



Krystyna STEC\*

## Określenie przyczyny wysokoenergetycznych wstrząsów górotworu na podstawie parametrów mechanizmu ognisk

Streszczenie: Celem badań było określenie przyczyny występowania wysokoenergetycznych wstrząsów (energia  $E \geq 1,0E+05$  J) w rejonie ściany A położonej pokładzie 405/2 w znajdującej się w zachodniej części siodła głównego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. W badaniach wykorzystano metodę inwersji tensora momentu sejsmicznego dającą w wyniku parametry mechanizmu ognisk (procentowy udział składowych: izotropowej, jednoosiowego ściskania lub rozciągania, składowej ścinającej; azymut i upad płaszczyzn nodalnych; kierunki osi naprężeń tensyjnych i kompresyjnych). Parametry te są wielkościami, które opisują procesy zachodzące w ogniskach wstrząsów i posiadają wyraźny związek z warunkami naprężeniowymi w danym rejonie. Na podstawie otrzymanych parametrów wyznaczono kierunki naprężeń głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  oraz pozostałe parametry takie jak: parametr  $R = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ ; naprężenie normalne  $\sigma$  i ścinania  $\tau$  przy założeniu, że  $\sigma_1 = 1$  a  $\sigma_3 = 0$ ; kierunek osi ściskania – rozciągana, kierunek naprężenia horyzontalnego. Przeprowadzone badania wykazały, że przyczyną występowania wysokoenergetycznych wstrząsów podczas eksploatacji ściany A w pokładzie 405/2 była dynamiczna destrukcja warstw stropowych, które uzyskały możliwość przemieszczenia się w kierunku przestrzeni powstałej po wyeksploatowaniu pokładu. Dodatkowym czynnikiem znacznie potęgującym ten proces był udział istniejących w górotworze naprężeń, które pochodziły od występujących w tym rejonie krawędzi i lokalnych uskoków. Wyniki badań stanowiły dodatkową informację dla określenia stanu zagrożenia tąpnięciami w tym rejonie. Mianowicie, ze względu na niebezpieczne warunki (parametry naprężeniowe odpowiadające górotworowi o dużej wytrzymałości na ścinanie, w którym wstrząsy cechują się silniejszym oddziaływaniem dynamicznym) wykonane zostały w tym rejonie dodatkowe działania profilaktyczne – strzelania wstrząsowe.

Słowa kluczowe: wstrząs sejsmiczny, mechanizm ogniska, naprężenia główne

\* Dr hab. inż., Główny Instytut Górnictwa, Katowice; e-mail: kstec@gig.eu

## Causes of the occurrence of high-energy seismic events based on focal mechanism parameters

Abstract: The aim of the research was to determine the cause of high-energy rock mass tremors (energy  $E \geq 1,0E+05$  J) in the area of longwall A located in seam 505/2, in the western part of the main saddle in the Upper Silesian Coal Basin. The research employed the method of seismic moment tensor inversion which provides parameters of focal mechanism (percentage share of its components: isotropic, uniaxial compression or tension, shear component; trend and dip of nodal planes, directions of tension axes and compression stress). The parameters describe processes occurring in focuses of tremors and they are clearly linked with stress conditions in a given area. Based on the obtained parameters, the directions of principal stresses  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  were determined, as well as other parameters such as: parameter  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ; normal stress  $\sigma$  and shear stress  $\tau$ , assuming that  $\sigma_1 = 1$  and  $\sigma_3 = 0$ ; direction of Shortening/Extension axis; direction of horizontal stress. The research showed that the cause of the occurrence of high-energy tremors while exploitations longwall A mining seam 405/2, was the dynamic destruction of roof rocks which could displace towards the cavity created after mining the seam. An additional factor significantly magnifying the process was the share of stresses, which originate from the faults in the area, existing in the rock mass. The results of the research provided additional information to determine the degree of rockburst hazard in the area. Due to the very dangerous work conditions (stress parameters reflect the rock mass of high shear strength, where dynamic influence of tremors is stronger) additional preventive actions – distress blastings were made in this area.

Keywords: seismic event, focal mechanism, principal stresses

## Wprowadzenie

Na początku lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, na podstawie analizy empirycznych rozkładów ekstremalnych energii sejsmicznych sformułowana została hipoteza o istnieniu zjawiska bimodalności sejsmiczności obserwowanej w polskich kopalniach węgla kamiennego. Uważano, że jego przyczyną może być różna geneza wydzielonych dwóch grup wstrząsów. Przyjęto, że jedna grupa jest odpowiedzialna za niskoenergetyczną komponentę rozkładu, natomiast druga generuje komponentę wysokoenergetyczną (Kijko 1982, 1986).

Przeprowadzone badania mechanizmu ognisk dużego zbioru wstrząsów o różnych energiach sejsmicznych (kilkaset wstrząsów) z Górnośląskiego Zagłębia Węglowego jednoznacznie potwierdziły fakt występowania wstrząsów górniczych o różniących się mechanizmach ognisk, co z kolei potwierdziło powyższą hipotezę o występowaniu zjawiska modalności w sejsmiczności górniczej. Ponadto wyniki tych badań wyraźnie potwierdziły, że mechanizm tworzenia się ognisk wstrząsów górniczych zależy od wielu czynników geologiczno-górniczych, których wzajemna korelacja ma decydujący wpływ na powstawanie wstrząsów określonego typu. Stwierdzono, że zmienność mechanizmów ognisk wstrząsów jest silnie zależna od cech tektonicznych rejonu, położenia ogniska wstrząsu względem frontu ścianowego i istniejących w danym rejonie zaszczości eksploatacyjnych. Określenie przyczyn występowania danego typu wstrząsów ma podstawowe znaczenie dla oceny zagrożenia sejsmicznego w danym rejonie, ponieważ poznanie procesów pęknięcia w źródle jest niezbędne do opracowywania technik prognozowania, zwalczania i przeciwdziałania zjawiskom dynamicznym. Wstrząsy o ogniskach położonych w pokładzie węgla charakteryzują się najczęściej eksplozywnym mechanizmem i wymagają odmiennej profilaktyki niż wstrząsy o ogniskach znajdujących się poza pokładem, w mocnych warstwach piaskowco-

wych lub strefach tektonicznych. W przypadku tych wstrząsów w strefie ogniskowej dominuje układ pary sił powodujący procesy ścinania i poślizgu na płaszczyźnie pęknięcia. Charakterystykę wstrząsów z Górnosląskiego Zagłębia Węglowego oraz przyczyny ich występowania w każdej z grup zostały opisane są w licznych publikacjach (Stec 2007, 2009, 2012a,b; Wojtecki i in. 2016; Zuberek i in. 1996). Na podstawie parametrów mechanizmu ognisk istnieje możliwość określania w górotworze względnych wartości i naprężeń głównych. Jest to szczególnie cenne ze względu na informację użyteczną dla oceny zagrożenia sejsmicznego w kopalniach, gdzie eksploatacji towarzyszy wyraźna sejsmiczność górotworu. Na podstawie parametrów opisujących stan naprężeń w danym rejonie można określić skłonność górotworu do generowania wstrząsów, ponieważ większe wartości naprężenia ścinającego charakteryzują górotwór o wyższej wytrzymałości. Jest to metoda pozwalająca na bezpośrednią i szybką ocenę parametrów pola naprężeń, a szczególnie obserwacji jego zmian w czasie wybierania aktywnej sejsmicznie partii górotworu (Stec 2012a, b). Wyniki przedstawionych w artykule badań mogą przyczynić się do pełniejszego wykorzystania metody sejsmologicznej w ocenie zagrożenia łąpaniami, ze względu na uzyskanie dodatkowej informacji przydatnej dla określenia stateczności wyrobisk górniczych, które poddane są oddziaływaniom dynamicznym przez wstrząsy górotworu.

## 1. Opis rejonu badań

Rejon badań obejmował ścianę A położoną w pokładzie 405/2 w kopalni węgla kamiennego znajdującej się w zachodniej części siodła Głównego. Pokład w tym rejonie zalega na głębokości od -495 do -570 m p.p.m. i zapada w kierunku południowo-zachodnim. W polu ściany A występują zaburzenia typu ciągłego – lokalna synklina i antyklina oraz typu nieciągłego – małe uskoki o przebiegu NE-SW i zrzutach od 0,2 do 1,6 m a po południowo-wschodniej stronie ściany rozległa strefa uskokowa o rozciągłości NE-SW.

Budowa geologiczna górotworu, zarówno ponad, jak i pod pokładem 405/2 charakteryzuje się dużą zmiennością litologiczną. W stropie pokładu zalegają: łupek piaszczysty szary z wkładkami piaskowca, łupek ilasty, szary zapiaszczony, pokład 405/1, łupek ilasty, szary zmiennie zapiaszczony z wkładkami łupku piaszczystego oraz kolejno pokłady grupy 404–401 z naprzemiennie zalegającymi warstwami łupku ilastego i piaszczystego oraz piaskowiec średnio- i drobnoziarnisty. W warstwach spągowych pokładu 405/2 występują: łupek ilasty z gęstymi laminami, lokalnie o charakterze łupku piaszczystego, piaskowiec średnio- i drobnoziarnisty oraz pokłady 407/1 i 407/2.

Nad pokładem 405/2 w odległości około 46 m występuje krawędź pokładu 405/1 i w odległości około 170 m występuje krawędź pokładu 401. Poniżej w odległości około 41 m występuje krawędź pokładu 407/1 i w odległości około 70 m krawędź pokładu 407/2.

Pomimo że pole wybiegu ściany odprężone zostało uprzednio dokonaną eksploatacją dwoma ścianami w pokładzie 405/1, aktywność sejsmiczna w tym rejonie rozpoczęła się już w trakcie robót przygotowawczych. Podczas drążenia chodnika nadścianowego wystąpiły 32 wstrząsy górotworu o energiach  $10^2$ – $10^4$  J, w tym pięć wstrząsów o energii rzędu  $10^2$  J, 26 wstrząsów o energii rzędu  $10^3$  J oraz jeden wstrząs o energii  $10^4$  J. W trakcie eksplo-

atacji ściany A tj. od marca 2016 do lipca 2016 roku wystąpiło 116 wstrząsów górotworu o energiach rzędu  $10^2$ – $10^6$  J, w tym 23 wstrząsy o energii  $10^2$  J, 67 wstrząsów o energii  $10^3$  J, 17 wstrząsów o energii  $10^4$  J, 8 wstrząsów o energii  $10^5$  J oraz 1 wstrząs o energii  $10^6$  J. Wysokoenergetyczne wstrząsy górotworu o energii powyżej  $10^5$  J były zjawiskiem niepokojącym, ponieważ pokład 405/2 został zaliczony do I stopnia zagrożenia tapaniami.

Z tego względu zostały przeprowadzone badania mające na celu wyjaśnienie przyczyn występowania wysokoenergetycznych wstrząsów oraz poznanie przebiegu procesów pęknięcia zachodzących w strefie występowania ognisk wstrząsów.

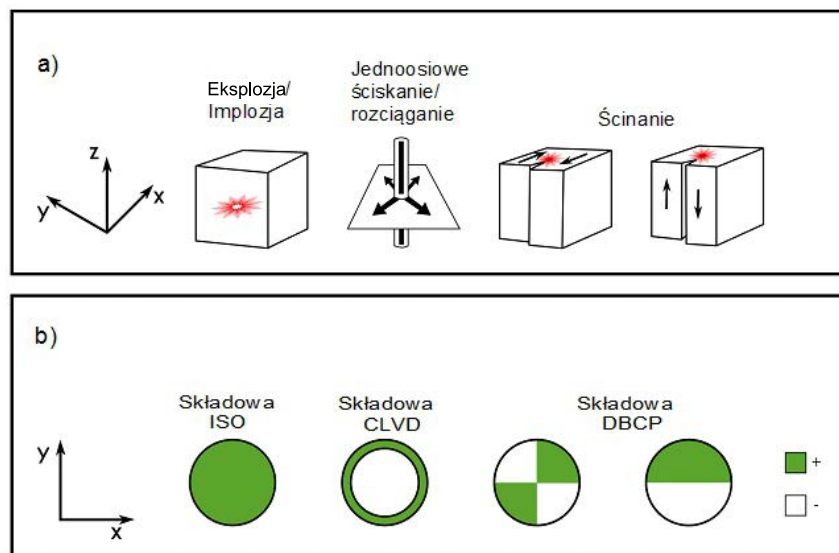
## 2. Wyniki obliczeń mechanizmu ognisk

Mechanizm powstawania wstrząsów górotworu zależy od wielu czynników geologiczno-górnicznych, których wzajemna korelacja ma decydujący wpływ na powstawanie różnego typu ognisk. Destrukcję warstw wstrząsogennych można z pewnym przybliżeniem opisać parametrami mechanizmu ognisk wstrząsów wyznaczonymi metodą inwersji tensora momentu sejsmicznego. Podstawy matematyczne metody są szeroko opisane w literaturze, między innymi w pracach (Aki i Richards 1980; Ben-Menahem i Singh 1981; Hasegawa 1989; Gibowicz i Kijko 1994; Shearer 2009). Tensor momentu sejsmicznego (TMS) opisuje układ sił występujących w źródle sejsmicznym jako liniową kombinację par sił z momentem. System sił oddziałuje na górotwór powodując przemieszczenia, które w dalekim polu falowym są sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne pary sił. TMS można rozłożyć na następujące dwie części: izotropową (opisującą zmiany objętości w źródle) i dewiatorową, która jest złożeniem podwójnej pary sił i skompensowanego liniowo dipola wektorowego. Dekompozycja TMS na część izotropową, na liniowy skompensowany dipol i na podwójną parę sił jest najczęściej przyjmowanym opisem źródła sejsmicznego. Graficzny obraz modelu powstawania pęknięcia skał opisanego przez poszczególne składowe TMS przedstawia rysunek 1.

W przypadku dominacji składowej ścinania określa się orientację przestrzenną płaszczyzny ogniskowej, na której ma miejsce proces niszczenia, to jest jej azymut i upad oraz kierunek i zwrot przemieszczenia na tej płaszczyźnie. Uzyskuje się również dane o azymucie i zanurzeniu osi naprężeń kompresyjnych  $P$  i tensyjnych  $T$ . Graficzne odwzorowanie (rzut stereograficzny) oraz sposób pęknięcia warstw w ognisku dla ścinającego mechanizmu ognisk przedstawione są na rysunku 2.

Mechanizm ognisk wstrząsów o energii od  $10^5$  J, które wystąpiły w czasie eksploatacji ściany A w okresie 16.06–8.07.2016 r. wyznaczono programem FOCI (Kwiatek 2016) na podstawie sejsmogramów zarejestrowanych przez lokalną sieć sejsmologiczną. Sieć sejsmologiczna w okresie badań składała się z 16 pionowych sejsmometrów otaczających rejon ściany, co było podstawą dla prawidłowego określenia współrzędnych ognisk wstrząsu, jak i wyznaczenia mechanizmu ognisk. Obliczenia wykonano w domenie czasu dla fali podłużnej  $P$  wyznaczając amplitudę i kierunek pierwszych wychyleń fali  $P$ .

Wynikiem obliczeń były modele ognisk wstrząsów, opisane przez trzy rodzaje tensora momentu sejsmicznego: ogólny, dewiatoryczny i czystego ścinania.



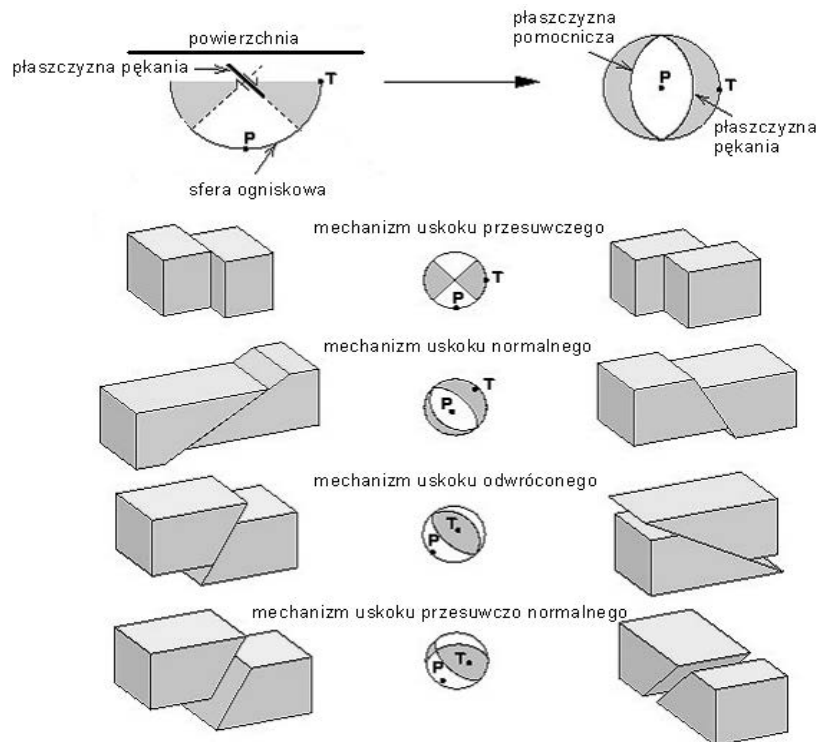
Rys. 1. Model powstawania pęknięcia w ośrodku skalnym (a) i model mechanizmu ogniska wstrząsu dla TMS [+ kompresja; – dylatacja] (b)

Fig. 1. Model of the rock fracture formation (a) and focal mechanism model for TMS [+ compression; – dilatation] (b)

- Tensor ogólny zawiera składową izotropową ISO, która opisuje zmiany objętości w ognisku (eksplozja /+ / lub implozja /- /), składową CLVD odpowiadającą jednoosiowemu ścisnaniu /- / lub rozciąganiu /+ / oraz składową ścinającą DC opisywaną przez podwójną parę sił.
- Tensor dewiatoryczny (związany ze zmianą postaci bez zmiany objętości) zawiera dwie składowe, tj. CLVD i DC.
- Tensor czystego ścinania zawiera tylko składową DC.

Przy obliczaniu mechanizmu ognisk bardzo istotna jest dokładna lokalizacja hipocentrum wstrząsu. Przyjęto poziome współrzędne (X, Y) ognisk wstrząsów wyliczone programem lokalizacyjnym używanym w kopalni, a współrzędną pionową obliczono na podstawie współczynników jakości rozwiązań i błędów wyznaczenia składowych tensora momentu sejsmicznego. Najlepsze dopasowanie TMS uzyskano dla głębokości od –380 do –450 m p.p.m. Głębokość ta odpowiadała położeniu warstw wstrząsogennych (piaskowce i łupki) zalegających od 150 do 200 m nad pokładem 405/2.

Analizowane wstrząsy charakteryzowały się mechanizmem poślizgowym z udziałem procesów ścinania wynoszącym ponad 50%. Mechanizm ognisk wstrząsów typu poślizgowego normalnego cechuje się działaniem dominującego naprężenia ściskania w kierunku zbliżonym do kierunku pionowego a naprężeniem rozciągania zbliżonym do kierunku poziomego. Wyniki obliczeń przedstawione są w tabeli 1, a graficzny obraz mechanizmów ognisk na mapie pokładu 405/2 na rysunku 3.



Rys. 2. Przykład mechanizmu ognisk i odpowiadającej im geometrii uskoków

Fig. 2. Examples of focal mechanisms and their corresponding fault geometries

Z najlepszego dopasowania rozwiązania wynika, że obliczona według tej metody głębokość ognisk może wskazywać, że wstrząsy te występowały w wyniku pęknięcia i załamywania się wskutek przekroczenia naprężeń piaskowców i łupków położonych powyżej pokładu 405/2. Kierunek azymutów płaszczyzn pęknięcia NE-SW zbliżony był do rozciągłości występujących w polu ściany A małych uskoków i spękań, towarzyszących dużej strefie uskoku otaczającej od południowego wschodu ścianę A. Równocześnie występował również wpływ krawędzi eksploatacyjnych pokładu 405/1. Azymut płaszczyzn pęknięcia odpowiadał również przebiegowi tych krawędzi.

TABELA 1. Zestawienie parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów\*  
 TABLE 1. List of focal mechanism parameters

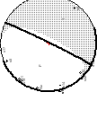

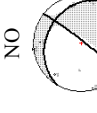
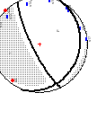

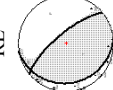
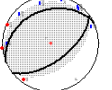
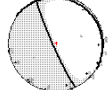

Nr Data Czas	Energia [J]	Składowe TMS, Nim $M_{11}$ $M_{12}$ $M_{13}$ $M_{21}$ $M_{22}$ $M_{23}$ $M_{31}$ $M_{32}$ $M_{33}$	Plaszczynny nodalne A,B $\Phi_A/\delta_A/\lambda_A$ $\Phi_B/\delta_B/\lambda_B$	Osie naprężeń $P, T$ $\Phi_P/\delta_P$ $\Phi_T/\delta_T$			Udział składowych TMS [%]			Typ mechanizmu	Lokalizacja ogniska
				ISO	CLVD	DCP	6	7	8		
1 2016.06.16 15:31:13	4,0E+05	6,36E+08 1,43E+10 -5,36E+09 1,43E+10 -1,04E+10 -1,05E+10 -5,36E+09 1,05E+10 -3,68E+10	26/88/-88 160/3/-134	298/47 114/43	-13	-21	66	9	NO 	wybieg 6 m, 17 m do chodnika nadsłanianowego	
2 2016.06.21 23:10:59	6,0E+05	-1,77E+09 1,57E+10 1,97E+10 1,57E+10 1,24E+10 -5,11E+10 1,97E+10 -5,11E+10 -6,18E+10	189/73/-71 319/25/-137	124/58 264/26	-14	-24	62	NO 	wybieg 17 m, 40 m do chodnika n nadsłanianowego		
3 2016.06.24 21:56:39	3,0E+05	-1,88E+08 1,72E+09 -2,35E+08 1,72E+09 2,06E+11 -4,27E+09 -2,35E+08 -4,27E+09 -1,91E09	151/77/-90 333/13/-89	61/58 241/32	-1	37	62	NO 	wybieg 50 m, 48 m do chodnika nadsłanianowego		
4 2016.06.28 14:36:22	2,0E+05	1,60E+08 -4,39E+08 -1,38E+08 -4,39E+07 -1,46E+08 2,54E+08 -1,38E+08 2,54E+08 -1,75E08	42/79/-119 293/31/22	281/48 155/28	-13	-26	61	NO 	wybieg 65 m, 27 m do chodnika nadsłanianowego		
5 2016.06.28 17:25:37	2,0E+05	1,59E+08 -4,43E+10 -1,51E+08 -4,43E+07 -1,52E+08 2,56E+08 -1,51E+08 2,56E+08 -8,76E+07	38/85/-119 299/29/-11	280/43 152/33	-7	-20	73	NO 	wybieg 90 m, 25 m do chodnika nadsłanianowego		

TABELA 1 cd.

TABLE 1 cont.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6 2016.07.01 15:41:48	4,0E+05	5,34E+08 -1,29E+09 -3,07E+09 -1,29E+09 -2,26E+09 -3,19E+09 -3,07E+09 -3,19E+09 3,42E+09	320/73/79 172/20/120	58/27 215/61	7	31	62	RE 	wybieg 60 m, 80 m do chodnika nadszcianowego
7 2016.07.05 18:36:20	1,0E+5	-2,51E+07 1,51E+07 -8,17E+07 1,51E+07 -1,84E+07 5,69E+07 -8,17E+07 5,69E+07 1,90E+08			23	45	32		wybieg 85 m, 75 m do chodnika nadszcianowego
8 2016.07.06 9:59:00	1,0E+6	2,37E+11 -1,30E+11 9,69E+11 -1,30E+11 -1,81E+11 -4,25E+11 9,60E+11 -4,25E+11 -8,39E+10	320/73/79 172/20/120	160/50 333/39	9	2	89	NO 	wybieg 94 m, 103 m do chodnika nadszcianowego
9 2016.07.08 0:13:21	2,0E+5	3,83E+07 3,94E+08 1,27E+08 3,94E+08 4,65E+08 -9,06E+08 1,27E+08 -9,06E+08 -4,3E+09	161/54/-82 327/37/-101	103/79 245/9	-29	30	51	NO 	wybieg 17 m, 40 m do chodnika nadszcianowego

\* – oznaczenia w tabeli:

NO – typ mechanizmu ogniska poślizgowy normalny, RE – typ mechanizmu ogniska poślizgowy odwrócony,

ΦA,B – azymut płaszczyzn nodalnych A,B; δA,B – upad płaszczyzn nodalnych A, B,

λ – kąt przesunięcia,

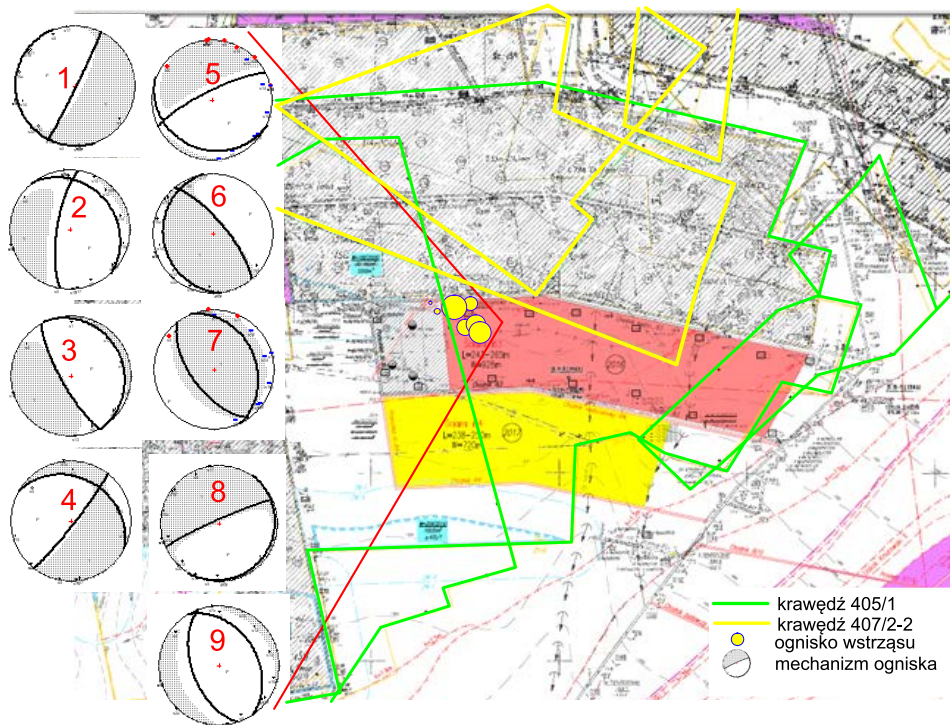
ΦP,T – Azymut osi naprężeń P, T; δP, T – zanurzenie osi naprężeń P, T,

ISO – procentowy udział składowej izotropowej,

CLVD – procentowy udział składowej jednoosiowej,

DC – procentowy udział składowej ścinającej.





Rys. 3. Położenie i mechanizm ognisk wstrząsów na tle ściany A, pokład 405/2

Fig. 3. Location and focal mechanism of high-energy tremors in the area of longwall A, seam 405/2

### 3. Charakterystyka lokalnego pola naprężeń

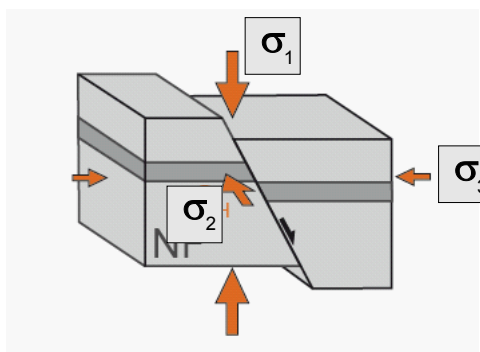
Parametry mechanizmu ognisk wyrażone przez azymut i upad płaszczyzn nodalnych, kąt poślizgu oraz naprężenia kompresyjne  $P$  i tensyjne  $T$  wykorzystano do wyznaczenia względnego lokalnego pola naprężeń, opisanego położeniem naprężeń głównych. Dane te były podstawą oceny naprężeniowego stanu górotworu mającego wpływ na występowanie wysokoenergetycznych wstrząsów (Stec 2012a, b). Należy zaznaczyć, że przestrzenny układ osi naprężeń głównych decyduje o zaistnieniu odpowiedniego typu mechanizmu ogniska wstrząsu. Nie można oczywiście na podstawie danych sejsmologicznych określać bezwzględnych wartości naprężeń, ale ich przestrzenne położenie i wzajemne relacje. Warunki powstania pęknięcia w górotworze określa się na podstawie metody opartej na kryterium wytrzymałościowym Coulomba-Mohra  $\tau = C + \mu\sigma$ , gdzie  $\tau$  oznacza naprężenie styczne działające na płaszczyźnie rozrywu,  $\sigma$  jest naprężeniem normalnym,  $C$  oznacza wartość spójności a  $\mu$  – współczynnik tarcia. Naprężenia główne na podstawie parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów obliczane są przy następujących założeniach (Mckenzi 1969; Etchecopar 1981; Gephart i Forsyth 1984; Reches 1987; Angelier 2002):

- proces pęknięcia w ognisku rozwija się wzdłuż określonej płaszczyzny,
- wektor poślizgu jest równoległy do naprężenia ścinającego leżącego w tej płaszczyźnie,
- zniszczenie skały następuje w wyniku ścicia w płaszczyźnie, w której naprężenie ścinające na płaszczyźnie rozrywa  $\tau$ , zrównoważy naprężenie normalne,  $\sigma$  i siły tarcia wewnętrznego.

W wyniku obliczeń uzyskuje się następujące dane – azymut i zanurzenie naprężeń głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ :

- parametr  $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ; zakładając, że zachodzi  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , parametr R przybiera wartości  $0 \leq R \leq 1$  i odpowiada  $\sigma_2$ ,
- diagram dla stanu naprężeń w układzie współrzędnych  $\sigma$ ,  $\tau$  przy założeniu, że maksymalne naprężenie  $\sigma_1 = 1$  i  $\sigma_3 = 0$ ,
- azymut naprężenia ścinania (róża spękań),
- średnie względne naprężenie ścinające (*Shear Stress*), przy założeniu, że maksymalne naprężenie  $\sigma_1 = 1$  i  $\sigma_3 = 0$ ,
- kierunek osi ściskania–rozciągania (*Shortening/Extension*),
- kierunek dominującego naprężenia horyzontalnego.

Na podstawie wymienionych parametrów można opisać warunki określające stan naprężeniowy górotworu w rejonach występowania ognisk wstrząsów. Występowanie wstrząsów o ogniskach typu poślizgowego normalnego zachodzi w wyniku dominujących naprężeń  $\sigma_1$  o kierunku pionowym (rys. 4).

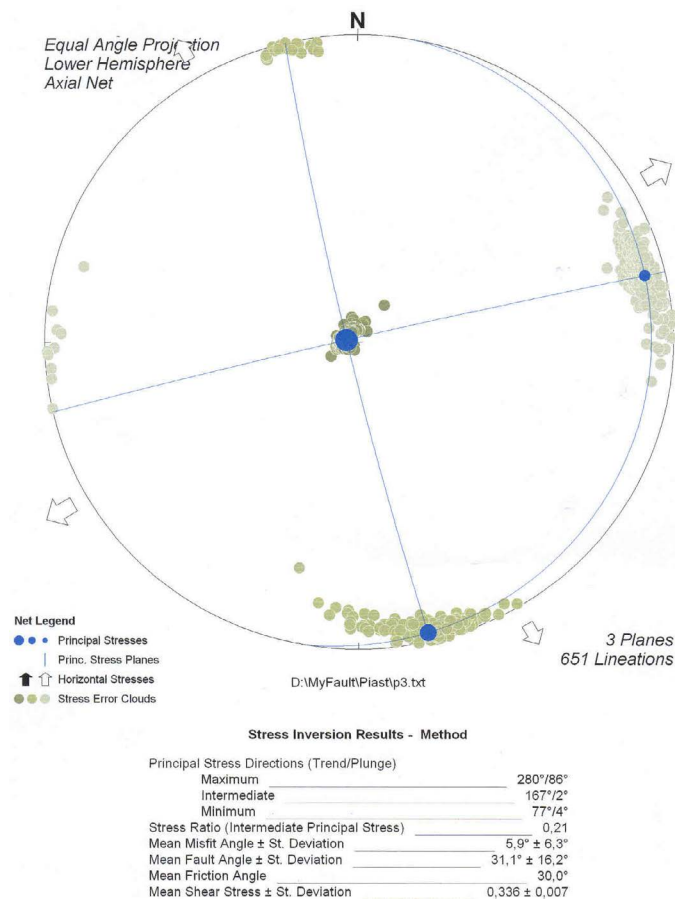


Rys. 4. Układ naprężeń dla zaistnienia ogniska wstrząsu typu uskoku normalnego (zachodzi zależność  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )

Fig. 4. System of stresses for a focus of tremor of normal fault type (there is dependence  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ )

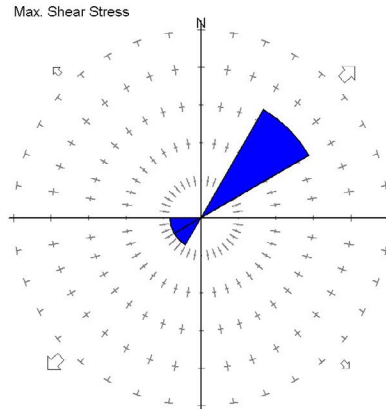
Na podstawie wstrząsów o poślizgowym, ścinającym mechanizmie ognisk obliczono średnie lokalne pole naprężeń w analizowanym rejonie ściany A opisane przez kierunki osi naprężeń głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  (azymut i zanurzenie), parametr R charakteryzujący względne relacje naprężeń  $(\sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3)$  przy założeniu, że  $\sigma_1 = 1$  i  $\sigma_3 = 0$  i pozostałe parametry wymienione powyżej. Wyniki analizy przedstawione są na rysunku 5. Układ naprężeń był następujący: naprężenie  $\sigma_1$  skierowane było pionowo (azymut –  $280^\circ$ , zanurzenie –  $86^\circ$ ),

a główne naprężenie pośrednie  $\sigma_2$  (azymut – 167°, zanurzenie – 2°) oraz minimalne  $\sigma_3$  (azymut – 77°, zanurzenie – 4°) były poziome. Stan naprężeń o dominacji głównego naprężenia  $\sigma_1$  skierowanego pionowo odzwierciedla pęknięcie i załamywanie się nadległych warstw piaskowcowych zachodzące w czasie postępującej eksploatacji górniczej. Względna wartość maksymalnego naprężenia ścinającego (*Shear Stress*) wynosiła 0,34, a jego azymut przedstawiony na rysunku 6 miał kierunek zbliżony do rozciągłości małych uskoków o przebiegu NE-SW i zrzutach od 0,2 do 1,6 m oraz rozległej strefy uskokowej o rozciągłości NE-SW znajdującej się po południowo-wschodniej stronie ściany A. Współczynnik tarcia wynosił 0,57 ( $\phi = 30^\circ$ ). Kierunek działania naprężenia horizontalnego, które jest naprężeniem rozciągającym (oznaczonego na rysunkach 5 i 6 przez białe strzałki) jest NE-SW i jest również zbliżony do rozciągłości wymienionych uskoków.



Rys. 5. Wyniki obliczeń parametrów pola naprężeń dla wstrząsów o poślizgowym mechanizmie ognisk z rejonu ściany A

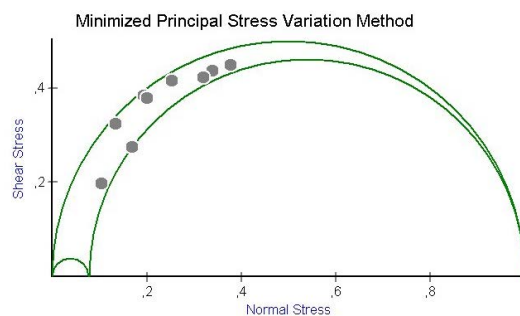
Fig. 5. Results of calculations of parameters of stress distribution based on slip focal mechanisms in the area of longwall A



Rys. 6. Azymut kierunku naprężenia ścinającego (niebieski kolor) oraz kierunek naprężenia horyzontalnego (białe strzałki)

Fig. 6. Trend of shear stress (blue) and direction of horizontal stress (white arrows)

Metoda ta pozwala również na przedstawienie względnego stanu naprężeń na podstawie kół Mohra w układzie współrzędnych naprężenia normalnego  $\sigma$  i naprężenia ścinania  $\tau$ . Przy określonym układzie naprężeń  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  osiągnięty jest pewien stan krytyczny i następuje zniszczenie struktury skały w wyniku pęknięcia kruchego. Rysunek 7 dla analizowanych wstrząsów obrazuje obwiednię kół Mohra obliczoną przy założeniu, że naprężenie  $\sigma_1 = 1$  i  $\sigma_3 = 0$ . Jak widać, dla analizowanych wstrząsów (czarne punkty), stan naprężeń w rejonie ognisk wskazuje, że wartość naprężenia normalnego  $\sigma$  jest mniejsza niż naprężenia ścinania  $\tau$ . Stan taki oznacza ośrodek charakteryzujący się większą wytrzymałością na ścinanie, w którym wstrząsy cechują się silniejszym oddziaływaniem dynamicznym, co stanowi większe zagrożenie dla prowadzonej eksploatacji.



Rys. 7. Przedstawienie trójosiowego stanu naprężeń w rejonie ognisk wysokoenergetycznych wstrząsów ze ściany A w układzie współrzędnych  $\sigma$ ,  $\tau$

Fig. 7. Triaxial state of stress in the area of focuses of high-energy tremors, longwall A in a coordinate system  $\sigma$ ,  $\tau$

## Podsumowanie

Analiza parametrów mechanizmu ognisk oraz lokalnego pola naprężeń wyrażonego przez kierunek i relatywną wartość naprężeń głównych  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ , wysokoenergetycznych wstrząsów występujących w trakcie eksploatacji ściany A w pokładzie 405/2 stanowiła podstawę do określenia stanu naprężeniowego górotworu w obszarach powstawania wstrząsów, a przez to dała możliwość wnioskowania o genezie tych zjawisk.

Parametry naprężeniowe były charakterystyczne dla ośrodka charakteryzującego się większą wytrzymałością na ścinanie, w którym wstrząsy cechują się silniejszym oddziaływaniem dynamicznym, co stanowiło większe zagrożenie dla prowadzonej eksploatacji.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że przyczyną zaistniałych wstrząsów było przemieszczanie nad wybraną przestrzeń zrobową warstw stropowych, które ulegały stopniowemu ugięciu i następnie dynamicznemu pękaniu. Dodatkowym czynnikiem znacznie potęgującym ten proces było oddziaływanie naprężeń istniejących w górotworze, które pochodziły od wyżej położonej krawędzi eksploatacyjnej oraz strefy uskokowej otaczającej od południowego wschodu rejon eksploatowanej ściany A.

Tego typu informacje stanowiły podstawę dodatkowych działań profilaktycznych (strzelania wstrząsowe) wykonanych w celu zmniejszenia zagrożenia tąpnięciami w tym rejonie.

## Literatura

- Aki, K. i Richards, P.G. 1980. *Quantitative Seismology – Theory and Methods*. W.H. Freeman & Co. Vol. 1, 2, San Francisco.
- Angelier, J. 2002. Inversion of earthquake focal mechanisms to obtain the seismotectonic stress IV – a new method free of choice among nodal planes. *Geophys. J. Int.* 150, s. 588–609.
- Ben-Menahem, A. i Singh, S.J. 1981. *Seismic Waves and Sources*. Springer-Verlag, New York.
- Drzewiecki, J. 2015. Determination of the value of the elastic modulus of the large-size rock mass  $E_{srm}$  disturbed by longwall operation on the basis of seismic energy events. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 12/4 (180), s. 377–86.
- Etchecopar i in. 1981 – Etchecopar, A., Vasseur, G. i Daigniers, M. 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis. *J. Struct. Geol.* 3, s. 51–65.
- Gephart, J.W. i Forsyth, D.W. 1984. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando Earthquake Sequence. *J. of Geoph. Res.* 89, s. 305–0320.
- Gibowicz, S.J. i Kijko, A. 1994. *Introduction to Mining Seismology*. Academic Press, San Diego, s. 396.
- Hasegawa i in. 1989 – Hasegawa, H.S., Wetmiller, R.J. i Gendzewill, D.J. 1989. Induced seismicity in mines in Canada – an overview. *Pure Appl. Geophys* 129, s. 423–453.
- Kijko, A. 1982. A modified form of the first Gumbel distribution: model for the occurrence of large earthquakes. Part II – Estimation of parameters. *Acta Geophys. Pol.* 2, s. 148–159.
- Kijko, A. 1986. Bimodalny charakter ekstremalnych rozkładów zjawisk sejsmicznych w kopalniach. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, M-8 (191), s. 91–101.
- Kwiatek i in. 2016 – Kwiatek, G., Martínez-Garzón, P. i Bohnhoff, M. 2016. HybridMT: A MATLAB/shell environment package for seismic moment tensor inversion and refinement, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220150251.
- McKenzi, D.P. 1969. The relation between fault plane solution and the directions of the principal stressrs. *Bull. Seism. Soc. Am.* 59(2).
- Michael, A.J. 1987. Use of Focal Mechanisms to Determine Stress: A Control Study, *J. Geophys. Res.* 92, s. 357–368.

- Reches, Z., 1987. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb yield condition. *Tectonics* 6(6), s. 849–861.
- Stec, K. 2007. Characteristics of Seismic Activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journal International*, Blackwell Publishing Ltd, Vol. 168, s. 757–768.
- Stec, K. 2009. Metody wyznaczania mechanizmu ognisk wstrząsów. *Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko* 4/1, s. 223–236.
- Stec, K. 2012a. Określenie stanu naprężeń w strefach zagrożenia sejsmicznego na podstawie parametrów mechanizmu ognisk wstrząsów. *Przegląd Górniczy* nr 2, s. 8–15.
- Stec, K. 2012b. Focal Mechanisms of Mine-induced Seismic Events an explanation of Geomechanical Processes in the Area of Longwall 6, Seam 510 in Hard Coal Mine Bobrek-Centrum. *Arch. Min. Sci.* 57(4), s. 871–886. doi: 10.2478/v10267-012-0057-7
- Stec, K. i Drzewiecki, J. 2012. Mine Tremor Focal Mechanism: An Essential Element for Recognising the Process of Mine Working Destruction. *Acta Geophysica* 60(2), DOI: 10.2478/s11600-011-0036-y, s. 449–471.
- Shearer, P.M. 2009. *Introduction to seismology*. Cambridge University Press. Second Edition. s. 396
- Wojtecki i in. 2016 – Wojtecki, Ł., Mendecki, M.J., Waclaw, W.M. i Knopik, M. 2016. An attempt to determine the seismic moment tensor of tremors induced by destress blasting in coal seam. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 83, s. 162–169.
- Zuberek i in. 1996 – Zuberek, W.M., Teper, L., Idziak, A.F. i Sagan, G. 1996. Tectonophysical approach to the description of mining induced seismicity in the Upper Silesia. *Tectonophysics in Mining Areas*. Idziak A. red., Katowice: Wyd. UŚ, s. 79–98.