

## Stanowisko do badania próbek węgla i skał w atmosferze gazów, pod ciśnieniem

ANDRZEJ NOWAKOWSKI, JULIUSZ TOPOLNICKI, JANUSZ NURKOWSKI, MIROSLAW WIERZBICKI,  
JACEK SOBCZYK, ZBIGNIEW LIZAK

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

### Streszczenie

Artykuł zawiera opis czynności związanych z zaprojektowaniem i wykonaniem komory umożliwiającej wykonywanie testów wytrzymałościowych próbek węgla i skał w atmosferze gazów sorbujących ( $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$ ). Komora ta pozwala na badanie próbek o średnicy do 50 mm i wysokości do 100 mm przy ciśnieniu wypełniającego komorę gazu do 2 MPa. Jest wyposażona w przetworniki siły oraz deformacji zaprojektowane i wykonane w Pracowni Odształceń Skał IMG PAN. Artykuł zawiera także wyniki pierwszych testów, którym poddano samą komorę oraz jej wyposażenie:

**Słowa kluczowe:** testy wytrzymałościowe, gaz sorbujący, pomiar siły, pomiar deformacji, cechowanie przetworników

### 1. Wstęp

Obecność gazów w przestrzeni porowej skały potrafi w znaczący sposób zmienić jej właściwości mechaniczne. Przyczyny tych zmian mogą być zarówno natury czysto mechanicznej, np. związane z funkcjonowaniem tzw. zasady naprężeń efektywnych, jak też natury fizykochemicznej (procesy sorpcyjne), czy też czysto chemicznej (zmiana struktury skały w wyniku reakcji chemicznych zachodzących między płynem porowym a materią skalną). Biorąc pod uwagę powszechną obecność w kopalniach węgla kamiennego takich gazów jak dwutlenek węgla ( $\text{CO}_2$ ) i metan ( $\text{CH}_4$ ) oraz aktywności sorpcyjnej węgla należy uznać za celowe podjęcie prac zmierzających do rozpoznania zmian zachodzących w właściwościach mechanicznych węgla w atmosferze gazów fizykochemicznie aktywnych.

Sygnalizowany problem nie jest nowy, a w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN sporo czasu poświęcono na jego rozpoznanie przede wszystkim w latach 1981-1990, kiedy to najpierw realizowany był Międzyresortowy Problem MR I 26 „Zjawiska fizyczne w górotworze jako ośrodku wielofazowym” a następnie tzw. Centralny Problem Badań Podstawowych 03.06 „Górotwór jako ośrodek wielofazowy”. Uzyskane w ramach tych programów badawczych wyniki zebrane zostały w pracy zbiorowej wydanej w 1990 r. pod redakcją prof. dr hab. inż. Jerzego Litwiniszyna (Litwiniszyn, 1990). Spośród zamieszczonych w tym opracowaniu artykułów na szczególną uwagę zasługują – z punktu widzenia tematyki niniejszej pracy – następujące opracowania: Czaplński i Gustkiewicz (1990), Hołda (1990) i Ryncarz (1990).

Analizą wpływu procesów sorpcyjnych na zachowanie się i właściwości węgla kamiennych zajmowało się wielu badaczy. Wydaje się, że najlepiej zbadanym obszarem jest pęcznienie węgla podczas sorpcji oraz jego kontrakcja w procesie desorpcji. Procesy te mogą wywoływać zmiany objętości węgla a przy jego skrepowaniu generują naprężenia sorpcyjne. Przykładem prac z tego zakresu są publikacje (Kelemen i Kwiatek, 2009), (Larsen, 2004), (Day i in., 2008), (Karacan, 2003), (Karacan, Mitchell, 2003). Ettinger i Lamba (1957), Tankard (1957), Ates i Barron (1988), Lama (1995) oraz Aziz i Ming-Li (1999). Badali oni wpływ sorpcji na wytrzymałość węgla kamiennego wykorzystując do tego celu różne gazy i różne metody

badawcze. Bergen i in. (2009) obserwowali odkształcenia wolnostojących próbek węgla o kontrolowanym stopniu zawilgocenia pod wpływem interakcji z różnymi gazami, Karacan (2007) badał odkształcenia próbek węglowych znajdujących się w hydrostatycznym stanie naprężenia w kontakcie z CO<sub>2</sub>. Dość wyczerpujące badania wpływu procesów sorpcyjnych na właściwości mechaniczne zarówno węgla brunatnych jak i kamiennych w aspekcie sekwestracji CO<sub>2</sub> przeprowadzili Viète i Ranjith (2006, 2007).

Wśród polskich badaczy prowadzących badania na polskich węglach kamiennych wiodącym ośrodkiem jest Akademia Górniczo-Hutnicza, czego przykładem są prace Ceglarska-Stefańska i Zarębska (2005), Majewska i inni (2009), Majewska i Ziętek (2007). Badacze ci skupili się głównie na badaniach pęcznienia/kontrakcji oraz emisji akustycznej w procesach generowania naprężeń sorpcyjnych.

Temat zmian wytrzymałości węgla wywołany procesem sorpcji jest mało rozpoznany i wpisuje się w zakres badań obejmujących rozpoznanie układu węgiel-gaz w aspekcie zagrożenia metanowego i wyrzutami gazów i skał. Opublikowane przez wymienionych wyżej badaczy wyniki nie są jednoznaczne. Aczkolwiek większość z nich (m.in. Ettinger i Lamba, Tankard) uważa, że w przypadku węgla obecność gazu zasorbowanego zmienia niektóre właściwości mechaniczne węgla, to jednak istnieją tacy (Ates i Barron), którzy kwestionują ten pogląd. Biorąc pod uwagę rolę procesów sorpcji i desorpcji w zachodzących w górotworze zjawiskach dynamicznych (wyrzuty) uznano za konieczne stworzenie aparatury umożliwiającej badania tego problemu ze szczególnym ukierunkowaniem na węgle pochodzące z kopalń należących do Jastrzębskiej Spółki Węglowej.

## 2. Cel i zakres prac

Celem prac prowadzonych w ramach zadania było zaprojektowanie oraz wykonanie komory, która pozwoliłaby na prowadzenie badań wytrzymałościowych próbek skał bądź węgla znajdujących się w atmosferze gazowej, a w szczególności w atmosferze gazów sorbujących takich jak CH<sub>4</sub> i CO<sub>2</sub>. Założenia przyjęte podczas projektowania urządzenia były następujące:

- 1) Komora jest urządzeniem przenośnym o wymiarach umożliwiających umieszczenie jej, w pozostającej na stanie Pracowni Odkształceń Skał IMG PAN, sztywnej maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8500 Rock Testing System (opis maszyny wytrzymałościowej i jej sposobu pracy: Nowakowski, 1997).
- 2) W komorze badać można próbki o średnicy do 50mm i wysokości do 100 mm, przy ciśnieniu gazu porównywalnym do ciśnienia złożowego, przy czym ciśnienie to ma pozostawać stałe podczas eksperymentu. Wartość ciśnienia złożowego oszacowano na podstawie badań własnych prowadzonych *in situ* na nie większą niż 2 MPa (Topolnicki i in., 2004).
- 3) Konstrukcja komory daje możliwość kondycjonowania badanej próbki w następujący sposób: najpierw z komory i próbki usuwane jest powietrze (pożądane jest uzyskanie próżni poniżej 10<sup>-2</sup> bar) a następnie próbka nasycana jest gazem pod żądanym ciśnieniem.
- 4) Zakłada się, że eksperyment przebiega w sposób następujący: próbka jest umieszczana w komorze, w której jest następnie kondycjonowana aż do osiągnięcia stanu równowagi sorpcyjnej a następnie, po uzyskaniu tego stanu, ściskana jest siłą osiową.
- 5) W trakcie kondycjonowania a następnie obciążania próbki mierzone i rejestrowane są następujące wielkości fizyczne: ciśnienie i temperatura gazu w komorze, siła oddziałująca na próbkę oraz przemieszczenia próbki: podłużne i obwodowe.

Zaprojektowanie i wykonanie urządzenia spełniającego wymienione w pkt. 1)-5) warunki objęło następujące czynności:

- a) Wybór możliwie standardowych elementów konstrukcyjnych, z których składać się będzie komora oraz zaprojektowanie i wykonanie elementów uzupełniających.
- b) Zaprojektowanie i wykonanie układu ciśnieniowych przepustów elektrycznych i zaworów do usuwania gazu z komory i napełniania jej gazem.
- c) Dostosowanie istniejących systemów pomiarowych do potrzeb projektowanej komory oraz zaprojektowanie i wykonanie niezbędnych przetworników i ich kalibrację.
- d) Opracowanie i przetestowanie metodyki pomiarów obejmującej m.in. sposoby instalacji przetworników na próbce.

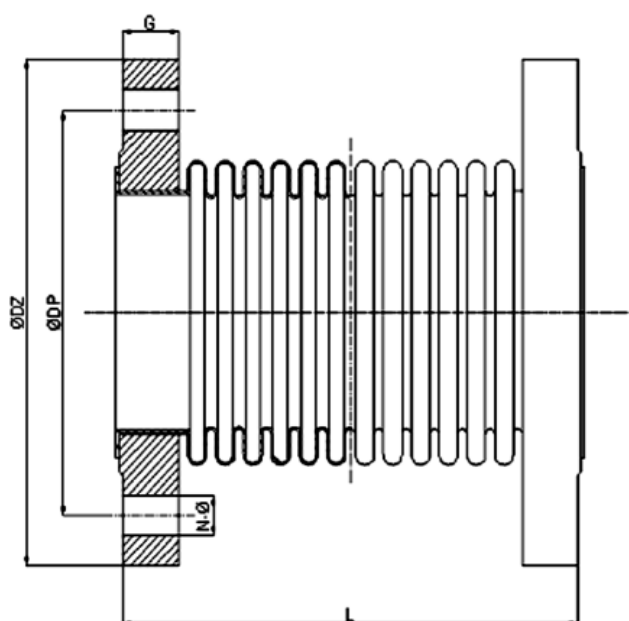
### 3. Konstrukcja urządzenia

Przyjęto, że urządzenie konstruowane będzie w oparciu o tzw. kompensator mieszkowy. Kompensatory takie są elementami rurociągów służących do przesyłu płynów i mają za zadanie kompensować – poprzez swoją deformację – ewentualne deformacje takich rurociągów, wywołane np. zmianami temperatury bądź też odkształceniami podłoża. Do wykonania komory wykorzystano kompensator DN100 firmy „TEHACO”, którego widok pokazuje rys. 1, a schemat rys. 2. Kompensator ten, przeznaczony do pracy pod ciśnieniem do 1,6 MPa, może bezpiecznie (tzn. bez doznania deformacji trwałych) ulec wydłużeniu o 20 mm albo skróceniu o 10 mm.

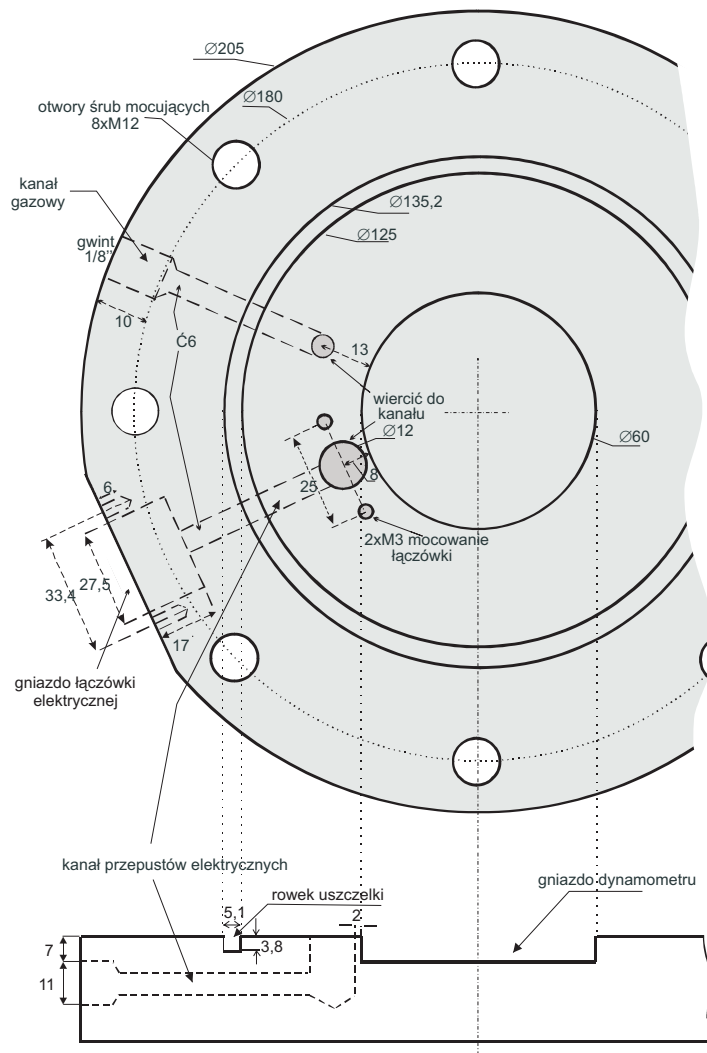
Pokazany na rys. 1 kompensator uzupełniono o dwie szczelne pokrywy, przy czym pokrywa górna pełni jedynie funkcję zamknięcia komory natomiast w pokrywie dolnej zaprojektowano i wykonano kanał do napełniania komory gazem oraz system przepustów elektrycznych dla wyprowadzenia na zewnątrz sygnałów elektrycznych z zainstalowanych wewnątrz komory urządzeń pomiarowych. Schemat dolnej pokrywy pokazuje rys. 3 a jej widok rys. 4.



Rys. 1. Kompensator DN100 firmy „TEHACO” – widok ogólny ([www.tehaco.com.pl](http://www.tehaco.com.pl))



Rys. 2. Kompensator DN100 firmy „TEHACO” – schemat ([www.tehaco.com.pl](http://www.tehaco.com.pl));  
 $\text{ØDZ} = 220 \text{ mm}$ ,  $\text{ØDP} = 180 \text{ mm}$ ,  $N\text{-Ø} = 8 \times \text{Ø}18$ ,  $L = 120 \text{ mm}$ ,  $G = 20 \text{ mm}$

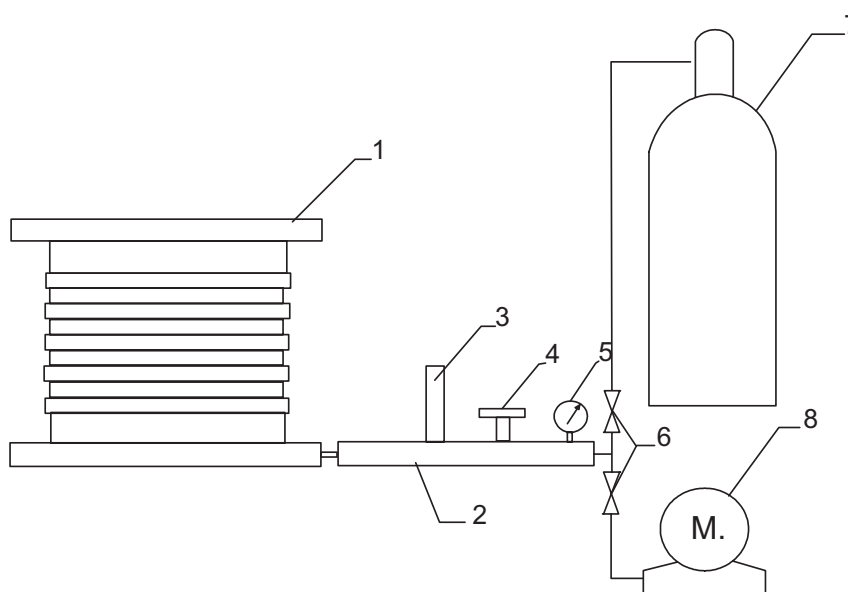


Rys. 3. Schemat dolnej pokrywy komory

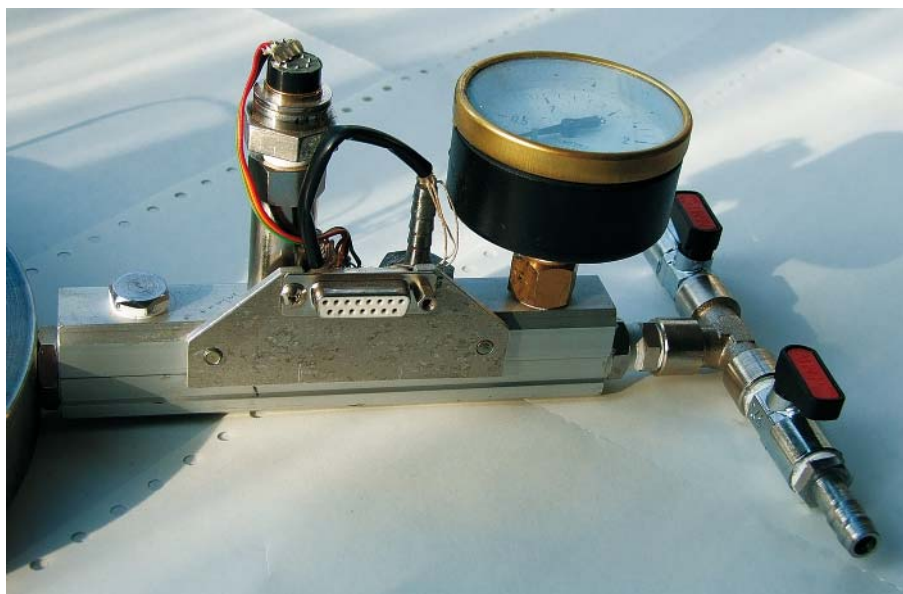


Rys. 4. Widok dolnej pokrywy komory

Aby umożliwić opisaną w pkt. 3) rozdz. 2 niniejszej pracy procedurę kondycjonowania próbki zaprojektowano i wykonano odpowiedni układ przewodów i zaworów ciśnieniowych. Schemat tego układu pokazuje rys. 5, a jego widok rys. 6. Podstawą układu jest prostokątny rozdzielacz wykonany z aluminium, który ma w środku wydrążony przewód ciśnieniowy, a na powierzchni sześć nagwintowanych gniazd, z których dwa znajdują się na czołach rozdzielacza a cztery na jego powierzchni górnej. Jedno gniazdo czołowe łączy układ z dolną płytą komory, a w drugie wkręcono króciec z dwoma zaworami, z których jeden podłączono do pompy próżniowej a drugi do zbiornika z gazem. W gniazdach na górnej powierzchni bloczka osadzono przetworniki ciśnienia (jedno gniazdo pozostaje wolne i zaślepione śrubą co widać na rys. 6).



Rys. 5. Schemat układu przewodów i zaworów ciśnieniowych umożliwiającego kondycjonowanie próbki:  
1 – komora, 2 – rozdzielacz, 3 – czujnik ciśnienia, 4 – gniazdo przepustów elektrycznych,  
5 – manometr, 6 – zawory, 7 – butla z gazem, 8 – pompa próżniowa



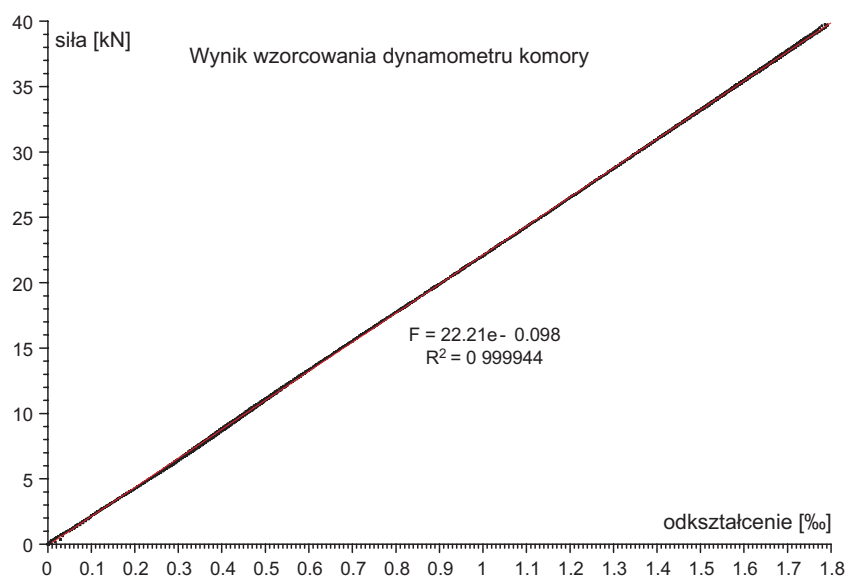
Rys. 6. Widok układu przewodów i zaworów ciśnieniowych umożliwiającego kondycjonowanie próbki

#### 4. Przetworniki pomiarowe

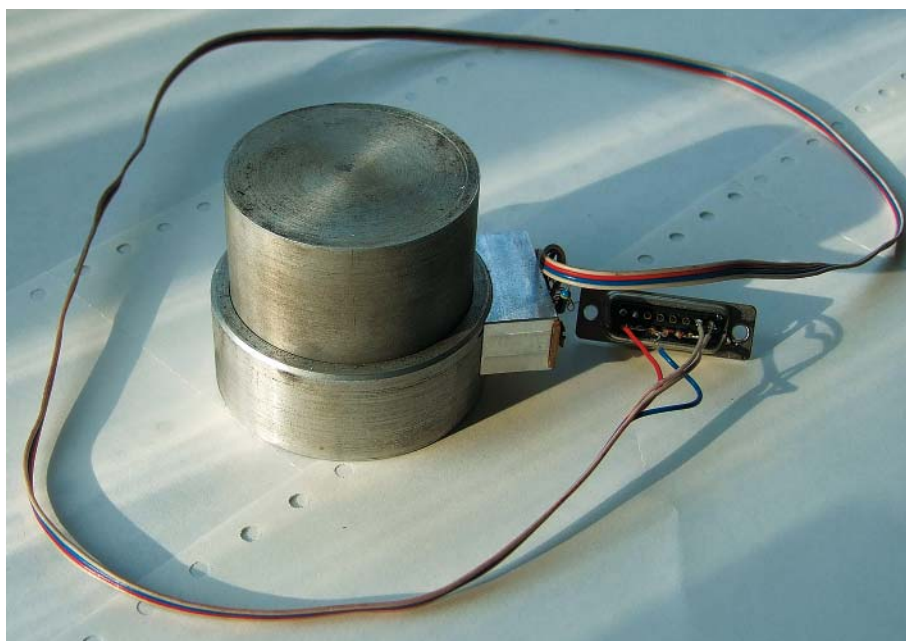
Zgodnie z tym, co napisano w pkt. 5), rozdz. 2 niniejszej pracy przyjęto, że podczas eksperymentu rejestrowane będą w sposób ciągły cztery wielkości fizyczne: ciśnienie wypełniającego komorę gazu ( $p$ ), siła obciążająca próbkę ( $F$ ), zmiana długości próbki ( $\Delta l_1$ ) oraz zmiana długości obwodu próbki ( $\Delta l_3$ )

Ciśnienie gazu mierzone jest przetwornikiem piezoelektrycznym, pracującym w zakresie do 1,6 MPa, osadzonym w odpowiednim gnieździe układu służącego do nasączania próbki gazem. Czujnik ten jest dublowany przez standardowy manometr zegarowy o zakresie 0-2,5 MPa. Rozmieszczenie i wygląd tych przetworników pokazują rys. 5 i 6.

Do pomiaru wartości siły obciążającej zaprojektowano i wykonano w pracowni dynamometr tensometryczny mający zakres do 40 kN. Wynik wzorcowania dynamometru pokazano na rys. 7, a sam dynamometr na rys. 8.



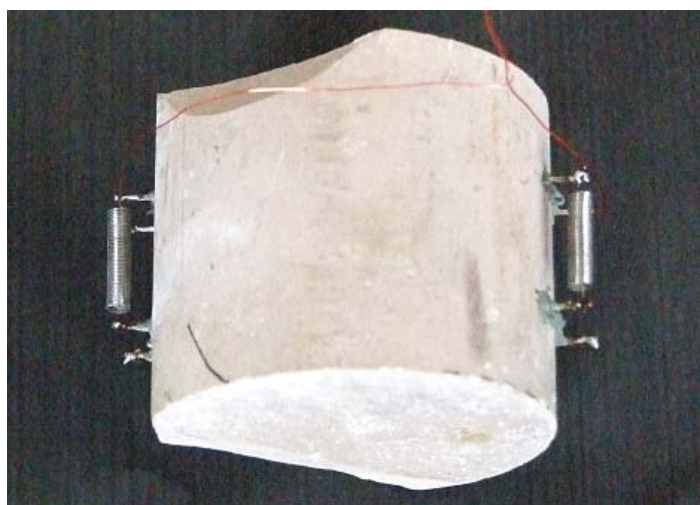
Rys. 7. Wynik wzorcowania dynamometru



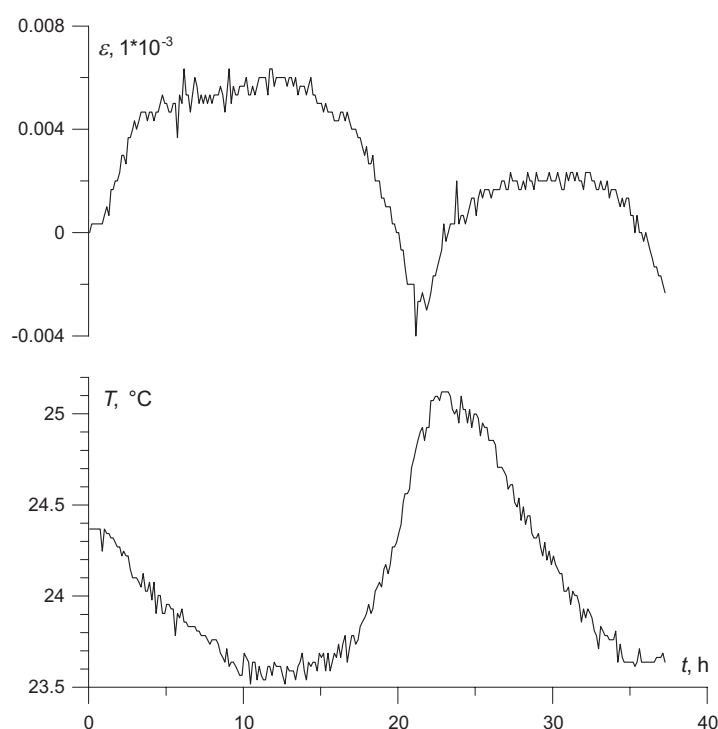
Rys. 8. Dynamometr – widok ogólny

Z uwagi na konieczność monitorowania temperatury gazu podczas jego sprężania i rozprężania w komorze zainstalowano czujnik temperatury, którego funkcję pełni spolaryzowane w kierunku przewodzenia złącze p-n. Zmiany spadku napięcia na złączu są proporcjonalne do zmian temperatury. Czujnik ten jest śledzony przez ten sam przetwornik A/C co manometr i umożliwia pomiar temperatury z rozdzielczością lepszą niż  $0,1^{\circ}\text{C}$  (czułość rzędu  $2\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ).

Do pomiaru deformacji próbki znajdującej się w komorze wykorzystano opracowane i rozwijane w pracowni już od wielu lat przetworniki indukcyjne. Opis samych przetworników oraz drogę ich rozwoju prześledzić można np. na podstawie prac Nurkowskiego (2004a, 2004b, 2008) a próbkę z zainstalowanymi czujnikami pokazano na rys. 9. Zastosowano porównawczą metodą pomiaru odkształceń (jeden czujnik zamontowany jest na badanym materiale, drugi zaś na materiale o znanych właściwościach mechanicznych). Osiągnięto w ten sposób małą wrażliwość pomiaru na zmiany temperatury i ciśnienia oraz stabilność pomiarów w czasie. Na rys. 10 pokazano zmiany wskazań czujnika zamocowanego do próbki granitowej



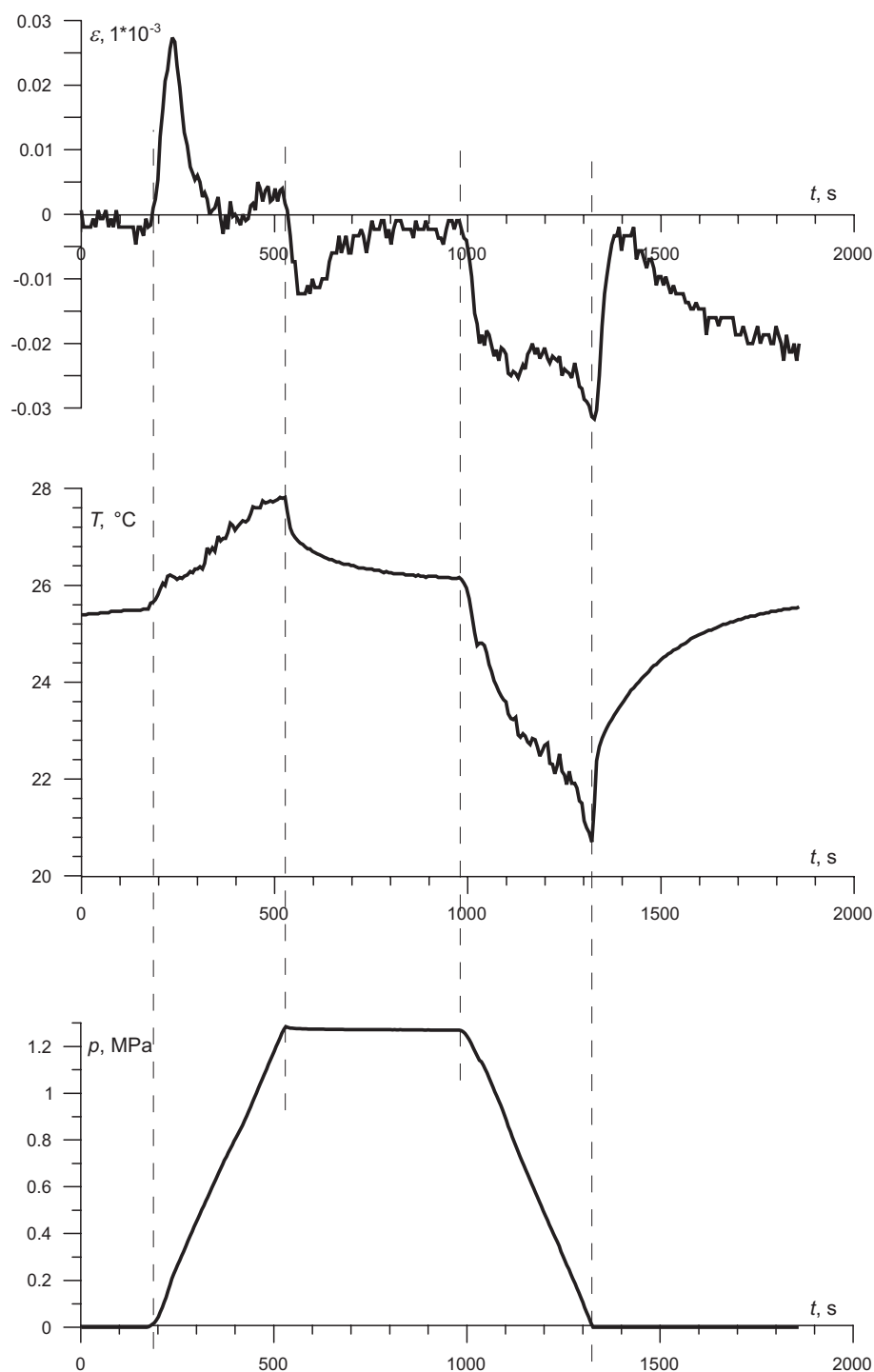
Rys. 9. Próbkę z zainstalowanymi przetwornikami do pomiaru deformacji podłużnych



Rys. 10. Stabilność wskazań czujnika odkształcenia przy dobowych zmianach temperatury

wywołane dobowymi zmianami temperatury laboratorium. Zmiany wskazań czujnika mają wartość około  $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  i dają się wytłumaczyć rozszerzalnością termiczną granitu.

Ponieważ podczas napełniania i opróżniania komory należy spodziewać się zmian temperatury, przeprowadzono test wskazań czujnika przemieszczenia w takich warunkach. Komorę napełniano gazem od ciśnienia atmosferycznego do 1,5 MPa a następnie opróżniono do ciśnienia atmosferycznego. Zarówno sprężanie jak i rozprężanie trwało ok. 5 min. Rejestrowano wpływ zmian temperatury i ciśnienia w komorze na wskazania czujnika przemieszczeń. Otrzymane wyniki pokazano na rys. 11. Zmiany ciśnienia spowodowały zmiany temperatury w komorze o amplitudzie ok.  $8^{\circ}\text{C}$ . Skojarzone oddziaływanie temperatury i ciśnienia w podanym zakresie spowodowały niestabilność wskazań czujnika równoważną odkształceniom nie przekraczającym  $\pm 0,03$  promila.

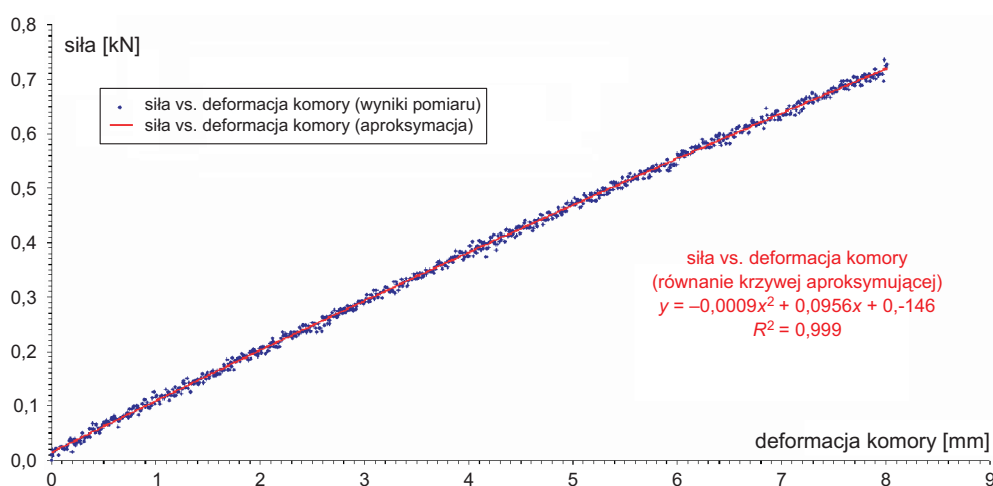


Rys. 11. Wpływ zmian ciśnienia w komorze na temperaturę w jej wnętrzu i stabilność wskazań czujnika odkształcenia



## 5. Pierwsze eksperymenty

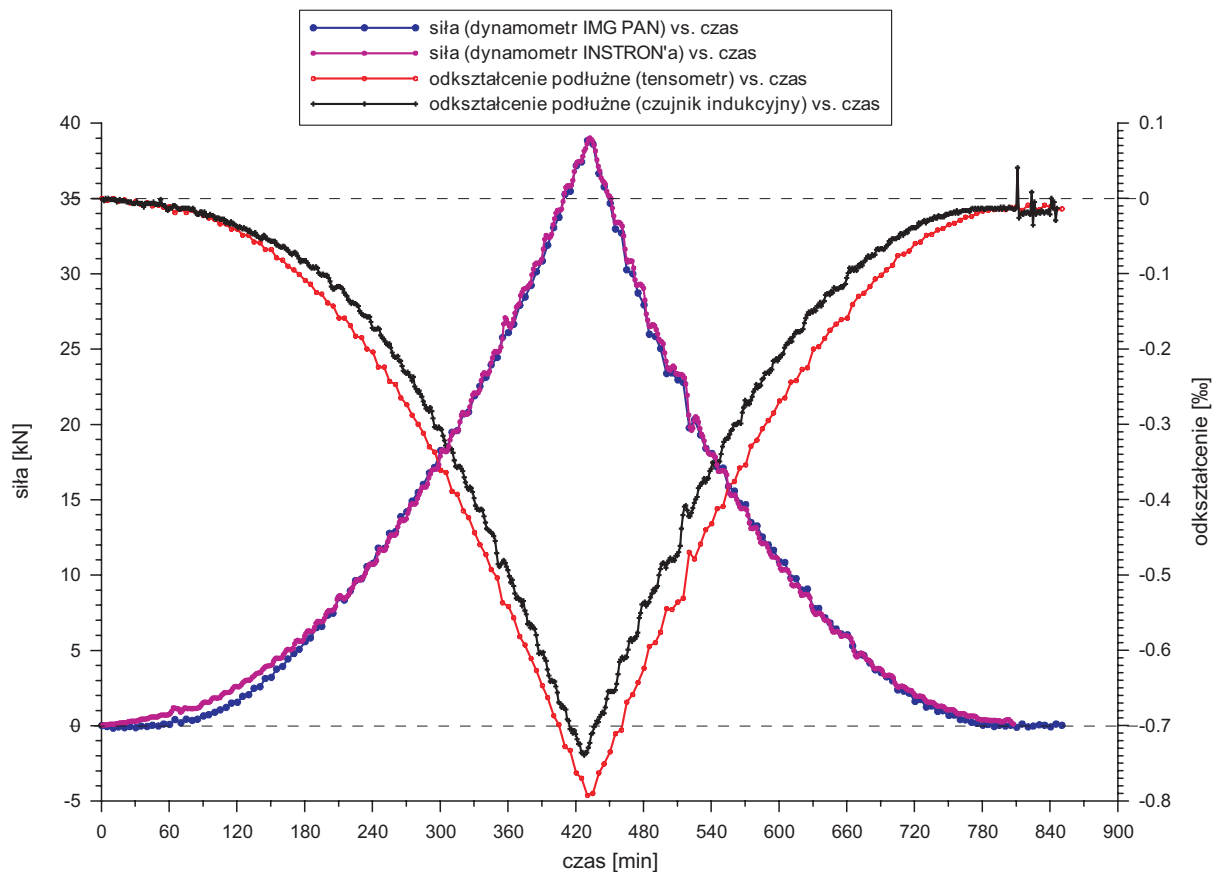
W trakcie projektowania i wykonywania komory wykonano szereg eksperymentów testujących części składowe samego urządzenia oraz zakładanego dla niego toru pomiarowego. Pierwszymi takimi eksperymentami były testy wzorcowania dynamometru, których ostateczny wynik omówiono w rozdz. 5 i pokazano na rys. 7. Następnie wykonano pomiar sztywności będącego podstawą konstrukcji komory kompensatora. Pomiar ten polegał na wykonaniu na komorze pętli obciążenie-odciążenie w zakresie deformacji komory, który producent uznaje za sprężysty i sprawdzeniu, jak w tym zakresie zmienia się siła w zależności od deformacji kompensatora, będącego podstawowym elementem konstrukcyjnym komory. Wynik odpowiedniego testu pokazuje rys. 12. Widać na nim, że w zakresie deformacji od 0 do 8 mm komora deformuje się sprężysto, choć nieliniowo, a wartość siły „oporu” kompensatora komory nie przekracza 0,8 kN.



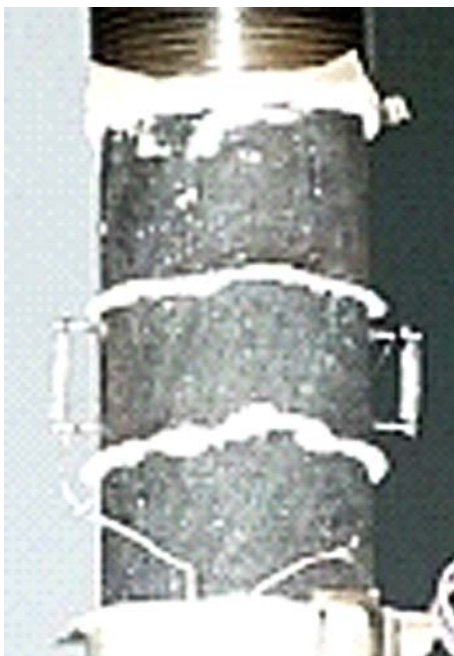
Rys. 12. Siła „oporu” kompensatora komory w zależności od jego deformacji

W ramach testów wykonywanych w celu sprawdzenia jakości wykonanych przetworników pomiarowych wykonano eksperyment, w którym siłę obciążającą próbkę jak i deformacje podłużne próbki mierzono niezależnie, przy pomocy różnych przetworników pomiarowych. I tak siłę obciążającą próbkę mierzono dynamometrem przedstawionym wyżej w rozdz. 5 (ozn. „dynamometr IMG PAN”) oraz dynamometrem maszyny wytrzymałościowej INSTRON Rock Testing System o zakresie 250 kN (ozn. „dynamometr INSTRON<sup>®</sup>a”), natomiast deformacje podłużne przetwornikami indukcyjnymi zaprojektowanymi i wykonanymi w IMG PAN (ozn. „czujnik indukcyjny”) oraz tensometrami elektrooporowymi (ozn. „tensometr”). Wyniki tak przeprowadzonych pomiarów pokazuje rys. 13. Wynika z niego, że w przypadku pomiaru wartości siły obciążającej jego wynik praktycznie nie zależy od zastosowanego przetwornika. Natomiast w przypadku pomiaru deformacji wartości pomierzone tensometrem były nieco większe od pomierzonych czujnikiem indukcyjnym (maksymalna różnica była rzędu 6,8%). Różnica ta spowodowana była nieco większą indukcyjnością doprowadzeń czujników indukcyjnych zamocowanych na próbce niż podczas ich kalibracji. Błąd ten skorygowano uznając wskazania tensometrów rezystancyjnych za wzorcowe.

Ostatni z prezentowanych tu eksperymentów związanych z testowaniem wykonanej komory podyktowany był problemami związanymi z uzyskaniem próbki o założonych wymiarach. Jak napisano w pkt. 2) rozdz. 2 niniejszego opracowania zaprojektowane urządzenie powinno umożliwiać wykonywanie eksperymentów na próbkach o średnicy rzędu 50 mm. Zasady pomiaru deformacji nakazują, aby wysokość próbki była w takim przypadku nie mniej niż dwukrotnie większa od jej średnicy (czyli w tym przypadku rzędu 100 mm). Jeśli, ze względu na możliwość powtarzania pomiarów na ustandaryzowanych próbkach, decydujemy się na pracę z wykorzystaniem brykietów węglowych to okazuje się, że wykonanie jednorodnego brykietu węglowego o takiej wysokości jest praktycznie niemożliwe. Powstało zatem pytanie, czy można jednolitą próbkę o wys. 100 mm zastąpić próbka złożoną z trzech ustawionych na sobie identycznych niższych próbek, przy czym pomiar deformacji byłby wykonywany na próbce środkowej. Aby to sprawdzić wykonano następujący eksperyment: próbkę litego węgla o średnicy 50mm i wysokości 100 mm (ozn. próbka

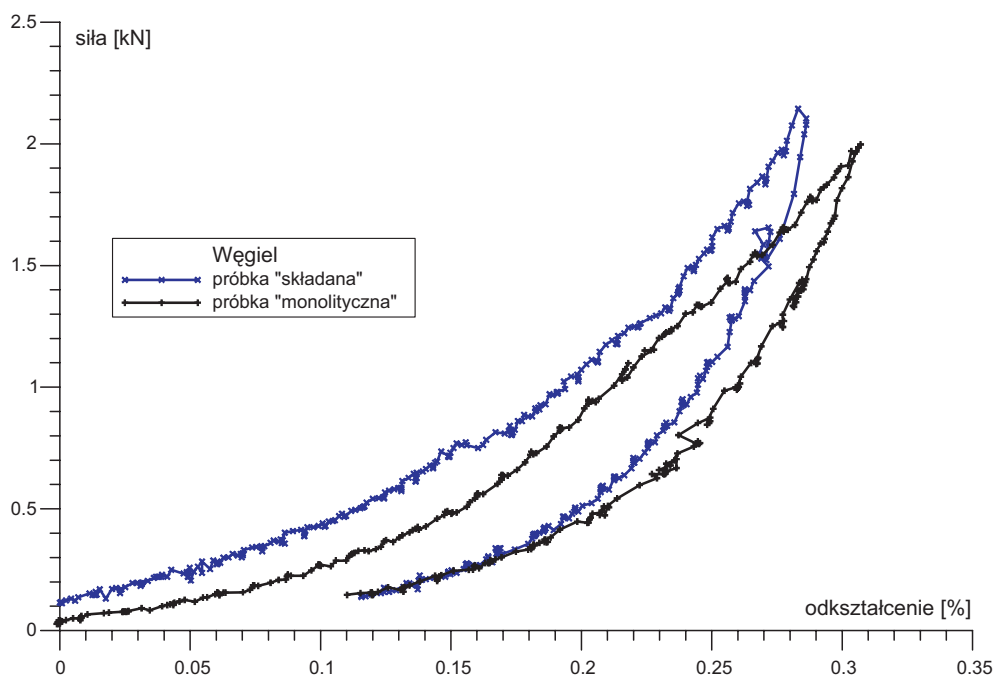


Rys. 13. Porównanie wyników pomiaru sił i deformacji różnymi metodami



Rys. 14. Próbką „składana”

monolityczna”) obciążono do wartości siły 2 kN i odciążono do zera, mierząc przy tym jej deformacje przetwornikiem indukcyjnym. Następnie, nie zdejmując przetworników deformacji, przecięto tę próbkę na trzy części i ponownie złożono, przy czym miejsca złożenia wyrównano gipsem (rys. 14) otrzymując próbkę, która nazwano próbką „składaną”. Dla tak wykonanej próbki wykonano identyczną pętlę obciążenie – odciążenie. Wyniki obu tych eksperymentów pokazuje rys. 15. Sądząc w wyglądzie pokazanych na tym rysunku krzywych wydaje się, że to czy próbka jest monolityczna czy też powstała wskutek złożenia z kilku próbek nie ma większego znaczenia, oczywiście pod warunkiem, że płaszczyzna złożenia nie znajduje się w obrębie bazy pomiarowej, na której mierzone są deformacje. Nieco mniejsze odkształcenia pomierzone w przypadku próbki „składanej” mogą być konsekwencją odkształceń trwałych, jakich próbka „monolityczna” doznała w wyniku pierwszej pętli obciążenie – odciążenie lub też usztywnienia próbki będącego konsekwencją wprowadzenia przekładek gipsowych. Nie ulega wątpliwości, że sposób składania takiej próbki wymaga jeszcze dopracowania.



Rys. 15. Zależność między siłą obciążającą próbkę a jej deformacją uzyskana dla próbek „monolitycznej” i „składanej”

## 6. Podsumowanie

Podsumowując to, co napisano powyżej należy stwierdzić, iż w świetle rozpoznania literaturowego celowym wydaje się podjęcie prac zmierzających do określenia wpływu procesów sorpcyjnych na własności mechaniczne węgla kamiennych. Znajomość tych relacji wpłynie na lepsze rozpoznanie układu węgiel-gaz sorbujący, co przyczynić się może do wyjaśnienia natury zagrożeń górniczych związanych z obecnością gazu w górotworze oraz podziemnego składowania  $\text{CO}_2$  w pokładach węgla kamiennego.

Wydaje się, że podjęta przez zespół badawczy próba wykonania komory pozwalającej na badanie próbek węgla i skał w atmosferze gazów sorbujących została zakończona sukcesem. Zaprojektowano i wykonano zarówno samą komorę jak i niezbędny do jej eksploatacji osprzęt oraz przeprowadzono szereg eksperymentów testujących zarówno samą komorę jak i poszczególne elementy toru pomiarowego. W chwili obecnej trwają prace nad dopracowaniem procedury pomiarowej na nowopowstałym stanowisku badawczym w IMG PAN oraz nad skonstruowaniem urządzenia ułatwiającego wykonywanie brykietów węglowych o odpowiednich wymiarach i jednakowej porowatości.

Praca została wykonana w roku 2009 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- Ates Y., Barron K., 1988. *The effect of gas sorption on the strength of coal*, Mining Science and Technology, Volume 6, Issue 3, March 1988, pp. 291-300.
- Aziz N.I., Ming-Li W., 1999. *The effect of sorbed gas on the strength of coal – an experimental study*, Geotechnical and Geological Engineering 17: 387-402.
- Bergen F., Spiers C., Floor G., Bots P., 2009. *Strain development in unconfined coals exposed to  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and Ar: Effect of moisture*, International Journal of Coal Geology, 77 (2009), 43-53.
- Ceglarska-Stefańska G., Zarebska K., 2005. *Sorption of carbon dioxide-methane mixtures*, Int. J. Coal Geol., 62, 211-222.
- Czapliński A., Gustkiewicz J., 1990. *Sorpcyjne naprężenia i odkształcenia w węglu*. (w:) „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. T. II”, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, s. 455-468.
- Day S., Fry R., Sakurovs R., 2008. *Swelling of Australian coals in supercritical  $\text{CO}_2$* , International Journal of Coal Geology, 74, 41-52.

- Ettinger, I.L., Lamba E.G., 1957. Gas medium in coal breaking process, *Fuel*, 36 (1957): 298
- Hołda S., 1990. *Wpływ sorpcji gazów, par i cieczy na wytrzymałość skal.* (w:) „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. T. II”, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, s. 443-453.
- Karacan C.O., 2007. *Swelling-induced volumetric strains internal to a stressed coal associated with CO<sub>2</sub> sorption*, *International Journal of Coal Geology*, 72, 209-220.
- Karacan C.O., 2003. *Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO<sub>2</sub> injection*, *Energy Fuels* 17, 1595-1608.
- Kelemen S.R., Kwiatek L.M., 2009. *Physical properties of selected block Argonne Premium bituminous coal related to CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub> adsorption*, *International Journal of Coal Geology*, 77, 2-9.
- Karacan C.O., Mitchell G.D., 2003. *Behaviour and effect of different coal microlithotypes during gas transport for carbon dioxide sequestration into coal seams*, *Int. J. Coal Geol.* 53, 201-217.
- Lama R.D., Bodziony J., 1996. *Outbursts of gas, coal and rock in underground mines*, Publisher Lama & Associates, Australia.
- Lama R.D., 1995. *Errors in gas content measurements in underground sampling of coal using cores*, *Int. Symp.-cum-Workshop on Management & Control of High Gas Emissions & Outbursts*, Wollongong, Mardh, pp. 557-567.
- Larsen J.W., 2004. *The effects of dissolved CO<sub>2</sub> on coal structure and properties*, *International Journal of Coal Geology*, 57, 63-70.
- Litwiniszyn J., 1990. *Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. T. I-II.* Praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków.
- Majewska Z., Ziętek J., 2007. *Acoustic emission and sorptive deformation induced in coals of various rank by the sorption-desorption of gas*, *Acta Geophysica*, vol. 55, no. 3, pp. 324-343.
- Majewska Z., Ceglarska-Stefańska G., Majewski S., Ziętek 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, 90-102.
- Nowakowski A., 1997. *Wpływ sposobu obciążania próbki w sztywnej maszynie wytrzymałościowej na wynik testu jednoosiowego ściskania.* (w:) „Geotechnika Górnicza i Budownictwo Podziemne”, mat. XX Zimowej Szkoły Mech. Górotworu, Szklarska Poręba 3-7 III 1997, Dolnośl. Wyd. Edukacyjne, Wrocław, s. 357-364.
- Nurkowski J., 2004a. *Bezdrzeniowy indukcyjny czujnik w pomiarach deformacji próbek skalnych.* (w:) XXVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górotworu. Budownictwo Specjalne. Zakopane, 14-19 marca 2004. tom , s. 195-204.
- Nurkowski J., 2004b. *An inductive strain sensor for operation in high pressure environments.* *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, Vol. 41, pp. 175-180.
- Nurkowski J., 2008. *A referential method of strain measurements in a high-pressure cell using an inductive coreless sensor.* *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, vol. 45, Is. 1, January 2008, pp. 103-110.
- Ryncarz T., 1990. *Napężenia w węglu wywołane zmianą zawartości gazu.* (w:) „Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. T. II”, J. Litwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, s. 469-486.
- Tankard J.H.G., 1957. *The effect of sorbed carbon dioxide upon the strength of coals*, M.Sc. thesis, The University of Sydney, Australia.
- Topolnicki J., Wierzbicki M., Skoczylas N., 2004. *Wyrzuty skalno-gazowe w świetle badań laboratoryjnych i pomiarów kopalnianych*, *Arch. Min. Sci., Special Issue*, 49, s. 99-116.
- Viete D.R., Ranjith P.G., 2006. *The effect of CO<sub>2</sub> on the geomechanical and permeability behaviour of brown coal: Implications for coal seam CO<sub>2</sub> sequestration*, *International Journal of Coal Geology*, 66 (2006), 204-216.
- Viete D.R., Ranjith P.G., 2007. *The mechanical behaviour of coal with respect to CO<sub>2</sub> sequestration in deep coal seams*, *Fuel*, 86 (2007), 2667-2671.
- www.tehaco.com.pl: strona internetowa firmy **TEHACO Sp. z o.o.**

## Experimental facility for testing rock and coal samples in the gaseous atmosphere and under pressure

### Abstract

The study briefly describes the activities associated with the design and engineering of a specialised chamber enabling the resistance tests of rock and coal samples in the atmosphere of sorbing gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>). The chamber enables the testing of samples with the diameter up to 50 mm and height up to 100 mm under the pressure of gas filling the chamber up to 2 Mpa. It is equipped with force and strain transducers designed and engineered in the Laboratory of Rock Deformation at the Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences. The study provides the results of the first experiments performed to test the behaviour of the chamber and its major equipment.

**Keywords:** resistance tests, sorbing gas, force measurements, strain measurement, calibration of transducers