

Mechaniczny tensometr sejsmiczny do monitorowania stanu zagrożenia tąpnięciami wyróbisk górniczych

Streszczenie: Proponuje się zbudowanie mechanicznego tensometru sejsmicznego (MTS), mierzącego zmianę odkształceń średnicy istniejącego otworu wiertniczego w trzech kierunkach, które służą do obserwacji skał za pośrednictwem kamery. Pozwoli to wyznaczyć zmiany naprężeń głównych σ_1 i σ_2 oraz ich kierunków w otaczającym górotworze. Proponuje się umieszczenie w jednym otworze trzech sond, na różnej głębokości oraz z możliwością wyciągnięcia ich z otworu, celem kontroli i ewentualnych napraw. Sonda w dolnej części posiadać będzie oświetlony kompas do obserwacji i odczytów za pomocą małej kamery. Sonda działałaby ciągle, podgląd wyników lub sygnałów obrobionych (analizowanych) przedstawiano by na odpowiednim ekranie.

Słowa kluczowe: tąpnięcia kopalniane, metoda tensometryczna, projekt tensometru mechanicznego.

Mechanical seismic strain gauge for monitoring the risk of rock bursts of the mine excavations

Summary: A mechanical seismic strain gauge for measuring distortion of the existing borehole diameter in three directions is proposed. The device will determine the changes in the vectors of main stresses in the surrounding rock mass. It is proposed to place three probes in the hole at different depths, in a way that will allow to remove them for inspection and a possible repair. The probe in the lowest part of the hole will have an illuminated compass that might be read through a small camera. The probe will be operating continuously, the readouts will be presented on the appropriate screen.

Keywords: mine bumps, strain gauge method, mechanical strain gauge project.

1. Tąpnięcia w kopalniach podziemnych

Tąpnięcie jest to zjawisko dynamiczne spowodowane wstrząsem górotworu, w wyniku którego wyróbisko lub jego odcinek uległo gwałtownemu zniszczeniu lub uszkodzeniu, w następstwie czego doszło do całkowitej albo częściowej utraty jego funkcjonalności lub bezpieczeństwa jego użytkowania [11]. Każdemu tąpnięciu towarzyszy wstrząs

górotworu, natomiast nie każdy wstrząs skutkuje tąpnięciem. Wstrząsy górotworu są wynikiem zaburzenia jego równowagi mechanicznej wywołanej eksploatacją górniczą. Naprężenia wywołane eksploatacją górniczą przesuwały się wraz z frontem eksploatacji i jeśli napotkają strefę zwiększonych naprężeń lub strefę zmienionych właściwości fizycznych skał, to tworzą się warunki do przekroczenia kryteriów pęknięcia masywu skalnego i powstania eksploatacyjnych wstrząsów sejsmicznych [12]. Wstrząsy górnicze zasadniczo różnią się od trzęsień ziemi tym, iż są zjawiskami słabszymi i charakteryzują się wyższymi częstotliwościami. Maksymalne amplitudy drgań występują w strefie ogniskowej i są wywołane najczęściej falami bezpośrednimi (przestrzennymi), a czas trwania drgań jest krótszy, często sprowadza się do pojedynczego piku. Fale powierzchniowe są z kolei groźne dla zabudowy powierzchniowej. Reakcja budynków na powierzchni na drgania górnicze jest odmienna niż na drgania wywołane trzęsieniami górniczymi (nawet regionalno-tektonicznymi zlokalizowanymi w rejonie dużych stref uskokowych) oraz trzęsieniami wulkanicznymi ziemi. W roku 79 naszej ery, podczas wybuchu Wezuwiusza, ziemia drżała coraz silniej przez trzy dni, aż zniszczone zostały Pompeje (historyk Pliniusz). Zarówno w Polsce, jak i w innych krajach celem ograniczenia występującego w różnych kopalniach zagrożenia tąpnięciami prowadzone są badania i analizy występujących w górotworze stanów naprężeń [6, 7, 13]. Pozwalają one na bieżący monitoring stanu zagrożenia tąpnięciami w czasie prowadzenia robót górniczych, jeśli ustali się innymi metodami miejsca potencjalnie dużego stanu zagrożenia tąpnięciami. W kopalniach rud miedzi wykorzystuje się pomiary deformacji otworów wiertniczych wykonanych w caliznie lub stropie. Stabilne przebiegi deformacji otworów oznaczają, że górotwór jest stateczny, a ryzyko wystąpienia wstrząsu wysokoenergetycznego jest mniejsze od przeciętnego. W otworach wiertniczych można zmierzyć również zmiany ich średnicy wewnętrznej za pomocą tensometru mechanicznego.

2. Przykład tąpnięcia w kopalni „Rudna”

W dniu 19 marca 2013 r. o godz. 22:09:52 nastąpiło silne tąpnięcie w kopalni „Rudna” [8]. Było ono jednym z najsilniejszych w kopalni i wiele wyrobisk uległo zniszczeniu. Hipocentrum (ognisko) zostało zlokalizowane w okolicy uskoku na głębokości 897 m. Były także wstrząsy następcze (6 wstrząsów o energii między 10^3 J a 10^4 J. Wstrząs miał $4,7^\circ$ R (w skali Richtera) [8]. W czasie wizji lokalnej zauważono wypiętrzanie spągu chodnika, co sugeruje wystąpienie zjawiska implozji. Wysłunięto przypuszczenie, że wstrząs miał charakter uaktywnienia dyslokacji tektonicznej. Wstrząsy były zarejestrowane przez wiele stacji sejsmologicznych (dwie lokalne kopalniane i jedna napowierzchniowa). Część zapisów wstrząsów kopalnianej Stacji Geofizyki Górniczej została obcięta w wyniku przesterowania systemu rejestrującego, co świadczy o bardzo dużej sile wstrząsów. Nie przeszkadzało to jednak w analizie sygnałów zarejestrowanych w czasie wstrząsu. Analiza częstotliwościowa sugeruje, że mogła też wystąpić silna fala powierzchniowa

o częstotliwości od 0,06 do 0,1 Hz. W normalnych trzęsieniach ziemi największe zniszczenia niesie fala powierzchniowa. Dociera ona najpóźniej, przemieszcza się najwolniej i jest bardzo niszczyielska.

3. Stosowane w kopalni „Rudna” metody obserwacji stanu górotworu

Na terenie kopalni „Rudna” monitoruje się sejsmiczność za pomocą rejestracji drgań, które najczęściej trwają 8–10 sek. Uprzedzenie o łąpaniu z pomiarów drgań (amplitudy przyspieszenia, prędkości) jest niemożliwe. Można tylko porównywać jedno łąpanie z drugim. Na terenie kopalni działa Kopalniana stacja Geofizyki Górniczej posiadająca sieć sejsmologiczną (Wolmore II i Wolmore III) złożoną z 36 pionowych sejsmometrów [8]. Istnieje dodatkowo na powierzchni sieć sejsmologiczna Instytutu Geofizyki PAN, która prowadzi badania sejsmiczne. Oprócz tego istnieje sieć mikrofonów akustycznych prowadząca nasłuch „trzasków” powtarzających się w czasie pęknięcia skał. Prowadzi się też obserwację pęknięć ścianek w istniejących otworach za pomocą kamer. Jest to obserwacja wzrokowa prowadzona przez specjalistów Uniwersytetu Wrocławskiego szczególnie w otworach nad wyrobiskami. Rejestracja drgań, pomiary akustyczne czy obserwacje wzrokowe nie zawsze dają satysfakcjonujące wyniki. Niszczeniu ośrodka skalnego towarzyszą różne zjawiska fizyczne, których obserwacja może stanowić prognozę zagrożenia łąpaniami. Pękające skały zawierają substancje (kryształy) piezoelektryczne będące źródłem ładunku elektrycznego (elektronów). Dochodzi do dynamicznego ruchu elektronów, na skutek którego tworzy się zmienne pole elektryczne, a to z kolei wytwarza zmienne pole magnetyczne. Powstaje fala elektromagnetyczna. Do przesyłania tych fal można wykorzystać istniejące okablowanie akustyczne. Istniejące otwory wiertnicze służące do obserwacji ścianek można też wykorzystać do zamontowania mechanicznych tensometrów sejsmicznych umożliwiających zbieranie danych o zmianie naprężeń w górotworze.

4. Ogólny opis metody tensometrycznej [4, 5]

Tensometr mierzy zmianę średnicy wewnętrznej otworów w trzech kierunkach leżących pod pewnymi kątami względem siebie. Zakłada się go w otworze, w którego otoczeniu panuje określone nieznanne naprężenie traktowane jako naprężenie wstępne. Metody tensometryczne pozwalają mierzyć przyrosty tych naprężeń, które mogą świadczyć o wzroście stanu zagrożenia łąpaniami. Korzystając z prawa Hooke’a, możemy przedstawić związek

gdzie:

$$\sigma = \epsilon E, \quad (1)$$

σ – naprężenie N/m²,

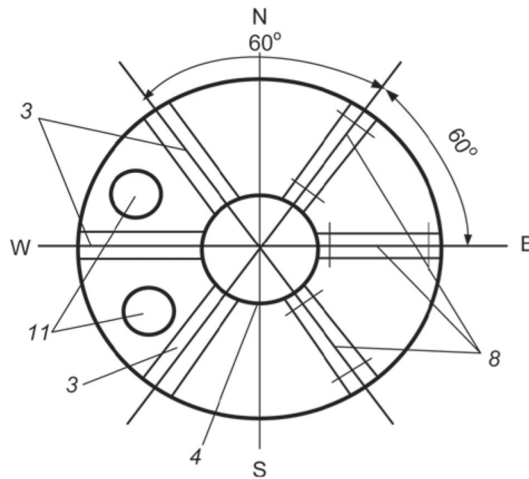
ϵ – odkształcenie [o/o],

E – moduł Younga N/m².

Tensometr musi być zorientowany w płaszczyźnie poziomej za pomocą kompasu, ponieważ informacja o kierunkach naprężeń głównych jest bardzo istotna dla geologów. Szість ramion tensometru umieszczonych jest względem siebie pod kątem 60°.

5. Opis metody tensometrycznej

Przekrój poprzeczny otworu (prostopadły do jego osi) traktujemy, jakby był to płaski stan naprężeń, a otwór jakby był wypełniony skałami posiadającymi daną wartość E , ν . Na rysunku 1 pokazano widok z góry obrazujący ułożenie mechanicznego tensometru sejsmicznego znajdującego się poniżej kosza, który wychwytuje odłamki skalne.



Rys. 1. Schematyczny widok na mechaniczny tensometr sejsmiczny poniżej kosza wychwytyjącego, 8 – równoległoboczne tensometry ruchome, 3 – nieruchoma część tensometru, 4 – rura centralna, 11 – otwierane rury na linki nośne, N – północ, O – wschód, S – południe, W – zachód, kierunki N, O, S, W – według wskazań kompasu.

Źródło: wykonanie własne.

Odształcenia są mierzone na odpowiednich kierunkach (oznaczymy je np. jako a , b , c) indukcyjnymi czujnikami przemieszczeń. Zgodnie z prawem Hooke'a odształcenia ϵ_a , ϵ_b , ϵ_c są funkcjami odpowiednich naprężeń normalnych.

Kierunki naprężeń głównych, które trzeba skorygować ze wskazaniem kompasu podają wzory:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{2\tau_a}{\sigma_{xa} - \sigma_{ya}} = \sqrt{3} \frac{\epsilon_b - \epsilon_c}{2\epsilon_a - \epsilon_b - \epsilon_c}, \quad (2)$$

stąd

$$\alpha_0 = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \sqrt{3} \frac{\epsilon_b - \epsilon_c}{2\epsilon_a - \epsilon_b - \epsilon_c}.$$

Wartości naprężeń głównych σ_1 i σ_2 wynoszą:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3(1-\nu)} + \frac{E}{1+\nu} \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_a + \varepsilon_b + \varepsilon_c}{3(1-\nu)} - \frac{E}{1+\nu} \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_a - \varepsilon_b - \varepsilon_c}{3}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_c}{\sqrt{3}}\right)^2}.$$

Wyznaczenie tych naprężeń (rozciągających i ściskających) może być podstawą oceny stanu zagrożenia łąpaniami.

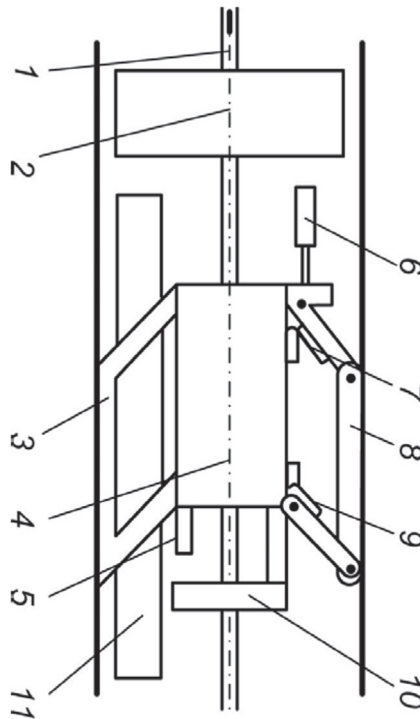
6. Przedsięwzięcia do projektu mechanicznego tensometru sejsmicznego (MTS)

Przy wykonaniu projektu MTS należy sporządzić przynajmniej uproszczoną dokumentację techniczną. Powinna ona uwzględniać następujące wymogi:

1. Możliwość wyjmowania tensometru na powierzchnię w celu dokonania przeglądu, naprawy itp. Polegać to będzie m.in. na przemieszczeniu łapek a , b , c . Proponuje się uczynić to za pomocą dwóch przeciwstawnych sprężyn sterowanych z powierzchni, jednej słabszej, służącej do docisku i drugiej, silniejszej, do chowania łapki.
2. Całość należy wykonać z metali antymagnetycznych (miedź, aluminium), co zapewni odporność na korozję i ewentualną wilgoć.
3. Lina nośna winna być zawieszona centralnie.
4. Pomiar obrotu łapek powinien być zabezpieczony czujnikami przemieszczeń (np. indukcyjnymi).
5. MTS musi być przed użyciem kalibrowany.
6. Wymagana jest ciągłość monitoringu.
7. Przewiduje się użycie w jednym otworze trzech MTS-ów.

Na rysunku 1 pokazano schematyczny widok na MTS z góry, a na rysunku 2 przedstawiono widok z boku.

Właściwe wykonanie takiego urządzenia będzie gwarantem, że wyniki pomiaru wielkości odkształceń nie będą obciążone dużymi błędami.



Rys. 2. Schematyczny widok na MTS z boku, 1 – rura na przewody, 2 – kosz na odłamki skalne, 3 – nieruchoma część tensometru MTS, 4 – rura centralna, 5 – oświetlenie kompasu, 6 – indukcyjny czujnik pomiarowy, 8 – ruchomy tensometr równoległoboku, 7, 9 – sprężyny spiralne, 10 – płytkę do zamocowania kamery i oświetlenia, 11 – dwie rury otwierane przy ścianie kosza dla innych MTS-ów,

Źródło: wykonanie własne.

7. Podsumowanie

Zaproponowane urządzenie, zwane mechanicznym tensometrem sejsmicznym, za-instalowane w górotworze pozwoli w znacznym stopniu podnieść bezpieczeństwo przy wydobyciu rud miedzi. MTS może podawać informacje o wzroście lub obniżeniu naprężeń głównych σ_1 i σ_2 i podawać ich kierunki na mapie złoża. Stan zagrożenia tąpnięciami w kopalniach rud miedzi ocenia się na podstawie geologicznego rozpoznania możliwości wystąpienia tąpnięcia, metody sejsmologii górniczej, rozeznania sytuacji górniczej w rejonie prowadzonych robót, pomiarów przejawów ciśnienia górotworu i obserwacji dołowych. Mogą być także stosowane inne metody oceny stanu zagrożenia tąpnięciami, np.: konwergencji, elektrooporowa, pomiaru deformacji otworów wiertniczych, grawimetryczna, a także tensometryczna. Metoda tensometryczna z wykorzystaniem nowego rodzaju urządzenia będzie lepiej uzupełniać metody sejsmologiczne i geologiczno-górniczego rozpoznania możliwości wystąpienia zagrożenia tąpnięciami.

7. Wnioski i uwagi końcowe

Można sformułować następujące wnioski:

1. MTS przeznaczony jest do pomiaru zmian naprężeń głównych σ_1 i σ_2 i kąta względem stron świata, które wystąpią od chwili jego założenia i rozpoczęcia pracy.
2. MTS wymaga przetestowania (jak każde nowe urządzenie), jak również sporządzenia charakterystyki naprężenie–odkształcenie przed jego założeniem do otworu wiertniczego.
3. Przewiduje się założenie w jednym otworze wiertniczym trzech sond MTS wg analiz przeprowadzonych przez geologów, przy czym głębokość ich zawieszenia wynosi nawet do 1 tys. m.
4. Należy opracować nowy program dopasowujący kąt transformacji do wskazań kompasu odczytanych z kamery.
5. Wśród istniejących i dostępnych patentów USA i polskich istnieją urządzenia monitorujące tąpnięcia, ale jednokierunkowe, działające na głębokości od 10 do 30 m, rozpie-
rające otwór za pomocą pobijanego klina niewyjmowanego. Wad tych – jak się wydaje – nie ma MTS zawieszony na linie w dowolnym otworze, na dowolnej głębokości.

Literatura

- [1] Jastrzęmski P., Mutermilch J., Orłowski W., *Wytrzymałość materiałów. Część 1*, Arkady, Warszawa 1985.
- [2] Jastrzęmski P., Mutermilch J., Orłowski W., *Wytrzymałość materiałów. Część 2*, Arkady, Warszawa 1986.
- [3] Zakrzewski M., Zawadzki J., *Wytrzymałość materiałów*, PWN, Warszawa 1983.
- [4] Jakubowicz A., Orłoś Z., *Wytrzymałość materiałów*, WNT, Warszawa 1978.
- [5] Jarguliński W., Łazowski A., Barancewicz Z., *Statyczny pomiar tensometryczny belek mostu PSMK*, sprawozdanie z badań, Ośrodek Badawczy Sprzętu Inżynieryjnego, Wrocław 1968.
- [6] Bukowska M., *Wskaźnikowe metody oceny skłonności do tąpań skał i górotworu*, Prace naukowe GIG, „Górnictwo i Środowisko” 2005, nr 2, s. 95–107.
- [7] Mutke G., *Ocena zagrożenia tąpnięciami w kopalniach podziemnych uwzględniająca parametry drgań blisko ognisk wstrząsów – doświadczenia z polskich kopalń*, „Górnictwo i Geoinżynieria” 2007, z. 3/1, s. 439–450.
- [8] Rudziński Ł., Lizurek G., *Mechanizm zjawiska sejsmicznego oraz tąpnięcia w OZG Rudna w Polkowicach z 19.03.2013 z wykorzystaniem lokalnych i regionalnych sieci sejsmologicznych*, „CUPRUM – Czasopismo Naukowo – Techniczne Górnictwa Rud” 2015, nr 3, s. 61–72.
- [9] Piesiak S., Jambroziak K., Jarguliński W., *Identyfikacja wybuchów podziemnych i tąpnięć kopalnianych na podstawie pomiarów widm i energii zarejestrowanych drgań*, „Zeszyty Naukowe UJW. Studia Z Nauk Technicznych” 2015, z. 4, s. 205–216.
- [10] Roliński T., *Pomiary tensometryczne*, WNT, Warszawa 1968.
- [11] Rozporządzenie MSWiA z dnia 14 czerwca 2002 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. nr 94, poz. 84).

- [12] Mutke G., *Zagrożenia sejsmiczne*, [w:] W. Konopko (red.), *Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego*, GIG, Katowice 2013.
- [13] Butra J., *Eksploracja złóż rud miedzi w warunkach zagrożenia tąpniętami i zawałami*, KGHM „Cuprum”, Wrocław 2010.