

## Rozszerzalność węgla z kopalni „Pniówek” wywołana zmianami temperatury układu węgiel-gaz

Temperature-induced expansion of coal from Pniówek mine in coal-gas systems



*Dr inż. Paweł Baran<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Katarzyna Czerw<sup>\*)</sup>*



*Prof. dr hab. Katarzyna Zarębska<sup>\*)</sup>*



*Dr inż. Janusz Cygankiewicz<sup>\*\*)</sup>*

**Treść:** Węgiel znajdujący się w złożu doznaje naprężeń wynikających z występowania naprężeń geostatycznych oraz zmian objętościowych, towarzyszących procesom sorpcji/desorpcji gazów. Zmiany wymiarów węgla będące następstwem procesów sorpcyjnych stanowią efekt wypadkowy kilku zjawisk, w tym: pęcznienia matrycy węglowej towarzyszącej sorpcji, kontrakcji węgla pod wpływem ciśnienia gazu wolnego w szczelinach i porach oraz przegrupowania elementów struktury węgla. Występujące w górotworze wahania temperatury mogą powodować zaburzenie równowagi sorpcyjnej gazów obecnych w złożu węgla (pochodzenia endogenicznego czy też wtłoczonego/zdeponowanego CO<sub>2</sub>). Naruszenie równowagi wywoływać będzie zmiany objętościowe masy węglowej, co powodować może zmiany stanu naprężenia górotworu i w konsekwencji prowadzić do niekontrolowanego rozszczelnienia magazynu gazu (w przypadku sekwestracji CO<sub>2</sub>) czy też wyrzutu skalno-gazowego w przypadku eksploatacji górniczej złoża. Stąd też analiza wpływu temperatury na zjawiska sorpcyjno-dylatometryczne będzie mieć istotne znaczenie. Istnieje mało doniesień literaturowych pokazujących jaki jest wpływ temperatury na zmiany objętościowe węgla kamiennego towarzyszące sorpcji gazów kopalnianych. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów dylatometrycznych dla dwóch próbek węgla, pochodzących z różnych pokładów w kopalni „Pniówek”. Zostały zmierzone zmiany objętościowe układów węgiel-CH<sub>4</sub>, węgiel-CO<sub>2</sub> podczas zmiany temperatury układu. Stwierdzono odmienny charakter zachowania się układu w zależności od rodzaju użytego gazu. Uzyskane wyniki wskazują również, że głębokość zalegania oraz skład petrograficzny mają wpływ na zmiany objętościowe układu węgiel-gaz podczas zmian temperatury.

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie, <sup>\*\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa, Katowice

**Abstract:** Coal seams are imposed by effective stress emerging from vertical overburden pressure, horizontal lateral earth pressure and extensively from gas sorption/desorption-induced volumetric changes. The range of contingent dimension changes of coal resulting from sorption processes is a combined effect of several phenomena, including sorption-induced swelling of coal matrix, contraction of coal microporous regions caused by free gas pressure in pores and cleats and coal structural re-arrangement. Temperature fluctuations emerging in coalbeds may result in significant changes in sorption conditions followed by equilibrium disturbance for accumulated gases. The equilibrium disturbance can cause volumetric changes in coal mass that may be further transferred to stresses in rock strata and a repercussion can lead to an uncontrolled loss of gas reservoir sealing (in CO<sub>2</sub> sequestration case) or sudden gas, rock and coal outburst in case of operating underground coal mines. Hence conducting analyses of the temperature influence on sorption and dilatometric phenomena will be of significance. Nonetheless, the influence of temperature variation on mine gases sorption-induced coal's overall dimensions changes remains an unexplored research area. In this study the results of dilatometric tests performed on 2 hard coal samples obtained from different seams of Polish coal mine Pniówek are presented. Measurements of temperature-induced changes of coal samples overall dimensions and volume in coal-methane and coal-carbon dioxide systems were conducted. The influence of the type of gas on the nature of coal-gas system response to temperature change effect was acknowledged. The results also show that the depth of the coal seam and the petrographic composition of coal relate to character of volumetric changes of coal-gas system caused by temperature changes.

**Słowa kluczowe:**

węgiel, metan, ditlenek węgla, rozszerzalność, sekwestracja, sorpcja

**Key words:**

coal, methane, carbon dioxide, swelling, sequestration

## 1. Wprowadzenie

Rozszerzalność ciała stałego nieodłącznie towarzyszy zjawisku sorpcji. Obecność gazów w porach ośrodka ma istotny wpływ na jego stan naprężeń i deformacji. Gaz może występować w stanie wolnym i zasorbowanym, a jego ilość w obu stanach zależy od temperatury i ciśnienia. Ilość gazu zasorbowanego zależy od jego rodzaju, a także od rozmiarów i ilości porów sorbentu, jak również od stopnia zmetamorfizowania węgla, jego wilgotności i zawartości popiołu. Ciśnienie gazu wolnego wraz z siłami powierzchniowymi dają w wyniku efektywne naprężenie. Zdolność sorpcyjna węgla jest powodem jego odkształcenia objętościowego i obniżenia energii powierzchniowej, a więc spadku wytrzymałości i wzrostu odkształcalności skały. Proces pęcznienia jest efektem dwóch przeciwnych zjawisk: zwiększania objętości matrycy węglowej w wyniku sorpcji oraz kompresji matrycy związanej z ciśnieniem gazów w porach. Obserwacje wykazały, że pęcznienie początkowo związane jest z kształtem izotermy adsorpcji. Przy wysokich ciśnieniach, gdy szybkość zmian zawartości zaadsorbowanego gazu maleje, dominuje kurczenie się matrycy, co może zmniejszyć efekt wzrostu objętości. Przepuszczalność złoża węgla pierwotnie zdeterminowana jest obecnością szczelin/spękań, a ich wielkość zależy od efektywnego ciśnienia, którego zwiększenie poprzez obniżenie ciśnienia w porach prowadzi do ich zamknięcia. Pęcznienie i kurczenie się węgla pod wpływem ciśnienia może zmienić charakter szczelin, a niektóre efekty zmian objętościowych muszą być kompensowane zmianą porowatości, której znacząca część jest właśnie porowatością tych szczelin. Badania w zakresie pęcznienia węgla podejmowane są od szeregu lat (Ceglarska-Stefańska, Czaplinski 1979, Czaplinski 1968, Ettinger i in. 1974). Prowadzą one do ogólnego wniosku, iż węgiel pod układ biporowaty, transportowo-sorpcyjny, w którym pod wpływem wysokiego ciśnienia gazów sprężane są obszary mikroporowate i rozszerzane makropory, natomiast pęcznienie mikroporowatej substancji węglowej, towarzyszące procesowi sorpcji, powoduje zawężanie porów transportowych i spadek przepuszczalności układu, a *in situ* pokładu (Ceglarska-Stefańska, Zarebska 2002; Seewald, Klein 1986). W literaturze spotkać można wyniki badań wskazujące na istnienie liniowej zależności pomiędzy pęcznieniem węgla

a wielkością wywołującej go sorpcji (Chikatamarla i in. 2004; Robertson, Christiansen 2005, George, Barakat 2001). Znane są również prace, z których wynika, że przebieg procesów sorpcyjnych i wielkość towarzyszących im odkształceń nie są związane liniową zależnością (Ceglarska-Stefańska i in. 2007, 2008, Pan, Connel, 2007). Oryginalne podejście w równoczesnym pomiarze zmian sorpcyjnych i dilatometrycznych przedstawił zespół Majewskiej i Ceglarskiej-Stefańskiej (Majewska i in. 2009). Oprócz równoległego pomiaru kinetyk sorpcji i rozszerzalności w układzie mierzono również poziom emisji akustycznej. Pomiarów dokonano dla próbek węgla w formie kostek, a sorbatem był: metan, ditlenek węgla oraz ich mieszanina. Stwierdzono nieliniową zależność między rozszerzalnością a ilością zasorbowanego gazu oraz nieodwracalność procesu pęcznienia. Wykazano również preferencyjną sorpcję metanu oraz porównywalne powinowactwo CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub> dla wyższego ciśnienia. Wskazuje to, że pokłady węgla o takich właściwościach są nieprzystdatne z punktu widzenia sekwestracji CO<sub>2</sub>. Literatura odnosząca się do tematyki sekwestracji ditlenku węgla (w zakresie badań eksperymentalnych) w dużej mierze skupia się głównie na badaniach sorpcyjnych i poszukiwaniu wpływu parametrów (stopień metamorfizmu, zawartość grup macerałów, porowatość, zawartość wilgoci itd.) na chłonność sorpcyjną. W większości badania sorpcyjne bazują na pomiarach próbek ziarnowych, często wręcz na próbkach pylistych. Tego typu podejście umożliwia skrócenie czasochłonności eksperymentów (szybsze ustalanie się równowagi sorpcyjnej), lecz generuje pytanie, czy takie rozdrobnienie próbki nie spowoduje destrukcji struktury porowatej, która uniemożliwi odniesienie otrzymanych wyników do warunków panujących *in situ*. W przypadku badań nad rozszerzalnością węgla konieczne jest analizowanie próbek nierozdrobnionych. Brak jest także doniesień literaturowych, pokazujących jaki jest wpływ temperatury na zmiany objętościowe wymiarów ziaren węgla kamiennego towarzyszące sorpcji gazów kopalnianych. Wahań temperatury mogą powodować zaburzenie równowagi sorpcyjnej gazów obecnych w złożu węgla (pochodzenia endogenicznego czy też wtłoczonego/zdeponowanego CO<sub>2</sub>). Stąd też analiza wpływu temperatury na zjawiska sorpcyjno-dilatometryczne będzie mieć istotne znaczenie.

**Tabela 1. Wyniki analizy elementarnej i technologicznej badanych próbek**  
**Table 1. Characteristic of the coal material**

Próbka /pokład	C <sup>daf</sup>	S <sup>daf</sup>	H <sup>daf</sup>	N <sup>daf</sup>	O <sup>daf</sup>	W <sup>a</sup>	A <sup>a</sup>	V <sup>daf</sup>
Pn1 (360/1)	84,24	0,39	4,58	1,52	4,58	1,75	3,01	27,12
Pn2 (404/1)	84,96	0,58	4,60	1,70	3,76	0,68	3,78	25,50

**Tabela 2. Skład petrograficzny badanych próbek**  
**Table 2. Petrography of the tested coal sample**

Próbka	Grupa macerałów [%]		
	Witrynit	Liptynit	Inertynit
Pn1	73	7	20
Pn2	53	8	39

## 2. Metodyka badań

### 2.1. Charakterystyka próbek węgla

Badania przeprowadzone zostały na dwóch próbkach węgla z kopalni Pniówek pobranych z pokładów 360/1 i 404/1, których charakterystyka przedstawiona została w tab. 1 i 2.

Poddane badaniom próbki cechowały się zbliżonymi wynikami analizy elementarnej. W przypadku analizy petrograficznej, próbki różniły się zawartością macerałów grupy witrynit i inertynit, przy podobnej zawartości liptynit.

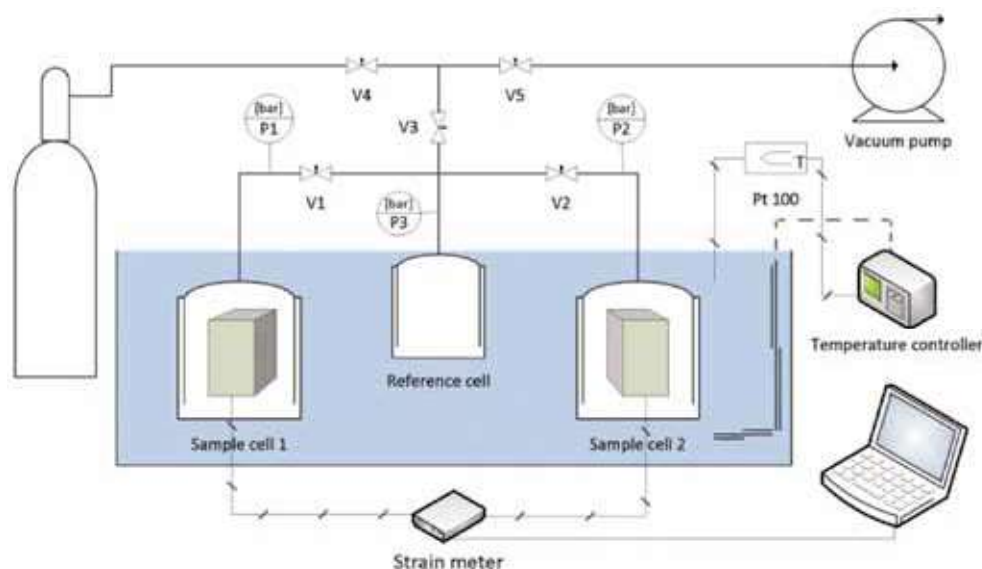
Duża zmienność właściwości fizykochemicznych, które mają wpływ na efekty sorpcyjne w węglu stanowi trudność w interpretacji wyników. Zastosowanie stosunkowo dużej, litej próbki o masie ok. 20 g pozwala na lepszą reprezentatywność uzyskanych wyników w stosunku do danych literaturowych. Dlatego też do pomiarów z macierzystej bryły węgla wycięto prostopadłościenną próbkę o wymiarach 18×18×40 mm. Następnie na przeciwległych ściankach próbki zostały przyklejone tensometry oporowe zorientowane wzdłuż i poprzecznie do warstwowania.

### 2.2. Opis aparatury sorpcyjno-dylatometrycznej

Do przeprowadzenia pomiarów użyty został aparat umożliwiający równoczesny pomiar wielkości sorpcyjno-dylatometrycznych próbek w postaci kostki (rys. 1). Konstrukcja aparatu umożliwia wykonywanie pomiarów na 2 próbkach

równocześnie. Pomiaru chłonności sorpcyjnej dokonuje się metodą Sieverta (metodą objętościową). Pomiar ciśnienia odbywa się przy użyciu przetworników ciśnienia (P1, P2, P3). W przypadku części dozującej aparatu użyto przetwornika S-10 firmy WIKA (P3), pracującego w zakresie ciśnień od 0 do 100 bar, o klasie dokładności 0,25% BFSL (*Best Fit Straight Line*). Pomiar ciśnienia w ampułkach pomiarowych (P1 i P2) (*sample cell 1 i 2*) dokonywany jest przy użyciu przetworników UT-10 firmy Wika. Przetworniki umożliwiają pomiar ciśnienia do 100 bar i posiadają regulowany zakres pomiarowy skali 1:20. Dokładność urządzeń wynosi 0,1% zakresu pomiarowego. Aparat umieszczony jest w termostacie wodnym, utrzymującym stałą temperaturę z dokładnością 0,1 K. Istota pomiaru polega na rozprężeniu gazu o znanym ciśnieniu i objętości z przestrzeni dozującej, do ampulki zawierającej sorbent. Znając objętość martwą aparatu i objętość dozownika, ilość zasorbowaną można obliczyć za pomocą praw gazowych. Objętość części dozującej wyliczono, mierząc wypływ azotu za pomocą przepływomierza El\_Flow F111B firmy Bronkhorst. Objętość martwą części pomiarowej zniwelowano za pomocą kulek szklanych, a jej wartość wyznaczono za pomocą helu.

Pomiar odkształceń próbki węgla dokonywany jest za pomocą tensometrycznego miernika odkształceń zbudowanego w Instytucie Mechaniki Górniczej Polskiej Akademii Nauk w Krakowie. Zmiana wymiarów liniowych próbki mierzona jest przy pomocy tensometrów naprężnych elektrozestancyjnych przy zastosowaniu przetworników rezystancyjnych, mostkowych. Wyniki pomiarów prezentowane są przy pomo-



**Rys. 1. Schemat aparatury**  
**Fig. 1. Configuration of the measuring apparatus**



cy wyświetlacza alfanumerycznego, mogą też być zapisywane w wewnętrznej pamięci lub transmitowane na zewnątrz przy pomocy łącza szeregowego. Programowanie miernika obejmuje wprowadzanie parametrów zespołu podłączanych tensometrów lub przetworników, ustawianie bieżącego czasu, określenie kryterium rejestracji danych pomiarowych. Zasada działania tego miernika opiera się na wykorzystywaniu zjawiska fizycznej zmiany rezystancji przewodnika pod wpływem odkształceń.

### 2.3. Metodyka badań rozszerzalnościowych

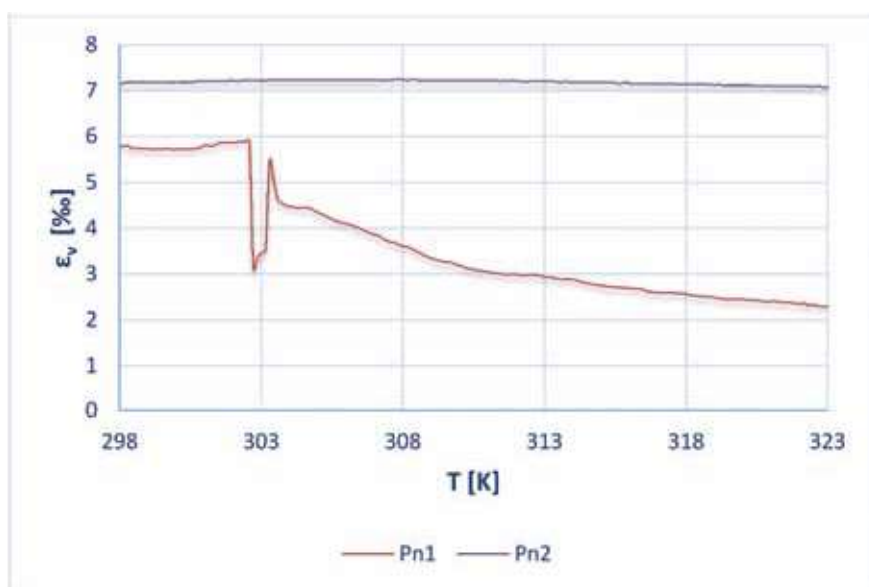
Próbka została umieszczona w ampułce pomiarowej i podłączona do miernika odkształceń. Przed zasadniczą częścią eksperymentu próbka węgla była odgazowywana. Następnie, wyznaczono objętość martwą części pomiarowej (*sample cell 1*) i ponownie odgazowano układ do osiągnięcia próżni statycznej rzędu  $10^{-2}$  Pa. Po zamknięciu wszystkich zaworów i wyzerowaniu tensometrycznego miernika odkształceń, tak przygotowany układ stanowił punkt wyjścia do rozpoczęcia zasadniczej części eksperymentu. Do części dozującej (*reference cell*) wprowadzono ditlenek węgla. Po ustaleniu się stałej wartości ciśnienia, gaz został wprowadzony do części pomiarowej (*sample cell 1*). W momencie zadozowania gazu rozpoczęto rejestrację kinetyki spadku ciśnienia (P1) w układzie pomiarowym. Początkowe ciśnienie, od którego następowały zmiany sorpcyjno-dylatometryczne próbki, wynosiło dla wszystkich pomiarów 12-12,8 bar. Kinetyka odkształceń liniowych próbki zapisywana była w wewnętrznej pamięci tensometrycznego czujnika odkształceń. Kinetyka zmian sorpcyjno-dylatometrycznych w temperaturze 298K rejestrowana była przez 50 godzin. Koniec izotermicznej części pomiaru stanowił początek prezentowanego w artykule etapu eksperymentu. Etap ten polegał na rejestracji zmian ciśnienia gazu w układzie oraz wymiarów liniowych próbki towarzyszących wzrostowi temperatury układu od 298 do 323 K. Wzrost temperatury następował z szybkością 1 K na ok. 5 minut. Temperaturę 323 K osiągnięto po blisko 3 godzinach, a przez kolejne 7 godzin rejestrowano już pomiar izotermiczny. Po zakończeniu eksperymentu z użyciem ditlenku węgla,

układ ponownie odgazowano i wykonano pomiar z użyciem metanu, powtarzając wyżej opisaną procedurę.

### 3. Analiza wyników

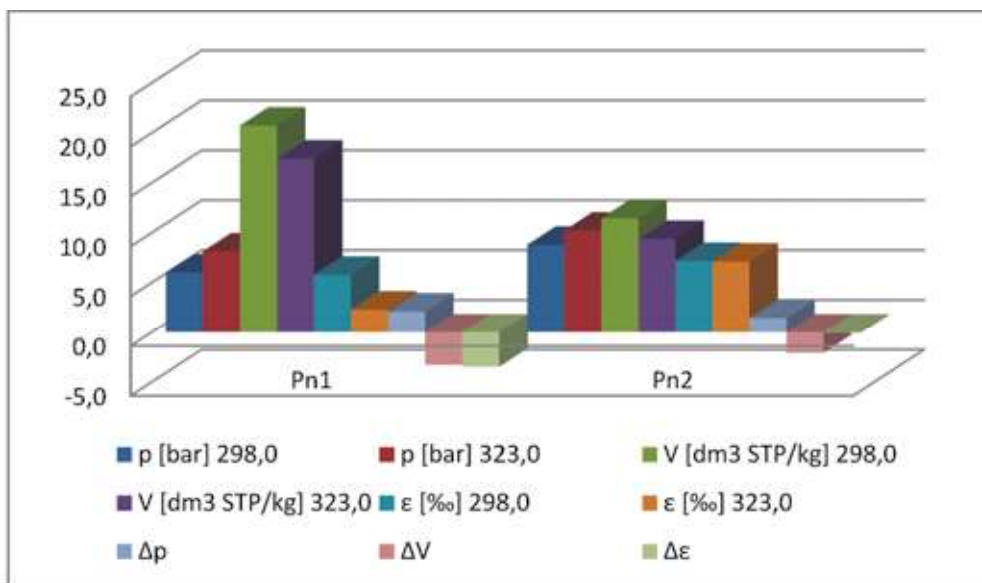
Interpretację wyników należy rozpocząć od zaakcentowania, że zapoczątkowanie eksperymentu, w którym mierzono rozszerzalność objętościową próbki węgla miało miejsce od stanu nasycenia próbki gazem (ditlenkiem węgla lub metanem). Miało to na celu odtworzenie hipotetycznych warunków, które mogłyby mieć miejsce w pokładzie. Analizując zmianę rozszerzalności próbki węgla towarzyszącą wzrostowi temperatury, zaobserwowano odmienny charakter przebiegu tych zmian wywołanych obecnością  $\text{CO}_2$  lub  $\text{CH}_4$ .

W przypadku układu węgiel- $\text{CO}_2$  (rys. 2) obserwuje się odmienny przebieg dla próbek pochodzących z różnych pokładów kopalni. W przypadku próbki Pn1 początkowa zmiana temperatury wywołuje nieznaczne pęcznienie próbki. Po ok 25 minutach następuje gwałtowny skurcz, by znowu nastąpiła kontrakcja i kolejny skurcz, tym razem rozłożony w czasie. Gwałtowny skurcz następuje w okolicach temperatury krytycznej  $\text{CO}_2$ . Obserwowane zmiany można tłumaczyć zmianą mechanizmu lokowania się cząsteczek  $\text{CO}_2$ . Zgromadzony w porach, w wyniku kondensacji kapilarnej ditlenek węgla, ulega przemianie fazowej, powodując gwałtowną desorpcję, co w konsekwencji prowadzi do skurczu. Tego typu zachowania nie odnotowuje się dla próbki Pn2, dla której wzrost temperatury nie powoduje praktycznie zmian objętości próbki. To odmierne zachowanie można interpretować odnosząc się do składu petrograficznego próbek. Próbka Pn1 cechuje się wyższą zawartością macerałów grupy wityrynytu i odpowiednio niższą ilością macerałów grupy inertynitu. Badania Karacana (2003) dowodzą, że macerały grupy wityrynytu pod wpływem ditlenku węgla początkowo ulegają pęcznieniu, by po pewnym czasie nastąpiła kontrakcja. W przypadku macerałów grupy inertynitu Karacan dowiódł, że porowatość przesunięta jest w kierunku mezoporów, co ułatwia zajście procesu desorpcji. Przy wzroście temperatury początkowa ilość sorbatu zakułowana w masie węglowej desorbuje do fazy gazowej.



Rys. 2. Rozszerzalność objętościowa próbek węgla pod wpływem  $\text{CO}_2$  towarzysząca zmianie temperatury

Fig. 2. Volumetric strains of sample under the  $\text{CO}_2$  influence during the temperature increase

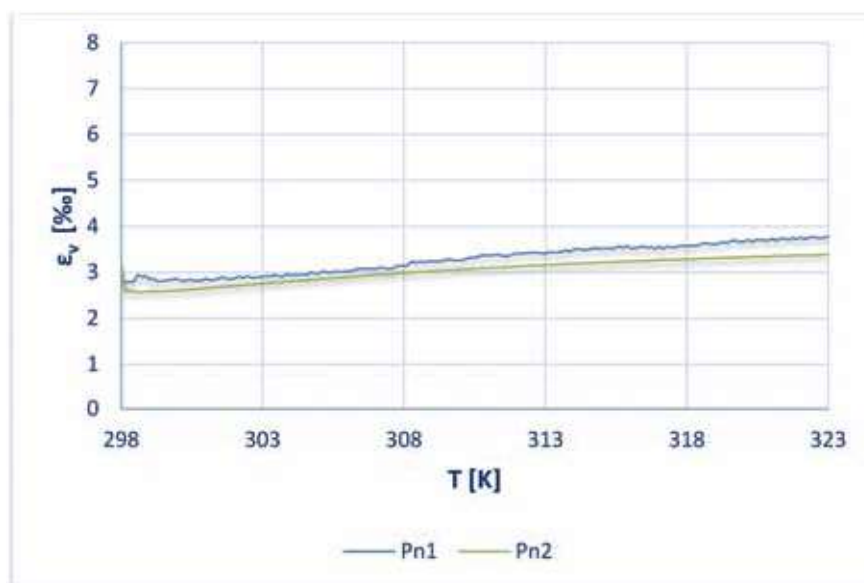


Rys. 3. Parametry układu węgiel-CO<sub>2</sub> w temperaturze 298 i 323 K  
 Fig. 3. Parameters of coal-CO<sub>2</sub> system at 298 and 323 K

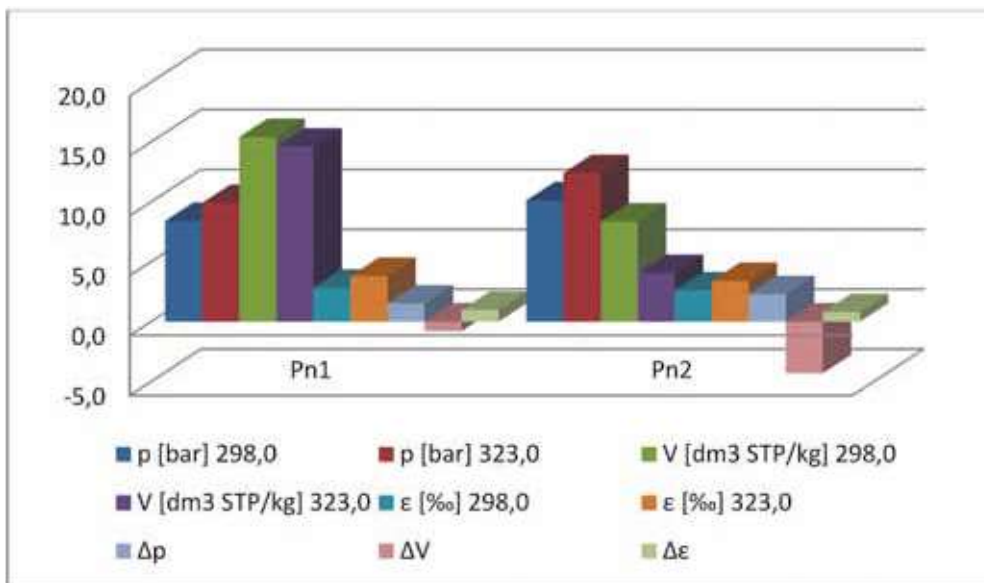
Większa ilość gazu wolnego, wraz ze wzrostem temperatury powoduje wzrost ciśnienia w układzie. Interpretację tego wniosku należy rozszerzyć uwzględniając wyniki zilustrowane na rys. 3. Można wysunąć tezę, że rozszerzalność masy węglowej należy rozpatrywać w powiązaniu z ciśnieniem panującym w układzie. Dla ocenianych układów węgiel-CO<sub>2</sub> chłonność sorpcyjna nie jest parametrem określającym wprost wpływ na rozszerzalność. W przypadku próbki Pn2 zmiany objętościowe na początku i końcu eksperymentu (w 298K i 323K) utrzymują się na poziomie 7 ‰, ale przy ilości zasorbowanej znacznie niższej niż w przypadku stanu początkowego dla próbki Pn1 (rys. 3). W przypadku próbki Pn1, chłonność sorpcyjna na starcie eksperymentu wynosiła ok 20 dm<sup>3</sup>/kg. Wzrost temperatury o 25 K nieznacznie obniżył chłonność do poziomu ok 17,5 dm<sup>3</sup>/kg. W przypadku próbki Pn2 zmiana temperatury obniżyła chłonność sorpcyjną od 11,4 do 9,5 dm<sup>3</sup>/kg. Obserwuje się więc niewielką różnicę

w ilości zdesorbowanego CO<sub>2</sub> z próbek węgla. Wyniki, których ilustrację stanowi rys. 3, pozwalają jednak postawić tezę, że istotnym parametrem decydującym o przebiegu zmian rozszerzalnościowych jest również ciśnienie panujące w układzie. Wyższe ciśnienie może więc wpływać na równowagę sił będących efektem pęcznienia próbki węglowej. W przypadku próbki Pn1, ciśnienie gazu wolnego było znacznie niższe, co pozwalało na swobodniejszy, niezakłócony ciśnieniem, proces pęcznienia. Istotnym efektem może być też udział zjawiska absorpcji, który ma miejsce w przypadku dużej zawartości wityritu. W tym przypadku gwałtowna desorpcja zaabsorbowanego CO<sub>2</sub> może skutkować gwałtownym skurczem masy węglowej.

W przypadku metanu zmiana temperatury powoduje pęcznienie próbki i zmiana ta ma charakter praktycznie liniowy (rys. 4). Zachowanie układu wydaje się jednak nietypowe. Jak wiadomo procesowi desorpcji towarzyszy skurcz skały węglowej.



Rys. 4. Rozszerzalność objętościowa próbek węgla pod wpływem CH<sub>4</sub> towarzysząca zmianie temperatury  
 Fig. 4. Volumetric strains of sample under the CH<sub>4</sub> influence during the temperature increase



Rys. 5. Parametry układu węgiel-CH<sub>4</sub> w temperaturze 298 i 323 K  
Fig. 5. Parameters of coal-CH<sub>4</sub> system at 298 and 323 K

węj. Wzrost temperatury układu musi powodować desorpcję metanu. Równocześnie wzrost ciśnienia powoduje przesunięcie równowagi w kierunku zachodzenia procesu adsorpcji. W efekcie końcowym w temperaturze 323 K ilość zasorbowanego metanu jest nieznacznie niższa w porównaniu do temperatury 298 K, a zmiany wymiarów objętościowych kostki węglowej mimo wszystko wzrosły. Na chłonność sorpcyjną względem CH<sub>4</sub> wpływa korzystnie wyższy udział macerałów grupy wityritu (Chalmers, Bustin 2007), co potwierdzają wyniki przedstawione na rys. 5. Dla próbki Pn1 obserwuje się wyższą wartość chłonności sorpcyjnej zarówno w 298 K, jak i po podniesieniu temperatury do 323 K. Nie przekłada się to jednak na zmiany wymiarów objętościowych. Może to pozostawać w związku z brakiem zjawiska absorpcji CH<sub>4</sub> w masie węglowej (Jodłowski i in. 2007). Zmagazynowany metan występuje jedynie w formie gazu zaadsorbowanego i sprężonego w obszarze powierzchniowym. W tej sytuacji powolna desorpcja i związana z nią potencjalna rozszerzalność układu może być kompensowana zjawiskiem sorpcji wywołanej wzrostem ciśnienia i dodatkowo może wskazywać na znaczący udział sprężania gazu wolnego, obecnego w obszarze adsorpcyjnym mikro i mezoporów, co w efekcie powoduje rozszerzanie masy węglowej.

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Prezentowane w pracy badania mogą mieć istotne znaczenie w przypadku rozważania projektów podziemnego magazynowania CO<sub>2</sub> w głębokich, nieeksploatowanych pokładach węgla lub też eksploatacji pokładów węgla zawierających metan. Zmiany temperatury pod ziemią, naruszając równowagę adsorpcyjną, powodują zmiany objętościowe masy węglowej (jej skurcz bądź pęcznienie). Może to wiązać się z rozszczelnieniem pokładu i desorpcją gazu w kierunku powierzchni, a także wiązać się z niekontrolowanym wyrzutem skalno-gazowym.

W toku przeprowadzonych badań stwierdzono odmienny przebieg zmian objętościowych próbek węgla z obu badanych pokładów, wywołanych wprowadzeniem do układu ditlenku węgla. Stwierdzono, że za ten fakt odpowiedzialny jest skład maceralny węgla. Natomiast w przypadku układu

węgiel-metan wzrost temperatury powodował dla obu próbek wzrost rozszerzalności układu. Ten nieoczekiwany efekt można tłumaczyć wzrostem ciśnienia gazu wolnego obecnego w porach węgla.

Przeprowadzone badania nie pozwoliły na obecnym etapie w sposób jednoznaczny odpowiedzieć na pytanie jaki jest wpływ temperatury na rozszerzalność węgla. Natomiast zaplanowany eksperyment pozwolił na ukierunkowanie prowadzenia dalszych badań w układzie izobarycznym, w których wzrost temperatury układu przy stałym ciśnieniu pozwoliłby uzupełnić oraz lepiej zinterpretować zebrane dotąd wyniki.

*Praca finansowana z Badań Statutowych AGH nr 11.11.210.244*

#### Literatura

- CEGLARSKA-STEFAŃSKA G., CZAPLIŃSKI A. 1979 - Rozszerzalność liniowa węgla kamiennych pod wpływem działania par alkoholi alifatycznych, „Archiwum Górniczo”, 24, s. 167-175.
- CEGLARSKA-STEFAŃSKA G., MAJEWSKA Z., MAJEWSKI ST., ZIĘTEK J., CZERW K. 2007 - Rozwój odkształceń węgla kamiennego w procesach sorpcyjno-desorpcyjnych, „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, nr 23, z. spec. 3, s. 41 – 50.
- CEGLARSKA-STEFAŃSKA G., NODZEŃSKI A., CZERW K., HOŁDA S. 2008 - Coal – mine gases systems in the aspects of methane recovery and CO<sub>2</sub> sequestration, Proceedings of the 21st World Mining Congress, Prace Naukowe GiG, Mining and Environment, 4, s. 63 – 71.
- CEGLARSKA-STEFAŃSKA G., ZARĘBSKA K. 2002 - Expansion and contraction of variable rank coals during the exchange sorption of CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub>, Adsorption Science & Technology, vol. 20, no 1, s. 49 – 62.
- CHALMERS G.R.L., BUSTIN R.M. 2007 - On the effect of petrographic composition on coalbed methane sorption. International Journal of Coal Geology, 69, s. 288-304.
- CHIKATAMARLA L., CUI X., BUSTIN R.M. 2004 - Implications of volumetric swelling / shrinkage of coal in sequestration of acid gases. International Coalbed Methane Symposium Proceedings. Tuscaloosa, Alabama, paper 0435.
- CZAPLIŃSKI A. 1968 - Rozszerzalność węgla kamiennych pod wpływem sorpcji gazów, Przegląd Górniczy 24, s. 215-222.
- ETTINGER I.L., BARANOW R.J., BUNIN A.B., SZULMAN I.W., OGNIESJAN M.A. 1974 - Sorpcyjnoje Naitychanie Kamiennych

- Uglej Razlicznoj Porostoj Struktury, Chim. Twierd. Topl. 6, s. 86-92.
- GEORGE J.D.ST., BARAKAT M.A. 2001 - The change of effective stress associated with shrinkage from gas desorption in coal, International Journal of Coal Geology, Volume 45, Issues 2-3, s 105-113.
- JODŁOWSKI G.S., BARAN P., WÓJCIK M., NODZEŃSKI A., PORADA S., MILEWSKA-DUDA J. 2007 - Sorption of methane and carbon dioxide mixtures in Polish hard coals considered in terms of adsorption-absorption, Applied Surface Science, 253 (13), 5732-5735.
- KARACAN C.Ö. 2003 - Heterogeneous Sorption and Swelling in a Confined and Stressed Coal during CO<sub>2</sub> Injection, Energy & Fuels, 17 (6), s. 1595 - 1608.
- MAJEWSKA Z., CEGLARSKA-STEFANSKA G., MAJEWSKI S., ZIETEK J. 2009 - Binary gas sorption/desorption experiments on a bituminous coal: simultaneous measurements on sorption kinetics, volumetric strain and acoustic emission. International Journal of Coal Geology, 77, s 90-102.
- PAN Z., CONNELL L.D. 2007 - A theoretical model for gas adsorption induced coal swelling. International Journal of Coal Geology, 69, s. 243-252.
- ROBERTSON E.P., CHRISTIANSEN R.L. 2005 - Measurements of sorption-induced strain, International Coalbed Methane Symposium, Tuscaloosa, Alabama, 17 - 19 May 2005, paper 0532.
- SEEWALD H., KLEIN J. 1986 - Methansorption an Steinkohle und Kennzeichnung der Porenstruktur, Glückauf - Forschungshefte, 47 (3), s. 149-156.

Artykuł wpłynął do redakcji – grudzień 2016  
Artykuł akceptowano do druku 15.01.2016

---

---

***Szanowni Czytelnicy!***  
***Przypominamy o wznowieniu***  
***prenumeraty „Przeglądu Górniczego”***

Informujemy też, że od 2009 roku w grudniowym zeszycie P.G. zamieszczamy listę naszych prenumeratorów.