

Mirosława Bukowska, Jerzy Gawryś**

WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNE WĘGLI GZW W ASPEKCIE WYRZUTÓW GAZÓW I SKAŁ

1. Wprowadzenie

Wyrzuty skalno-gazowe są zaliczane do zjawisk naturalnych występujących w górotworze naruszonym eksploatacją górniczą. Polegają na gwałtownym wyrzuceniu rozdrobnionych skał i gazu z calizny do wyrobiska w ciągu określonego czasu, mogą, zatem być również katastrofalne w skutkach. Zjawiska te występują podczas eksploatacji podziemnej różnych surowców, w tym węgla, rud metali, soli i powstają w wyniku zmiany warunków termodynamicznych w górotworze (przemiany fazowe i destrukcja górotworu).

Górotwór jest ośrodkiem nieciągłym. Nieciągłości są wypełnione gazami, na przykład metanem, dwutlenkiem węgla i azotem, które mogą sorbować na powierzchniach skał lub w wyniku dyfuzji wchodzić w ich struktury wewnętrzne, przy czym gaz jako samodzielne medium nie może być przyczyną wyrzutów skalno-gazowych. Również duża pojemność sorpcyjna węgla nie wskazuje na skłonność do wyrzutów, lecz dopiero prędkość wydzielania gazu z calizny węglowej (większe gradienty ciśnienia gazu) może stanowić wartość kryterialną przy ocenie tej skłonności.

Po raz pierwszy zdarzenie wyrzutu węgla i metanu odnotowano w połowie XIX wieku we Francji w kopalni Rochefort. Pierwszy odnotowany wyrzut węgla i dwutlenku węgla na obszarze dzisiejszej Polski miał miejsce w 1894 roku w Dolnośląskim Zagłębiu Węglowym, w kopalni Cezar-Zofia na głębokości 80 m. W Górnośląskim Zagłębiu Węglowym wyrzuty węgla i metanu występują w węglach koksowych w SW części zagłębia. Pierwszy wyrzut węgla i metanu w GZW wystąpił w 1967 roku podczas eksploatacji pokładu 505/1 w kopalni „Jastrzębie” na głębokości 400 m. W latach 70. i 80. XX wieku miały miejsce wyrzuty węgla i metanu w pokładach grupy 300 i 400 w kopalni „Zofiówka”, eksploatowanych na głębokościach 500–580 m oraz w pokładzie 363 w kopalniach „Pniówek” i „Brzeszcze”. Wyrzuty

* Zakład Tępań i Mechaniki Górotworu, Główny Instytut Górnictwa, Katowice

metanu i węgla w kopalniach „Pniówek” (2002 r.) i „Zofiówka” (2005 r.) były związane również z pokładami grupy 400, ale zalegającymi na głębokościach 950–1000 m. W wyniku tego ostatniego, do wyrobiska zlokalizowanego w pokładzie 409/4, zostało wyrzuconych 200 Mg węgla i 12 000 m³ metanu.

Wyrzuty skalno-gazowe występują w górotworze skłonnym do tego typu zjawisk, podobnie jak w przypadku występowania tąpnięć (górotwór musi być skłonny do tupań, aby to zdarzenie zaistniało w wyrobisku) [2–4]. Do czynników naturalnych sprzyjających wyrzutom są między innymi właściwości skał wynikające ze stopnia zdiagenezowania złoża lub lokalnie nawet zmetamorfizowania, tektonika rejonu, nasycenie złoża gazami wyrażające się wielkością ciśnienia złożowego, naprężenia panujące w górotworze i inne. Czynnikiem górniczym, w wyniku którego może wystąpić wyrzut skalno-gazowy, są roboty udostępniające pokład.

W ostatnim czasie, wobec niewielu danych dostępnych w literaturze naukowej, uwaga autorów została skierowana na właściwości fizyczne węgla kamiennych, w tym mechaniczne, w aspekcie ich wyrzutowości. Ze względu na to, że węgle różnią się właściwościami fizycznymi, wartości niektórych z nich zostały przedstawione w niniejszym artykule.

2. Wyniki badań właściwości fizycznych węgla w aspekcie skłonności do wyrzutów skalno-gazowych

W GZW występują węgle od energetycznych przez koksowe do antracytów, przy czym wyrzuty węgla i metanu występują w węglach zdiagenezowanych i/lub zmetamorfizowanych. Stopień ich zmetamorfizowania wzrasta z głębokością ze wschodu na zachód [9]. Wielu badaczy, na podstawie własnych doświadczeń, stwierdziło, że wyrzuty węgla i metanu w GZW zachodzą w rejonach, w których węgiel jest przeobrażony strukturalnie — zmylonityzowany [7], co świadczy o zmieniających się warunkach ciśnienia i temperatury w górotworze. Mylonityzacja jest procesem geologicznym, który zachodzi w warunkach niskiego stopnia metamorfizmu i polega na rozkruszeniu aż do zupełnego roztrucia i zmiany tekstury masy mylonitycznej na kierunkową pod wpływem nacisków tektonicznych. Według innych strefa zmylonityzowana może stanowić barierę odgazowania pokładu [5]. Podobne zmiany zachodzą również w górotworze w miejscach zaburzeń sedimentacyjnych (np. wyklinowania) i tektonicznych (dyslokacje nieciągłe — uskoki i ciągłe — fleksury i przegięcia pokładów), w których może wystąpić podwyższona metanonośność i obniżona zwięzłość węgla.

Właściwości geomechaniczne węgla i ich struktura, w szczególności wytrzymałość, porowatość i szczelinowatość są jednymi z czynnikami, które mają wpływ na skłonność do wyrzutów węgla i metanu. Wykazano zależność między zawartością metanu w węglu a strukturą węgla, wyrażającą się liczbą spękań w pokładzie [8]. Według Majcherczyka [11] niektóre parametry fizyko-mechaniczne mogą być zwiastunami zagrożenia wyrzutem skalno-gazowym. Są to, na przykład zmiany wytrzymałości, zwięzłości i struktury węgla — między innymi zmiana jego połysku — czyli przejście z litotypów błyszczących do matowych w wyniku mylonityzacji, oraz pojawienie się wkładek węgla o niskiej wytrzymałości a także wzrost ich grubości.

Wiele hipotez i modeli matematycznych wyjaśniających mechanizmy wyrzutu węgla i metanu oraz metod obliczeń grubości warstwy węgla zabezpieczającej załogę przodka przed wyrzutem i obliczeń zasięgu strefy wyrzutowej opiera się na wynikach badań laboratoryjnych. Wśród parametrów fizycznych uwzględnia się: współczynnik Poissona, gęstość, ciężar właściwy, moduł Younga, kąt tarcia wewnętrznego, spójność, wytrzymałość na ściskanie, wskaźnik zwięzłości i inne. Przy modelowaniu wyrzutów skał i gazów wykorzystuje się również współczynnik tarcia masy wyrzutowej. Jednakże trudno znaleźć w publikacjach naukowych dokładne jego wartości dla różnych litotypów węgla. Kidybiński wskazuje na potrzebę opracowania numerycznego dynamicznego modelu makrostruktury procesu wyrzutowego w warunkach GZW [10]. Wartości współczynnika tarcia są w tym przypadku wykorzystywane w modelowaniu utraty więzi między cząstkami węgla w pokładzie, w wyniku narastającej strefy desorpcji oraz wzrostu ciśnienia gazu wolnego.

W celu oceny parametrów fizyko-mechanicznych węgla, w aspekcie ich skłonności do wyrzutów węgla i metanu w obszarze GZW, autorzy artykułu przeprowadzili badania próbek węgla z kopalń i pokładów, które przedstawiono w tabeli 1. Wydzielono w niej grupę węgla nieskłonnych i skłonnych do wyrzutów, z zaznaczeniem tych pokładów, w których w przeszłości nastąpił wyrzut węgla i metanu.

TABELA 1

Wykaz próbek węgla pobranych z obszarów górniczych kopalń GZW

Skłonność węgla do wyrzutów	Kopalnia, numer pokładu
Węgiel nieskłonny do wyrzutów	Janina, pokład 118 Sobieski, pokład 209 Brzeszcze, pokład 405/1
Węgiel skłonny do wyrzutów	Zofiówka, pokład 404/4 Zofiówka, pokład 409/3 Zofiówka, pokład 418/1-2 Pniówek, pokład 404/1 Pniówek, pokład 404/2 Pniówek, pokład 363* Zofiówka, pokład 409/4*

* pokład, w którym w przeszłości nastąpił wyrzut węgla i metanu.

Węgle różnią się właściwościami fizycznymi, w tym geomechanicznymi, między innymi wytrzymałością na ściskanie. Wytrzymałość na ściskanie koreluje z wieloma parametrami geomechanicznymi skał, w tym z tymi, które mogą wskazywać na skłonność węgla i metanu do wyrzutów. Wytrzymałość na ściskanie ma istotny wpływ na zawartość metanu w węglu, która zmniejsza się ze wzrostem wytrzymałości.

W analizie wyników badań parametrów fizyko-mechanicznych węgla, wykonanej przez autorów (tab. 2), uwzględniono również unikatowe dane z badań wykonanych na próbkach węgla pobranych z rejonu wyrzutu węgla i metanu w kopalni „Zofiówka” do którego doszło w 2005 roku w chodniku transportowym D-6 w pokładzie 409/4. W przebadanych przez autorów próbkach węgla zakwalifikowanych jako skłonne do wyrzutów (tab. 1), przeważa

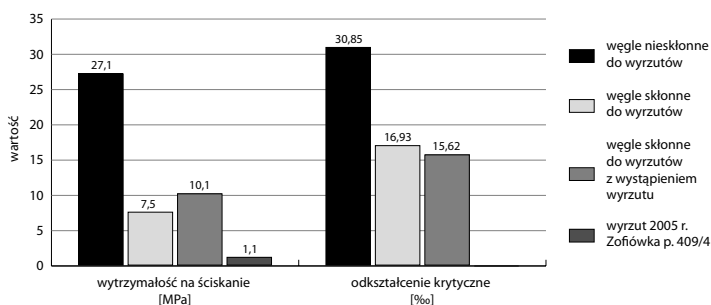
węgiel błyszczący, lokalnie warstwowany węglem półbłyszczącym. Wśród węgla uznanych za niesklonne do wyrzutów są również węgle półmatowe i matowe.

TABELA 2
Wartości średnie parametrów fizyko-mechanicznych przebadanych węgla skłonnych i niesklonnych do wyrzutów

Parametr	Pokłady węgla niesklonne do wyrzutów	Pokłady węgla skłonne do wyrzutów	Pokłady węgla skłonne do wyrzutów, w których wystąpił wyrzut	
	wartość parametru <i>od-do</i>	wartość parametru <i>od-do</i>	wartość parametru w sąsiedztwie miejsca wyrzutu <i>od-do</i>	wartość parametru z rejonu wyrzutu (KWK „Zofiówka” chodnik transportowy D-6, pokład 409/4, 2005 r.) [11]
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	21,3–32,4	5,2–11,5	8,8–11,3	1,1–2,2
Gęstość objętościowa, g/cm ³	1,25–1,29	1,23–1,27	1,24	1,19–1,21
Wskaźnik zwięzłości, bezwym.	0,92–1,33	poniżej 0,4-0,42	poniżej 0,4	0,2–0,5
Moduł Younga, MPa	1095–2081	517–1181	972–1169	541–1376
Współczynnik Poissona, bezwym.	0,14–0,16	0,12–0,24	0,18–0,21	brak danych
Gęstość, g/cm ³	1,36–1,44	1,35–1,39	1,36–1,38	
Odształcenie krytyczne, ‰	18,63–41,96	14,45–18,60	14,24–17,00	
Moduł pokrytyczny, MPa	4626–7523	454–1668	1631–1992	
Spójność, MPa; oznaczona \perp do uławicenia	1,00–1,92	0,57–2,04	0,24–0,63	
Spójność, MPa; oznaczona \parallel do uławicenia	0,91–1,34	0,30–3,54	0,42–1,20	
Kąt tarcia wewnętrznego, stopnie; oznaczony \perp do uławicenia, bezwym.	32–47	21–38	40–45	
Kąt tarcia wewnętrznego, stopnie; oznaczony \parallel do uławicenia, bezwym.	38–40	23–44	37–39	
Współczynnik tarcia statycznego; oznaczony \perp do uławicenia, bezwym.	0,68–0,83	0,55–0,64	0,56–0,59	
Współczynnik tarcia statycznego; oznaczony \parallel do uławicenia, bezwym.	0,60–0,82	0,50–0,81	0,54–0,56	
Współczynnik tarcia dynamicznego; oznaczony \perp do uławicenia, bezwym.	0,57–0,67	0,50–0,56	0,52–0,54	
Współczynnik tarcia dynamicznego; oznaczony \parallel do uławicenia, bezwym.	0,51–0,71	0,46–0,68	0,47–0,50	

Biorąc pod uwagę wytrzymałość węgla na ściskanie, niektórzy badacze przyjmują wartość z przedziału 1,0–14,0 MPa jako charakterystyczną dla węgla skłonnych do wyrzutów, w szczególności, gdy występują w nich przewarstwienia węgla o niskiej wytrzymałości. Wyższe wartości wytrzymałości na ściskanie przypisuje się węglom (pokładom) niesklonnym do wyrzutów.

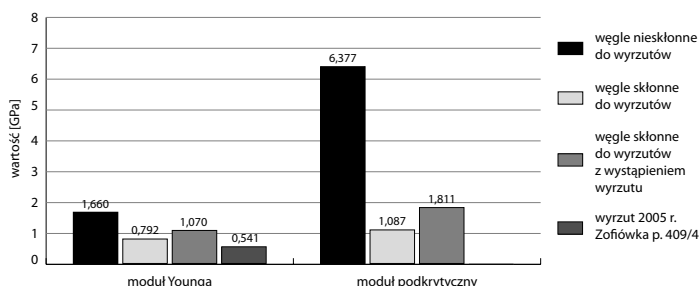
Dane zestawione w tabeli 2, które dotyczą węgla uznanych za skłonne do wyrzutów, wskazują na niską ich wytrzymałość od 1,1 do 11,5 MPa (rys. 1). Dla węgla uznanych za niesklonne do wyrzutów wytrzymałość na ściskanie przyjmuje wartości powyżej 20 MPa. Jest to zgodne z cytowanymi wyżej przedziałami zmienności wytrzymałości na ściskanie dla węgla skłonnego i niesklonnego do wyrzutów węgla i metanu. Na krzywej naprężenie-odkształcenie podłużne przedstawiające przebieg niszczenia próbki skalnej w próbie ściskania w maszynie wytrzymałościowej, naprężeniu maksymalnym (krytycznemu) odpowiada odkształcenie krytyczne. Wartości średniego odkształcenia krytycznego dla przebadanych węgla różnią się znacznie między sobą w obrębie grup węgla niesklonnego i skłonnego do wyrzutów (rys. 1).



Rys. 1. Średnie wartości wytrzymałości na ściskanie i krytycznego odkształcenia podłużnego przebadanych węgla GZW

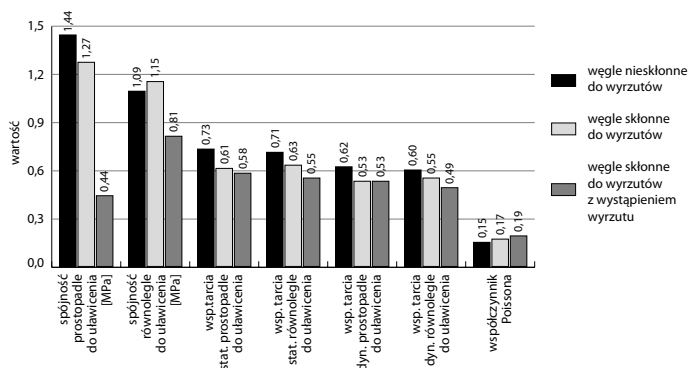
Jednym ze wskaźników charakteryzujących zdolność do wyrzutów węgla i gazu jest zwięzłość węgla, wyrażona wskaźnikiem zwięzłości, określanym empirycznie w aparacie Syskova metodą Protodiakonowa. W polskim górnictwie węgla kamiennego, zgodnie z przepisami Prawa geologicznego i górniczego [12], przyjmuje się wartość wskaźnika zwięzłości mniejszą niż 0,3 jako kryterialną, poniżej której występują zjawiska wyrzutowe. Przebadane przez autorów węgle, uznawane za skłonne do wyrzutów, wykazują słabą zwięzłość, poniżej wartości uznawanej za kryterialną, w przeciwieństwie do węgla zaliczonych do grupy niesklonnego do wyrzutów.

Węgle wykazują również spadek wartości modułu Younga od węgla niesklonnego do skłonnego do wyrzutów (rys. 2), przy czym wartości te nie odbiegają od wartości modułu



Rys. 2. Średnie wartości modułu Younga i modułu podkrytycznego przebadanych węgla GZW

Younga węgla z innych ogniw litostratygraficznych górnego karbonu GZW [4]. Wartości współczynnika Poissona oznaczone przez autorów na próbkach węgla zmieniają się w przedziale od 0,15 do 0,19 (rys. 3), przy czym wzrastają w kierunku węgla, które przejawiają skłonność do wyrzutów. Ze względu na to, że istnieje zależność między przedkrytycznymi i pokrytycznymi właściwościami geomechanicznymi skał [1], trendy zmian wartości modułu pokrytycznego, wyznaczanego z pokrytycznej części krzywej naprężeniowo-odkształceniowej są zgodne z tendencją zmian wartości modułu Younga wyznaczanego z części przedkrytycznej — spadek w kierunku węgla skłonnych do wyrzutów (rys. 2).



Rys. 3. Średnie wartości spójności, współczynnika tarcia i współczynnika Poissona

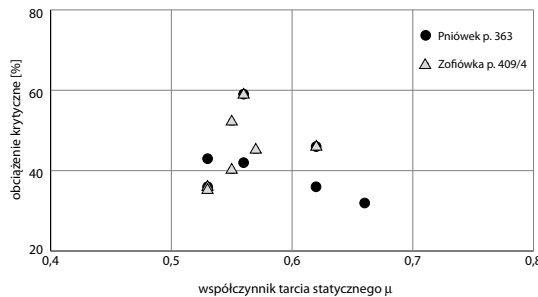
Tarcie wewnętrzne charakteryzuje opór, jaki stawiają cząstki skalne tego samego ciała naprężeniom ścinającym. Opory tarcia wewnętrznego wynikają z istnienia sił spójności i zależą od swobody przemieszczania się cząsteczek danego ciała. Miarą tarcia wewnętrznego jest kąt tarcia wewnętrznego, którego wartości dla węgla wyrzutowych zawierają się w przedziale 16–35° [6]. Badania przeprowadzone przez autorów artykułu wykazały, że wartości kąta tarcia wewnętrznego węgla uznawanych za skłonne do wyrzutów i niesklonne nie różnią się znacznie i oscylują wokół wartości kąta tarcia wewnętrznego, który wyznacza górną granicę przedziału zmienności jego wartości podaną przez Gila i Świdzińskiego [6]. Wartości spójności wyznaczone dla węgla skłonnych i niesklonnych do wyrzutów różnią się znacznie — średnio o około 50% i maleją w kierunku węgla skłonnych do wyrzutów (rys. 3). Wyraźne różnice w wartościach spójności zaobserwowano między węglami z pokładów, w których w przeszłości nastąpił wyrzut węgla i metanu a węglami pozostałymi. W tym przypadku spójność przyjmowała wartość poniżej 1,0 MPa, bez względu na kierunek przyłożenia siły normalnej w stosunku do uławicenia węgla.

Wielkością charakteryzującą siłę tarcia jest współczynnik tarcia — dynamiczny (kinetyczny) podczas ruchu lub statyczny, gdy zostaje zapoczątkowany proces przesuwania stykających się powierzchni różnych ciał. W eksperymentach przeprowadzonych przez autorów powierzchnie te powstały w wyniku realizacji oznaczenia wytrzymałości na ścinanie, które przeprowadzono zgodnie z zaleceniami ISRM [13]. Wartość statycznego współczynnika tar-

cia oznaczono bezpośrednio po ścinaniu, według definicji (formuły matematycznej) współczynnika tarcia. Różnica między wartością współczynnika tarcia statycznego a dynamicznego może być różna, w zależności od chropowatości stykających się powierzchni, ale zwykle zachodzi zależność:

$$\text{współczynnik tarcia statycznego} > \text{współczynnik tarcia dynamicznego}$$

co również potwierdzają przeprowadzone badania (rys. 3). Średnie wartości współczynników tarcia statycznego oznaczone prostopadle i równoległe do uwarstwienia w obrębie grup charakteryzujących skłonność węgla do wyrzutów różnią się nieznacznie, co wskazuje, że kierunek działania siły, która nie powoduje jeszcze przemieszczenia względem siebie fragmentów badanej próbki, nie ma istotnego wpływu na ich wartość. Przykładem jest zbiór wartości współczynników tarcia statycznego dla węgla z pokładów 363 w kopalni „Pniówek” i 409/4 w kopalni „Zofiówka” (rys. 4). Badania wykazały jednak spadek wartości współczynnika tarcia statycznego od węgla niesklonnych do wyrzutów do skłonnych, przy czym w przypadku badanych próbek węgla różnica wynosi około 20% dla pokładów, w których w przeszłości odnotowano wyrzut węgla i metanu.



Rys. 4. Wartości współczynnika tarcia statycznego węgla dla zadanych warunków obciążenia na przykładzie kopalń „Pniówek” i „Zofiówka”

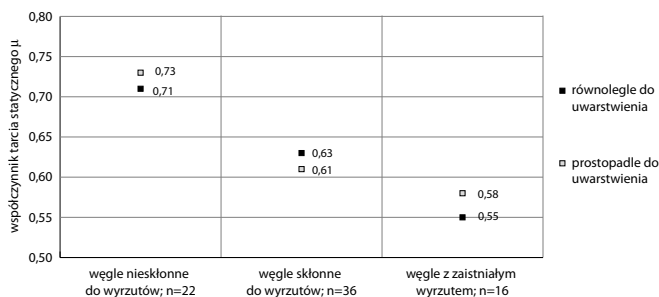
3. Podsumowanie

Dotychczasowa wiedza empiryczna o właściwościach fizycznych węgla w aspekcie ich wyrzutowości określa wskaźniki kryterialne tego procesu. Są wśród nich: wytrzymałość na ściskanie i zwięzłość. Na podstawie wartości tych parametrów, oraz biorąc pod uwagę wystąpienie zjawiska wyrzutu węgla i metanu w pokładach węgla w GZW, węgle warstw libiąskich, łaziskich, orzeskich i rudzkich, które wytypowano do badań, podzielono na niesklonne i skłonne do wyrzutów węglowo-gazowych.

Za pomocą badań wykazano, że średnie wartości niektórych parametrów fizyko-mechanicznych węgla skłonnych do wyrzutów i niesklonnych znacznie się różnią. Większość prezentowanych w artykule wartości parametrów fizycznych węgla GZW, w tym mechanicz-

nych, nie należy traktować jako kryterialnych dla węgli skłonnych do wyrzutów i niesłonnych. Kierunek ich zmian w przyjętych przez autorów grupach skłonności węgli do wyrzutów jest zgodny z dotychczasową wiedzą empiryczną o zjawiskach gazodynamicznych. Znane są zależności między wytrzymałością na ściskanie a innymi parametrami/wskaźnikami z grupy parametrów mechanicznych, zatem bardziej szczegółowe dalsze badania ich wartości w aspekcie wyrzutowości mogą w przyszłości być podstawą wyznaczenia ich wartości kryterialnych.

Badając właściwości mechaniczne węgli GZW z warstw libiąskich, łaziskich, orzeskich i rudzkich w aspekcie występowania zjawisk gazodynamicznych, szczególną uwagę zwrócono na współczynnik tarcia statycznego. Jego wartości wyraźnie różnią się w zależności od grupy skłonności węgli do wyrzutów (rys. 5). Na tej podstawie, uwzględniając fizykę zjawiska, zaproponowano wartość współczynnika tarcia statycznego jako kryterium wyrzutowe dla węgli kamiennych, wstępnie na poziomie 0,65.



Rys. 5. Przedziały zmienności wartości kryterialnych statycznego współczynnika tarcia dla węgli skłonnych i niesłonnych do wyrzutów (n — liczba próbek)

LITERATURA

- [1] Bukowska M.: Kształt charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych skał karbońskich oraz korelacje między parametrami fazy przedkrytycznej i pokrytycznej. [w]: Geotechnika górnicza i budownictwo podziemne. Dolnośląskie Wydaw. Edukacyjne, Wrocław 1997, s. 67–76
- [2] Bukowska M.: Mechanical Properties of Carboniferous Rocks in the Upper Silesian Coal Basin under Uniaxial and Triaxial Compression Tests. Journal of Mining Science. 2005, No. 2, vol. 41, pp. 129–133. Springer Science+Business Media, Inc
- [3] Bukowska M.: The Probability of Rockburst Occurrence in the Upper Silesian Coal Basin Area Dependent on Natural Mining Conditions. Journal of Mining Science, 2006, Volume 42, No. 6, pp. 570–577. Springer New York
- [4] Bukowska M. (red.): Kompleksowa metoda oceny skłonności do tąpnięć górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wydawnictwo GIG. Katowice 2009
- [5] Frączek R.: Rozpoznanie i zwalczanie zagrożenia wyrzutami gazów i skał w kopalniach węgla kamiennego. Politechnik Śląska. Gliwice 2007
- [6] Gil H., Świdziński A.: Wyrzuty gazów i skał. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 1988

- [7] *Jakubów A., Tor A., Wierzbicki M.*: Własności strukturalne węgla w rejonie wyrzutu węgla i gazu w chodniku transportowym D-6 w pokładzie 409/4 KWK Zofiówka. XIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna. Górnicze Zagrożenia Naturalne, Głębokość Eksploatacji a Zagrożenia Górnicze, 2006, s. 86–93
- [8] *Jura D.*: Analiza metanowości i geologiczna ocena zagrożenia gazodynamicznego w wybranych pokładach węgla KWK Pniówek. XXII Seminarium nt. Zwalczanie zagrożenia metanowego oraz wyrzutami gazów i skał — teoria i praktyka, SITG, Rybnik 2006
- [9] *Jureczka J., Kotas A.*: Tektonogeneza Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. [w]: The carboniferous system in Poland. Zdanowski A., Żakowa H. (red.). Prace PIG 1995, Vol. CXLVIII, s. 168–171
- [10] *Kidybiński A., Patyńska R.*: Analiza zjawisk gazodynamicznych w kopalniach węgla kamiennego w Polsce i na świecie. Wydawnictwo GIG. Katowice 2008
- [11] *Majcherczyk T.*: Występowanie zagrożenia wyrzutowego a wytrzymałość ośrodka skalnego XXII Seminarium nt. Zwalczanie zagrożenia metanowego oraz wyrzutami gazów i skał — teoria i praktyka, SITG, Rybnik 2006
- [12] Rozporządzenie MSWiA z dnia 14 czerwca 2002 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych (Dz.U. nr 94, poz. 841, z 2003 r. nr 181, poz. 1777 oraz z 2004 r. nr 219, poz. 2227)
- [13] The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974–2006. Editors: R. Ulusay, J. A. Hudson. Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 2007