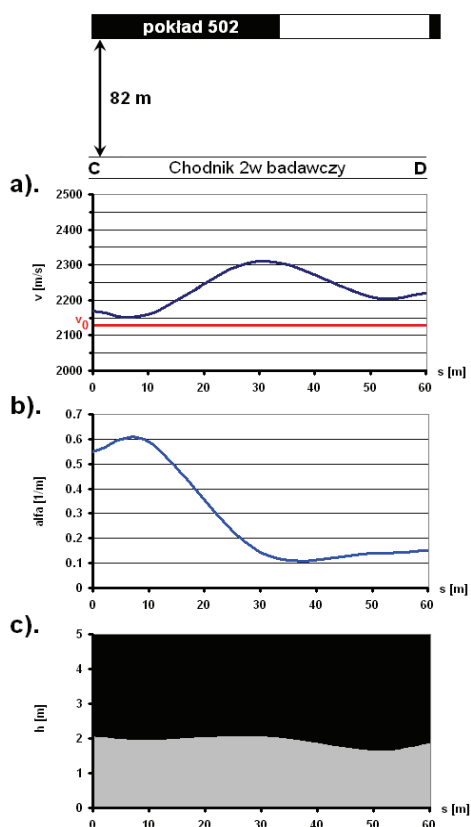
jaki upłynął od wydrążenia objętego badaniami odcinka chodnika wentylacyjnego znalazł swoje odzwierciedlenie w zasięgu strefy spękanej, który nie przekroczył 2 m. Wielkość tej strefy zawierała się w przedziale 1,4 - 1,9 m (rys. 5c).



Rys. 5. Wyniki profilowania sejsmicznego w chodniku wentylacyjnym w pokładzie 506:
a) rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej,
b) rozkład współczynnika tłumienia,
c) miąższość strefy spękanej

5.2. Profil w chodniku 2w badawczym w pokładzie 506 (C – D)

Chodnik 2w badawczy został objęty badaniami z uwagi na występowanie w jego rejonie krawędzi eksploatacyjnej wytworzonej w pokładzie 502, około 82 m nad pokładem 506. Profil pomiarowy został zlokalizowany w odległości do 60 m od skrzyżowania z pochylnią wentylacyjną. W tym rejonie krawędź eksploatacyjna pokładu 502 zmienia kierunek z południkowego na równoleżnikowy. Badania objęły około 35-metrowy odcinek, nad którym pokład 502 nie był eksploatowany oraz około 25-metrowy odcinek pod wybranym pokładem 502, na końcu którego ponownie występowała krawędź eksploatacyjna pokładu 502. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 6.



Rys. 6. Wyniki profilowania sejsmicznego w chodniku 2w badawczym w pokładzie 506:
 a) rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej,
 b) rozkład współczynnika tłumienia,
 c) miąższość strefy spękaniej

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej uzyskane w tym profilu zawierały się w przedziale od 2160 do 2310 m/s (rys. 6a). Wartości anomalii sejsmicznej, określone dla głębokości 1020 m ($v_0 = 2134$ m/s), zawierały się w przedziale od +1,2% do +8,2%. Na blisko połowie objętego badaniami odcinka chodnika 2w badawczego (od około 20 m do około 45 m na wschód od skrzyżowania z pochylnią wentylacyjną) stwierdzono zgodnie z sejsmiczną skalą oceny wzrostu naprężeń dla kopalń GZW występowanie słabego wzrostu naprężeń w pokładzie 506 (prawdopodobny wzrost naprężeń od 20% do 60%). Na pozostałym odcinku naprężenia były na poziomie normalnym (anomalie sejsmiczne mniejsze niż 5%).

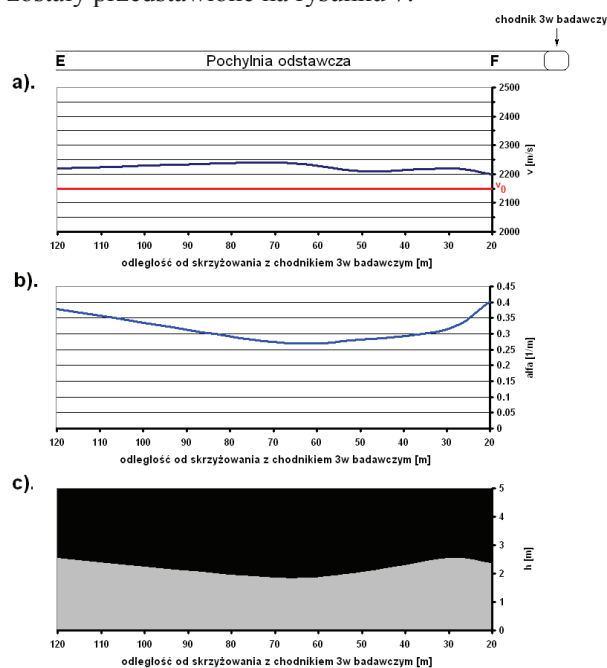
Współczynnik tłumienia podłużnej fali sejsmicznej w tym profilu zawierał się w przedziale od $0,14 \text{ m}^{-1}$ do $0,59 \text{ m}^{-1}$. Najwyższe wartości współczynnika tłumienia występowały w rejonie skrzyżowania chodnika 2w badawczego z pochylnią wentylacyjną. Przyczyną tego było najprawdopodobniej osłabienie górotworu w tym rejonie, spowodowane wykonaniem w/w wyrobisk. Dalej w kierunku krawędzi eksploatacyjnej wytworzonej w pokładzie 502 wartości współczynnika tłumienia maleją, osią-

gając dokładnie pod nią minimum, czyli $0,14 \text{ m}^{-1}$. Niskie wartości współczynnika tłumienia (poniżej $0,15 \text{ m}^{-1}$) utrzymywały się już do końca objętego badaniami odcinka chodnika 2w badawczego (rys. 6b), co związane jest niewątpliwie z wpływem krawędzi wytworzonej w pokładzie 502, zmieniającej w tym rejonie swój kierunek i występującej ponownie nad chodnikiem 2w badawczym na końcu profilu pomiarowego.

Zasięg strefy spękaniej na objętym badaniami odcinku chodnika 2w badawczego zawierał się w przedziale od 1,7 m do 2,1 m (rys. 6c). Największy zasięg strefy spękaniej (ponad 2 m) występował w odległości do około 30 m od skrzyżowania z pochylnią wentylacyjną.

5.3. Profil w pochylni odstawczej w pokładzie 506 (E – F)

Pochylnia odstawcza została wydrążona w filarze dla przekopów południowych. Był to pierwszy z czynników, który zadecydował o objęciu jej badaniami sejsmicznymi. W wytworzonych filarach występują przeważnie dodatkowe siły ściskające, wpływające na panujący w nich stan naprężeń. Drugim czynnikiem była obecność uskoku diagonalnego o rzucie około 110 m, z którym mogły się wiązać dodatkowe naprężenia (szczególnie bliżej skrzyżowania z chodnikiem 3w badawczym). Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 7.



Rys. 7. Wyniki profilowania sejsmicznego w pochylni odstawczej w pokładzie 506:
 a) rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej,
 b) rozkład współczynnika tłumienia,
 c) miąższość strefy spękaniej

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej uzyskane w tym profilu zawierały się w przedziale od 2200 m/s do 2240 m/s (rys. 7a). Rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej wzdłuż profilu pomiarowego cechował się małą zmiennością. Wartości anomalii sejsmicznej, określone dla głębokości 1040 m ($v_0=2148$ m/s) zawierały się w przedziale od +2,4% do +4,3%. Na całym objętym badaniami odcinku pochylni odstawczej poziom naprężeń w przyociosowej części pokładu 506 był na poziomie normalnym (anomalii sejsmiczna mniejsza niż 5%).

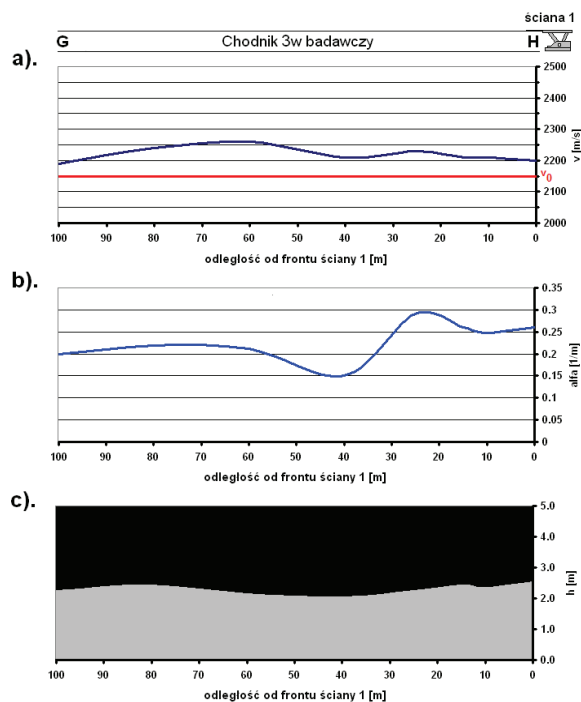
Współczynnik tłumienia podłużnej fali sejsmicznej zawierał się w przedziale od $0,27\text{ m}^{-1}$ do $0,4\text{ m}^{-1}$, przy czym na większości objętego badaniami odcinka pochylni odstawczej współczynnik ten oscylował wokół wartości $0,3\text{ m}^{-1}$ (rys. 7b). Uśredniony współczynnik tłumienia w tym profilu wyniósł $0,33\text{ m}^{-1}$, co pokrywa się z wartością uzyskaną w chodniku wentylacyjnym, na odcinku wydrążonym w filarze dla przekopów południowych. Najwyższe wartości współczynnika tłumienia występowały na końcach wyznaczonego profilu sejsmicznego. Nie stwierdzono spadku współczynnika tłumienia w miarę zbliżania się do uskoku diagonalnego, co prawdopodobnie spowodowane było znaczną odległością od tego zaburzenia tektonicznego (przekraczającą 100 m). Podobnie jak rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej, również rozkład współczynnika tłumienia cechował się małą zmiennością.

Spośród wszystkich objętych badaniami wyrobisk w pokładzie 506 badania w pochylni odstawczej zostały wykonane najwcześniej. W związku z tym zasięg strefy spękannej nie spadał tutaj poniżej 2 m i zawierał się w przedziale od 2 m do 2,6 m (rys. 7c).

5.4. Profil w chodniku 3w badawczym w pokładzie 506 (G – H)

Chodnik 3w badawczy to chodnik przyścianowy ściany 1, prowadzonej na całą miąższość pokładu 506 z zawałem stropu. Profil pomiarowy w chodniku 3w badawczym został zlokalizowany w odciosie ścianowym, na długości do 100 m przed frontem ściany 1, w zasięgu jej ciśnienia eksploatacyjnego. Wyniki badań zostały przedstawione na rysunku 8.

Prędkości podłużnej fali sejsmicznej uzyskane w tym profilu zawierały się w przedziale od 2190 m/s do 2260 m/s (rys. 8a). Najwyższe prędkości (większe niż 2250 m/s) występowały w odległości od ponad 50 m do około 70 m przed frontem ściany 1. Rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej wzdłuż profilu pomiarowego cechował się małą zmiennością.



Rys. 8. Wyniki profilowania sejsmicznego w chodniku 3w badawczym w pokładzie 506: a) rozkład prędkości podłużnej fali sejsmicznej, b) rozkład współczynnika tłumienia, c) miąższość strefy spękannej

Wartości anomalii sejsmicznej, określone dla głębokości 1055m ($v_0=2159$ m/s) zawierały się w przedziale od +1,4% do +4,7%. Na całym objętym badaniami odcinku chodnika 3w badawczego poziom naprężeń w przyociosowej części pokładu 506, zgodnie z sejsmiczną skalą oceny wzrostu naprężeń dla kopalń GZW, był na poziomie normalnym (anomalii sejsmiczna mniejsza niż 5%).

Współczynnik tłumienia podłużnej fali sejsmicznej na objętym badaniami odcinku chodnika 3w badawczego zawierał się w przedziale od $0,15\text{ m}^{-1}$ do $0,29\text{ m}^{-1}$ [rys. 8b]. Średni współczynnik tłumienia w hodniku 3w badawczym, do 100 m przed frontem ściany wyniósł $0,23\text{ m}^{-1}$. Wartość ta jest blisko 1,5 razy mniejsza od średniego współczynnika tłumienia uzyskanego w pochylni odstawczej (poza teoretycznym zasięgiem ciśnienia eksploatacyjnego ściany, ale w filarze dla przekopów południowych). Niższa wartość współczynnika tłumienia w pokładzie 506, przed frontem ściany 1 związana jest z ciśnieniem eksploatacyjnym tej ściany.

Zasięg strefy spękannej, podobnie jak w przypadku pochylni odstawczej nie zawężił się tutaj do wartości poniżej 2 m i zawierał się w przedziale od 2,1 m do 2,6 m (rys. 8c). Strefa spękana miała największy zasięg na odcinku od frontu ściany do około 20 m przed frontem ściany.

6. PODSUMOWANIE

Metoda profilowania sejsmicznego stanowi użyteczną metodę rozpoznania stanu naprężeń w pokładzie węgla, w strefie przyociosowej wyrobisk chodnikowych. Standardowo metoda ta stosowana jest w wersji kinematycznej, w której parametrem brany pod uwagę jest prędkość podłużnej fali sejsmicznej. Na potrzeby kopalń GZW została stworzona sejsmiczna skala oceny wzrostu naprężeń w pokładach węgla [1,2]. Wzrost naprężeń określany jest według tej skali na podstawie anomalii sejsmicznej, która obliczana jest w oparciu o zmierzone prędkości fali i prędkość odniesienia, zależną od głębokości zalegania pokładu w miejscu prowadzenia badań.

Eksploatacja w kopalniach węgla kamiennego GZW jest prowadzona na coraz większych głębokościach, na których panują coraz większe naprężenia pierwotne. W takich warunkach dodatkowym, dużym przyrostom naprężeń, spowodowanym czynnikami górnictwymi czy geologicznymi, odpowiadają niewielkie zmiany anomalii sejsmicznej.

Do oceny stanu naprężeń w górotworze coraz częściej wykorzystywany jest współczynnik tłumienia. Wartość tego współczynnika zależy w istotny sposób od stanu naprężeń panujących w pokładzie, a ponadto współczynnik tłumienia jest parametrem bardziej czułym na zmianę stanu naprężeń w porównaniu do prędkości fali sejsmicznej. Dodatkowo przyrosty współczynnika tłumienia ze wzrostem naprężenia maleją w mniejszym stopniu [10].

Podczas profilowań sejsmicznych prowadzonych w KWK Bielszowice potwierdzono przedstawione wyżej zalety wykorzystania współczynnika tłumienia do oceny wpływu czynników geologicznych i górniczych na zmiany poziomu naprężeń w pokładzie zalegającym na dużej głębokości. W rejonie krawędzi eksploatacyjnych, wytworzonych w pokładach sąsiednich, a także na odcinku teoretycznego występowania ciśnienia eksploatacyjnego ściany, nieznacznym zmianom anomalii sejsmicznej w profilach pomiarowych odpowiadały znaczne zmiany współczynnika tłumienia.

Literatura

1. *Dubiński J.* 1989: Sejsmiczna metoda wyprzedzającej oceny zagrożenia wstrząsami górnictwymi w kopalniach węgla kamiennego, Prace Głównego Instytutu Górnictwa, Katowice, 32–37.
2. *Dubiński J., Konopko W.* 2000: Tąpnięcia. Ocena, prognozowanie, zwalczanie, Główny Instytut Górnictwa, Katowice, 198–266.
3. *Dzik G., Wojtecki Ł.* 2009: Próba określenia rozkładu współczynnika tłumienia na wybiegu ściany 306b/507 w KWK Bielszowice metodą pasywnej tłumieniowej tomografii sejsmicznej, *Mechanizacja i Automatyizacja Górnictwa*, 10(464), 28–32.

4. *Jarosz J.* 2001: Sejsmiczna ocena spękań wokół wyrobiska, w: *Badania geofizyczne w kopalniach*, praca zbiorowa pod red. J. Dubińskiego, Z. Pileckiego, W. M. Zuberka, Wydawnictwo IGSMiE, Kraków, 347–354.
5. *Kasina Z.* 1983: Problem tłumienia fal sprężystych w aspekcie sejsmiki poszukiwawczej, *Prace Geologiczne*, nr 128, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 7–50.
6. *Kłosiński J.* 2004: Wyznaczanie współczynnika dobroci Q tłumienia fali sejsmicznej, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, *Miesięcznik WUG* nr 5/2004, 41–43.
7. *Lurka A., Siata R.* 2011: Wykorzystanie algorytmów regularyzacyjnych i algebraicznej rekonstrukcji w tomografii amplitudowej na przykładzie ściany M-4, pokład 501/3 w Kopalni Węgla Kamiennego „Jankowice”, *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Zagrożenia Naturalne 2011*, Katowice, 200–206.
8. *Pilecki Z., Kłosiński J.* 2007: Profilowanie tłumienia fali sejsmicznej w pokładzie węgla, *Materiały Warsztatów z cyklu „Zagrożenia naturalne w górnictwie”*, 381–393.
9. *Pilecki Z., Szreder Z.*: Możliwość wykorzystania współczynnika tłumienia do oceny stanu naprężenia i deformacji za pomocą profilowań sejsmicznych w warunkach dużych głębokości, *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Zagrożenia Naturalne 2007*, Katowice, 197–203.
10. *Szreder Z., Pilecki Z., Kłosiński J.* 2008: Efektywność rozpoznania oddziaływania krawędzi eksploatacyjnych metodami profilowania tłumienia oraz prędkości fali sejsmicznej, *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, zeszyt 2/3, 215–226.
11. *Winkler K. W., Nur A.* 1982: Seismic Attenuation: Effects of Pore Fluids and Frictional Sliding, *Geophysics*, 47(1), s. 1–15.
12. *Wojtecki Ł.* 2011: Wykorzystanie metod sejsmicznych w wersji kinematycznej do określania stanu naprężeń w górotworze podczas eksploatacji w Kopalni Węgla Kamiennego „Bielszowice”, *Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Zagrożenia Naturalne 2011*, Katowice, 578–597.
13. *Yu G., Vozoff K., Durney F. W.*, 1993: The Influence of Confining Pressure and Water Saturation on Dynamic Elastic Properties of Some Permian Coals, *Geophysics*, 58(1), s. 30–38.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów