

Monitoring wyrobisk korytarzowych jako podstawa weryfikacji metod projektowych i przyjętego schematu obudowy

Roadways monitoring as a basis of support design and construction verification



*Dr hab. inż. Piotr Malkowski, prof. AGH**



*Dr hab. inż. Zbigniew Niedbalski, prof. AGH**

Treść: Realizacja każdego górniczego procesu technologicznego, szczególnie w tak złożonych warunkach jakie występują w kopalniach podziemnych, powinna być monitorowana. Dotyczy to również zjawisk zachodzących wokół drążonych i utrzymywanych wyrobisk. W polskich kopalniach węgla kamiennego prowadzona ocena bieżącego stanu wyrobisk korytarzowych obejmuje najczęściej ocenę wizualną. Przy takim sposobie kontroli pracy obudowy, gdy nie ma możliwości ilościowej oceny stanu górotworu i obudowy, nie można skutecznie udoskonalać metod projektowych, oraz właściwie ocenić pracę zaprojektowanej konstrukcji. W artykule zawarto charakterystykę metod pomiarowych aktualnie stosowanych podczas monitorowania pracy obudowy oraz wybrane przykłady badań kopalnianych prowadzonych przez pracowników Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii AGH. Przedstawiono różne aspekty stosowania monitoringu, który może służyć weryfikacji schematów obudowy, ocenie skuteczności rozrzedzania odrzwi obudowy podporowej oraz kontroli pracy nowych elementów konstrukcyjnych.

Abstract: Executing of any mining technological process, especially in such complex conditions as in underground mines, should be monitored. It concerns the phenomena occur in the rock mass around the driving and maintaining development workings as well. In Polish coal mines the assessment of running roadways' stability is carried out in the visual way only. In this way, without the quantitative evaluation of rock mass and support state, there is no possibility to improve designing methods, support constructions and its specific elements. The paper contains the review of up-to-date monitoring methods and some selected examples of roadways' monitoring carried out by the workers of Faculty of Mining and Geoengineering AGH UST. The diversity of roadways monitoring application was performed. The ground control can verify designed support schemes, support spacing and behaviour of new construction elements.

Słowa kluczowe:

inżynieria górnicza, obudowa wyrobisk korytarzowych, monitoring górotworu, stateczność wyrobisk

Keywords:

mining engineering, support of roadways, ground control, roadways' stability

1. Wprowadzenie

W każdej kopalni węgla kamiennego w Polsce drążonych jest rocznie od kilku do nawet kilkudziesięciu kilometrów wyrobisk korytarzowych. Podstawowym sposobem ich zabezpieczenia jest obudowa kotwowa i podporowa, a także opinka z siatki. Zmieniające się warunki geologiczno-górnice, w tym tektonika i wzrastająca głębokość eksploatacji powodująca wyższe naprężenia pierwotne, powodują, że konstrukcje obudowy są ciągle modyfikowane tak, aby zapewnić bezpieczeństwo załóg oraz funkcjonalność wyrobiska. Jednym z zasadniczych problemów inżynierskich jest ocena skuteczności pracy tych konstrukcji, a więc weryfikacja metod projektowych i przyjętych schematów obudowy. Weryfikację

taką można przeprowadzić tylko w oparciu o zaplanowany system monitoringu, który powinien być dostosowany do:

- rodzaju obudowy – np. kotwowa, podporowa, powłokowa;
- typu górotworu – własności mechaniczne, uwarstwienie, podzielność itp.,
- możliwości technicznych kopalni – dostęp do sieci telemetrycznej, posiadane urządzenia pomiarowe, rodzaj występujących zagrożeń ograniczających możliwość zastosowania wybranych typów urządzeń pomiarowych.

Jak pokazują doświadczenia światowe prezentowane na przełomie XX i XXI w. (Wang i in. 2000, Singer, Raines 2001, Johnson i in. 1999, 2003, Shen i in. 2003) oraz polskie (Szmyczek i in. 2001, Korus i in. 2003, Nierobisz 1999), kontrola górotworu w przypadku kopalń podziemnych od prawie 30 lat dotyczy przede wszystkim samodzielnej obudowy kotwowej. Duży udział w tych pracach mają także pracow-

*) AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

nicy AGH, którzy w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych XX w. wykonali wiele projektów i badań w tym zakresie (Tajduś, Cała 1996, Stopyra i in. 1999, Majcherczyk i in. 1999, Korzeniowski, Piechota 2000, Majcherczyk i in. 2005). W przeciwieństwie jednak do RPA, Australii, USA czy Wielkiej Brytanii, gdzie w wyrobiskach korytarzowych stosowano prawie wyłącznie samodzielną obudowę kotwową, w Polsce zasadniczą obudową, podobnie jak obecnie, była obudowa podporowa. Zasady pracy obudowy podporowej były jednak obserwowane sporadycznie (Stachowicz i in. 1995). W drugiej połowie lat 90. rozpoczęto prace nad łączeniem odrzwi obudowy ŁP z kotwami. Pierwszym sposobem było przykotwianie łuków stropnicowych za pomocą pary lub dwóch par krótkich kotew stalowych, albo też za pomocą jednej kotwy. Nowe rozwiązania technologiczne wymagały wówczas nie tylko opinii rzeczoznawcy WUG, ale także kontroli zachowania się takiej konstrukcji obudowy (Majcherczyk, Niedbalski 2002). Atutem takiego rozwiązania była możliwość utrzymania rozstawu odrzwi obudowy podporowej przy pogorszonych warunkach geologicznych oraz poprawa stateczności wyrobisk przyścianowych w rejonie skrzyżowania z wyrobiskiem ścianowym (Majcherczyk, Niedbalski 2003, Stasica i in. 2006). Prowadzono wówczas także próby z zastosowaniem kotew linowych (Stasica i in. 2006).

Kolejnym etapem rozwoju obudowy kotwowej było wdrażanie tzw. kotwi strunowych, tzn. długich kotwi o prostym, nieskręconym linisku. Stosowanie różnych schematów łączenia kotew i odrzwi ŁP wymusiło konieczność udoskonalania metod monitoringu w celu wskazania najbardziej efektywnych schematów obudowy. Uzyskane przez Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH projekty badawcze pozwoliły na wykonanie wielu odcinków testowych w kopalniach węgla kamiennego, gdzie prowadzono szeroki monitoring górotworu i obudowy sprawdzając różne schematy obudowy (Majcherczyk i in. 2006a, 2006b, 2008, 2010, 2014, Małkowski 2010, Niedbalski i in. 2013).

Należy dodać, że monitoring wskazany jest również nie tylko w trakcie wdrażania nowych typów zabezpieczenia wyrobisk, ale także w wyrobiskach, gdzie spodziewane są duże wartości obciążeń obudowy, np.: w wyrobiskach międzyścianowych zlokalizowanych pod zrobami zawałowymi (Prusek 2005), w wyrobiskach poddanych wpływom eksploatacji zawałowej (Prusek, Majcher 2003, Majcherczyk, Małkowski 2003, Majcherczyk i in. 2011, Rajwa i inni 2016), w wyrobiskach utrzymywanych za frontem ściany (Niełacny i in. 2008, Bobek i inni 2014) lub też w samych wyrobiskach ścianowych (Szurgacz i Brodny 2019).

Najnowsze badania dotyczące stateczności wyrobisk korytarzowych w polskich kopalniach węgla kamiennego, skupiają się przede wszystkim na rozrzedzaniu odrzwi obudowy podporowej (Małkowski i in. 2017) oraz na zwiększeniu żywotności wyrobisk długotrwałych (Majcherczyk i in. 2015). W artykule zawarto charakterystykę aktualnie stosowanych metod pomiarowych podczas monitorowania pracy obudowy wraz z wybranymi przykładami. Wskazano przy tym na przydatność danych technik pomiaru w zależności od stosowanej obudowy oraz warunków geologiczno-górnicznych.

Należy zauważyć, że zakres pomiarów w górnictwie polskim oraz stosowane techniki nie odbiegają od metod stosowanych na świecie (Shen 2014, Lu i in. 2018, Xie i in. 2018). W niektórych krajach (np. Chiny) trwają już jednak prace nad wdrażaniem zaawansowanych systemów monitoringu, które objęłyby stany krytyczne kotew, w tym nie tylko stałą kontrolę sił osiowych, ale także ich korozji, jakości i stanu spoiwa, długości wklejenia oraz rozwarstwiania się i separacji kleju (Song i in. 2017) lub też poprzez tzw. *smart washers* kontrolowałyby naciąg wstępny i obciążenie kotwi (Yin i inni 2016).

2. Kontrola stateczności wyrobisk podziemnych

W celu prawidłowego i efektywnego utrzymania funkcjonalności wyrobisk oraz optymalizacji na bieżąco stosowanych schematów obudowy niezbędne jest prowadzenie kontroli w dwóch obszarach, tj.: w zakresie zachowania się górotworu wokół wyrobiska oraz w zakresie pracy poszczególnych elementów obudowy. Takie podejście do monitorowania jest niezwykle ważne, bowiem zjawiska zachodzące w górotworze są symptomami zachowań jakich można się spodziewać na konturze wyrobiska oraz w elementach obudowy.

W zależności od obszaru, który jest monitorowany, wykorzystywane są odmienne urządzenia, które zasadniczo rejestrują następujące wielkości:

- rozwarstwienia górotworu,
- zasięg strefy spekań,
- zmiany naprężeń w górotworze,
- konwergencję przekroju poprzecznego wyrobiska,
- przemieszczenia poszczególnych elementów obudowy,
- obciążenie kotew,
- obciążenie odrzwi obudowy lub elementów wzmacniających, takich jak np. stojaki.

Badania stateczności wyrobisk, które kopalnie wykonują z własnej inicjatywy, odbywają się sporadycznie. Jeżeli są już wykonywane, to najczęściej obejmują pomiar rozwarstwień skał stropowych oraz pomiar konwergencji wyrobisk.

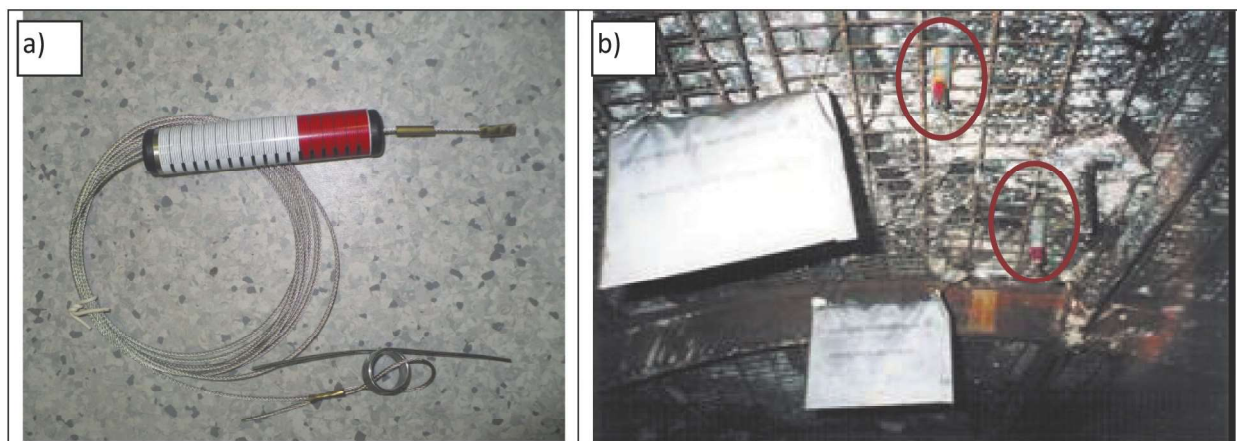
2.1. Kontrola zmian w górotworze

Jedną z najprostszych i najdłużej stosowanych metod obserwacji zmian w stropie wyrobisk jest pomiar rozwarstwień. Rozwarstwieniomierze mogą być typu wskaźnikowego lub ilościowego. Powinny być zabudowywane w przodku drążonego wyrobiska, bowiem rozwarstwienia stropu zachodzą natychmiast po odsłonięciu skał. Zaletą rozwarstwieniomierzy wskaźnikowych, np. linkowych (*tell-tales* – rys. 1) czy sygnalizatorów rozwarstwień skał (SRS) jest prosta budowa, sposób montażu oraz odczyt wizualny, niewymagający specjalistycznych urządzeń. Uzyskiwane informacje są ogólne, ale często wystarczające do podjęcia decyzji o ewentualnym wzmocnieniu obudowy wyrobiska. Prawidłowa ocena stanu i jakości stropu powinna bazować na pomiarze ilościowym. Do takich urządzeń zaliczyć można sondę ekstensometryczną składającą się z 20 kotwiczek magnetycznych zabudowanych na różnych poziomach na długości około 7,5 m (rys. 2). To rozwiązanie jest obecnie na świecie najbardziej popularne.

Na świecie stosowane są również systemy automatycznego pomiaru rozwarstwień oferowane przez wiele firm, np. Geokon, ACE, Sissgeo (np. ekstensometry typu MPBX *multi-point borehole extensometer*). Największym problemem przy ich zastosowaniu jest obecnie brak dopuszczeń do stosowania w kopalniach podziemnych w Polsce (brak polskich atestów) i ograniczony, często do 15-20 cm zakres pracy. Może to stanowić problem w przypadku dużej deformacji stropu w wyrobiskach przyścianowych oraz innych poddanych wpływom eksploatacji i utrzymywanych w długim okresie czasu.

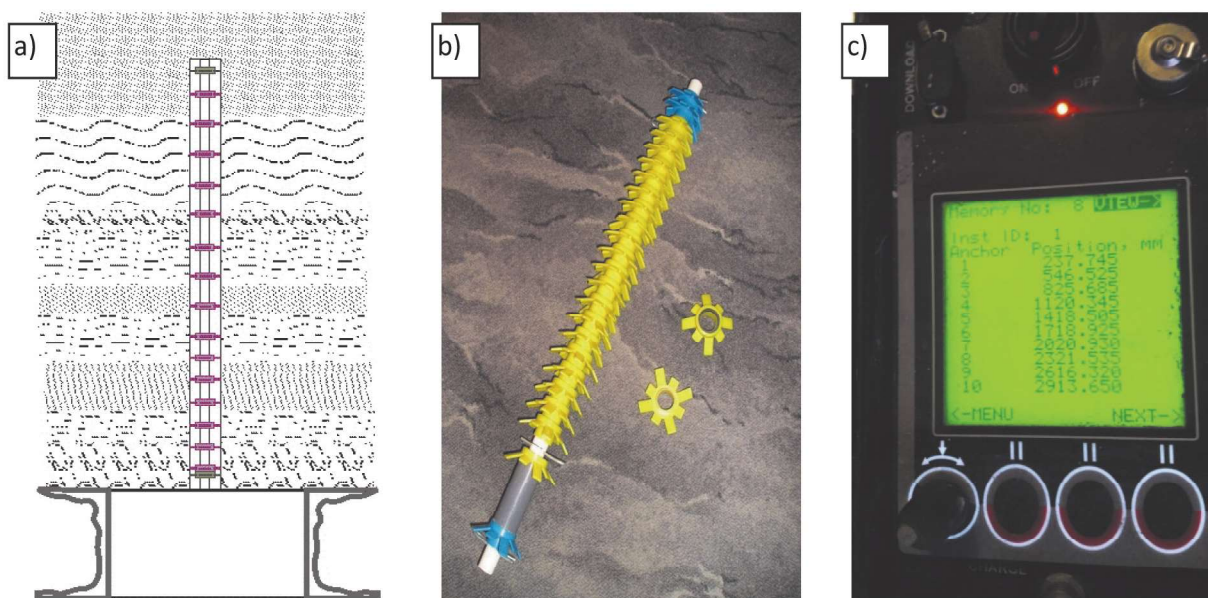
Od wielu lat do oceny jakości skał otaczających stosuje się systemy wizyjne w postaci endoskopów. Choć to metoda czasochłonna, to daje najlepsze efekty. W tym przypadku istnieje możliwość najdokładniejszej oceny charakteru spekań ich rozwarcia i dokładnego zasięgu spekań, w tym, stwierdzenia spekań pionowych czy nachylonych. Aktualnie jakość urządzeń oraz ich uniwersalność pozwala na bardzo szczegółowe analizy (Majcherczyk i inni 2005, Stasica i inni 2006, Małkowski i in. 2017).

Zmianę zjawisk zachodzących w górotworze można także rejestrować poprzez zmiany naprężeń wokół wyrobiska. W tym



Rys. 1. Rozwarstwiomierz linkowy: a) widok ogólny, b) zabudowany na dwóch różnych poziomach w stropie wyrobiska w obudowie podporowo-kotwowej

Fig. 1. Tell-tale: a) general view, b) installed on two different levels in the roof – stand-and-roofbolting support



Rys. 2. Sonda ekstensometryczna: a) w stropie wyrobiska, b) kotwiczki magnetyczne, c) czytnik sondy

Fig. 2. Extensometer probe: a) in the roof, b) magnetic anchors, c) the datalogger

celu stosowane są przez Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH sondy pomiarowe firmy Geokon 4350-1 (rys. 3). Urządzenie służy do monitorowania naprężeń ściskających w materiałach takich jak skała, sól lub beton. Sonda składa się z trzech czujników strunowych rozmieszczonych po obwodzie w odstępach 60 stopni, co umożliwia pomiar naprężeń głównych w płaszczyźnie prostopadłej do osi czujnika (rys. 4). Model został zbudowany z cylindra wykonanego ze stali wysokiej wytrzymałości. Zmiana naprężeń powoduje deformację cylindra, a co za tym idzie, zmianę częstości rezonansowej drgających strun. Zakres pomiarowy sondy wynosi $0 \div 70$ MPa, przy dokładności 0,014 MPa. Zakres temperatury pracy urządzenia to -20°C do $+80^{\circ}\text{C}$.

Najprostszą metodą do oceny zjawisk zachodzących w górotworze na konturze wyrobisk podziemnych jest pomiar konwergencji (rys. 5). W tym celu budowane są w stropie, spągu i w ociosach krótkie, ok. metrowe kotwy prętowe tzw. repery. W określonych odstępach czasu określa się odległości pomiędzy reperami w poziomie DS i w pionie ΔH . Jeżeli jest to technicznie możliwe, wykonuje się także pomiar zmian

obwodu wyrobiska ΔL (rys. 5). Obecnie jednostki naukowo-badawcze, ale również wiele zakładów górniczych, dysponuje skanerami laserowymi (rys. 6), co daje możliwość dokładnego odwzorowania konturu wyrobiska.

Do ciągłej oceny zmian wymiarów poprzecznych możliwe jest zastosowanie mierników teleskopowych czy automatycznych metrów. To rozwiązanie może się sprawdzać jedynie w przypadku wyrobisk o niewielkim wyposażeniu w urządzenia, w których nie prowadzi się intensywnych prac.

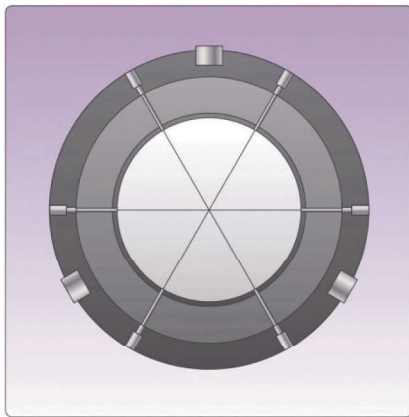
Należy podkreślić, że najlepsze efekty daje zastosowanie w jednym miejscu różnych technik pomiarowych, bowiem jest możliwość wzajemnej weryfikacji uzyskanych danych oraz oceny przydatności określonych metod pomiaru w konkretnych warunkach.

2.2. Kontrola obudowy

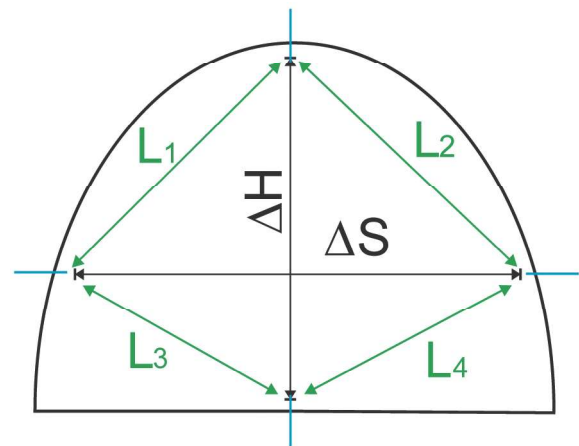
W przypadku kontroli obciążenia obudowy podporowo-kotwowej należy kontrolować obciążenie odrzwi obudowy oraz obciążenie kotew.



Rys. 3. Sonda dwuosiowa do pomiaru naprężeń
Fig. 3. Biaxial VW stressmeter



Rys. 4. Rozmieszczenie strun pomiarowych w przekroju poprzecznym sondy do pomiaru naprężeń (Geokon.com)
Fig. 4. The vibrating wire layout inside the head of the stress meter (Geokon.com)



Rys. 5. Typowy schemat pomiaru konwergencji
Fig. 5. Typical convergence scheme layout



Rys. 6. Skaner 3D firmy FARO w wyrobisku górniczym
Fig. 6. 3D scanner by FARO in the mining working

Obciążenie działające na obudowę podporową monitoruje się w oparciu o różnego rodzaju urządzenia wskazujące pośrednio lub bezpośrednio wielkość obciążenia. Do najczęściej stosowanych urządzeń należą dynamometry hydrauliczne lub dynamometry elektroniczne tzw. *load cells*. Pojedynczy dynamometr hydrauliczny pokazano na rys. 7, natomiast tzw. dynamometr szeregowy opracowany na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii AGH na rys. 8 (Małkowski i in. 2009). Dynamometr pojedynczy umieszcza się na spągu pod łukiem ociosowym zamiast stopy podporowej, ewentualnie na łuku stropnicowym (rys. 9). W przypadku dynamometru szeregowego specjalnie opracowany profil pozwala na umieszczenie dynamometru wewnątrz łuku o profilu V w dowolnym miejscu (również na odcinkach nachylonych), a połączenie 3-4 dynamometrów w szereg daje pewność kontaktu dynamometru z górtworem na dłuższym odcinku obudowy. Odczyt dokonuje się manualnie na manometrze glicerynowym (rys. 10) lub też automatycznie, stosując manometr elektroniczny z pamięcią o dowolnie ustawionym interwale czasowym rejestracji (rys. 11).

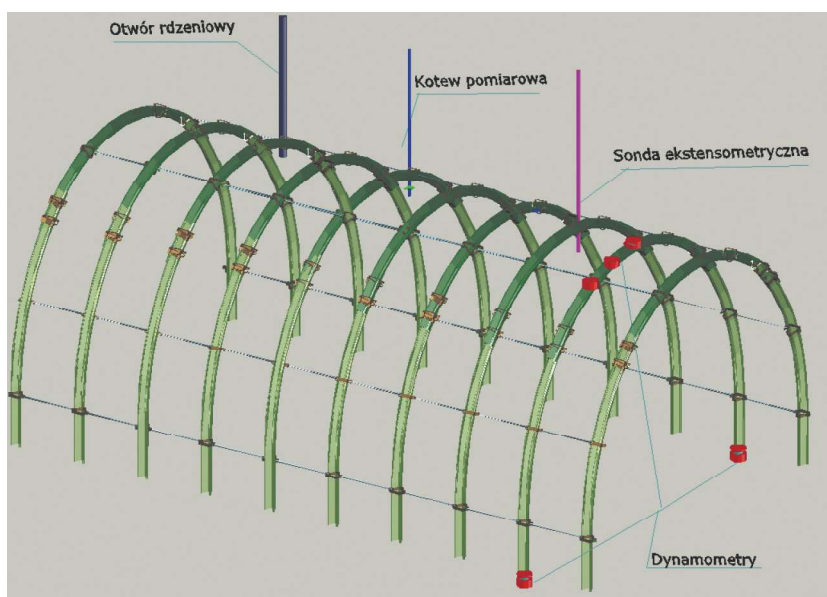
W przypadku kontroli obciążenia stropu można stosować także poduszki hydrauliczne z manometrem (rys. 12) lub też krążki obciążenia – *load cells* (rys. 13). Poduszkę pomiarową umieszcza się pomiędzy łukiem stropnicowym a górtwo-



Rys. 7. Dynamometr hydrauliczny stopowy
Fig. 7. Hydraulic foot dynamometer



Rys. 8. Dynamometr hydrauliczny szeregowy
Fig. 8. Hydraulic series dynamometer



Rys. 9. Schemat stacji pomiarowej wraz z pomiarem obciążeń obudowy podporowej
Fig. 9. The scheme of monitoring station with frame load control



Rys. 10. Manometr glicerynowy
Fig. 10. Glyceric manometer



Rys. 11. Manometr elektroniczny z pamięcią
Fig. 11. Electronic manometer with memory

rem, a manometr znajdujący się na końcu pozwala odczytać ciśnienie i stąd daje możliwość określenia działającej siły (rys. 12). Krążek obciążeń umieszcza się tak samo jak poduszkę. Wewnątrz krążka znajdują się tensometry lub czujniki z drgającą struną (rys. 13). Pod wpływem nacisku następuje

zmiana oporu na tensometrach lub zmiana częstotliwości drgań, które przeliczane są na wielkość obciążenia. Krążki dynamometryczne wymagają posiadania specjalnych urządzeń odczytowych.



Rys. 12. Poduszka hydrauliczna z manometrem (Geokon.com)

Fig. 12. Borehole pressure cell (Geokon.com)



Rys. 13. Krążek obciążenia - Load cell (soil.co.uk)

Fig. 13. Load cell (soil.co.uk)

W przypadku kontroli zabudowy kotwi podstawowym pomiarem kontrolnym jest obciążenie za pomocą wrywarki (rys. 14). Siłownik cylindryczny zakładany na kotew wysuwany hydraulicznie kontroluje rzeczywistą siłę, przy której kotew jest wyciągana z otworu lub też zrywana. Badanie takie powinno być wykonywane na dodatkowych kotwach przeznaczonych specjalnie do badań. Kotwy takie instalowane są według tej samej technologii co pozostałe kotwy podczas wykonywania wyrobiska. W przypadkach pogarszania się stanu wyrobiska, dopuszcza się kontrolę nośnych elementów obudowy, czyli kotew stanowiących część obudowy.



Rys. 14. Pomiar wrywania kotwi w wyrobisku

Fig. 14. The pull-out test in the roadway

W celu jakościowej oceny pracy kotew można wykonywać pomiary za pomocą indykatorów (rys. 15) lub cylindrów dynamometrycznych (rys. 16). Indykator i cylinder dynamometryczny umieszczane są na końcowym odcinku kotwy pomiędzy podkładką a nakrętką. Poprzez wielkość

swojego odkształcenia pokazują wartość działającej na nie siły osiowej. Ilościowy pomiar obciążenia może być realizowany za pomocą hydraulicznego krążka dynamometrycznego (rys. 17), dynamometru automatycznego (rys. 18), albo za pomocą kotwi oprzyrządowanej (rys. 19). Przewagą hydraulicznego krążka dynamometrycznego jest to, że nie wymaga on miernika, bowiem odczyt obciążenia odbywa się bezpośrednio na manometrze przy urządzeniu (rys. 17). Krążki obciążenia są dokładnie takimi samymi urządzeniami, jak na rys. 13, z tym że w tym przypadku ich wysokość jest nieco większa i wynosi ok. 70-90 mm (rys. 18), a widoczne na rysunku przewody pozwalają podłączyć urządzenie również do sieci telemetrycznej kopalni (po wpięciu przetwornika).



Rys. 15. Indykator

Fig. 15. Indicator



Rys. 16. Cylinder dynamometryczny

Fig. 16. Dynamometric cylinder



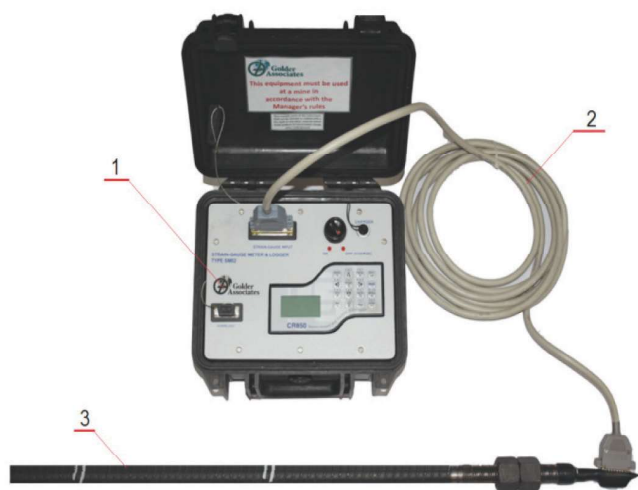
Rys. 17. Hydrauliczny krążek dynamometryczny

Fig. 17. Hydraulic dynamometric cell



Rys. 18. Dynamometr automatyczny - load cell (aceco.co.kr)
Fig. 18. Load cell (aceco.co.kr)

Kotew pomiarowa (rys. 19) to kotew stalowa, na której w wykonanych rowkach wzdłuż osi kotwi wklejono pary tensometrów i podłączono do nich przewody. Maksymalnie par takich jest 9. Rowek następnie zalewany jest żywicą, a kotew wklejana do górotworu na ładunkach klejowych, tak jak zwykła kotew stalowa. Każde rozwarstwienie się skał obciąża kotew, a tensometry pokazują wielkość tego obciążenia. Podpięcie kotwi przewodem (2) do miernika (3) pozwala na bardzo precyzyjne określenie wartości sił lub momentów gnących działających na kotew.



Rys. 19. Kotew pomiarowa wraz z miernikiem (www.golder.com)
Fig. 19. Instrumented bolt with datalogger (www.golder.com)

Przedstawione metody kontroli górotworu oraz obudowy muszą być prowadzone w ściśle określonych odstępach czasu. Częstotliwość pomiarów powinna być dostosowana do:

- schematu obudowy,
- przeznaczenia wyrobiska,
- czasu utrzymania wyrobiska,
- dodatkowych oddziaływań, np. frontu ściany lub wstrząsów górotworu.

3. Przykłady zastosowania monitoringu obudowy wyrobisk i znaczenie praktyczne

Ze względu na obszerność zagadnienia oraz dużą liczbę wyników, w artykule skupiono się na prezentacji wybranych

badan kopalnianych realizowanych przez Autorów. Badania realizowano w różnych wyrobiskach korytarzowych kopalni węgla kamiennego i wykonanych zwykle w obudowie podporowo-kotwowej. Wyniki opatrzone pewnymi obserwacjami praktycznymi oraz wnioskami o przydatności danych metod w zależności od warunków stosowania i informacji oczekiwanych od monitoringu. Z tego też względu nie podawano szczegółowych danych geologiczno-górnictwowych rejonu prowadzenia badań oraz stosowanych dokładnych schematów obudowy.

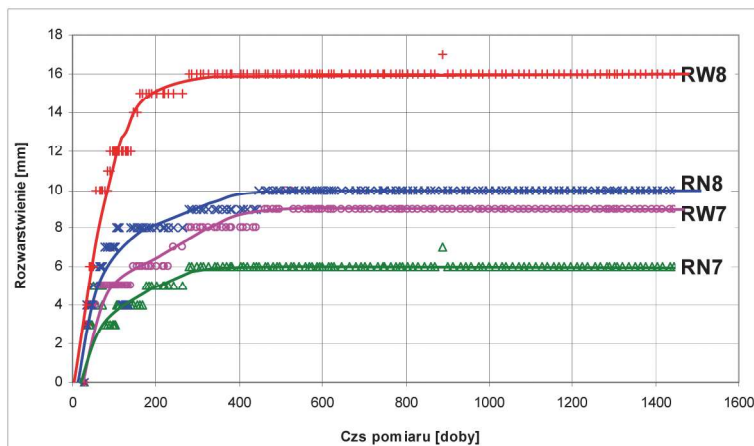
3.1. Monitoring zjawisk w górotworze

Bardzo istotną wielkością o dużym znaczeniu praktycznym jest zasięg strefy spękań wokół wyrobisk górniczych. Jak już wskazano, jest najczęściej oceniany na podstawie wyników różnej konstrukcji rozwarstwiomierzy i ekstensometrów, na podstawie jakości rdzeni wiertniczych, lub też badań endoskopowych.

Jednym z podstawowych urządzeń stosowanych od wielu lat w górnictwie podziemnym są rozwarstwiomierze linkowe, które najczęściej rejestrują wielkość rozwarstwień w określonym pakiecie skał stropowych np. 0–3 m, 0–6 m itp. Pomiar rozwarstwień jest jednym z nielicznych przykładów monitorowania obudowy, który jest obligatoryjny, choć tylko dla samodzielnej obudowy kotwowej. Pomiar umożliwia rejestrację nawet w długim okresie czasu, czego przykładem są wyniki rozwarstwień niskich RN (pakiet 0–2,5 m) i wysokich RW (pakiet 0–5,5 m) w chodniku wykonanym w samodzielnej obudowie kotwowej na głębokości większej niż 1000 m (rys. 20). Wyniki wskazują że ruchy górotworu w stropie wyrobiska stabilizowały się na bardzo niskim poziomie tj. kilku, kilkunastu milimetrów. Jednocześnie można stwierdzić, że możliwe jest bezpieczne stosowanie samodzielnej obudowy kotwowej na dużych głębokościach.

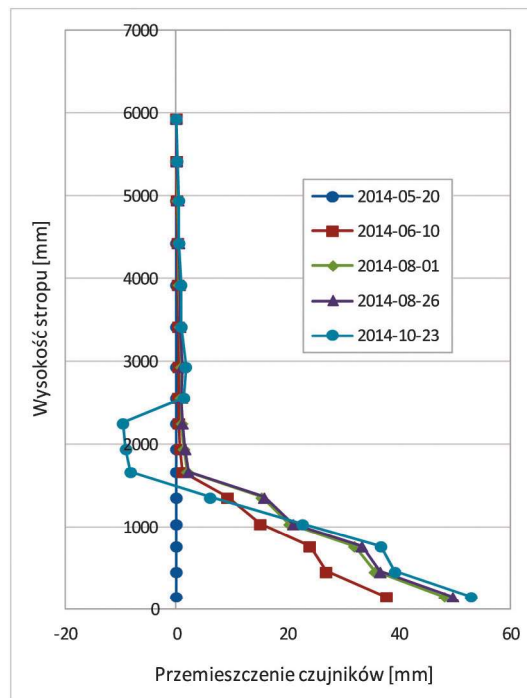
Dokładniejszym pomiarem rejestracji spękań w górotworze jest pomiar z wykorzystaniem automatycznych lub manualnych ekstensometrów wielopoziomowych. W tym przypadku możliwa jest ocena przemieszczeń warstw stropowych na wielu poziomach, gdzie rejestruje się nie tylko rozwarstwienia warstw, ale również ich kompakcję, jak pokazano to na rys. 21. Wykres wskazuje, że największe wartości rozwarstwień mają miejsce w warstwie przystropowej wyrobiska, jednak w ostatnim pomiarze na głębokości około 2,0 m stwierdzono ściskanie warstw. Może to wskazywać na występowanie w tym miejscu warstw o odmiennych właściwościach mechanicznych.

Inną metodą stosowaną do oceny rozwarstwień skał są badania na podstawie jakości rdzenia wiertniczego RQD, jednak znacznie dokładniej spękania można ocenić w oparciu o badania endoskopowe. W celu wykazania różnicy pomiędzy wynikami tych badań na rys. 22 przedstawiono przykładowe wyniki obserwacji endoskopowych w otworze wiertniczym, a w tabeli 1 przedstawiono wyniki oceny wskaźnika RQD dla rdzenia pochodzącego z tego samego otworu. Litologia w tym otworze była mało skomplikowana, bowiem do ok. 8,5 m występował mułowiec, a powyżej węgiel. Wyniki wskazują, że liczba kawałków rdzenia nie koresponduje z liczbą spękań określoną w badaniach endoskopowych. Świadczy to o konieczności weryfikowania jakości stropu metodą bezpośrednią, jaką jest obserwacja wizualna. Stopień zniszczenia rdzenia wiertniczego jest często wynikiem techniki oraz sposobu wiercenia i odległości transportu.



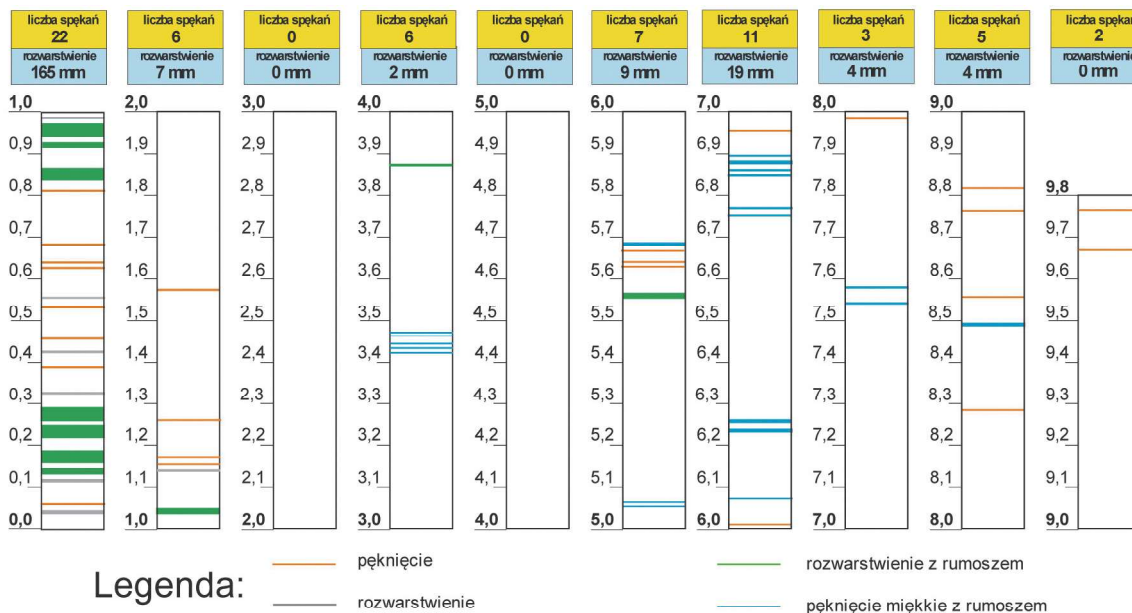
Rys. 20. Zmiana rozwarstwień w czasie w chodniku pośrednim E1 wykonanym w samodzielnej obudowie kotwowej (Majcherczyk i in. 2005)

Fig. 20. Roof separation in time – research gate E1 in roofbolting (Majcherczyk i in. 2005)



Rys. 21. Wyniki badań rozwarstwienia w stropie przekopu wentylacyjnego W-1 poz. 1000 uzyskane na podstawie ekstensometrycznej sondy

Fig. 21. Roof separation in ventilation drift W-1, level 1000 – sonic probe investigations



Rys. 22. Spękania w otworze stropowym określone na podstawie obserwacji endoskopowych

Fig. 22. Discontinuities in the borehole observed with the camera

Do oceny zmiany naprężeń w górotworze można zastosować między innymi czujnik naprężeń firmy GEOKON wyposażony w trzy struny mierzące częstotliwość ich drgań (geokon.com). Na rysunku 23 przedstawiono wyniki rejestracji z okresu około 20 miesięcy. Odczyty wykonywane były automatycznie co godzinę i zapisywane w pamięci miernika. Czujnik został zainstalowany w poziomym otworze wykonanym w ociosie na głębokości 1,8 m od obrysu wyrobiska. Krzywa koloru niebieskiego oznaczona jako (p) reprezentuje

zmiany naprężenia maksymalnego, a krzywa koloru czerwonego (q) wartość naprężenia minimalnego, zaś krzywa koloru zielonego (θ) oznacza kąt odchylenia naprężenia maksymalnego (p) od pionu (wartość naprężenia z minusem oznacza odchylenie od pionu w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara). Wyniki wskazują, że wraz z upływem czasu następuje ciągła zmiana wartości naprężeń tak pod względem wartości, jak i pod względem kierunku. Zmiany naprężeń w tym przypadku nie są wysokie i wynoszą od 0,35 MPa do

Tabela 1. Ocena wskaźnika jakości rdzenia RQD na podstawie rdzenia z otworu poddanego obserwacji endoskopem

Table 1. RQD assessment of the core log where the endoscopic investigation has been carried out

| L.p. | Długość rdzenia [m] | Liczba kawałków rdzenia | Suma długości odcinków większa niż 2d* [m] | Wskaźnik jakości rdzenia RQD [%] |
|------|---------------------|-------------------------|--|----------------------------------|
| 1 | 0,00 ÷ 1,00 | 3+rumosz | 0,33 | 33 |
| 2 | 1,00 ÷ 2,00 | 6 | 0,75 | 75 |
| 3 | 2,00 ÷ 3,00 | 8 | 0,46 | 46 |
| 4 | 3,00 ÷ 4,00 | 3 | 0,85 | 85 |
| 5 | 4,00 ÷ 5,00 | 3 | 0,85 | 85 |
| 6 | 5,00 ÷ 6,00 | 13 | 0,60 | 60 |
| 7 | 6,00 ÷ 7,00 | 11 | 0,85 | 85 |
| 8 | 7,00 ÷ 8,00 | 43 | 0,11 | 11 |
| 9 | 8,00 ÷ 9,00 | 72 | 0,00 | 0 |

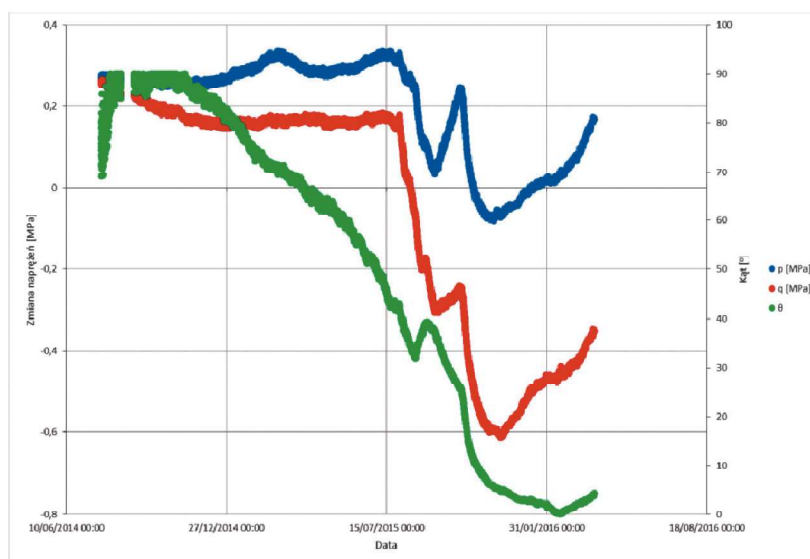
-0,6 MPa. Należy dodać, że roboty eksploatacyjne prowadzone były od stacji pomiarowej w odległości większej niż 300 m, stąd prawdopodobnie niskie wartości zmian naprężeń. Samo urządzenie ma możliwość rejestracji zmian w zakresie do 70 MPa. W przypadku konieczności oceny wpływu frontu ściany na zmianę wartości naprężeń (np. w celu ochrony wyrobisk) zastosowanie takiego urządzenia umożliwia w konkretnych warunkach dokładną ocenę stanu naprężeniowego i zaplanowanie ewentualnych wzmocnień, jeszcze przed wystąpieniem skutków w postaci deformacji obudowy.

Skaning laserowy umożliwia szczegółową ocenę nie tylko przemieszczeń samego górotworu (wypiętrzenie spą-

gu, zaciskanie ociosów), ale także bardzo dokładną ocenę deformacji występujących w poszczególnych elementach obudowy. Wynika to z faktu, że odwzorowanie wyrobiska składa się wtedy z wielu milionów punktów o konkretnych współrzędnych, pomiędzy którymi można dokonać pomiaru dowolnych odległości (rys. 24). Porównanie kolejnych skanów w tym samym rejonie pozwala na określenie wszelkich zmian geometrycznych zachodzących wraz z upływem czasu, czy zmian wynikających ze zmiany sytuacji górniczej. Wadą tej metody jest konieczność posiadania odpowiedniego sprzętu i oprogramowania, a zarówno same pomiary, jak i ich obróbka jest bardzo czasochłonna.

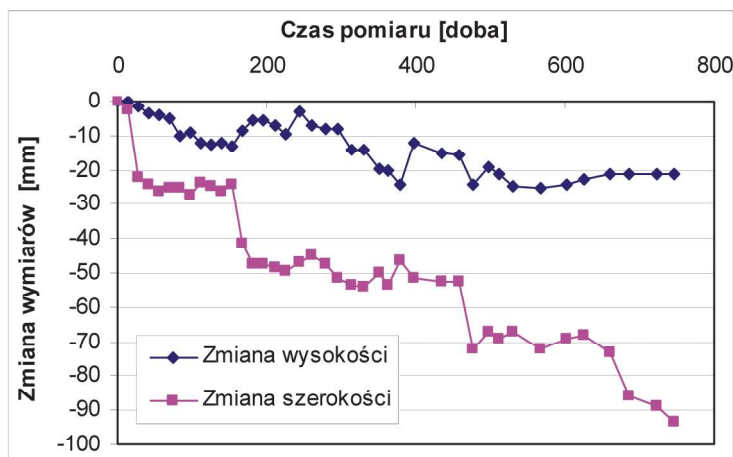
Rys. 23. Zmiany naprężeń w górotworze i kąt odchylenia naprężeń od pionu - ocios wyrobiska korytarzowego

Fig. 23. The change of the stress in the rock mass and the vertical tilt of the stress – the rib of the roadway



Rys. 24. Obraz wyrobiska ze skanowania laserowego (Majcherczyk i in. 2015)

Fig. 24. The laser scanning image of the mining working (Majcherczyk i in. 2015)



Rys. 25. Konwergencja wyrobiska - zmiana w czasie wysokości i szerokości chodnika przyścianowego

Fig. 25. Working convergence – the change of gate height and width

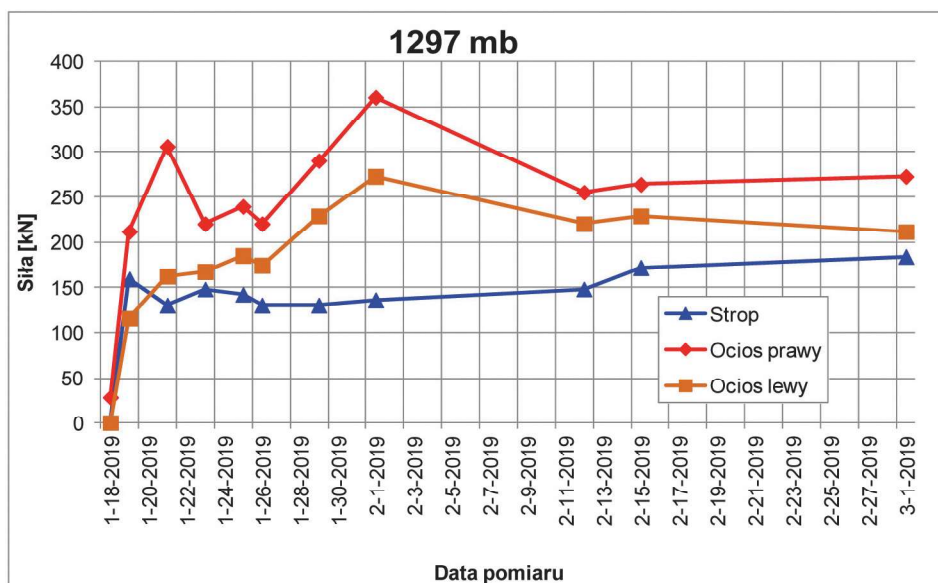
Skaning laserowy daje więc znacznie więcej możliwości diagnostycznych niż klasyczne pomiary konwergencji. Z uwagi jednak na prostotę obserwacji np. poprzez zastosowanie dalmierzy laserowych, dla ogólnej oceny zmian przekroju wyrobiska także zwykły pomiar konwergencji, gdzie mierzy się tylko zmianę szerokości i wysokości wyrobiska, może być bardzo przydatny (rys. 25).

3.2. Monitoring elementów obudowy

Najważniejsze wielkości jakie podlegają monitorowaniu w przypadku obudowy wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego, to wielkość obciążenia odrzwi (ewentualnie dodatkowych stojaków czy kasztów w wyrobiskach utrzymywanych za frontem ściany) oraz w przypadku zastosowania kotew, pomiary sił osiowych w kotwach. Należy jednak zauważyć, że obciążenia obudowy są konsekwencją zjawisk jakie zachodzą w górotworze.

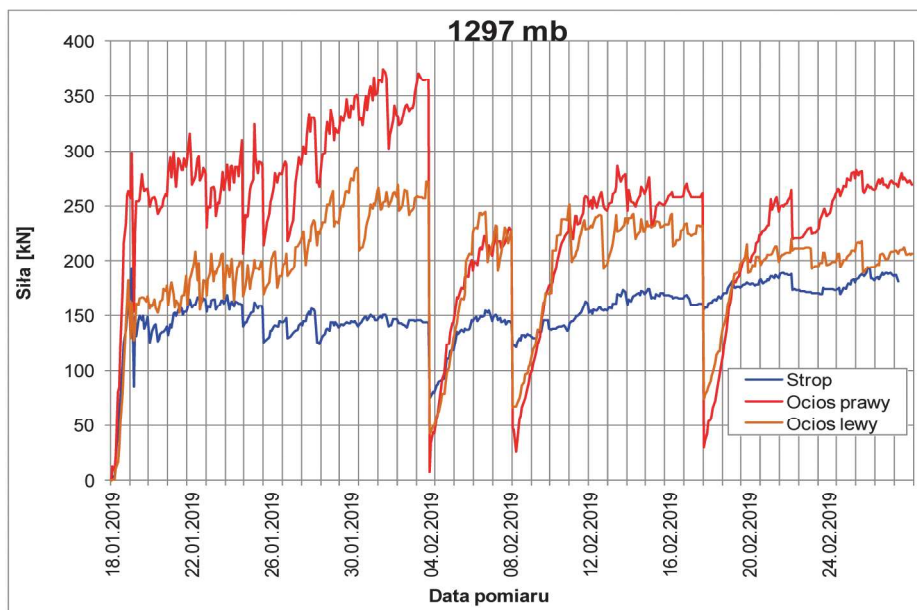
Podstawowe zabezpieczenie wyrobisk w polskich kopalniach węglowych stanowi obudowa podporowa podatna z kształtownika V. Wyniki badań obciążenia odrzwi pro-

wadzone wg schematu pokazanego na rys. 9, dla tej samej stacji pomiarowej pokazano na rysunkach 26 i 27, z tym, że na rys. 26 dla odczytu manualnego, a na rys. 27 dla odczytu automatycznego realizowanego co 2 godziny. Porównując oba wykresy można stwierdzić, że występuje cykliczne obciążanie i odciążanie odrzwi obudowy, przy czym dokładniejsze wyniki uzyskuje się w przy rejestracji automatycznej (rys. 27). Mimo stosunkowo krótkiego okresu pomiarów, zauważalne są okresy, w których obudowa została odciążona, przy czym wartość odciążenia rejestrowana manualnie co kilka dni wykazała znacznie mniejsze wartości spadku sił (rys. 26) w porównaniu do rejestracji automatycznych. Odciążenie to może być efektem zsuwu na złączach, bądź związane z odkształceniami obudowy. Maksymalna wartość obciążenia to 370 kN i zarejestrowano ją na dynamometrze pod łukiem ociosowym prawym. Najmniejszą wartość odnotowano w stropie, gdzie siła w całym okresie obserwacji wahała się w zakresie 150-180 kN. Odniesienie rejestrowanych sił działających na obudowę do nośności odrzwi umożliwia weryfikację obliczeń projektowych oraz, w razie konieczności, podjęcie decyzji o ewentualnych wzmocnieniach obudowy.



Rys. 26. Obciążenie odrzwi obudowy wg odczytu manualnego

Fig. 26. Load on the support frame – the manual readout



Rys. 27. Obciążenie odrzwi obudowy wg pomiaru automatycznego
 Fig. 27. Load on the support frame – the automatic readout

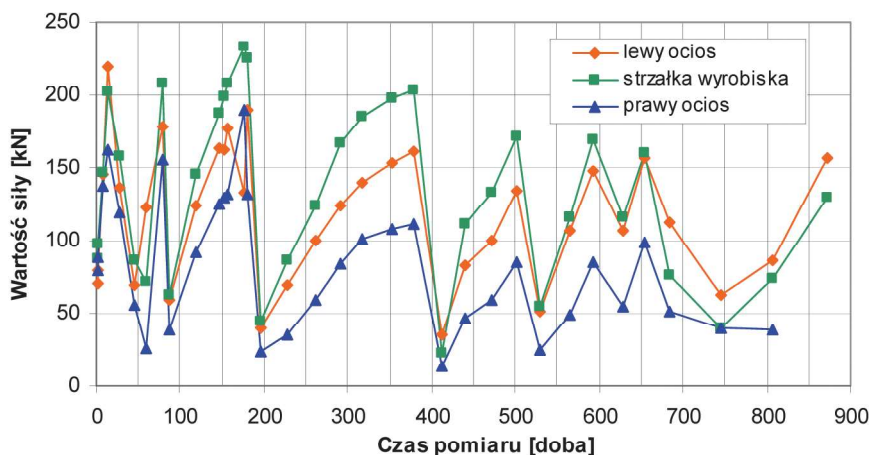
Cykliczność pracy odrzwi obudowy polegająca na obciążeniu i odciążeniu uzyskuje się także w długim okresie czasu, czego przykładem są wyniki z pochylni B-1. Rejestrowane maksymalne wartości obciążenia odrzwi osiągnęły w okresie pomiarów około 230 kN (rys. 28). Charakter zmian rejestrowanych sił odpowiadał typowej pracy obudowy podatnej. W tym przypadku obserwowano okresowe wzrosty oraz spadki wartości obciążeń na wszystkich dynamometrach tj.: pod łukami ociosowymi oraz na dynamometrze pomiędzy łukiem stropnicowym a górotworem.

Kolejnym pomiarem bardzo istotnym z punktu widzenia oceny schematu zaprojektowanej obudowy jest pomiar obciążeń kotew. Jak pokazano w rozdziale 2, można rejestrować siły w kotwach w sposób jakościowy, wykorzystując różnego rodzaju indykatory zakładane na końcówki kotew. Większa liczba informacji uzyskiwana jest jednak przy zastosowaniu kotew pomiarowych. Uzyskiwane dane pozwalają wtedy na weryfikację poprawności parametrów zastosowanych kotew (typ, długość, nośność) w stosunku do rzeczywiście działających sił i ich rozkładu. Przykładowe wartości zmierzonych sił osiowych na długości kotew pomiarowych przedstawiono na rys. 29 i 30. Kotwy pomiarowe znajdowały się w odległości

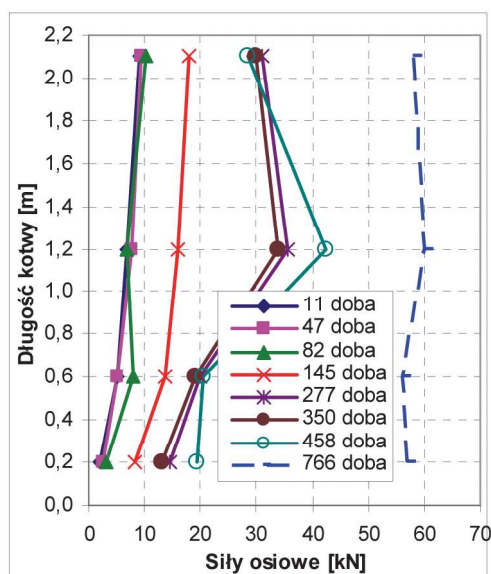
około 100 m od siebie, a obudowa ŁP o rozstawie odrzwi 1,2 i 1,5 m była wzmocniona dwoma parami kotew (Niedbalski i inni 2013, Niedbalski 2014). Wyniki wskazują, że większy rozstaw odrzwi generował na długości kotew większe wartości sił. W kotwi zlokalizowanej na odcinku o zwiększonym rozstawie odrzwi do 1,5 m stwierdzono wartość siły około 90 kN (rys. 30) wobec wartości około 60 kN przy rozstawie odrzwi 1,2 m (rys. 29). Dane wskazują, że dopiero przy rozstawie odrzwi 1,5 m została wykorzystana efektywna nośność kotew wzmacniających wynosząca 120 kN. Taki sposób pomiaru obciążenia kotew pozwala także ocenić skuteczność działania obudowy w warunkach obciążeń dynamicznych (Małkowski i in. 2009).

4. Podsumowanie

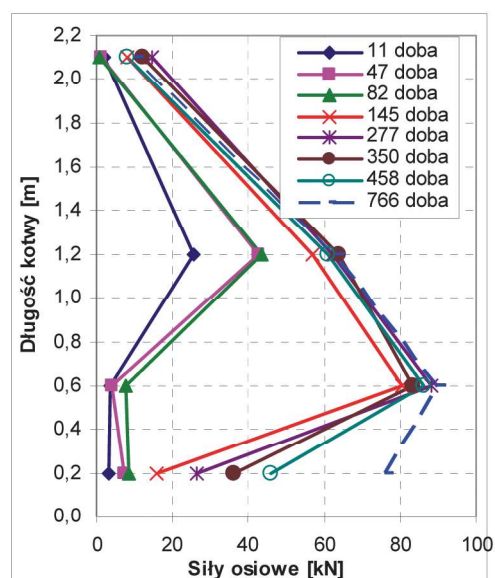
Realizacja każdego procesu technologicznego, szczególnie w tak złożonych warunkach jakie znajdują się w kopalniach podziemnych, skłania do podejmowania działań zmierzających do monitorowania zjawisk zachodzących wokół wyrobisk. W polskich kopalniach węgla kamiennego



Rys. 28. Obciążenie odrzwi obudowy w pochylni B-1
 Fig. 28. Load on the support frame in inclined drift B-1



Rys. 29. Wartość sił w kotwi – rozstaw odrzwi 1,2 m
Fig. 29. The load on bolt – support spacing 1.2 m



Rys. 30. Wartość sił w kotwi – rozstaw odrzwi 1,5 m
Fig. 30. The load on bolt – support spacing 1.5 m

prowadzona ocena bieżącego stanu wyrobiska obejmuje najczęściej wizualne określenie zmian przekroju poprzecznego oraz kształtu wyrobiska. W przypadku wystąpienia deformacji obudowy ocenia się funkcjonalność wyrobiska pod kątem wykorzystania go w celach wentylacyjnych lub transportowych. O ile w wielu przypadkach tak prowadzona kontrola jest wystarczająca, o tyle dla weryfikacji stosowanych metod projektowych, czy oceny skuteczności stosowania nowych schematów obudowy jest ona niedostateczna. Przy wizualnej ocenie pracy obudowy nie ma możliwości prowadzenia działań zmierzających do udoskonalania obudowy jako całej konstrukcji oraz jej poszczególnych elementów. W takim przypadku prowadzone obserwacje dają tylko podstawy do wyciągania wniosków o charakterze ogólnym.

W celu ilościowej oceny pracy konstrukcji obudowy należy prowadzić kontrolę za pomocą specjalnych technik pomiarowych. Monitoring ten należy realizować w dwóch obszarach: w zakresie oceny zjawisk zachodzących w górotworze oraz oddziaływań jakie przenoszone są przez elementy obudowy. Ponadto proces kontroli wyrobisk powinien być odpowiednio zaprojektowany i poza określeniem głównego celu pomiarów obejmować kilka etapów (Małkowski 2017), m.in. wybór mierzonych wielkości, metod pomiaru, urządzeń pomiarowych, określenia lokalizacji urządzeń pomiarowych, częstotliwości pomiaru, wartości alarmowych, sposobu zapisu i gromadzenia danych, a także wskazania osób odpowiedzialnych za pomiar i gromadzenie danych.

Przedstawione wybrane przykłady badań kopalnianych prowadzonych przez Wydział Górnictwa i Geoinżynierii AGH wskazują na ich dużą przydatność w procesie projektowania i utrzymania wyrobisk korytarzowych. Zjawiska zachodzące w otaczającym wyrobiska górotworze (np. rozwarstwienia stropu) często jednocześnie oddziałują na obudowę i powodują jej znaczne obciążenia. Mierzone wartości sił działających na obudowę pozwalają na podejmowanie z odpowiednim wyprzedzeniem działań zabezpieczających wyrobisko, a analiza większej liczby danych obserwacyjnych pozwala na weryfikowanie metod projektowych oraz optymalizację stosowanych schematów obudowy.

Złożone warunki geologiczno-górniczne w kopalniach podziemnych wymuszają poszukiwanie nowych, efektywnych sposobów zabezpieczeń wyrobisk korytarzowych,

a jednocześnie niejako wymuszają kontrolę stanu wyrobisk w warunkach kopalnianych. Konieczne więc będzie rozwijanie i doskonalenie technik pomiarowych monitoringu. Wydział Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. St. Staszica w Krakowie intensywnie uczestniczył w tych pracach w ciągu 100 lat swojej historii i jest gotowy na podejmowanie tych wyzwań w kolejnych latach.

Literatura

- BOBEK R., ŚLEDŹ T., RATAJCZAK A., GLUCH P. 2014 - Problemy utrzymania chodników przyścianowych w warunkach zagrożeń naturalnych w KWK „Knurów-Szczygłowice” Ruch Knurów. WARSZTATY 2014 z cyklu: Górnictwo - człowiek - środowisko: zrównoważony rozwój, s. 117-142.
- JOHNSON J.C., BRADY T., LARSON M., LANGSTON R., KRISTEN H. 1999 - Use of strain-gauged rock bolts to measure rock mass strain during drift development. 37th Symposium of Rock Mechanics, Rotterdam, s. 497 – 502.
- JOHNSON J.C., WILIAMS T., SUNDERMAN C., SINGER S. 2003 - Field test with strain gauged friction bolts at the gold hunter mine, Mullan, Idaho, USA. 22th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, s. 233-239.
- KORUS H., SZYMICZEK W., FICEK J., SOBIK M. 2002 - Monitoring pracy obudowy kotwiowej w kopalni „Jankowice”. „Przeгляд Górnicy” nr 2, s. 20-27.
- KORZENIOWSKI W., PIECHOTA S. 2000 - Rozkład siły osiowej wzdłuż kotwi na podstawie badań in situ. „Przeгляд Górnicy” nr 12, s. 22-28.
- LU R., MA F., GUO J., ZHAO H. 2018 - Analysis and monitoring of roadway deformation mechanisms in nickel mine, China. Concurrency and Computation: Practice and Experience, vol. 30, issue 17, <https://doi.org/10.1002/cpe.4832>.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P. 2003 - Wpływ frontu ściany na wielkość strefy spełnia wokół wyrobiska przyścianowego. „Wiadomości Górnicy”, nr 1, s. 20-29.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2015 - Analiza utrzymania stateczności wyrobisk korytarzowych w długim okresie. „Przeгляд Górnicy” nr 1, s. 53-60.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2008 - Badania nowych rozwiązań technologicznych w celu rozrzedzenia obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych. Wydawnictwa AGH, Kraków.

- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2011 - Geomechaniczna ocena stateczności wyrobisk przyścianowych w obudowie podporowo-kotwowej. „Przeгляд Górnicy” nr 6, s. 43–49.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2006a - Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań in situ. Wydawnictwo Wydziału Górnictwa i Geoinżynierii.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2006b - Speed of roof rock separation and a type of working's support. W: New technological solutions in underground mining”, International Mining Forum 2006, E. J. Sobczyk, J. Kicki (eds), Taylor & Francis Group, London, s. 39–47.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 1999 - Stateczność chodników równoległych w samodzielnej obudowie kotwowej. „Przeгляд Górnicy” nr 10, s. 16–25.
- MAJCHERCZYK T., MAŁKOWSKI P., NIEDEBALSKI Z. 2005 - Zmiany rozwarstwień skał stropowych w wyrobiskach korytarzowych w samodzielnej obudowie kotwowej o długim okresie użytkowania. Materiały konferencyjne: Warsztaty 2005: Zagrożenia Naturalne w Górnictwie, s. 257–266.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z. 2002 - Ocena obudowy podporowo-kotwowej na podstawie wybranych badań in situ. „Przeгляд Górnicy” nr 12, s. 1–7.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z. 2003 - Rozrzedzanie obudowy podporowej w świetle wyników badań kopalnianych. „Przeгляд Górnicy” nr 5, 10–15.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z., MAŁKOWSKI P. 2010 - Wzmacnianie obudowy wyrobisk korytarzowych w złożonych warunkach górnictwo-geologicznych. Kwartalnik AGH „Górnictwo i Geoinżynieria” z. 2, R. 34, s. 451–462.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z., MAŁKOWSKI P., BEDNAREK Ł. 2014 - Analysis of yielding steel arch support with rock bolts in mine roadways stability aspect. Archives of Mining Sciences vol. 59 no. 3, s. 641–654, DOI 10.2478/amsc-2014-0045.
- MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z., ULASZEK A. 2015: Roadway stability evaluation on the basis of modern monitoring of displacement. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 37 no. 1, s. 45–52.
- MAŁKOWSKI P., MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z. 2009: Dynamometr szeregowy -Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; Opis zgłoszeniowy wynalazku ; PL 382785 A1; Opubl. 2009-01-05. — Zgłosz. nr P.382785 z dn. 2007-06-28, Biuletyn Urzędu Patentowego; ISSN 0137-8015; nr 1, s. 21.
- MAŁKOWSKI P. 2010 - Litologia górotworu karbońskiego a skuteczność pracy kotwi strunowych. *Prace Naukowe GIG. „Górnictwo i Środowisko”* nr 2/1, s. 144–157.
- MAŁKOWSKI P. 2017 - Zarządzanie monitoringiem zagrożeń w górnictwie. *Inżynieria Mineralna* vol. XVIII, nr 2, s. 215–224, doi: 10.29227/IM-2017-02-24.
- MAŁKOWSKI P., MAJCHERCZYK T., NIEDEBALSKI Z. 2017 - Zastosowanie kotwi dla rozrzedzania odrzwi obudowy podporowej w wyrobiskach korytarzowych. „Przeгляд Górnicy” nr 7, s. 12–22.
- MAŁKOWSKI P., BORECKI J., SKATUŁA R., CHILIŃSKI T. 2009 - Skuteczność pracy kotwi strunowych w warunkach aktywności sejsmicznej – analiza przypadku. *Prace Naukowe GIG. Górnictwo i Środowisko* nr 4/2, s. 224–234.
- NIEDEBALSKI Z., MAŁKOWSKI P., MAJCHERCZYK T. 2013 - Monitoring of stand-and-roof-bolting support: design optimization. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, vol. 10, no. 2, s. 215–226.
- NIEDEBALSKI Z., 2014 - Prognoza utrzymania funkcjonalności wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego. Wydawnictwa AGH, Kraków.
- NIELACNY P., SETLAK K., SIODŁAK Ł. 2008 - Sposoby zapewnienia stateczności wyrobisk przyścianowych utrzymywanych w sąsiedztwie zrobów w KWK „Ziemowit”. *Miesięcznik WUG* nr 3, s. 12–20.
- NIEROBISZ A. 1999 - Zastosowanie kotwi w warunkach obciążeń dynamicznych. „Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie” nr 4, s. 10–15.
- PRUSEK S. 2005 - Deformacje chodnika międzyścianowego zlokalizowanego pod zrobami zawałowymi. *Miesięcznik WUG*, nr 11, s. 11–16.
- PRUSEK S., MAJCHER M. 2003 - Przebieg ruchów górotworu w chodniku przyścianowym z uwagi na wpływ frontów eksploatacji zawałowej. *Miesięcznik WUG*, nr 2, s. 3–7.
- RAJWA S., ROBAKOWSKI A., KOWALCZUK J., MASNY W. 2016 - Sposób wzmocnienia i przygotowania wyrobiska zlokalizowanego w polu wbiegu ściany wraz z technologią prowadzenia ściany. „Przeгляд Górnicy” nr 9, s. 18–27.
- SHEN B. 2014 - Coal Mine Roadway Stability in Soft Rock: A Case Study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 47, s. 2225–2238, DOI 10.1007/s00603-013-0528-y.
- SHEN B., POULSEN B., KELLY M., NEMCIK J., HANSON C. 2003 - Roadway span stability in thick seam mining – field monitoring and numerical investigation at Moranbah North Mine. 2003 Coal Operators' Conference, The AusIMM Illawara Branch, University of Wollongong, s. 173–184.
- SINGER S., RAINES R. 2001 - Effects of bolt spacing, bolt length, and roof span on bolt loading in a Trona Mine. 20th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown 2001, s. 302 – 308.
- SONG G., Li W., BO W., CHUN S., HO M. 2017 - A Review of Rock Bolt Monitoring Using Smart Sensors. *Sensors* 17(4), 776; <https://doi.org/10.3390/s17040776>.
- STACHOWICZ S., KOSONOWSKI J., KOZEK B. - Charakterystyka zaciśnięcia wyrobisk korytarzowych kamiennych w kopalni „Bogdanka”. „Wiadomości Górnictwa”, nr 4, 1995. s. 165–168.
- STASICA J., RAK Z., STOPYRAM. 2006 - Kontrola stateczności wyrobisk korytarzowych wykonywanych w obudowie podporowo-kotwowej i kotwowej. *Miesięcznik WUG* nr 4, s. 7–14.
- STOPYRA M., SURMA A., STASICA J., RAK Z. 1999 - Elektroniczny monitoring obudowy kotwowej w KWK „Wesoła”. *WUG* nr 2, s. 4–9.
- SZURGACZ D., BRODNY J. 2019 - Application of a roof support monitoring system for analysis of work parameters of a powered longwall system. W: IVth International Innovative Mining Symposium, Kemerovo, Russian Federation, October 14–16, 2019, Eds. M. Tyulenev, S. Zhironkin, A. Khoreshok, S. Voth, M. Cehlar, D. Nuray, J. Janocko, S. Anyona, Y. Tan, A. Abay, D. Marasova I P. Stefanek, Les Ullis, s. 1–7.
- SZYMICZEK W., FICEK J., SOBK M. 2001 - Nowoczesne metody monitoringu pracy obudowy kotwowej. *Nowoczesne technologie górnictwa 2001 –Kotwienie, Gliwice –Ustroń*, s. 453–468.
- TAJDUŚ A., CAŁA M. 1996 - Możliwości zastosowania obudowy kotwowej w warunkach występowania zagrożenia tąpnięciami. *XIX Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu, Ustroń*, s. 197 – 213.
- WANG C., WANG Y., LU S. 2000 - Deformational Behaviour of Roadways in Soft Rocks in Underground Coal Mines and Principles for Stability Control. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* nr 37, s. 937–946.
- XIE Z., ZHANG N., QIAN D., HAN C., AN Y., WANG Y. 2018 - Rapid Excavation and Stability Control of Deep Roadways for an Underground Coal Mine with High Production in Inner Mongolia. *Sustainability*, vol. 10, 1160; doi:10.3390/su10041160.
- YIN H., WANG T., YANG D., LIU S., SHAO J., LI Y. 2016 - A Smart Washer for Bolt Looseness Monitoring Based on Piezoelectric Active Sensing Method. *Appl. Sciences*, no 6, 320; doi:10.3390/app6110320.
- <http://aceco.co.kr>
<https://soil.co.uk>
<https://www.golder.com>
www.geokon.com

Artykuł wpłynął do redakcji – wrzesień 2019
 Artykuł akceptowano do druku – 27.09.2019