## Zależność wyniku testu ściśliwości próbki węgla od rodzaju płynu porowego

Andrzej Nowakowski. Janusz Nurkowski, Zbigniew Lizak

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

#### Streszczenie

Prowadzone dotychczas w Pracowni Odkształceń Skał badania laboratoryjne wykazały, że właściwości mechaniczne skał zależą od rodzaju płynu wypełniającego przestrzeń porową skały. W celu sprawdzenia czy dla węgla zachodzą podobne zależności jak dla skał przebadano testem ściśliwości dwie serie cylindrycznych próbek z dwóch węgli pochodzących z KWK Brzeszcze i KWK Zofiówka. Próbki testowano w stanie powietrznie-suchym oraz nasączone naftą i wodą destylowaną.

Wyniki badań pokazały, że test ściśliwości w przypadku węgla ma zasadniczo inny przebieg niż w przypadku skały i to niezależnie od rodzaju zastosowanego płynu porowego. Uzyskane krzywe ściśliwości okazały się nieliniowe w całym zakresie stosowanych ciśnień, wykazały brak odkształceń trwałych oraz brak zależności między kształtem krzywej ściśliwości a typem cieczy porowej (sorbująca vs. inertna). Wydaje się, że przyczynami zaobserwowanych zjawisk mogą być budowa węgla, a w szczególności struktura jego przestrzeni porowej, zasadniczo inna niż w przypadku badanych do tej pory skał, oraz fizykochemiczne właściwości węgla jako sorbentu.

Slowa kluczowe: ściśliwość skał, test ściśliwości, krzywa ściśliwości, właściwości węgla, płyn porowy, płyn inertny, płyn sorbujący, sorpcja

## 1. Wstęp

Prowadzone dotychczas w Pracowni Odkształceń Skał badania laboratoryjne wykazały, że właściwości mechaniczne skał zależą od rodzaju płynu wypełniającego przestrzeń porową skały, przy czym na stopień tej zależność wpływa zarówno rodzaj skały jak i rodzaj płynu porowego. W Pracowni podejmowano również próby wykonywania analogicznych badań dla węgli, ale czyniono to nader rzadko przede wszystkim z uwagi na trudności z uzyskaniem dostatecznie dużej liczby próbek o zbliżonych właściwościach i wymiarach (por. Gustkiewicz i Orengo, 1991). Dodatkowym problemem były trudności w pomiarach deformacji próbek węgla związane z niemożnością stosowania tensometrów elektrooporowych.

W trakcie prac prowadzonych w 2012 r. udało się wykonać dwie serie cylindrycznych próbek z dwóch węgli pochodzących z KWK Brzeszcze i KWK Zofiówka oraz opracować sposób separacji próbek od cieczy w komorze wysokiego ciśnienia. Szczegółowe informacje na ten temat przedstawiono poniżej w rozdz. 2.

Deformacje próbek mierzono wykorzystując opracowaną w Pracowni Odkształceń Skał indukcyjną metodę pomiaru deformacji, która pozwala na ilościowy opis procesu deformacji objętościowej węgla przy wypełnieniu jego przestrzeni porowej różnymi płynami (por. Nurkowski, 2004, 2008).

## 2. Przygotowanie próbek do testu ściśliwości

Eksperyment ściśliwości wykonywany jest w komorze ciśnieniowej urządzenia GTA-10. Komora ta jest cylindrem o średnicy 50mm i wysokości 100mm. Uwzględniając konieczność zainstalowania na próbce czujnika odkształcenia i wykonania na niej osłony, średnica próbki nie może przekraczać 40 mm. Z drugiej strony, z uwagi na dużą niejednorodność struktury węgla (spękania) starano się uzyskać próbki o jak największej objętości, które można by uznać za w miarę reprezentatywne dla warunków "in situ".

#### 2.1. Sposób wykonania próbek węgla

W dotychczas wykonywanych na urządzeniu GTA-10 testach stosowano próbki różnych skał w kształcie walca o średnicy 22 mm lub 32 mm. Uzyskiwano je na drodze rdzeniowania koronką z większego bloku. W przypadku przedmiotowych węgli podjęto również taką próbę, przy czym, aby zapewnić stabilne zamocowanie brył węgla na stoliku maszyny rdzeniującej, bryły te zalano wstępnie zaprawą tynkarską. Tak przygotowane do rdzeniowania bloki węgla pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Bloki węgla unieruchomione zaprawą tynkarską na stoliku maszyny rdzeniującej

Niestety, nawet tak staranne przygotowanie materiału do rdzeniowania nie przyniosło powodzenia. Przeznaczony do badań węgiel okazał się zbyt słaby i nawet bardzo ostrożne rdzeniowanie koronką diamentową nie pozwoliło na uzyskanie odcinka rdzenia o dostatecznej długości. Sukces przyniosło dopiero wykonanie próbek metodą wieloetapową. Najpierw blok węgla cięto na plastry o grubości rzędu 32 mm. Z plastrów tych wycinano prostopadłościany o szerokości 32 mm i długości ok. 50 mm. Następnie krawędzie tych prostopadłościanów obcinano w taki sposób aby uzyskać wielościany o równoległych podstawach i przekroju możliwie zbliżonym do kołowego (por. rys. 2).



Rys. 2. Wielościenne bloczki węgla przed przetoczeniem na obrabiarce

# 2.2. Sposób wykonania osłon zapewniających izolacje próbek od cieczy wypełniających komorę wysokiego ciśnienia

Z uwagi na sposób wykonania testu ściśliwości oraz rodzaj płynu wypełniającego przestrzeń porową badanej próbki, wyróżnić można trzy sposoby przygotowania próbki do testu ścisliwosci:

- 1. Próbka nasączona jest płynem porowym identycznym jak ciecz wypełniająca komorę, a ciśnienie porowe *q* równe jest chwilowemu panującemu w komorze ciśnieniu hydrostatycznemu *p*; próbka pozbawiona jest osłon.
- 2. Przestrzeń porowa próbki musi być podczas eksperymentu odizolowana od cieczy wypełniającej komorę; stosuje się osłony izolujące próbkę od cieczy porowej.
- 3. Podczas eksperymentu wymagane jest sterowanie wartością ciśnienia porowego q niezależne od wartości ciśnienia hydrostatycznego p; stosuje się osłony izolujące próbkę od cieczy porowej oraz dodatkowy osprzęt (kowadła, sitka) mający zapewnić kontakt przestrzeni porowej z zewnętrznym źródłem ciśnienia.

Powyższe zestawienie pokazuje, że bez prawidłowego wykonania osłon wykonanie testu ściśliwości praktycznie nie jest możliwe.

Tradycyjna metoda wykonania osłony polegała na użyciu kilku sprężystych osłon lateksowych (pozyskanych z gotowych palców ochronnych). Osłony te naciągano na próbkę ustawioną pomiędzy pomocniczymi krótkimi, metalowymi, walcowymi kowadełkami umieszczonymi na podstawach próbki a następnie nasuwano na osłony lateksowe winidurowe rurki termokurczliwe. Pierwsza osłona lateksowa wypełniała pod wpływem zewnętrznego ciśnienia hydrostatycznego ewentualne małe wżery na pobocznicy próbki skalnej, nawet tracąc przy tym szczelność, następne dwie osłony lateksowe zapewniały szczelność, a osłona termokurczliwa izolowała osłony lateksowe od destrukcyjnego wpływu nafty na lateks. Walcowe kowadełka uszczelniały podstawy próbki. Niestety, pomimo wielu prób, taki sposób izolowania próbek okazał się w przypadku węgla nieskuteczny. Nawet najbardziej starannie i delikatnie wykonana próbka węgla miała liczne i głębokie wżery i pęknięcia, w które ciśnienie wgniatało wszystkie warstwy osłon przerywając je i cały układ tracił szczelność. Dodatkowym problemem było uzyskanie wystarczająco dokładnego splanowania podstaw próbki, koniecznego dla zapewnienia szczelności względem podstawy metalowego kowadełka. Zastosowanie do tego docierarki powodowało rozrywanie próbek. Ręczne szlifowanie podstaw próbek było mało dokładne oraz powodowało wykruszane węgla na obrzeżach.

Rozwiązaniem przedstawionych powyżej problemów okazało się opracowanie metody izolowania próbek węgla połączonego ze wstępnym wyrównaniem ich powierzchni. Wyglądała ona następująco: pierwszym krokiem było gipsowanie powierzchni próbki w celu wypełnienia istniejących nierówności. Gips wypełniał szczeliny na całej powierzchni próbki, a po wyschnięciu był szlifowany papierem ściernym celem usunięcia jego nadmiaru. Tak przygotowana próbka była wygrzewana w temperaturze około 110°C przez kilkanaście godzin, aby usunąć wilgoć z próbki pochodzącą z procesu jej wycinania z bloku węgla i gipsowania. Następnie próbkę gruntowano płynem akrylowym i powlekano trzema warstwami pasty akrylowej zarówno na pobocznicy jak i na podstawach tak, aby łączna grubość osłony akrylowej wynosiła ok. 2 mm. Taki sposób zabezpieczenia próbki pozwolił na wyeliminowanie konieczności stosowania pomocniczych kowadełek klejonych do czół próbki.

Urządzenie GTA-10 daje możliwość wykonywania badań wytrzymałościowych z jednoczesnym połączeniem przestrzeni porowej próbki ze środowiskiem zewnętrznym. Połączenie to jest realizowane poprzez otwór o średnicy 1mm znajdujący się w korku komory. Otwór ten umożliwia np. nasączanie próbki różnymi płynami podczas zmian ciśnienia hydrostatycznego w komorze oraz sterowanie ciśnieniem porowym w próbce. Jest to tak zwany eksperyment drenowany. Aby zapewnić niezbędną w takim przypadku szczelność styku próbki w korkiem komory stosuje się pomocnicze metalowe cylindryczne kowadełko o wysokości około 15 mm z trzpieniem. Poprzez kowadełko wraz z trzpieniem przechodzi koncentryczny otwór o średnicy 1mm łączący się z otworem w korku. Trzpień zaopatrzony jest w uszczelkę typu O-ring, która wchodzi w gniazdo korka od strony komory uszczelniając połączenie kowadełko-korek. Pozostaje uszczelnić połączenie kowadełko-próbka na powierzchni ich pobocznic. W takim przypadku niezbędne jest wykonanie cylindrycznej próbki o średnicy identycznej jak średnica kowadełka i podstawie płaskiej w sto-sunku do kowadełka. Próbki takie wykonywano przez przetoczenie na obrabiarce próbek wielościennych wycinanych wcześniej za pomocą piły tarczowej (por. rys. 3). Uszczelnienie próbek przebiegało w sposób uprzednio opisany, tzn. gipsowano próbkę, szlifowano a następnie zespół próbka-kowadełko pokrywano pastą akrylową.



Rys. 3. Uzyskane do eksperymentów próbki walcowe

#### 2.3. Pomiar odkształceń podczas testu ściśliwości

Z uwagi na sygnalizowaną już wyżej strukturę i teksturę próbki węglowej nie było możliwe użycie do pomiaru jej deformacji naklejanych na pobocznicę tensometrów rezystancyjnych (Nurkowski, 2007). Pomiary te wykonano zatem wykorzystując zaprojektowane i wykonane w IMG PAN bezrdzeniowe czujniki indukcyjne (Nurkowski, 2004). Czujniki te instalowano na cienkich stalowych prętach wklejonych w próbkę węgla. Pręty te, o długości 10 mm i średnicy 0.8 mm, wklejano żywicą epoksydową w dwa otwory wywiercone w próbce w odległości kilku milimetrów od jej końców na głębokość około 5 mm w taki sposób, aby wystawały ponad powierzchnie próbki ok. 5 mm. W ten sposób uzyskano bazę pomiarową o długości około 40 mm. Po wklejeniu tych prętów próbka pokrywana była pastą akrylową. Przygotowaną do badań próbkę z wklejonymi prętami ale przed pokryciem osłoną akrylową przedstawia rys. 4. Czujnik mocowano do wspomnianych prętów poprzez lutowanie.

Podczas eksperymentu rejestrowano dwa sygnały: sygnał z czujnika pomiarowego oraz sygnał z tzw. czujnika odniesienia zamocowanego obok próbki na stalowym wsporniku. Umożliwiło to minimalizację błędów pomiaru deformacji wynikających z oddziaływania na czujnik pomiarowy zmniennego ciśnienia i temperatury (Nurkowski, 2008). Przygotowaną do eksperymentu próbkę z zainstalowanymi czujnikami pomiarowym i odniesienia pokazano na rys. 5.

#### 3. Test ściśliwości dla skał – informacje ogólne

Pod pojęciem testu ściśliwości skały rozumie się eksperyment, w którym umieszczona w komorze wysokiego ciśnienia próbka skalna ściskana jest ciśnieniem hydrostatycznym *p*, czemu towarzyszy pomiar zmian objętości próbki *e*. Uzyskana dla próbki zależność odkształcenie objętościowe – ciśnienie hydrostatyczne nosi nazwę krzywej ściśliwości, przy czym – z uwagi na sposób kształtowania podczas eksperymentu wartości ciśnienia porowego *q* – rozróżniamy dwa podstawowe typy takich krzywych (Gustkiewicz, 1990): krzywą ściśliwości skały w stanie powietrznie suchym – oznaczaną *q* = 0, oraz krzywą ściśliwości fazy stałej (szkieletu) skały – oznaczaną *q* = *p*. Przykłady takich krzywych uzyskanych dla piaskowca z francuskich Wogezów pokazano na rys. 6.

Krzywą ściśliwości skały w stanie powietrznie suchym otrzymuje się ściskając próbkę, której przestrzeń porowa wypełniona jest powietrzem pod ciśnieniem atmosferycznym. Zmierzone w takiej sytuacji deformacje próbki są w istocie sumą deformacji jej szkieletu oraz przestrzeni porowej a sama krzywa ściśliwości jest sumą odcinków liniowych i nieliniowych łączących się w pewnych punktach charakterystycznych. Odpowiadające tym punktom ciśnienia hydrostatyczne zaznaczono na rys. 6. Są to:  $p_0$ - ciśnienie zamykania spękań i  $p_C$ - ciśnienie konsolidacji (szczegółowe informacje patrz Gustkiewicz, 1990).

Krzywą ściśliwości szkieletu skały uzyskuje się zapewniając podczas eksperymentu równość ciśnienia porowego q i panującego w komorze ciśnienia hydrostatycznego p (stąd oznaczenie q = p). W takiej



Rys. 4. Próbka ze szczelinami wypełnionymi gipsem i wklejonymi prętami do instalacji czujnika deformacji



Rys. 5. Próbka uszczelniona pastą akrylową, podwieszona do korka komory. Skrajne sprężyny mocują próbkę poprzez jarzmo, w środku: z lewej czujnik odniesienia, z prawej pomiarowy



Rys. 6. Krzywe ściśliwości i uzyskiwane na ich podstawie wielkości charakteryzujące skałę; piaskowiec Wogezy (Gustkiewicz, 1990)

sytuacji deformacja porów nie zachodzi, a zmierzone odkształcenia pozostają wyłącznie odkształceniami materii skalnej.

Zaprezentowane na rys. 6 krzywe ściśliwości umożliwiają wyznaczenie dwóch bardzo ważnych stałych materiałowych: modułu ściśliwości skały K – definiowanego jako kąt nachylenia prostoliniowej części krzywej q = 0 do osi odciętych, oraz modułu ściśliwości szkieletu skały  $K_S$  – który definiowany jest jako kąt nachylenia do tej samej osi prostoliniowej części wykresu q = p. Cenne uwagi o znaczeniu tych stałych dla ilościowego opisu właściwości skał znaleźć można u Gustkiewicza (1989) oraz Fabre'a i Gustkiewicza (1998). Ostatnią ze stałych materiałowych możliwą do wyznaczenia na podstawie krzywej ściśliwości jest tzw. porowatość spękań  $n_0$ , która mówi nam o udziale w przestrzeni porowej tzw. spękań, czyli takich porów, dla których niemniej niż jeden wymiar jest co najmniej o rząd mniejszy od pozostałych. Parametr  $n_0$  wyznaczony jest przez odciętą punktu przecięcia prostej przedłużającej liniowy odcinek krzywej p = 0 z osią odciętych.

Już na podstawie powyższych uwag można stwierdzić, jak duży wpływ na kształt krzywych ściśliwości oraz wartości wyznaczanych na ich podstawie stałych materiałowych ma obecność ciśnienia porowego. Dodatkowo Dutka i in.(2008) pokazali, że istotna jest nie tylko sama wartość parametru *q*, ale także rodzaj płynu wypełniającego przestrzeń porową. W szczególności okazało się, że istotnym jest nie tylko stan skupienia płynu porowego (ciecz lub gaz), ale także jego własności fizykochemiczne, zwłaszcza sorpcyjne. Niniejsze opracowanie zawiera informacje o wynikach próby rozszerzenia prowadzonych w 2008 r. badań na szczególnego rodzaju skałę, jaką jest węgiel.

## 4. Ściśliwość węgla – wyniki badań

Jak już sygnalizowano we wstępie przedmiotem badań były próbki węgli kamiennych pochodzących z dwóch kopalń: KWK Zofiówka i KWK Brzeszcze dalej zwane odpowiednio: węglem "Zofiówka" i węglem "Brzeszcze". Testy ściśliwości wykonano dla próbek znajdujących się w stanie powietrznie-suchym oraz takich, których przestrzeń porowa nasączona została naftą lub wodą destylowaną. Nie udało się wykonać testów dla próbek nasączonych dwutlenkiem węgla.

## 4.1. Węgiel "Zofiówka"

Wyniki testów ściśliwości wykonanych dla próbek z węgla "Zofiówka" pokazano na rys. 7. Należy zwrócić uwagę na następujące cechy charakterystyczne pokazanych na nim krzywych:

- a) odkształcenia objętościowe próbki powietrznie-suchej są znacząco większe niż w przypadku próbek nasączonych cieczami,
- b) na krzywa ściśliwości dla próbki w stanie powietrznie suchym wykazuje powstanie dużych odkształceń trwałych (ok. 0.55%),
- c) wszystkie otrzymane krzywe ściśliwości mają charakter nieliniowy,
- d) praktycznie nie ma różnicy między krzywą ściśliwości dla próbki nasączonej wodą i nasączonej naftą.

Porównanie krzywych pokazanych na rys. 7 z typowymi krzywymi z rys. 6 pokazuje pewną, bardzo istotną, różnicę. Jest nią nieliniowy charakter wszystkich uzyskanych krzywych ściśliwości, co pociąga za sobą niemożność wyznaczenia dla tego węgla odpowiednich modułów ściśliwości objętościowej *K* i *K<sub>s</sub>*. Warto również zwrócić uwagę, że rodzaj cieczy porowej wydaje się nie wpływać na przebieg testu ściśliwości. Na rys. 7 kształt krzywych ściśliwości dla próbek nasączonych wodą destylowaną i naftą jest praktycznie identyczny.

#### 4.2. Węgiel "Brzeszcze"

Krzywe ściśliwości uzyskane dla węgla "Brzeszcze" pokazano na rys. 8. W porównaniu z wynikami uzyskanymi dla węgla "Zofiówka" zwracają uwagę następujące fakty:

- *i)* w przypadku wszystkich rozważanych wyników odkształcenia objętościowe próbek mają wartości porównywalne, choć nie identyczne,
- ii) w prezentowanych wynikach praktycznie nie pojawiają się deformacje trwałe,
- iii) wszystkie prezentowane krzywe mają charakter nieliniowy,
- *iv)* próbka nasączona woda destylowana wykazała podczas eksperymentu odkształcenia objętościowe znacząco większe niż próbka nasączona naftą.



Rys. 7. Krzywe ściśliwości uzyskane dla węgla "Zofiówka"



Rys. 8. Krzywe ściśliwości uzyskane dla węgla "Brzeszcze"

Porównanie krzywych na rys. 8 i 6 prowadzi do wniosków zbliżonych – acz nie identycznych – jak w przypadku porównania rys. 6 i 7. Uzyskane dla węgla "Brzeszcze" krzywe ściśliwości mają charakter nieliniowy, niezależnie od rodzaju płynu porowego. Natomiast w przypadku tego węgla obserwowalna jest różnica w kształcie krzywych ściśliwości w zależności od rodzaju cieczy porowej. Próbka nasączona wodą miała odkształcenia znacząco większe od próbki nasączonej naftą.

## 5. Podsumowanie i dyskusja wyników

Wyniki wykonanych eksperymentów ściśliwości próbek węgla pozwalają na sformułowanie pewnych wniosków dotyczących zarówno metodyki badań jak i pewnych właściwości mechanicznych węgla jako materiału tworzącego górotwór. To, co najbardziej rzuca się w oczy podczas analizy krzywych ściśliwości węgla z rys. 7 i 8 to ich kształt, zdecydowanie różniący się od kształtu – uznanych za wzorcowe – krzywych z rys. 6. Przede wszystkim krzywe ściśliwości węgla nie dają możliwości wyznaczenia takich charaktery-stycznych ciśnień jak ciśnienie zamykania spękań czy ciśnienie konsolidacji. Krzywe z rys. 7 i 8 pozostają nieliniowe w całym zakresie ciśnień i odkształceń, przy czym wydaje się, że ze wzrostem ciśnienia hydrostatycznego odkształcenia objętościowe stopniowo maleją (próbka się usztywnia?). Oczywistą konsekwencją nieliniowego charakteru omawianych krzywych jest także niemożność wyznaczenia modułu ściśliwości węgla w sposób pokazany na rys. 6.

Ten, tak podkreślany wyżej, brak odcinka liniowego na krzywych ściśliwości węgla stawia przed interpretatorem wyników omawianych badań zasadnicze pytanie: na ile dopuszczalne jest traktowanie węgla jako materiału liniowo sprężystego, podlegającego prawu Hooke'a? Wiadomo przecież, że cztery stałe materiałowe, które można wykorzystać w równaniach Hooke'a (moduł Younga, współczynnik Poissona, moduł ściśliwości objętościowej, moduł ściśliwości postaciowej) nie są od siebie niezależne i niemożność wyznaczenia modułu ściśliwości objętościowej wg schematu z rys. 6 stwarza uzasadnione podejrzenie, że podobny problem może się powtórzyć w przypadku np. modułu Younga. Z drugiej strony w modelowaniu matematycznym i numerycznym górotworu węglowego równania liniowej teorii sprężystości stosowane są powszechnie i jak się wydaje z dobrym skutkiem. Jak zatem należy interpretować uzyskane w laboratorium wyniki badań?

Kolejna istotna cecha prezentowanych krzywych ściśliwości to brak odkształceń trwałych i wyraźnie widoczna histereza sprężysta (wyjątkiem jest próbka węgla "Zofiówka" ściskana w stanie powietrznie-suchym, o czym niżej). Wydaje się, że w stosowanym zakresie ciśnień hydrostatycznych deformacje objętościowe badanych węgli mają charakter nieliniowy, ale sprężysty. Z jednej strony potwierdza to wyrażone powyżej wątpliwości, co do poprawności stosowania w opisie węgli prawa Hooke'a z drugiej zaś wskazuje, że pewna "sprężystość" może być cechą węgla, a zatem zastosowanie modelu liniowo sprężystego może być w niektórych przypadkach wystarczające.

Jedyną krzywą ściśliwości, dla której dają się zauważyć znaczące deformacje trwałe jest krzywa uzyskana dla próbki węgla "Zofiówka" ściskanej w stanie powietrznie suchym (rys. 7). Wartość tych deformacji trwałych sięga w tym przypadku ok. 0,5%. Takie zachowania tej akurat próbki wydaje się być konsekwencja jej budowy. Próbka ta – pokazana na rys 9. – miała bowiem przechodzącą przez nią skośnie płaszczyznę nieciągłości (którą wskazano na rysunku białą strzałką). Płaszczyznę tę można utożsamić z makropęknieciem, które podczas hydrostatycznego ściskania zamyka się trwałe i w konsekwencji daje dużą trwałą zmianę objętości próbki.

Analizując krzywe ściśliwości pokazane na rys. 7 i 8 należy dłużej zatrzymać się nad krzywymi uzyskanymi dla próbek nasączonych cieczami. Zacząć wypada w tym przypadku od pytania o ew. przyczyny obserwowanej nieliniowości. Wydaje się, że podstawową przyczyną może być niecałkowite wypełnienie próbki cieczą porową. W takiej sytuacji deformacja próbki nie jest – jak zakładamy dla tego typu testów – deformacją wyłącznie szkieletu badanego węgla, ale sumą deformacji szkieletu i tych porów, które nie były wypełnione cieczą. Hipoteza taka jest tym bardziej prawdopodobna, że prowadzona metodą wagową kontrola procesu nasączania wodą próbek węgla wykazała, iż próbki wchłonęły mniej niż 1 cm<sup>3</sup> wody, co – przy objętości próbki rzędu 42 cm<sup>3</sup> – stanowi nie więcej niż 2,5% tej objętości. Ten wynik dobrze koresponduje z obserwacjami mikroskopowymi przedmiotowych węgli przeprowadzonymi przez dr inż. Katarzynę GODYŃ z Pracowni Mikromerytyki IMG PAN. Obserwacje te pokazały, że w żadnej czterech badanych próbek objętościowy udział spękań nie przekroczył 2,5%. Wiadomo również, że porowatość substancji węglowej w zasadzie nigdy nie jest niższa niż 5% a zazwyczaj jest to wartość ok. 10%. W naszym przypadku oznaczałoby to, że przeważającą część przestrzeni porowej badanego węgla stanowią pory izolowane lub też pory o tak małych wymiarach, że ciecz nie jest wstanie ich zapełnić nawet pomimo wcześniejszego odpompowania z nich powietrza. W takim przypadku wspomniany wyżej w rozdz. 3 eksperyment q = p jest po prostu niewykonalny, gdyż nie ma możliwości wypełnienia cieczą całej przestrzeni porowej.



Rys. 9. Próbka węgla "Zofiówka" ściśnięta w stanie powietrznie – suchym (strzałka wskazuje makropęknięcie)

Kończąc prezentację wyników badań trzeba jeszcze odnieść się do niewielkich różnic między krzywymi ściśliwości uzyskanymi dla próbek wypełnionych naftą i wodą destylowaną. W przypadku węgla "Zofiówka" (rys. 7) krzywe te są praktycznie identyczne zarówno pod względem jakościowym jak i ilościowym. W przypadku węgla "Brzeszcze" (rys. 8) odkształcenia próbki nasączonej wodą są ok. połowę wyższe od odkształceń próbki nasączonej naftą (różnica ilościowa), ale kształt obu krzywych jest zbliżony (jakościowo krzywe można uznać za takie same). Biorąc pod uwagę, iż przyjmowane przy badaniach skał założenie, że nafta jest płynem fizykochemicznie obojętnym w przeciwieństwie do fizykochemicznie czynnej wody destylowanej wydaje się wątpliwe gdy potencjalnym sorbentem jest węgiel (trudno bowiem uznać mieszaninę węglowodorów jaką jest nafta za inertną wobec węgla), uzasadnionym wydaje się domniemanie, że ta różnica ilościowa jest jedynie konsekwencją różnic w strukturze próbek a nie w sposobie oddziaływania płynu porowego.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

- Dutka B., Lizak Z., Nowakowski A., Nurkowski J., Wierzbicki M., 2008: Zależność wartości współczynnika Biota od rodzaju medium porowego. Prace IMG PAN, t. 10, nr 1-4, str. 3-16
- Fabre, D., Gustkiewicz, J., 1998: Influence of rock porosity on the Biot's coefficient. In: "Poromechanics A Tribute to Maurice A. Biot", Proc. of the Biot Conf. on Poromech., Louvain-la-Neuve (Belgium), 14-16 Sept. 1998, Thismus et al. (eds.), Balkema, Rotterdam

Gustkiewicz J., 1989: Objętościowe deformacje skały i jej porów. Arch. Min. Sci., Vol. 34, Issue 3, p. 593-609

- Gustkiewicz J., 1990: *Deformacje i wytrzymałość skał w trójosiowym stanie naprężenia z uwzględnieniem płynów porowych.* W: "Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe", praca zbiorowa, J. Litwiniszyn (ed.), Wydawnictwo AGH, t. 1, str. 96-136
- Gustkiewicz J., Orengo Y., 1991. Zmiany zachowania węgla pod działaniem wody. W: Górotwór jako ośrodek wielofazowy. Wyrzuty skalno-gazowe. T. III – Suplement, J. Liwiniszyn (red.), Wyd. AGH, Kraków, str. 763-781
- Nurkowski J., 2004. An inductive strain sensor for operation in high pressure environments. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 41, pp. 175-180
- Nurkowski J., 2007. The coreless inductive sensor for strain measurement of rock samples in a pressure cell some advantages and disadvantages in relation to the electrical resistance strain gauges. Arch. Min. Scs.; Vol. 52, Iss. 3; pp. 311-330
- Nurkowski J., 2008. A referential method strain measurements in a high-presure cell using an inductive coreless sensor. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol. 45, pp. 103-110

#### Relationship between type of pore fluid and result of coal sample compressibility test

#### Abstract

Laboratory tests that have been conducted until now in the Laboratory of Rock Deformations have shown that the mechanical properties of rocks depend on the type of fluid filling the pore space of the rock. In order to check whether the same dependencies were true for hard coal compressibility tests were carried out for two series of cylindrical samples from Brzeszcze and Zofiówka hard coal mines. The samples were tested in an air-dry state as well as when they were saturated with distilled water or kerosene.

The experiments showed that the compressibility test gave for coal substantially different results than in the case of rocks and it happened regardless of the type of pore fluid. The obtained compressibility curves were non-linear in full range of applied pressure, showed no permanent deformation and the lack of correlation between the shape of compressibility curve and type of pore fluid (inert vs. non-inert). It seemed that the causes of the observed phenomena could be as follows: coal construction, in particular the structure of its pore space, substantially different than in the case so far studied rocks, and physicochemical properties of the coal as a sorbent.

Keywords: rock compressibility, compressibility test, compressibility curve, cola properties, pore fluid, inert and non-inert fluid, sorption