

Łukasz Kaczmarek

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

Dominik Łukasiak

Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii

Michał Maksimczuk, Tomasz Wejrzanowski

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Materiałowej

Wykorzystanie wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej oraz analizy ultradźwiękowej w charakterystyce struktury paleozoicznych gazonośnych łupków z basenu bałtyckiego

W artykule przedstawiono metodykę badań próbek z horyzontów perspektywicznych dla eksploatacji łupków gazonośnych z polskiej części basenu bałtyckiego. Do badań wykorzystano wysokorozdzielczą mikrotomografię komputerową (μ CT) oraz pomiar czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez próbki. Uzyskany rozmiar piksela obrazu μ CT dla próbek o większych rozmiarach wynosił 25 μ m, natomiast dla niewielkich fragmentów próbek było to 5 μ m. W badaniach ultradźwiękowych czynnikiem o dominującym wpływie na uzyskiwane wyniki okazała się szczelinowatość, która oddziaływała tłumiąco na propagację fal. Na podstawie analizy μ CT określono procentowy udział szczelin w próbkach (średnia 0,82%) oraz przekroje przedstawiające strukturę wewnętrzną próbek z morfologią szczelin. Na podstawie prędkości propagacji fal ultradźwiękowych przez próbki obliczono dynamiczne parametry modułu Younga (zakres wyników 22÷57 GPa) oraz współczynnika Poissona (0,21÷0,40). Otrzymane wyniki wskazują na wysoką przydatność stosowania analiz ultradźwiękowych oraz wysokorozdzielczej tomografii komputerowej jako badań uzupełniających się.

Słowa kluczowe: łupki basenu bałtyckiego, sylur, rentgenowska mikrotomografia komputerowa, analizy ultradźwiękowe.

The use of high-resolution X-ray computed microtomography and ultrasonic analysis for structure characterization of Paleozoic gas-bearing shales of the Baltic Basin

The article presents the methodology of characterization research of samples from prospective horizons for the exploitation of shale gas from Polish part of the Baltic Basin. High-resolution computed microtomography (μ CT) and ultrasonic technique were used for the analysis. The resulting pixel size of μ CT image for larger samples were 25 microns, while for small fragments of samples pixel size were 5 microns. In ultrasonic tests, fissures had a dominant impact on acoustic waves propagation. Extensive fissures surface resulted in attenuation of ultrasonic waves. Based on the μ CT analysis, percentage content of fissures in the samples (average 0.82%) were determined. Furthermore a cross-section of specimens revealed the internal structure and morphology of fissures. Dynamic parameters of Young's modulus (range 22÷57 GPa) and Poisson's ratio (0.21÷0.40) were calculated, by converting the process of propagation velocity of ultrasonic waves through the samples. Results indicate the suitability of the use of ultrasonic analysis and μ CT as complementary tests.

Key words: Baltic Basin shale, Silurian, computed microtomography, ultrasonic pulse technique.

Wprowadzenie

Obecnie w Polsce trwają badania i próby przemysłowe wydobycia gazu ziemnego ze złóż niekonwencjonalnych. Jednym z podstawowych zagadnień jest rozpoznanie struktury oraz właściwości skał łupkowych w celu zaprojektowania odpowiednich zabiegów technicznych udostępniających złożę. Na rozpoczęcie eksploatacji i zwiększenie jej produktywności pozwala zabieg szczelinowania hydraulicznego. Wybór odpowiedniego systemu szczelinowania wymaga rozpoznania właściwości geomechanicznych górotworu, m.in. poprzez wyznaczenie parametrów sprężystych w warunkach laboratoryjnych [6]. Na podstawie modułu Younga oraz współczynnika Poissona istnieje możliwość prognozowania typu zniszczenia. Powszechnie stosowanym badaniem mającym na celu określenie parametrów sprężystych jest analiza ultradźwiękowa. Drugie narzędzie, pozwalające na rozpoznanie struktury wewnętrznej próbki oraz określenie objętości szczelin w materiale badawczym, stanowi technika wysokorozdzielczej mikrotomografii komputerowej (μ CT).

W literaturze można spotkać wiele przykładów zastosowania μ CT w analizach skał z różnych basenów naftowych: kredowych piaskowców Botucatu [1], permskich piaskow-

ców czerwonego spągowca [2] czy też skał typu węglany [9]. Mikrotomografia jest również stosowana do odtworzenia trójwymiarowej powierzchni szczelin [8]. Podstawy teoretyczne μ CT zostały opisane w artykułach przeglądowych V. Cnudde i M. Boone'a [3] oraz R. Ketchama i W. Carlsona [7]. Zastosowanie fal ultradźwiękowych do analiz zmian właściwości geomechanicznych skał, również uwzględniające zmienność regionalną, przedstawiono m.in. w artykułach J. Pinińskiej i H. Attii [10] oraz J. Pinińskiej i A. Dziedzica [12]. Opracowania prezentujące metodykę badań ultradźwiękowych można znaleźć w publikacjach J. Pinińskiej i E. Drescher [11], a także J. Pinińskiej i P. Łukaszewskiego [13].

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki analiz μ CT oraz ultradźwiękowych próbek pochodzących z paleozoicznych łupków gazonośnych z polskiej części basenu bałtyckiego. Przeprowadzona analiza pozwala na ocenę przydatności wykorzystywania dwóch metod w analizach struktury wewnętrznej, określając także wskazówki metodologiczne. Uzyskane rezultaty umożliwiają również wykonanie charakterystyki jakościowej struktury próbek oraz ilościowej dynamicznych parametrów sprężystych, jak również szczelinowatości.

Materiał badawczy

Analizowany materiał badawczy to czarne łupki mułowcowo-ileste (rysunek 1) z gazonośnych horyzontów otworu wiertniczego z północnej Polski [15]. Pięć próbek datowanych jest na sylur – landower (ogniwo z Jantaru), pięć na ordowik – karadok (formacja z Sasina) oraz dwie na kambry górny (formacja z Piaśnicy). Wymienione próbki pochodzą ze skał osadowych zalegających na krystalicznym podłożu prekambryjskiego paleokontynentu Baltiki [14]. Utwory te były deponowane

w środowisku o niewielkiej subsydenacji i na podłożu o lekkim południowym nachyleniu, o czym świadczą małe miąższości osadów (od kilkudziesięciu do maksymalnie 100 m [14]). Rysunek 1A przedstawia orientację próbek w stosunku do rdzenia wiertniczego oraz powierzchni laminacji. Próbki sylurskie pochodzą z głębokości 2871,40÷2881,98 m, próbki ordowickie z 2893,35÷2904,45 m, a kambryjskie z 2945,20÷2946,15 m [17]. Próbki mają kształt walców o średnicy ~25 mm oraz



Rys. 1. A – orientacja próbek w stosunku do rdzenia wiertniczego oraz laminacji; B – przykład analizowanej próbki (*core plug*); C – *slice* wycięty z próbki

wysokości ~60 mm. Wycięte fragmenty próbek (*slice*) miały wysokość ~4 mm. Analizowane osady zostały zdeponowane

w głębszej strefie nerytycznej basenu bałtyckiego, na zachodnim skłonie kratonu wschodnioeuropejskiego [14].

Metodyka

Wysokorozdzielcza mikrotomografia komputerowa

Główną zaletą μ CT jest możliwość przeprowadzenia nieniszczącej, wielokrotnej analizy budowy wewnętrznej próbki. Próbka nie wymaga wcześniejszych specjalnych przygotowań. Obrazowanie mikrotomografią komputerową oparte jest na różnych liniowych współczynnikach absorpcji promieniowania rentgenowskiego (rtg) różnych obszarów o zmiennej gęstości lub liczbie atomowej badanego materiału. Wykonując skanowanie μ CT, użyto czasu naświetlania na poziomie 5 s z powiększeniem czterokrotnym na obiektywie oraz filtrem z miedzi zlokalizowanym między lampą rtg a próbką. Przy tych ustawieniach mikrotomografu w przypadku całej próbki (*core plug*) uzyskano rozmiar piksela 25 μ m. Dla wyciętych fragmentów (*slice*) dzięki zmniejszeniu obszaru analizy otrzymano rozmiar piksela 5 μ m. Napięcie lampy rtg podczas badania było równe 150 kV, natomiast natężenie wynosiło 90 μ A. W badaniu wykorzystano mikrotomograf Xradia MicroXCT-400, ze źródłem Hamamatsu L8121-03, które może generować promieniowanie rentgenowskie w zakresie od 40 kV do 150 kV. Obrazy powstałe z naświetlania stopniowo obracającej się o kąt 360° próbki poddano konwersji na format danych cyfrowych za pomocą kamery CCD (z powłoką scyntylacyjną) o rozdzielczości 2048 \times 2048 z 16-bitową głębią obrazu.

W celu weryfikacji uzyskanych wyników wykonano dwie serie prześwietleń. Pierwsza dotyczyła całej próbki (*core plug*), natomiast druga – wyciętego cienkiego plastra (*slice*). Takie zróżnicowanie zostało zastosowane ze względu na uzyskiwany rozmiar voxela (trójwymiarowy piksel). Zmniejszenie rozmiarów próbki umożliwia przeprowadzenie pomiaru z większą dokładnością (mniejszy rozmiar voxela), co skutkuje lepszym zobrazowaniem mikrostruktury. Serie zdjęć rentgenowskich – radiografów będących bezpośrednim wynikiem badania poddano rekonstrukcji w celu uzyskania zestawu 1024 wysokorozdzielczych obrazów w formacie bitmap. Na podstawie tego zestawu stworzono obraz trójwymiarowy (wykorzystując program SkyScan). Zrekonstruowane obrazy były przetwarzane do 256-stopniowej skali szarości, a następnie binaryzowane metodą progowania (ang. *thresholding*). Metoda ta mogła zostać wykorzystana z powodu dobrze widocznego obrazu budowy wewnętrznej. Dzięki temu procesowi możliwe stało się rozdzielenie konturów strukturalnych w obrazach μ CT próbek skał łupkowych. Kolejnym etapem przetwarzania obrazów było określenie obszaru analizy, który został poddany procesowi wygładzenia

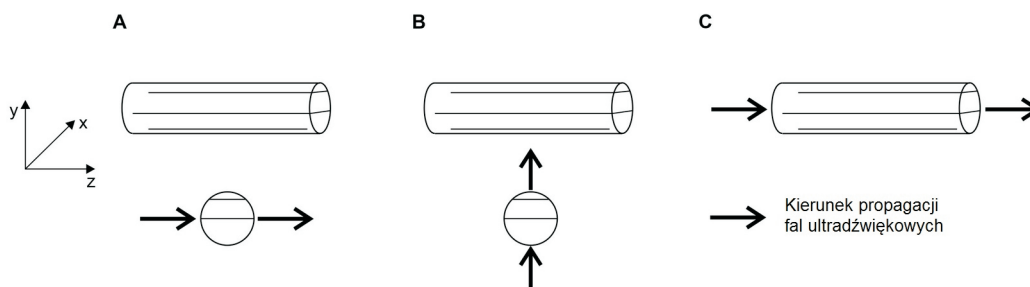
(mediana 9 sąsiadujących pikseli) oraz usunięcia zaburzeń. W ostatnim kroku określono stosunki voxelu szczeliny do objętości całej próbki.

Wyniki przetwarzania obrazów μ CT zostały wykorzystane do wizualizacji budowy wewnętrznej próbek wraz ze szczelinami. W celu ilościowego scharakteryzowania badanego materiału przeprowadzono obliczenia stosunku objętości szczeliny do całej objętości próbki ($V_v = V_s/V$, gdzie V_s to objętość szczeliny, natomiast V to objętość całego obszaru analizy). Obliczenie to wykonano, bazując na wynikach binaryzacji: przypisania numerycznego voxelom stanowiącym objętość szczeliny wartości 0, natomiast voxelom stanowiącym cząstki budujące badany materiał wartości 1. Należy podkreślić możliwe występowanie ilościowych różnic między objętością szczeliny w masywie skalnym (na głębokości ~3 km) i w materiale pobranym z rdzenia, w którym zapewne doszło do odprężenia. W celu szacunkowej weryfikacji wpływu naprężeń wykonano jednoosiowe ściskanie z równoczesnym skanowaniem μ CT, analizując obraz 3D z voxelom o długości boku 8,8 μ m. Przygotowane do tego badania dwie próbki miały kształt prostopadłościanu o stosunku wysokości do szerokości podstawy 2:1 (rozmiary około 3 \times 3 \times 6 mm).

Badania ultradźwiękowe

Badania ultradźwiękowe polegają na rejestracji czasu przejścia fali akustycznej przez próbkę [12]. Dzięki wyznaczeniu czasu i drogi przejścia fal (wysokości lub szerokości próbki) podłużnych i poprzecznych można określić prędkość i poprzez przeliczenie otrzymanych wartości ocenić właściwości sprężyste skały. Prędkość propagacji fal w ośrodku zależy m.in. od cech strukturalnych oraz przestrzeni porowej wraz ze szczelinowością [11]. Badania ultradźwiękowe zostały wykonane przy wykorzystaniu autorskiego systemu do pomiarów ultradźwiękowych prędkości fali podłużnej, poprzecznej i powierzchniowej Zakładu Geomechaniki Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego. Na system składają się: komputer z oprogramowaniem, generator fal, nadajnik fal i głowica odbiorcza fali ultradźwiękowej. Na rysunku 2 przedstawiono analizowane kierunki fal ultradźwiękowych. Czynniki, które ograniczają tę metodę, są: tłumienie fal ultradźwiękowych przez silnie porowate ośrodki skalne oraz zbyt długa droga fal [12].

W celu ustalenia dynamicznego modułu Younga oraz współczynnika Poissona wykorzystano wzory:



Rys. 2. Schemat kierunku propagacji fal ultradźwiękowych: A – równoległe do laminacji, B – prostopadłe do laminacji, C – równoległe do laminacji i po wysokości próbki

$$E_d = \rho v_p^2 \frac{(1 + \nu_d)(1 - 2\nu_d)}{(1 - \nu_d)}$$

$$\nu = \frac{0,5 - \left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2}{1 - \left(\frac{v_s}{v_p}\right)^2}$$

gdzie:

E_d – dynamiczny moduł Younga [GPa],

ν_d – dynamiczny współczynnik Poissona [–],

ρ – gęstość pozorna [g/cm³],

v_s – prędkość fali poprzecznej [m/s],

v_p – prędkość fali podłużnej [m/s].

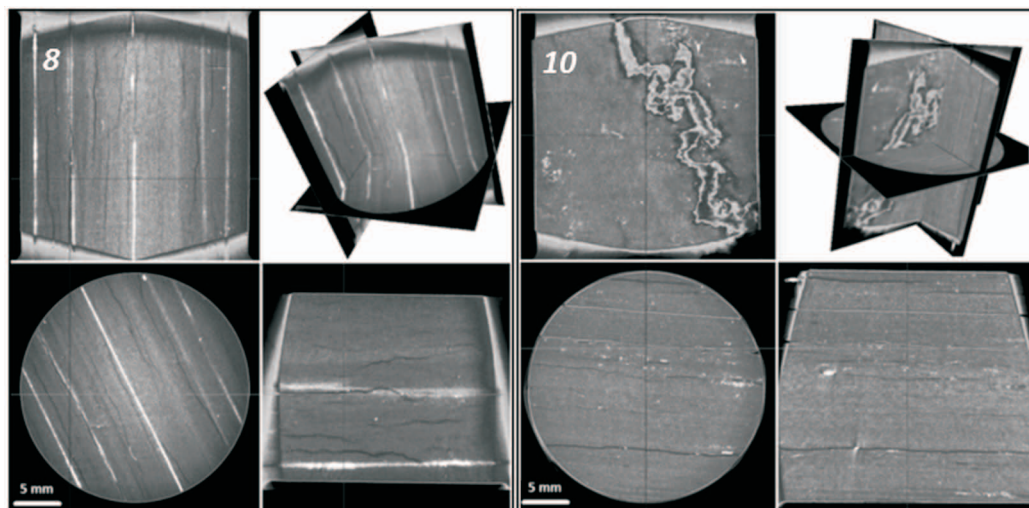
Obliczenia wykonano dla każdego kierunku (zgodnie z rysunkiem 2) propagacji fali, w którym nie nastąpiło jej wytłumienie. Do obliczeń wykorzystano gęstość pozorną, którą uzyskano na podstawie badania metodą wyporności w ciekłej parafinie, stosując normę PN-66/B-04100 [18]. Badania zostały przeprowadzone z częstotliwością fali akustycznej równą 500 kHz oraz z wykorzystaniem żelu do ultrasonografii (firmy Żelpol) jako medium sprzęgającego.

Wyniki i dyskusja

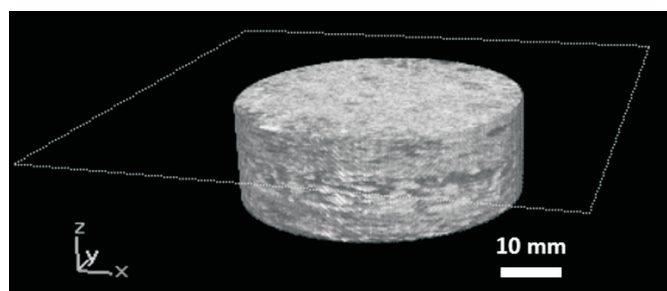
Dla oceny struktury wewnętrznej przeanalizowano przekroje poprzeczne i podłużne przez próbki (rysunek 3). Dodatkowo wykonano trójwymiarowy model numeryczny próbki, pozwalający na bardziej dokładną jakościową analizę próbek (rysunek 4). Charakterystyczne dla badanych łupków są szczeliny równoległe do laminacji oraz szczeliny zablźnione pirytem (skład chemiczny potwierdzony badaniami SEM). Oprócz szczelin o prostej, regularnej geometrii wyróżniono szczeliny o rozwiniętej morfologii (rysunek 3, próbka nr 10). Część szczelin ma genezę wtórną w wyniku odprężenia skał podczas pobierania próbek lub uszkodzenia ich w czasie transportu. Wypełnienie szczelin mineralizacją wskazuje na pierwotną genezę.

Na rysunku 4 można zobaczyć słabą gradację ziaren pyłu i cząstek iltu z warstewkami wynikającymi ze spokojnej sedymentacji. W celu redukcji na obra-

zach μ CT artefaktów wynikających z ograniczeń technicznych oraz nieregularnej geometrii próbki zastosowano m.in. filtry z miedzi. Efektem wykorzystania metalowych filtrów jest absorbowanie niskoenergetycznego spektrum wiązki promieniowania [8]. Przedstawiona na rysunku 4 wizualizacja numeryczna (próbki nr 5) została przecięta płaszczyzną równoległą do podstawy dla uzyskania obrazu budowy wewnętrznej.



Rys. 3. Przykłady rezultatów przetwarzania obrazów μ CT (próbki nr 8 i 10)



Rys. 4. Trójwymiarowa rekonstrukcja μ CT próbki nr 5 przecięta płaszczyzną równoległą do podstawy

W celu analizy wpływu naprężeń na budowę wewnętrzną próbki rejestrowaną za pomocą mikrotomografu wykonano dwie próby ściskania jednoosiowego z równoczesnym naświetlaniem rtg i rejestracją obrazu. Maksymalne naprężenia, jakie osiągnięto podczas ściskania, to 32 MPa. Dla weryfikacji zmian próbek nakładano obrazy przed i po ściskaniu. Przy danych ustawieniach oraz wywołanych naprężeniach nie odnotowano zmian.

W tabelicy 1 przedstawiono wyniki analiz ultradźwiękowych wraz ze szczelinowatością oraz zawartością pirytu. Rezultaty bez zakłóceń, pozwalające na wyznaczenie czasu przejścia fali podłużnej i poprzecznej, uzyskano w kierunku osi x , równoległe do laminacji. Z powodu tłumienia otrzymano szacunkowe wyniki zgodnie z osią z (równoległe do laminacji). Nie uzyskano wyników w kierunku prostym do szczelin z powodu zbyt dużego tłumienia przez przestrzenie puste szczelin. Szczelinowatość w badanych próbkach

oscyluje wokół wartości średniej 0,85%, przy czym dla skał kambryjskich jest największa (1%), dla skał sylurskich mniejsza (0,82%), a najniższa w przypadku skał ordowickich (0,72%). Warto zwrócić uwagę na próbkę nr 10, której szczelinowatość różni się o ponad 100% w odniesieniu do szczelinowatości pozostałych próbek formacji z Sasina.

Można zauważyć spadek prędkości fal w próbkach nr 4, 8, 11 i 12 w wyniku tłumienia fal. W celu wyznaczenia parametrów sprężystych dla badanych próbek wykonano obliczenia współczynnika Poissona i modułu Younga, na podstawie prędkości fal ultradźwiękowych; wyniki przedstawiono w tabelicy 2. Warto zwrócić uwagę na próbkę nr 10, w przypadku której pomimo wysokiej szczelinowatości prędkości fal nie są najniższe. Dla wyjaśnienia tego wyniku należy wrócić do rysunku 3, przedstawiającego obraz struktury wewnętrznej próbki. Szczelinowatość na obrazie ma kształt mocno nieregularny i przez to możliwe jest przejście fali. Inaczej wygląda sytuacja w przypadku wyżej wymienionych próbek, w których szczeliny tworzą płaszczyzny o dużej rozciągłości, powodując powstanie ekranów tłumiących.

Zakresy wartości modułu Younga oraz współczynnika Poissona dla wszystkich wyników badanych próbek wynoszą odpowiednio 22÷57 GPa i 0,21÷0,40. Dla propagacji fal zgodnie z osią x moduł Younga znajduje się w zakresie 22÷47 GPa, natomiast współczynnik Poissona 0,27÷0,40. Średnie wartości modułu Younga oraz współczynnika Poissona dla wszystkich próbek, obliczone na podstawie prędko-

Tablica 1. Wyniki analizy prędkości fal ultradźwiękowych wraz ze szczelinowatością oraz zawartością pirytu

Numer próbki	Prędkość fali podłużnej		Prędkość fali poprzecznej		Stosunek prędkości fal		Szczelinowatość V_v [%]	Zawartość pirytu* [%]
	$v_{p x}$ [m/s]	$v_{p z}$ [m/s]	$v_{s x}$ [m/s]	$v_{s z}$ [m/s]	$k_{ x}$ [-]	$k_{ z}$ [-]		
1	4478,138	–	1896,230	–	2,4	–	1,3	–
2	4305,085	–	1960,028	–	2,2	–	1,0	–
3	4248,913	–	1927,601	–	2,2	–	1,0	–
4	3780,324	4332,915	1836,322	2620,662	2,1	1,653	0,4	–
5	4584,010	4712,379	2014,274	2735,335	2,3	1,723	0,4	–
6	4409,722	–	2291,798	–	1,9	–	0,1	3,2
7	4248,913	4163,751	2172,054	–	2,0	–	0,5	2,4
8	3829,916	4271,238	1890,022	2533,423	2,0	1,686	0,1	0,1
9	4547,896	–	2014,274	–	2,3	–	0,9	–
10	4409,722	–	2064,369	–	2,1	–	2,0	–
11	4248,913	4335,474	1732,488	–	2,5	–	0,7	–
12	3307,722	4512,877	1859,852	–	1,8	–	1,3	–

* W obliczeniach uwzględniono tylko większe skupiska pirytu, natomiast drobniejsze frakcje zostały zmarginalizowane.

Tablica 2. Wyniki obliczeń dynamicznych parametrów sprężystych na podstawie analizy fal ultradźwiękowych

Stratygrafia	Formacje geologiczne	Głębokość [m p.p.t.]	Numer próbki	Gęstość pozorna ρ [kg/m ³]	Moduł Younga		Współczynnik Poissona	
					$E_{ x}$ [GPa]	$E_{ z}$ [GPa]	$\nu_{ x}$ [-]	$\nu_{ z}$ [-]
Sylur (landower)	ogniwo z Jantaru	2871,40	1	2499	25	–	0,39	–
		2873,95	2	2473	26	–	0,37	–
		2875,75	3	2473	25	–	0,37	–
		2877,15	4	2443	22	46	0,35	0,21
		2881,98	5	2580	29	57	0,38	0,25
Ordowik (karadok)	formacja z Sasina	2893,35	6	2408	47	–	0,31	–
		2894,20	7	2395	43	–	0,32	–
		2896,03	8	2436	23	44	0,34	0,23
		2900,80	9	2480	28	–	0,38	–
		2904,45	10	2528	29	–	0,36	–
Kambr górny	formacja z Piaśnicy	2945,20	11	2655	22	–	0,40	–
		2946,15	12	2660	29	–	0,27	–

ści fal ultradźwiękowych w kierunku równoległym do laminacji po osi x , są odpowiednio równe 29 GPa oraz 0,35. Dla poszczególnych próbek z formacji geologicznych wartości te wynoszą odpowiednio: 25,4 GPa i 0,37 (ogniwo z Jantaru), 34 GPa i 0,34 (formacja z Sasina) oraz 25,5 i 0,34 (formacja z Piaśnicy). Otrzymane wyniki E i ν wskazują na plastyczny charakter zniszczenia – z powodu stosunkowo wysokiego współczynnika Poissona oraz modułów Younga na poziomie 29 GPa. W przypadku występowania takich parametrów w całych analizowanych formacjach geologicznych zalecany system szczelinowania jest system hybrydowy lub też żelowy płyn szczelinujący [16]. Należy zaznaczyć, że dokładny wybór płynu szczelinującego powinien być uzależniony również od składu chemicznego skał,

układu naprężeń panującego w górotworze oraz techniki tłoczenia płynu [7].

Analizując uzyskane wyniki, należy zaznaczyć, że wykorzystana liczba próbek przedstawia tylko możliwe obrazy i parametry, jakie mogą wystąpić w poszczególnych formacjach. Wyniki badań parametrów sprężystych można porównać z rezultatami uzyskanymi dla próbek z tych samych formacji i z tego samego otworu przedstawionymi w dokumentacji [17]. Otrzymane w omawianych badaniach wartości prędkości fal oraz parametrów sprężystych dla ogniwa z Jantaru są niewiele niższe, dla formacji z Sasina są zbliżone, natomiast dla formacji z Piaśnicy są niższe. Uwzględniając zmienność środowiska geologicznego, można uznać uzyskane wyniki za wiarygodne.

Podsumowanie

Scharakteryzowano 12 próbek z horyzontów perspektywicznych dla eksploatacji łupków gazonośnych z polskiej części basenu bałtyckiego. Próbki pochodzą z ogniwa z Jantaru, formacji z Sasina oraz formacji z Piaśnicy. Do badań wykorzystano wysokorozdzielczą mikrotomografię komputerową oraz pomiar czasu przejścia fal ultradźwiękowych przez próbki. W celu uzyskania klarownego obrazu podczas naświetlania w mikrotomografii niezbędne było wykonanie długiego pomiaru oraz zastosowanie metalowego filtru. Otrzymany rozmiar piksela to 25 μm oraz 5 μm . W badaniach ultradźwiękowych czynnikiem tłumiącym propagację

fal była szczelinowatość, w postaci powierzchni o dużych rozciągłościach, które stanowiły naturalne ekrany tłumiące. Dzięki rekonstrukcji radiografów z mikrotomografii uzyskano procentowy udział szczelin w próbkach (średnia 0,82%) oraz przekroje przedstawiające strukturę wewnętrzną próbek z morfologią szczelin. Na podstawie prędkości propagacji fal ultradźwiękowych przez próbki obliczono dynamiczne parametry modułu Younga (zakres wyników 22÷57 GPa) oraz współczynnika Poissona (0,21÷0,40). Otrzymane wyniki wskazują na wysoką przydatność stosowania analiz ultradźwiękowych oraz wysokorozdzielczej tomografii

komputerowej jako badań uzupełniających się. Dzięki użyciu tych dwóch technik badawczych można określić potencjalne czynniki wpływające na propagację fal akustycznych oraz ich relację z parametrami sprężystymi skał łupkowych,

co może być wykorzystane do badań skał złóż niekonwencjonalnych w warunkach laboratoryjnych, jak i do analizy czynników wpływających na pomiary ultradźwiękowe *in situ* w otworze wiertniczym.

Podziękowania

Prezentowane wyniki badań były finansowane z Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (umowa nr BG1/IRES/13).

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 12, s. 1017–1023, DOI: 10.18668/NG2015.12.10

Artykuł nadesłano do Redakcji 13.05.2015 r. Zatwierdzono do druku 1.07.2015 r.

Literatura

- [1] Appoloni C., Fernandes C., Rodrigues C.: *X-ray microtomography study of a sandstone reservoir rock*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 2007, vol. 580, s. 629–632.
- [2] Bielecki J., Jarzyna J., Bozek S., Lekki J., Stachura Z., Kwiatek W.: *Computed microtomography and numerical study of porous rock samples*. Radiation Physics and Chemistry 2013, vol. 93, s. 59–66.
- [3] Cnudde V., Boone M.: *High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications*. Earth-Science Reviews 2013, vol. 123, s. 1–17.
- [4] Czupski M., Kasza P., Wilk K.: *Płyny do szczelinowania złóż niekonwencjonalnych*. Nafta-Gaz 2013, nr 69, s. 42–50.
- [5] Dohnalik M.: *Zwiększenie możliwości wyznaczania parametrów zbiornikowych skał z wykorzystaniem rentgenowskiej mikrotomografii komputerowej*. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2013, s. 6–26.
- [6] Dziedzic A., Lukaszewski P.: *Metodyczne uwarunkowania badań geomechanicznych skał pobranych z dużych głębokości w trojosiowym stanie napreżenia*. Nafta-Gaz 2015, nr 1, s. 3–10.
- [7] Ketcham R., Carlson W.: *Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences*. Computers & Geosciences 2001, vol. 27, s. 381–400.
- [8] Lykowska G.: *Trojwymiarowa wizualizacja szczelin metoda mikrotomografii rentgenowskiej*. Nafta-Gaz 2012, nr 68, s. 959–964.
- [9] Machado A., Lima I., Lopes R.: *Effect of 3d computed microtomography resolution on reservoir rocks*. Radiation Physics and Chemistry 2014, vol. 95, s. 405–407.
- [10] Pininska J., Attia H.: *Use of geomechanical research in the conservation of stone monuments (Maadi Town Temple, Fayoum, Egypt)*. Geological Quarterly 2003, vol. 47, no. 1, s. 1–12.
- [11] Pininska J., Drescher E.: *Laboratoryjne badania akustyczne skał*. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geosynoptyka i Geotermia 1976, nr 2, s. 33–38.
- [12] Pininska J., Dziedzic A.: *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał*. Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Warszawa 2006.
- [13] Pininska J., Lukaszewski P.: *Rock failure in acoustic emission spectre*. Proc. 20th Meeting EWG – AE, Leuven 1992, s. 161–166.
- [14] Podhalanska T.: *Graptolity – narzędzie stratygraficzne w rozpoznawaniu stref perspektywicznych dla występowania niekonwencjonalnych złóż węglowodorów*. Przegląd Geologiczny 2013, vol. 61, nr 8, s. 460–467.
- [15] Poprawa P.: *Potencjal występowania złóż gazu ziemnego w łupkach dolnego paleozoiku w basenie bałtyckim i lubelsko-podlaskim*. Przegląd Geologiczny 2010, vol. 58, nr 3, s. 226–249.
- [16] Rickman R., Mullen M., Petre E., Grieser B., Kundert D.: *A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett Shale*. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver 2008, Colorado, SPE 115258.
- [17] Twardus E., Nowicka A.: *Dokumentacja wynikowa otworu badawczego Opalino*. Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo, Piła 2014.

Akty prawne i normatywne

- [18] Polska Norma PN-66/B-04100. *Oznaczenie gęstości pozornej, porowatości i szczelności*. PKN, Warszawa.



Mgr Łukasz KACZMAREK
Doktorant na Wydziale Geologii
Uniwersytetu Warszawskiego
ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa
E-mail: lukasz.kaczmarek@uw.edu.pl
Technolog na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej

ul. Wołoska 141, 02-507 Warszawa
E-mail: Lukasz.Kaczmarek@inmat.pw.edu.pl



Dr Dominik ŁUKASIAK
adiunkt
Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii
ul. Żwirki i Wigury 93
02-089 Warszawa
E-mail: dominik.lukasiak@uw.edu.pl



Mgr Michał MAKSYM CZUK
Technolog na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej
ul. Wołoska 141
02-507 Warszawa
E-mail: michal.maksimczuk@inmat.pw.edu.pl



Dr inż. Tomasz WEJRZANOWSKI
Adiunkt na Wydziale Inżynierii Materiałowej
Politechniki Warszawskiej
ul. Wołoska 141
02-507 Warszawa
E-mail: twejrzanowski@inmat.pw.edu.pl