

Wiesław GRZEBYK*, Lech STOLECKI*

Pomiary inklinometryczne jako narzędzie monitoringu deformacji górotworu w kopalniach podziemnych

Streszczenie: Dotychczasowy zakres stosowanych w górnictwie podziemnym metod pomiarowych na ogół pomija wykorzystanie do tego celu obserwacji inklinometrycznych. Tymczasem na ich podstawie dokonuje się pomiaru zmian kąta nachylenia warstw skalnych i odległości pomiędzy punktami pomiarowymi, co może być wykorzystane do śledzenia procesu deformacji górotworu.

Dla sprawdzenia przydatności metody inklinometrycznej do monitorowania deformacji górotworu naruszonego procesem eksploatacji, na przestrzeni kilku ostatnich lat (od 2011 roku) przeprowadzono wiele pomiarów obiektowych w wybranych polach eksploatacyjnych kopalń LGOM. Obserwacjami objęto wszystkie elementy układu geomechanicznego, jakie na złożu rud miedzi stanowią: strop, filary i spąg. Rejestracje prowadzono za pomocą specjalnie wytworzonej aparatury, składającej się z czujników nachylenia CNS oraz terminali komunikacyjnych TK.

Aktualnie uzyskane wyniki, dzięki dużej czułości i rozdzielczości pomiaru oraz *quasi* ciągłemu charakterowi rejestracji, dostarczyły nowych, bardzo ciekawych informacji odnośnie przebiegu deformacji ośrodka skalnego, niemożliwych do pozyskania obecnie stosowanymi metodami pomiarowymi. Przeprowadzone aktualnie badania wskazują, że inklinometryczna metoda pomiarowa może być użytecznym narzędziem identyfikacji i oceny procesów zachodzących w górotworze w trakcie prowadzonej eksploatacji złoża.

Słowa kluczowe: górnictwo, deformacja górotworu, metoda inklinometryczna

Inclinometric measurements as a tool of monitoring rock mass deformation in underground mines

Abstract: Measurement methods currently used for monitoring rock mass deformation in underground mining omit inclinometer observations that could be used for this purpose. This method makes it possible to measure the angle of inclination of layers of rock and the distance between monitoring points, which may be used to describe the process of rock mass deformation.

* KGHM Cuprum spółka z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

In 2011, tests were carried out in selected operating fields located in LGOM mines, to verify the usefulness of the inclinometer method for monitoring the process of rock mass deformation. The observations encompassed all elements of the geomechanical system, i.e. the roof, pillar and floor.

The measurements were conducted using special instruments consisting of the inclination sensor (CNS) and communication terminal (TK). Due to the high accuracy of measurement and the quasi-continuous nature of the registration the results obtained, the tests have provided new and very interesting information about the process of the rock's deformation. Other contemporary measurement methods used in that kind of research could not have provided such results. The study described in this paper indicates that the inclinometric measuring method can be a useful tool for identification and evaluation of the processes occurring in the rock mass during mining works.

Key words: Mining, rock mass deformation, inclinometric method

Wprowadzenie

W trakcie podziemnej eksploatacji złoża dochodzi do naruszenia pierwotnego stanu naprężenia panującego w ośrodku skalnym i dążenia tego ośrodka do osiągnięcia nowego stanu równowagi. Stan ten zostaje osiągnięty w wyniku procesu odkształcania się ośrodka skalnego, który może przebiegać z różną intensywnością (Chudek 2010; Gergowicz 1987). Na ogół proces ten zachodzi w sposób powolny (statyczny) z czasowym występowaniem zjawisk deformacyjnych o charakterze dynamicznym (wstrząsy sejsmiczne). W odniesieniu do wyrobisk górniczych procesy deformacyjne uzewnętrzniają się w postaci zmian ich wymiaru i kształtu (Majcherczyk i in. 2006, 2008; Pilecki 1999). W skali masywu skalnego proces ten dotyczy całego nadkładu, partii złożowej (całizna i filary technologiczne w komorowo-filarowym systemie eksploatacji) oraz skał spągowych. W praktyce, spośród geodezyjnych metod obserwacji deformacji ośrodka skalnego najczęściej prowadzi się pomiary liniowych zmian odległości. W kopalniach LGOM, w tym zakresie powszechnie wykonuje się pomiary konwergencji wyrobisk górniczych oraz rozwarstwienia stropu. Ze względów technicznych, sporadycznie tylko wykonuje się pomiary niwelacyjne osiadania stropu.

Tymczasem, przez analogię do powierzchniowych zagadnień geotechnicznych, użyteczne w zakresie monitorowania deformacji ośrodka skalnego mogą być także obserwacje inklinometryczne. Pomiar zmian kąta nachylenia warstw dokonany w prostokątnym układzie współrzędnych, w danym punkcie lokalizacji czujnika, bardzo dobrze opisuje zmianę położenia (orientacji) elementarnego fragmentu ośrodka skalnego w przestrzeni. Jednocześnie, znajomość tego parametru w różnych punktach pomiarowych eksploatowanego pola stwarza możliwość odwzorowania ugięcia stropu w dużej skali.

1. Przykłady wykorzystania pomiarów inklinometrycznych

Inklinometr to rodzaj przyrządu służącego do pomiaru nachylenia w płaszczyźnie poziomej lub wychylenia w pionie. Za pomocą czujników inklinometrycznych można realizować obserwacje w jednym lub dwóch kierunkach, przy zakresach kątowych odpowiednio dobranych dla aktualnych potrzeb (maksymalny zakres kątowy to 360°). Dzięki łatwości wykonywanych pomiarów oraz dużej dokładności uzyskiwanych wyników (specjalistyczne rozwiązania pozwalają uzyskać rozdzielczość na poziomie 0,001°) obecnie ma miejsce

bardzo szeroki zakres zastosowań pomiarów inklinometrycznych. Obserwacje te wykorzystuje się między innymi do:

- monitoringu powierzchni terenu zagrożonej ruchami osuwiskowymi, celem określenia wielkości i prędkości deformacji,
- w systemach sterowniczych układów ogniw fotowoltaicznych lub paneli solarnych umożliwiających zmianę ich położenia w zależności od ruchu Słońca; takie rozwiązania pozwalają zwiększyć wydajność pozyskiwania energii słonecznej,
- w maszynach budowlanych (np. koparki wielonaczyniowe) i maszynach rolniczych (np. opryskiwacze, kombajny) do precyzyjnego sterowania elementami roboczymi,
- sterowania specjalistycznych urządzeń medycznych takich jak rezonans magnetyczny czy tomograf komputerowy; do tego celu stosuje się inklinometry charakteryzujące się bardzo dużą dokładnością pomiaru dochodzącą do $0,01^\circ$, umożliwiającą precyzyjne pozycjonowanie tych przyrządów,
- pozycjonowania dźwigów i innych maszyn ładujących,
- kontroli ustawienia turbin elektrowni wiatrowych,
- pomiaru elementów konstrukcyjnych silnie obciążonych siłami poziomymi (np. ścianki szczelinowe), a w przypadku budowli w obiektach zlokalizowanych w rejonie skarp zagrożonych ruchami osuwiskowymi,
- pomiaru stateczności obiektów hydrotechnicznych (np. tamy, wały ziemne), gdzie wielkość przemieszczeń poziomych jest jednym z podstawowych kryteriów oceny stanu technicznego tych budowli.

W świetle powyższych zastosowań metody inklinometrycznej zwraca uwagę stosunkowo wąski zakres wykorzystania tej techniki pomiarowej do monitorowania zagadnień z dziedziny górnictwa podziemnego.

2. Propozycja nowego sposobu pomiaru deformacji górotworu

W odróżnieniu od dotychczasowego sposobu określania deformacji ośrodka skalnego opartego na pomiarze odległości liniowych, w metodzie inklinometrycznej informacja zawarta jest w obserwowanych zmianach kąta. W niniejszym artykule, autorzy przedstawili swoje dotychczasowe doświadczenia ze stosowania tej metody pomiarowej do wyznaczania zmian zachodzących w obrębie wyrobisk podziemnych.

Pomiary nachylenia w danym miejscu można realizować na dwa sposoby. W pierwszym przypadku czujnik nachylenia instaluje się bezpośrednio do powierzchni skały (ociosu, stropu itp.), przy czym należy mieć na względzie stopień związania przypowierzchniowej warstwy skalnej z wgłębną partią ośrodka skalnego. Problem ten jest szczególnie istotny w ocenie stabilności warstw stropowych, które ulegają dezintegracji na różnego rodzaju płaszczyznach osłabień. Drugi sposób sprzęgania czujnika nachylenia z ośrodkiem skalnym polega na jego mocowaniu do reperów pomiarowych, które mogą stanowić różnego rodzaju pręty stalowe (np. kotwy) lub odcinki rur, wprowadzone do otworów wiertniczych na pewną głębokość i związane z ośrodkiem skalnym za pomocą spoiwa (beton, żywica itp.). Wówczas czujnik montuje się na końcówce wystającego z otworu repera. Ten rodzaj montażu czujnika sprawia, że obserwowane zmiany nachylenia są w znacznym stopniu związane z siłami objętościowymi działającymi wewnątrz ośrodka skalnego.

Pomiary zmian nachylenia prowadzi się za pomocą specjalnie w tym celu wytworzonej aparatury, składającej się z czujników nachylenia CNS oraz terminala komunikacyjnego TK (rys. 1). Czujniki CNS realizują pomiar zmian kąta nachylenia w dwóch prostopadłych do siebie osiach z zadaniem krokiem czasowym. Czujnik jest zasilany bateryjnie, natomiast dane pomiarowe przechowywane są w jego pamięci stałej. W obudowie czujnika znajduje się dioda sygnalizacyjna, która określonym kolorem światła informuje o przekroczeniu ustalonych wartości kąta. Komunikacja z czujnikiem odbywa się w sposób bezprzewodowy za pomocą terminala.



Rys. 1. Aparatura pomiarowa

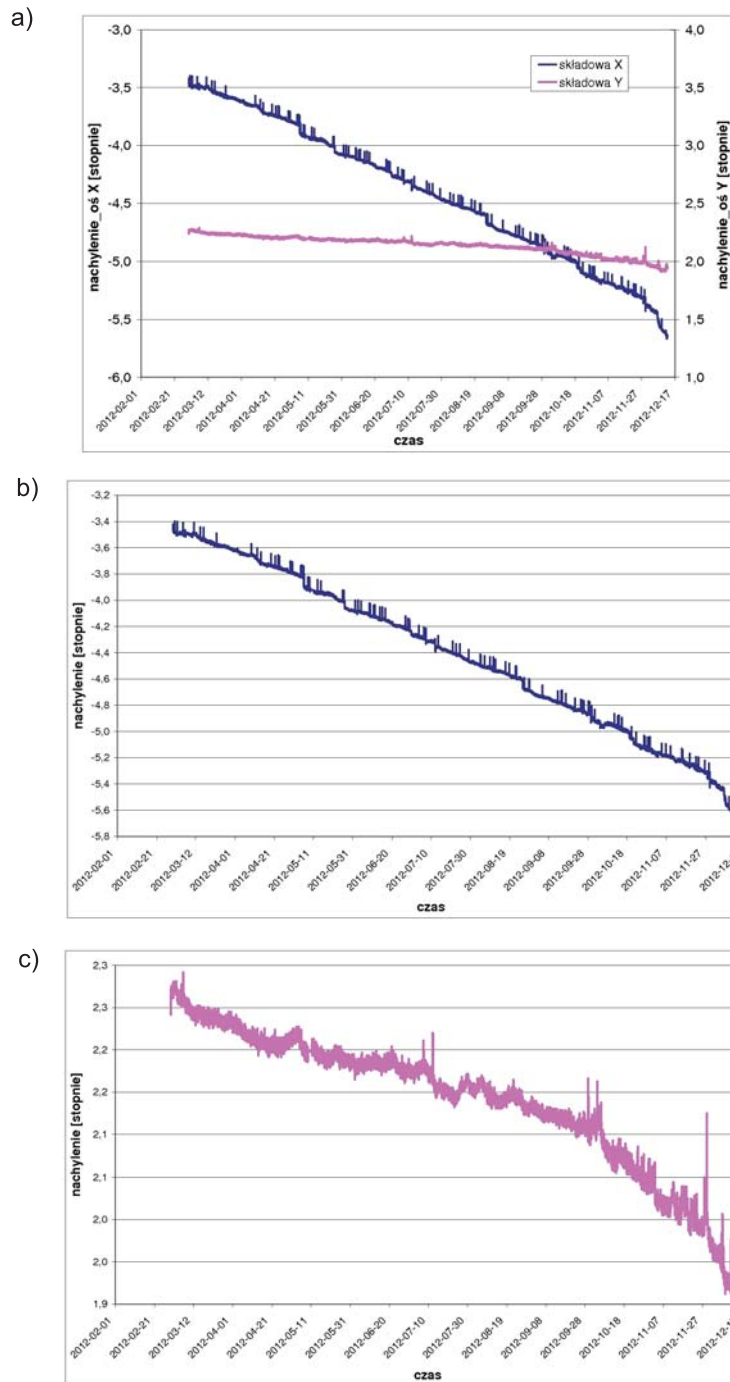
Fig. 1. Measurement instruments

O procesach deformacyjnych zachodzących w ośrodku skalnym świadczy wielkość i tempo zmian mierzonych parametrów. Uzyskane wyniki mogą być przedstawione w formie wykresu zmian mierzonych kątów dla składowej X i Y w płaskim układzie współrzędnych (czas, kąt), ewentualnie po odpowiednim przetworzeniu danych pomiarowych, w przestrzennym układzie współrzędnych obrazujących zmianę położenia płaszczyzny XY dla wybranej chwili czasu.

3. Przykładowe wyniki obserwacji

Wstępne obserwacje metodą inklinometryczną rozpoczęto w 2011 r. i dotyczyły one oceny stabilności warstw stropowych (Grzebyk i Stolecki 2012, 2013). Kolejne zastosowanie tej metody polegało na obserwacji przebiegu deformacji filara technologicznego usytuowanego na wyprzedzeniu frontu eksploatacyjnego. W tym przypadku, ze względu na potencjalne złuszczenie się ociosu filara, czujnik nachylenia mocowano do końcówki stalowej rury o długości 3 m zacementowanej w otworze wykonanym w części piaskowcowej filara. Obserwacje prowadzono do ostatniej fazy istnienia filara, tj. do jego rozcięcia. Uzyskane wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2.

Pomierzone przedziały zmian kąta wynosiły odpowiednio dla osi X – 2,2° i dla osi Y – 0,3°. Zamieszczone wykresy świadczą, że z upływem czasu piaskowcowa część filara

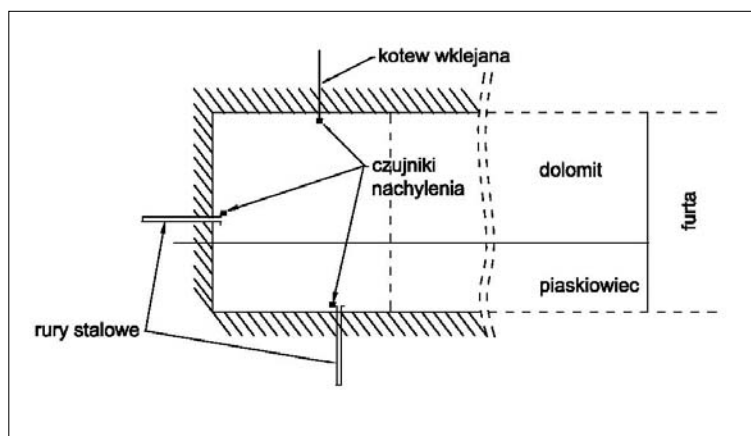


Rys. 2. Wykresy zmian kąta nachylenia: a – składowej X, b – składowej Y oraz c – obu składowych

Fig. 2. Graphs of changes of inclination for: a – component X, b – component Y and c – both components

była sukcesywnie wyciskana ku górze, z przyśpieszeniem tego procesu począwszy od października 2011 w przypadku osi Y i od grudnia 2012 dla osi X. W końcowej fazie rozcinań filara odnotowano także znaczącą zmianę kąta ($0,1^\circ$) w kierunku osi Y. Należy zaznaczyć, że oprócz filarów technologicznych, podobnego typu obserwacje można prowadzić w caliznie.

Dla wykazania użyteczności metody inklinometrycznej do określania deformacji wszystkich elementów układu geomechanicznego, w jednym z wyrobisk górniczych zainstalowano trzy czujniki pomiarowe z przeznaczeniem do rejestracji zmian nachylenia stropu (montaż na kotwi wklejanej), dolomitowej części filara oraz spągu (w dwóch ostatnich przypadkach montaż do stalowych rur) – rysunek 3. Otrzymane przebiegi zmian nachylenia przedstawiono na rysunku 4. Z porównania wykresów dla poszczególnych punktów pomiarowych wynika, że charakter obserwowanych zmian w stropie, ociosie i w spągu jest do siebie zbliżony, z tym że największe zmiany amplitudowe zachodzą w spągu wyrobiska. Wskazanie to ma swoje uzasadnienie wynikające z obniżonych parametrów fizykomechanicznych utworów piaskowcowych zalegających w spągu, w stosunku do warstw stropowych. Nasuwa to wniosek, iż obserwacja zachowania się warstw spągowych, dla takiej budowy litologicznej złoża, może być czułym wskaźnikiem procesów zachodzących w górotworze.

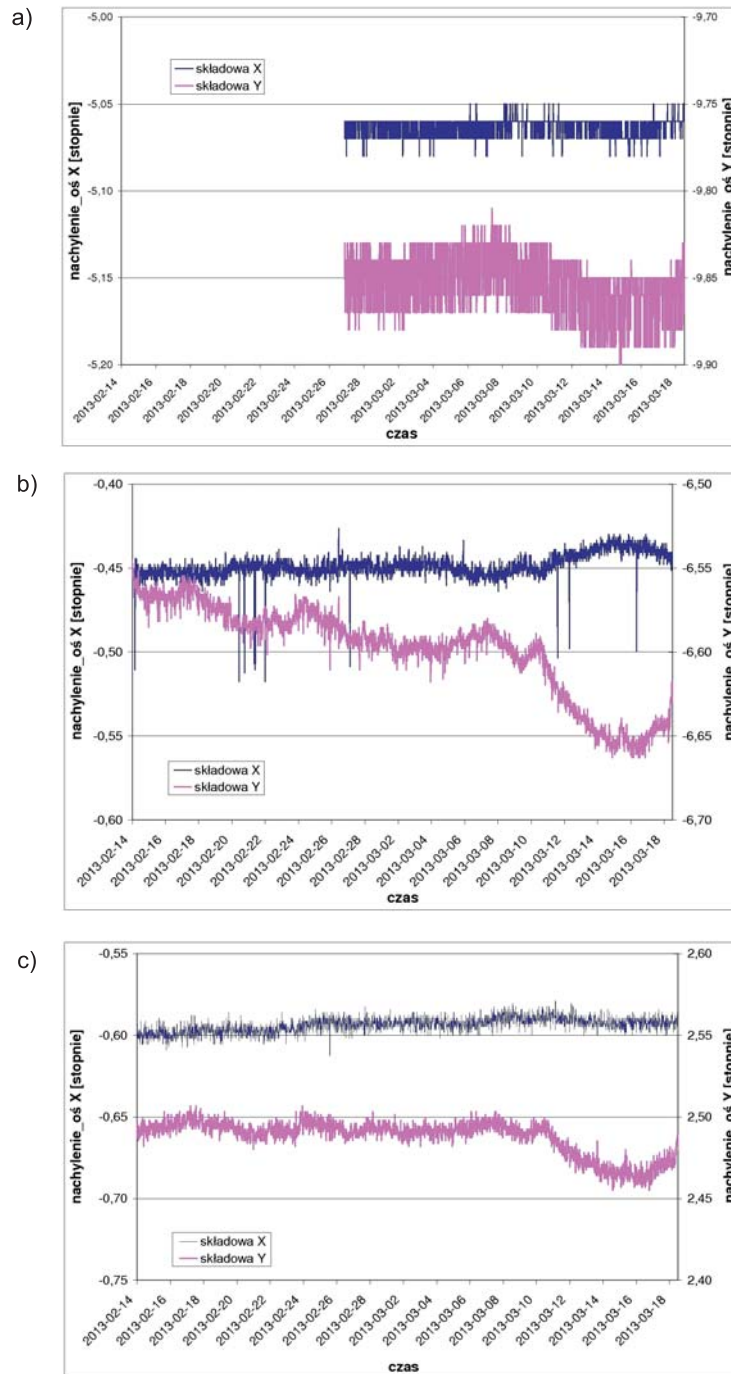


Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do obserwacji deformacji wyrobiska górniczego (strop, ocios i spąg)

Fig. 3. Layout of the measurement system for observation of mining excavation's deformation (roof, side wall and floor)

Podsumowanie

Teoretycznie, każdy projekt eksploatacji danej partii złoża zakłada określony sposób deformacji górotworu i zakres metod pomiarowych przewidzianych do jego monitorowania. W praktyce, działania te mają na celu zapewnić bezpieczeństwo procesu eksploatacyjnego poprzez sygnalizowanie zagrożenia ze strony ciśnienia górotworu i po-



Rys. 4. Wykres zmian nachylenia zarejestrowanych na: a – stropie, b – ociosie i c – spągu wyrobiska górniczego
 Fig. 4. Graphs of measured changes of inclination: a – on the roof, b – side wall and c – floor mining excavation

dejmowanie adekwatnych do tego zagrożenia czynnych i biernych działań profilaktycznych.

Zaprezentowane w niniejszym artykule wstępne wyniki obserwacji inklinometrycznych świadczą, że pomiary takie mogą być przydatnym narzędziem śledzenia, a po opracowaniu odpowiedniej metodyki, także oceny procesu deformacji górotworu, w którym prowadzona jest eksploatacja złoża. Pomiary inklinometryczne mogą być stosowane do monitorowania zagadnień o charakterze lokalnym (informacja z pojedynczego stanowiska pomiarowego) lub też do śledzenia przebiegu deformacji warstw stropowych o dużym zasięgu, na podstawie analizy danych pomiarowych uzyskanych z sieci czujników rozlokowanych np. w całym polu eksploatacyjnym.

Niemniej ważną zaletą przedstawionej metody pomiarowej jest jej prosty i wygodny, w warunkach kopalnianych, sposób realizacji z wykorzystaniem zastosowanej aparatury pomiarowej.

Literatura

- [1] Chudek, M. 2010. *Mechanika Górotworu*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- [2] Gergowicz, Z. 1987. Ciśnienie górotworu na obudowę wyrobisk zlokalizowanych na dużych głębokościach. *Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej, seria Górnictwo* z. 145, Gliwice.
- [3] Grzebyk, W. i Stolecki L. 2012. Sposób kontroli stateczności warstw stropowych w kopalniach podziemnych, *Materiały Konferencyjne XXXV ZSMGiG, Wisła-Jawornik*, s. 109–117.
- [4] Grzebyk, W. i Stolecki, L. Pomiar nachylenia jako wskaźnik stabilności warstw stropowych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr 8(228), s. 17–22, Katowice.
- [5] Majcherczyk i in. 2006 – Majcherczyk, T., Małkowski, P. i Niedbalski, Z. 2006. Ocena przemieszczeń górotworu wokół wyrobiska korytarzowego z wykorzystaniem parametrów empirycznych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie* nr 6, s. 23–25, Katowice.
- [6] Majcherczyk i in. 2008 – Majcherczyk, T., Małkowski, P. i Niedbalski, Z. 2008. Konwergencja wyrobisk chodnikowych na podstawie wyników obliczeń numerycznych i ich weryfikacja pomiarami. *Górnictwo i Geoinżynieria* z. 1, s. 199–215, Kraków.
- [7] Pilecki, Z. 1999. Metoda oceny zachowania się masywu skalnego wokół wyrobiska podziemnego. *Studia Rozprawy Monografie* nr 59, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- [8] Źródło internetowe: <http://gik.wilsig.tu.koszalin.pl/>