

*Andrzej Walentek**

MODEL NUMERYCZNY STREFY ZNISZCZENIA GÓROTWORU WOKÓŁ CHODNIKA PRZYŚCIANOWEGO

Streszczenie

W artykule przedstawiono próby odwzorowania, za pomocą modelowania numerycznego, strefy zniszczenia górotworu wokół chodnika przyścianowego znajdującego się w rejonie oddziaływania przesuwanego się frontu eksploatacyjnego. Próby te zostały przeprowadzone na podstawie uzyskanych wyników badań strefy spękań wokół chodnika przyścianowego z wykorzystaniem endoskopu otworowego, w jednej z kopalń węgla kamiennego GZW. Wykorzystując do obliczeń program Phase², którego podstawę stanowi metoda elementów skończonych, wykazano możliwość rozwiązania problemu modelowania strefy spękań dwoma odrębnymi metodami, uzyskując przy tym bardzo zbliżone wyniki. W pierwszej z nich założono zmniejszenie wartości wybranych parametrów mechanicznych skał w kryterium Hoeka-Browna wraz ze zbliżającym się frontem ściany, natomiast druga polega na zwiększaniu naprężeń wokół chodnika wskutek oddziaływania frontu eksploatacji.

Numerical model of rockmass destruction zone around longwall entry

Abstract

In the paper, trials were presented of mapping, with the help of numerical modelling, of the rockmass destruction zone around longwall entry located in an impact area of moving working front. These trials were undertaken on a basis of results obtained from investigations of fractured zone around the longwall entry with the use of endoscope for bore-holes, in one of hard coal mines of the GZW (Upper-Silesian Coal Basin). While using for calculations program Phase², which basis is the finite element method, the possibility was demonstrated of problem solution of the fractured zone modelling with two separate methods, for which very similar results were obtained. For first of them, decrease of values of selected mechanical parameters of rocks at the Hoek-Brown criterion with approaching front of longwall was assumed, whereas the another one consists in increasing of stresses around the entry as a result of impact of working front.

WPROWADZENIE

Obudowa wyrobiska korytarzowego powinna skutecznie przeciwdziałać obciążeniu ze strony górotworu i zapewniać zachowanie odpowiednich wymiarów chodnika, gwarantujących bezpieczną pracę załogi oraz spełnianie wszystkich funkcji wyrobiska w procesie wydobywczym. Podczas projektowania obudowy wyrobiska niezwykle istotne jest obliczenie wartości obciążenia działającego ze strony górotworu. Na etapie drażenia wyrobisko korytarzowe jest obciążone wskutek wytworzonej w jego pułapie strefy spękań. Wysokość tej strefy jest zależna między innymi od szerokości wyrobiska, wytrzymałości skał stropowych, wytrzymałości skał w ociosach chodnika oraz od ciśnienia górotworu (Prusek, Walentek 2005, 2007). W przypadku wyrobisk koryta-

* Główny Instytut Górnictwa

rzowych, narażonych na bezpośredni wpływ frontu eksploatacji (chodniki przyścianowe), istotnym czynnikiem wpływającym na wielkość strefy spękania wokół chodnika, a zarazem na wartość obciążenia, jest oddziaływanie frontu eksploatacyjnego przesuwanego się wzdłuż jednego z ociosów chodnika (Majcherczyk, Małkowski 2003; Myszkowski 2008).

W niniejszym artykule przedstawiono próby odwzorowania wyników badań dołowych zasięgu strefy spękań wokół chodnika przyścianowego za pomocą modelowania numerycznego. Zastosowano dwie metody rozwiązania analizowanego zagadnienia w płaskim stanie odkształcenia. Podstawę pierwszej metody stanowi przedstawiony w publikacji (Prusek 2008) model prognozowania zaciskania chodników przyścianowych z wykorzystaniem programu numerycznego Phase², do odpowiedniej modyfikacji wybranych parametrów kryterium Hoeka-Browna w zależności od położenia czoła ściany. W metodzie drugiej zaproponowano odpowiednie zwiększanie obciążenia na zewnętrznych krawędziach tarczy modelu, w zależności od położenia czoła ściany, w celu uzyskania naprężeń wokół wyrobiska, powodujących zniszczenia skał porównywalne z pomierzonymi w warunkach *in situ*.

1. CHARAKTERYSTYKA RODZAJU I MIEJSCA PRZEPROWADZONYCH BADAŃ

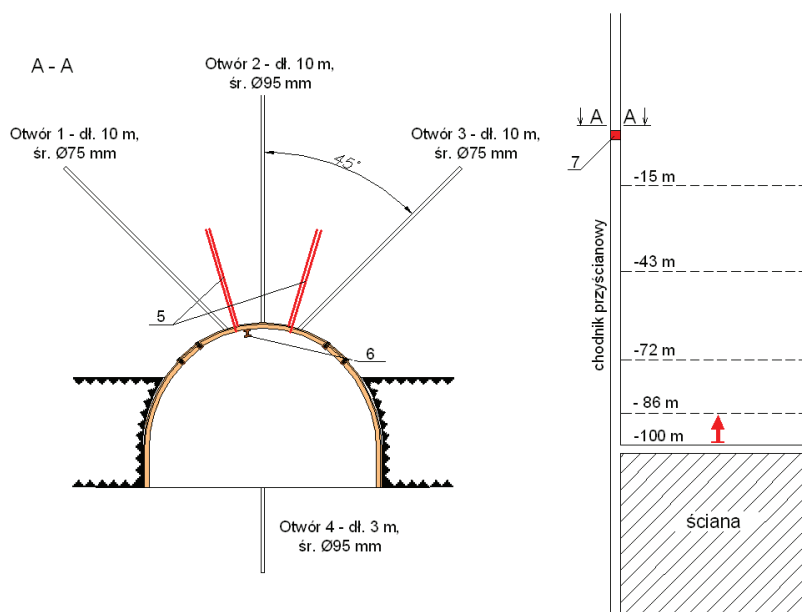
Badania wpływu ściany na wielkość zniszczenia górotworu wokół chodnika przyścianowego przeprowadzono za pomocą endoskopu otworowego wyposażonego w kamerę podczerwieni. Zastosowanie podczerwieni do oświetlenia badanego obiektu umożliwiło dokładniejsze zbadanie jego wnętrza niż w świetle widzialnym. Możliwe było stwierdzenie występowania defektów (pęknięć, szczelin) w górotworze nawet wówczas, gdy były one zanieczyszczone czy wręcz całkowicie wypełnione materiałem obcym.

Pomiary wykonano w bazie pomiarowej zlokalizowanej w chodniku przyścianowym około 100 m przed frontem ściany. W bazie tej wykonano cztery otwory w przekroju prostokątnym do osi wyrobiska: w stropie trzy otwory długości 10,0 m oraz jeden długości 3,0 m w spągu, zgodnie ze schematem przedstawionym na rysunku 1.

Obserwacje zmian zachodzących w górotworze wokół chodnika przyścianowego prowadzono wraz ze zbliżającym się frontem eksploatacji. Ogółem, wykonano pięć pomiarów w odległości: 100, 86, 72, 43 oraz 15 m przed frontem ściany. Początkowo zakładano, że badania będą obejmować rejon chodnika znajdującego się zarówno przed, jak i za czołem ściany, niemniej jednak z uwagi na utratę drożności otworów wiertniczych w momencie przejścia ściany przez bazę pomiarową dalsze badanie były już niemożliwe.

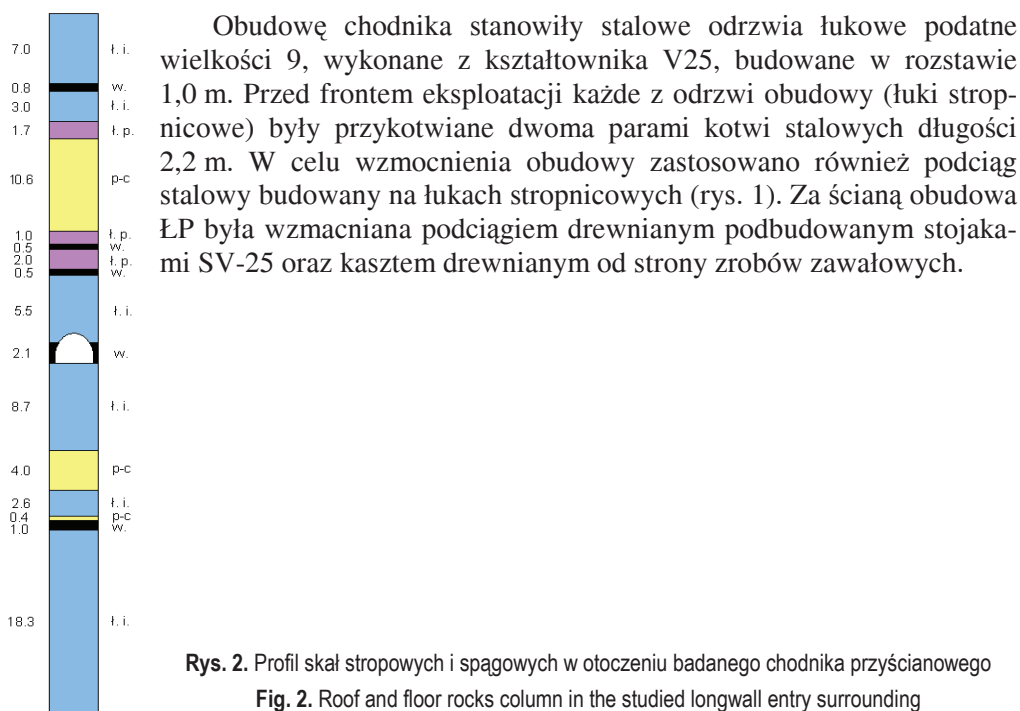
Oprócz pomiarów introskopowych, w pierwszej kolejności, w pionowych otworach (otwór 2 i 4) wykonano badania penetrometryczne, na podstawie których określono wytrzymałość skał stropowych i spągowych na ściskanie i rozciąganie.

Rozpatrywane wyrobisko korytarzowe pełniło funkcję chodnika przyścianowego ściany zawałowej, prowadzonej na wysokość 2,1 m, ze średnim postępem dobowym 6 m. Chodnik był zlokalizowany na głębokości około 525 m. W stropie bezpośrednim wybieranego pokładu węgla (rys. 2) występował łupek ilasty grubości około 5,5 m i wytrzymałości na ściskanie 21,8 MPa. Spąg pokładu tworzył również łupek ilasty, charakteryzujący się nieco większymi parametrami wytrzymałościowymi $R_c = 24,3$ MPa.



Rys. 1. Schemat usytuowania otworów badawczych w bazie pomiarowej w chodniku przyścianowym:
1, 2, 3, 4 – otwór, 5 – kotwie stalowe, 6 – podciąg stalowy, 7 – baza pomiarowa

Fig. 1. Layout of locations of exploratory bore-holes in measurement datum line in the longwall entry:
1, 2, 3, 4 – hole, 5 – roof bolts, 6 – steel stringer, 7 – measurement datum line



Rys. 2. Profil skał stropowych i spagowych w otoczeniu badanego chodnika przyścianowego
Fig. 2. Roof and floor rocks column in the studied longwall entry surrounding

2. OBLICZENIA NUMERYCZNE ZASIĘGU STREFY ZNISZCZENIA SKAŁ WOKÓŁ CHODNIKA NARAŻONEGO NA WPLYW CIŚNIENIA EKSPLOATACYJNEGO

Prawidłowe odwzorowanie wyników pomiarów strefy zniszczenia górotworu wokół badanego chodnika przyścianowego, przy użyciu modelowania numerycznego, wymaga określenia optymalnych warunków brzegowych modelu. W tym celu dokonano analizy wstecznej, która polegała na zmianach wybranych parametrów modelu do uzyskania wyników obliczeń numerycznych jak najbardziej zbliżonych do rezultatów badań dołowych. Odwzorowując zmianę strefy spękań wokół chodnika przyścianowego, z uwagi na oddziaływanie ciśnienia eksploatacyjnego, zastosowano dwie odrębne metody obliczeń.

W pierwszej metodzie, opracowanej do prognozowania zaciskania chodników przyścianowych, założono modyfikację wybranych parametrów w kryterium wytrzymałościowym Hoeka-Browna (Prusek 2008). Autor przytoczonej pracy wykazał, że przez zmianę pozniszczeniowych parametrów m_{bz} i s_z w kryterium Hoeka-Browna, można w sposób dokładny odwzorować wielkość deformacji chodników przyścianowych. Opracowane zgodnie z metodą wartości parametrów m_{bz} i s_z , w zależności od odległości od frontu eksploatacji, przedstawiają się następująco:

- dla węgla:

$$m_{bz} = 0,6278e^{-0,0024d}, \quad s_z = 0,000494e^{-0,00393d};$$

- dla łupku ilastego:

$$m_{bz} = 0,3197e^{-0,0148d}, \quad s_z = 0,00041e^{-0,01592d};$$

- dla łupku piaszczystego:

$$m_{bz} = 0,5093e^{-0,0127d}, \quad s_z = 0,000762e^{-0,01881d};$$

- dla piaskowca:

$$m_{bz} = 0,7568e^{-0,0127d}, \quad s_z = 0,001647e^{-0,01697d};$$

gdzie:

d – odległość od czoła ściany (przyjmuje wartości ujemne przed ścianą, a dodatnie za ścianą),

m_{bz} – wartość pozniszczeniowego parametru m_b kryterium Hoeka-Browna,

s_z – wartość pozniszczeniowego parametru s kryterium Hoeka-Browna.

W drugiej metodzie obliczeń, do odwzorowania zmierzonej w warunkach dołowych strefy spękań wokół chodnika przyścianowego, zwiększano wartość obciążenia modelu, co miało odzwierciedlać wzrost naprężeń spowodowany oddziaływaniem zbliżającego się frontu eksploatacji. Oddziaływanie czynnego frontu eksploatacji powoduje zwiększenie naprężeń zarówno w pokładzie węgla, jak również w skałach otaczających go. Z literatury (Bieniawski 1987; Brady, Brown 2006; Peng 2006) wynika, że maksymalne naprężenia w pokładzie wybieranym z zawalem stropu mogą

wynosić w przybliżeniu do 6,0 wartości pierwotnego naprężenia pionowego, występującego na danej głębokości. Wartość naprężenia przyjętą w rozpatrywanym modelu wyrażono w postaci stosunku zwiększonego naprężenia pionowego p'_z do naprężenia pierwotnego p_z .

Wszystkie obliczenia numeryczne zostały wykonane za pomocą programu Phase² v 7.0 firmy Rocscience, z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Założono, że modelowany górotwór jest ośrodkiem sprężysto-plastycznym i izotropowym. Warunek stanu granicznego był obliczany według kryterium Hoeka-Browna (Kaczmarek, Łydźba 1994); dla spękanego masywu skalnego definiuje się go następująco (Hoek, Carranza-Torres, Corkum 2002; Hoek 1999; 2006)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

gdzie:

- σ'_1 i σ'_3 – efektywne naprężenie maksymalne i minimalne przy zniszczeniu, MPa;
- m_b – wartość parametru Hoeka-Browna dla masywu skalnego;
- s i a – parametry wyznaczone na podstawie własności górotworu;
- σ_{ci} – wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie próbki skalnej, MPa.

Parametry m_b , a i s wyznacza się z następujących zależności (Hoek 1999; 2006):

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

gdzie:

- m_i – stała dla nienaruszonej skały zależna od jej rodzaju, wyznaczana na podstawie testu trójosiowego ściskania lub na podstawie danych tabelarycznych,
- GSI – parametr jakości górotworu (*Geological Strength Index*) określany dla różnych warunków geologicznych,
- D – współczynnik zniszczenia zależny od rodzaju skał i sposobu urabiania.

Pozostałe parametry w kryterium Hoeka-Browna, tj. s i a , w przypadku, gdy wartość $GSI > 25$, wyznacza się z następujących zależności (Hoek 1999; 2006):

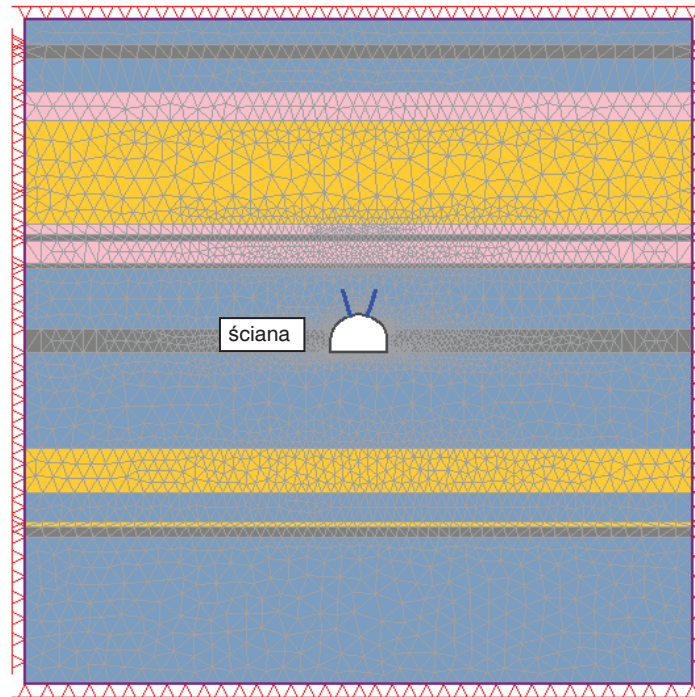
$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$

Dla wartości $GSI < 25$ parametr $s = 0$, zaś a oblicza się z zależności (Hoek 1999; 2006)

$$a = 0,65 - GSI/200$$

W celu wykonania obliczeń sporządzono model w postaci tarczy o wymiarach 70×70 m (rys. 3), w których układ oraz rodzaj skał otaczających wyrobisko przyjęto zgodnie z przedstawionym wcześniej profilem (rys. 2).



Rys. 3. Model górotworu przyjęty do obliczeń strefy spękań wokół chodnika przyścianowego
Fig. 3. Rockmass model assumed for the calculations of fractured zone around longwall entry

Podstawowe własności fizyko-mechaniczne warstw skalnych oraz parametry opisujące kryterium Hoeka-Browna zestawiono w tabelicy 1. Parametry te przyjęto na podstawie wyników uzyskanych z pomiarów wytrzymałościowych, wykonanych penetrometrem otworowym w rejonie prowadzonych badań oraz na podstawie obliczeń z wykorzystaniem modułu RockLab.

Tabela 1. Przyjęte do obliczeń własności warstw skalnych wokół chodnika przyścianowego

Rodzaj skały	Moduł Younga E , MPa	Współczynnik Poissona ν	Wytrzymałość na ściskanie R_c , MPa	Parametr m_b	Parametr s
Węgiel	1605	0,30	14,5	0,785	0,0007
Łupek ilasty – strop	3673	0,26	21,8	1,218	0,0020
Łupek ilasty – spąg	3732	0,26	24,3	1,262	0,0022
Łupek piaszczysty	4500	0,23	24,0	1,561	0,0031
Piaskowiec	8950	0,21	38,0	2,52	0,0105

Zastosowaną w chodniku obudowę podporową typu ŁP9/V25 zamodelowano w postaci belki (Małkowski, Niedbalski, Majcherczyk 2008), której przypisano parametry kształtownika V25 (Stoiński 1996; Skrzyński 2001):

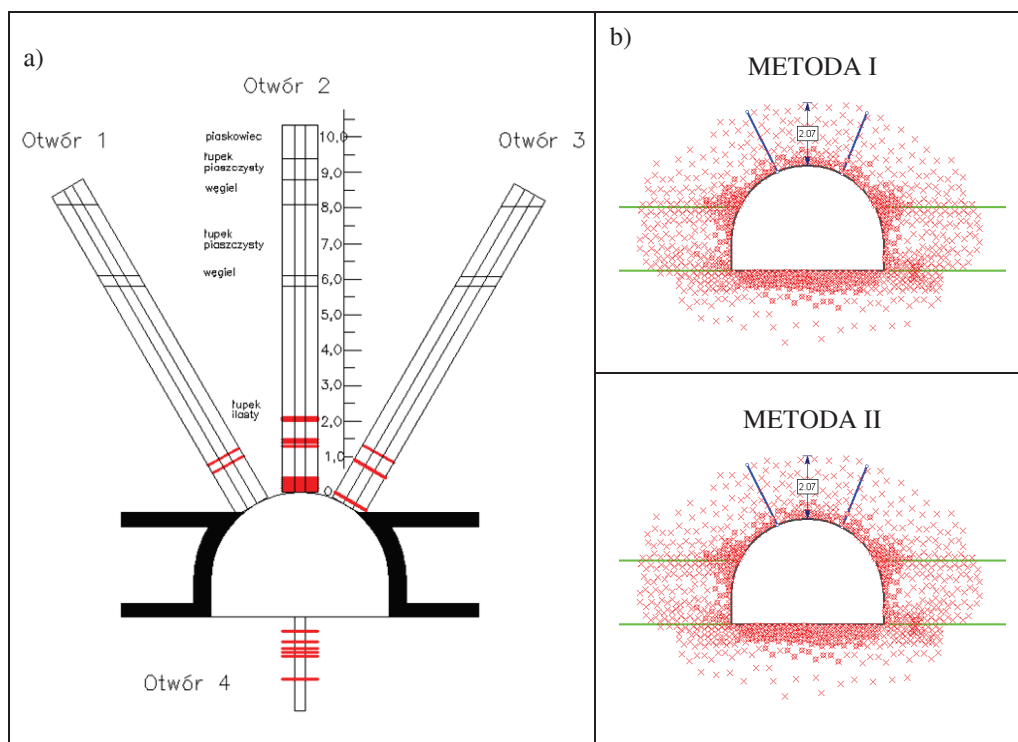
- pole powierzchni przekroju poprzecznego $A = 0,003184 \text{ m}^2$,
- moment bezwładności przekroju poprzecznego $I_x = 0,00000484 \text{ m}^4$,
- wysokość kształtownika $H = 118 \text{ mm}$.

W modelu obliczeniowym uwzględniono także wzmocnienie obudowy za pomocą dwóch par kotwi stalowych o następujących parametrach: długość 2,2 m, średnica żerdzi 20 mm, moduł Younga 205 GPa, nośność 120 kN.

Ponadto, do obliczeń założono następujące warunki brzegowe:

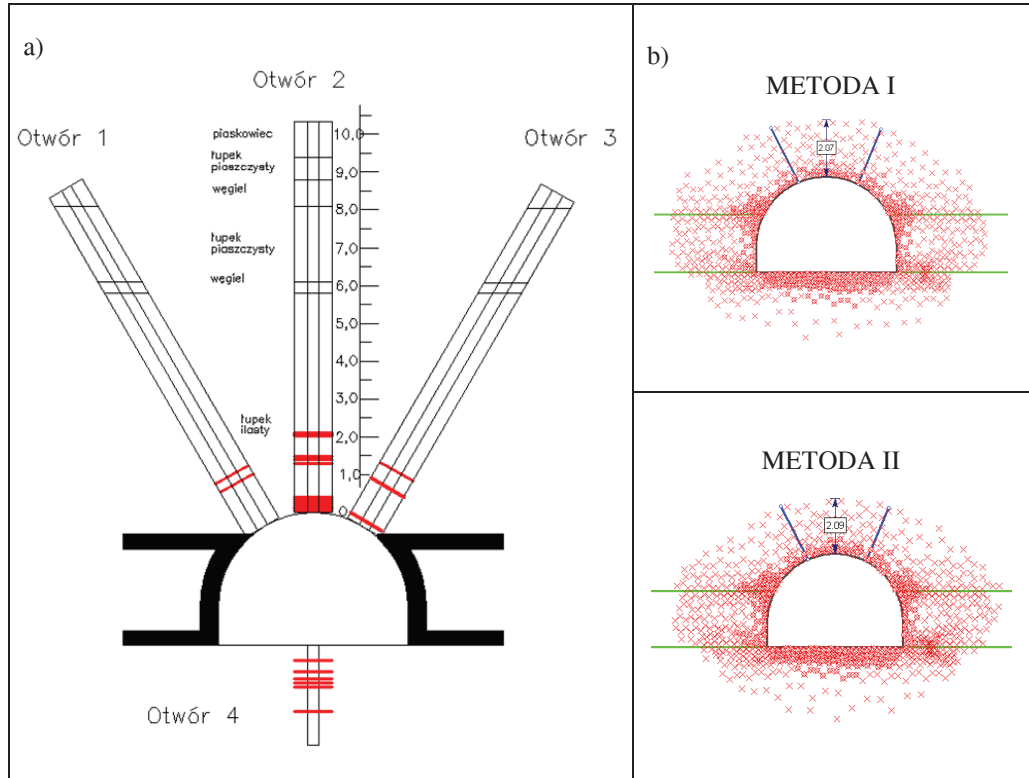
- zerowe przemieszczenia na wszystkich krawędziach tarczy w kierunku pionowym i poziomym,
- hydrostatyczny stan naprężeń,
- ciśnienie pierwotne $p_z = p_x = 13,1 \text{ MPa}$.

Wyniki pomiarów dołowych oraz obliczeń numerycznych strefy spękań wokół chodnika przyścianowego w zależności od położenia frontu ściany przedstawiono na rysunkach 4–8.



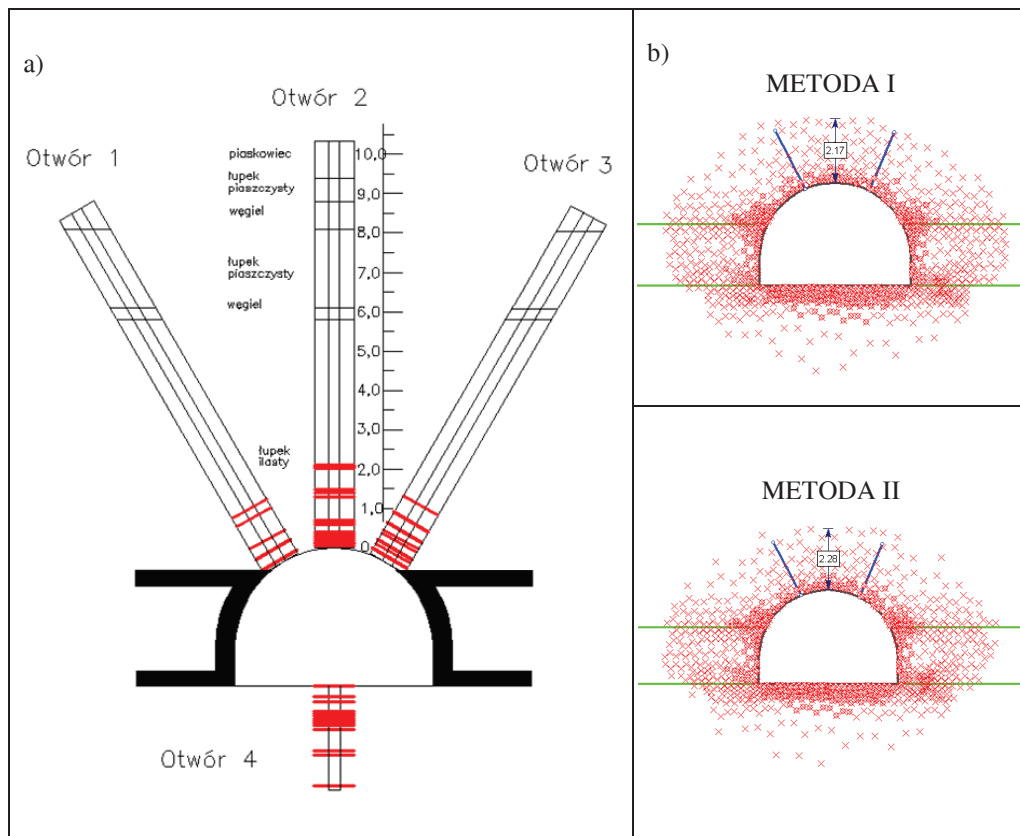
Rys. 4. Wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych strefy spękań w chodniku przyścianowym w odległości 100 m przed frontem ściany: a – wyniki badań dołowych, b – wyniki obliczeń modelowania numerycznego; 1, 2, 3, 4 – otwory

Fig. 4. Results of measurements and numerical calculations of fractured zone in longwall entry at the distance of 100 m before the front of longwall: a – results of underground investigations, b – results of calculations from numerical modelling; 1, 2, 3, 4 – holes



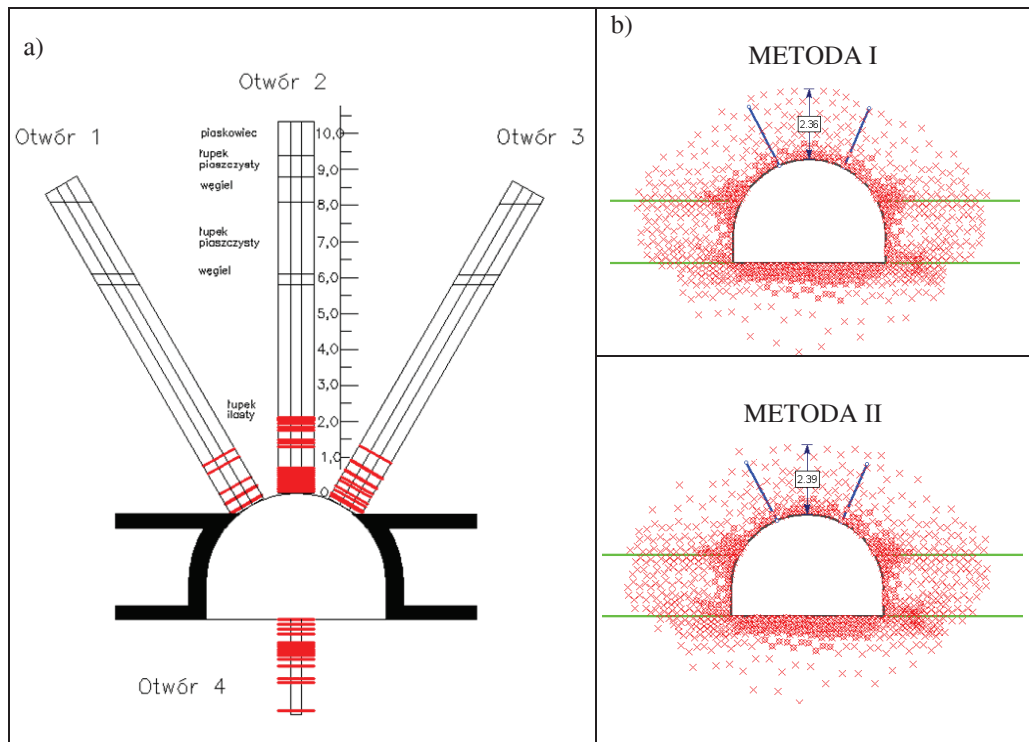
Rys. 5. Wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych strefy spękań w chodniku przyścianowym w odległości 86 m przed frontem ściany: a – wyniki badań dołowych, b – wyniki obliczeń modelowania numerycznego; 1, 2, 3, 4 – otwory

Fig. 5. Results of measurements and numerical calculations of fractured zone in longwall entry at the distance of 86 m before the front of longwall: a – results of underground investigations, b – results of calculations from numerical modelling; 1, 2, 3, 4 – holes



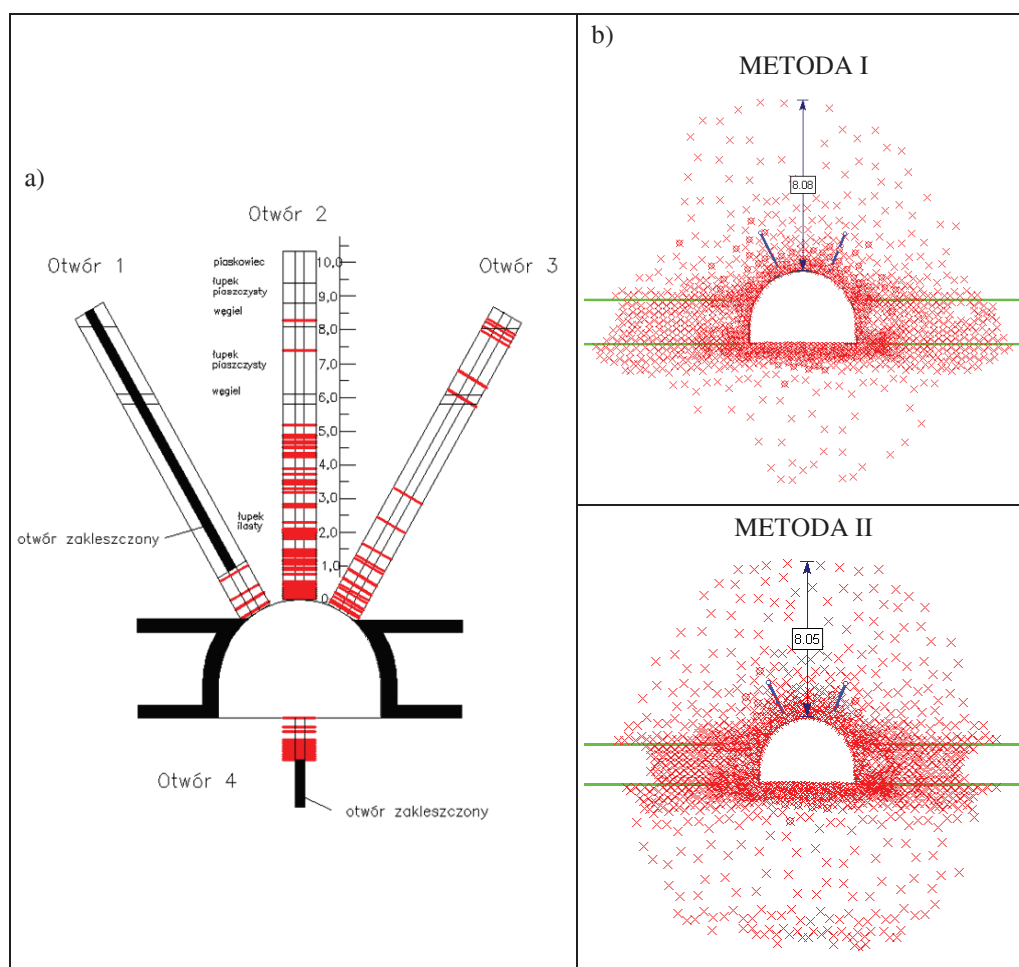
Rys. 6. Wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych strefy spękań w chodniku przyścianowym w odległości 72 m przed frontem ściany: a – wyniki badań dołowych, b – wyniki obliczeń modelowania numerycznego; 1, 2, 3, 4 – otwory

Fig. 6. Results of measurements and numerical calculations of fractured zone in longwall entry at the distance of 72 m before the front of longwall: a – results of underground investigations, b – results of calculations from numerical modelling; 1, 2, 3, 4 – holes



Rys. 7. Wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych strefy spękań w chodniku przyścianowym w odległości 43 m przed frontem ściany: a – wyniki badań dołowych, b – wyniki obliczeń modelowania numerycznego; 1, 2, 3, 4 – otwory

Fig. 7. Results of measurements and numerical calculations of fractured zone in longwall entry at the distance of 43 m before the front of longwall: a – results of underground investigations, b – results of calculations from numerical modelling; 1, 2, 3, 4 – holes



Rys. 8. Wyniki pomiarów oraz obliczeń numerycznych strefy spękań w chodniku przyścianowym w odległości 15 m przed frontem ściany: a – wyniki badań dołowych, b – wyniki obliczeń modelowania numerycznego; 1, 2, 3, 4 – otwory

Fig. 8. Results of measurements and numerical calculations of fractured zone around longwall entry, at the distance of 15 m before the front of longwall: a – results of underground investigations, b – results of calculations from numerical modelling; 1, 2, 3, 4 – holes

Z rysunków tych wynika, że pierwsze szczeliny i spękania pojawiły się nad wyrobiskiem już w odległości 100 m przed frontem ściany, na wysokości około 2 m (rys. 4). Strefa spękanych skał praktycznie nie zmieniła swojego zasięgu wraz ze zbliżaniem się ściany aż do odległości mniejszej niż 43 m. Wyraźne zwiększenie wielkości strefy spękań zaobserwowano w odległości 15 m od frontu ściany, a jej zasięg wynosił wówczas około 8 m (rys. 8).

Analizując wyniki obliczeń numerycznych strefy spękań wokół chodnika przyścianowego, można stwierdzić, że uzyskane kształty i wielkość zasięgu tej strefy są w znacznym stopniu zgodne z wynikami pomiarów dołowych. W przypadku zastosowanych metod obliczeniowych otrzymano zbliżone wartości zasięgu spękań, jedynie

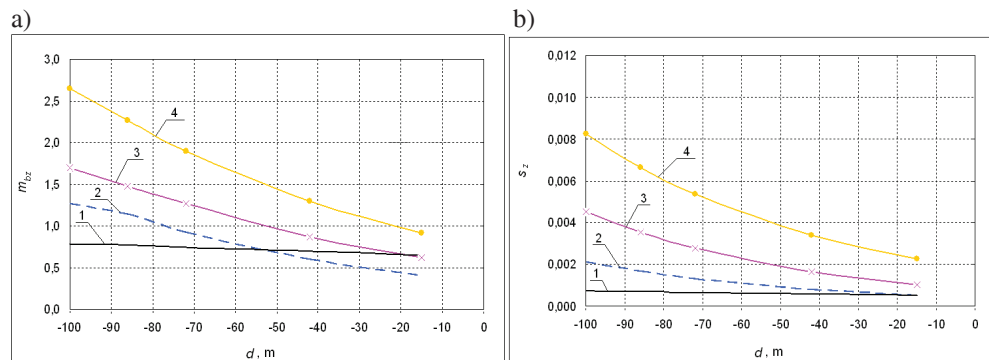
w ostatnim modelu (15 m przed frontem ściany) można zaobserwować różnice w kształcie obszaru zniszczenia. W przypadku zastosowania metody I znacznemu zniszczeniu uległ pokład węgla, natomiast w przypadku metody II pokład ten został naruszony w nieco mniejszym stopniu, kosztem zwiększonego zniszczenia skał spągowych. W celu porównania, w tabelicy 2 przedstawiono maksymalny zasięg strefy zniszczenia skał stropowych w strzałce wyrobiska, uzyskany z pomiarów dołowych oraz obliczeń.

Tablica 2. Zasięg strefy zniszczenia w stropie chodnika 6/615

Odległość od czoła ściany, m	Wyniki pomiarów w strzałce wyrobiska, m	Wyniki obliczeń w strzałce wyrobiska, m		Różnica pomiar – obliczenia, %	
		METODA I	METODA II	METODA I	METODA II
-100	2,00	2,07	2,07	+3,5	+3,5
-86	2,00	2,07	2,09	+3,5	+4,5
-72	2,10	2,17	2,28	+3,3	+8,6
-43	2,18	2,36	2,39	+8,3	+9,6
-15	8,21	8,08	8,06	-1,6	-1,8

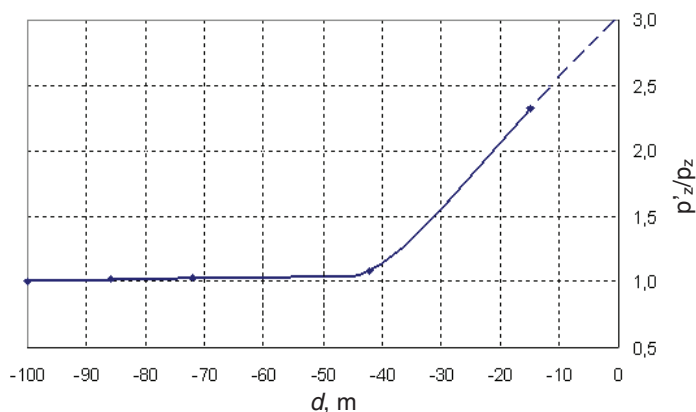
Zestawione w tabelicy 2 wartości potwierdziły dużą zgodność uzyskanych wyników obliczeniowych z pomiarami dołowymi, a uzyskane różnice nie przekraczały 10%. Taką różnicę wykazał model dla odległości 43 m przed frontem ściany, niemniej jednak ze względu na przeszacowanie zasięgu spękań, uzyskany wynik, z uwagi na bezpieczeństwo, można uznać za korzystny. Odwrotną sytuację zaobserwowano w ostatnim modelu (15 m przed czołem ściany), gdzie wielkość strefy obliczeniowej była mniejsza od rezultatów pomiarów o około 2%.

Omówione w niniejszym artykule wyniki otrzymano przy założeniu odpowiednich warunków brzegowych analizowanych wariantów modeli numerycznych, w których w zależności od położenia frontu ściany zmniejszono wartości parametrów m_{bz} i s_z w kryterium Hoeka-Browna według rysunku 9 (metoda I), bądź zwiększono wartość obciążenia na zewnętrznych krawędziach modelu według rysunku 10 (metoda II).



Rys. 9. Wartości parametrów m_{bz} i s_z w kryterium Hoeka-Browna przyjęte do obliczeń strefy zniszczenia wokół chodnika przyścianowego – metoda II: a – parametr m_{bz} , b – parametr s_z , d – odległość od czoła ściany, 1 – węgiel, 2 – lupek ilasty, 3 – lupek piaszczysty, 4 – piaskowiec

Fig. 9. Value of parameters m_{bz} and s_z in the Hoek-Brown criterion assumed for calculations of destruction zone around longwall entry – method II: a – parameter m_{bz} , b – parameter s_z , d – distance from the face, 1 – coal, 2 – mudstone, 3 – arenaceous shale, 4 – sandstone



Rys. 10. Wartości stosunku naprężeń p'_z/p_z przyjęte do obliczeń strefy zniszczenia wokół chodnika przyścianowego – metoda II: d – odległość od czoła ściany

Fig. 10. Value of stresses' ratio p'_z/p_z assumed for calculations of destruction zone around longwall entry – method II: d – distance from the face

Bardzo interesujący jest otrzymany przebieg wzrostu naprężeń w zależności od odległości od czoła ściany, przedstawiony na rysunku 10. Wynika z niego, że w analizowanym przypadku oddziaływanie frontu eksploatacji powodowało wzrost naprężeń w górotworze od około 40 m przed czołem ściany. Od tej odległości wartość naprężeń wzrastała, osiągając 15 m przed ścianą – wartość blisko 2,5-krotnie większą od naprężeń pierwotnych. Dokonując ekstrapolacji uzyskanej krzywej (linia przerywana) można stwierdzić, że na linii czoła ściany naprężenia będą 3-krotnie większe od naprężeń pierwotnych.

PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule metody obliczeniowe z wykorzystaniem programu Phase², którego podstawę stanowi metoda elementów skończonych, świadczą o możliwości rozwiązania problemu modelowania strefy spękań dwoma odrębnymi metodami. W pierwszej z nich, założono zmniejszenie wartości wybranych parametrów mechanicznych skał w kryterium Hoeka-Browna wraz ze zbliżającym się frontem ściany. Metoda druga polega na zwiększaniu naprężeń wokół chodnika wskutek oddziaływania frontu eksploatacji. Obie z zaprezentowanych metod pozwalają na uzyskiwanie bardzo zbliżonych wyników obliczeń zasięgu strefy spękań.

Prawidłowe wyznaczenie zasięgu strefy spękań górotworu wokół wyrobiska ma duże znaczenie w praktyce górniczej, szczególnie przy doborze i projektowaniu obudowy chodników przyścianowych. Oddziaływanie frontu eksploatacji powoduje bowiem, że powstająca wokół tych wyrobisk strefa spękań zwiększa się, wpływając na wzrost wartości obciążenia obudowy. Ponadto, właściwe określenie zasięgu strefy spękań jest jednym z podstawowych elementów w procesie projektowania obudowy kotwiowej wyrobisk górniczych.

Literatura

1. Bieniawski Z.T. (1987): Strata control in mineral engineering. Rotterdam, Student edition A.A. Balkema.
2. Brady B., Brown E. (2006): Rock mechanics for underground mining. The Netherlands, Springer, Third edition 2004, reprinted with corrections 2006.
3. Hoek E. (1999): Rock engineering – course notes. Toronto, Evert Hook Consulting Engineer Inc.
4. Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002): Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proceedings NARMS-TAC Conference, Toronto, s. 267-273.
5. Hoek E. (2006): Practical Rock Engineering. Rocscience Inc. (www.rocscience.com).
6. Kaczmarek J., Łydźba D. (1994): Przydatność hipotezy wytrzymałościowej Hoeka-Browna do określania wyężenia skał Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej nr 65, Seria Konferencje nr 33, s. 87-94.
7. Małkowski P., Niedbalski Z., Majcherczyk T. (2008): Konwergencja wyrobisk chodnikowych na podstawie wyników obliczeń numerycznych i ich weryfikacja pomiarami in situ. *Górnictwo i Geoinżynieria* R. 32, z. 1.
8. Majcherczyk T., Małkowski P. (2003): Wpływ frontu ściany na wielkość strefy spękań wokół wyrobiska przyścianowego. *Wiadomości Górnicze* nr 1.
9. Myszkowski J. (2008): Badanie rozwoju nieciągłości stropu zasadniczego przed frontem ściany. *Przegląd Górniczy* nr 11–12.
10. Peng S. (2006): Longwall Mining. 2nd edition. Morgantown, West Virginia University Press.
11. Prusek S., Walentek A. (2005): Wielkość strefy zniszczenia górotworu wokół wyrobiska korytarzowego w oparciu o kryterium Hoeka-Browna. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje nr 49, s. 13–24.
12. Prusek S., Walentek A. (2007): Numerical modelling the failure zone in the rock mass around a heading based on the Hoek-Brown criterion. *Szkoła Podzemnej Razrobotki, Dnepropetrowsk, Ukraina*, s. 95–105.
13. Prusek S. (2008): Modification of parameters in the Hoek-Brown failure criterion for gate road deformation reduction by means of numerical modeling. *Glückauf* Nr 9, s. 529–534.
14. Prusek S. (2008): Metody prognozowania deformacji chodników przyścianowych w strefach wpływu eksploatacji z zawałem stropu. Prace Naukowe GIG nr 874.
15. Skrzyński K. (2001): Nowy typoszereg kształtowników na odrzwiowe obudowy chodnikowe. Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej, Seria Konferencje nr 40, s. 443–452.
16. Stoiński K. i inni (1996): Przegląd i kierunki rozwoju obudowy wyrobisk korytarzowych i komorowych w kopalniach węgla kamiennego, Cz. 3: Stalowe obudowy odrzwiowe dla wyrobisk korytarzowych i komorowych. Prace Naukowe GIG nr 811.

Niniejszy artykuł powstał w wyniku realizacji pracy statutowej GIG nr 11010568-152.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Grzegorz Mutke