



Edyta PUSKARCZYK*, Paulina KRAKOWSKA*, Kamila WAWRZYNIAK-GUZ*, Jadwiga JARZYNA**

Badania prędkości fal sprężystych i charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa w warunkach trójosiowego ściskania dla wybranych skał klastycznych i węglanowych

Streszczenie: W pracy analizowano wyniki pomiarów laboratoryjnych wykonanych na próbkach o zróżnicowanej litologii. Głównym celem było sprawdzenie, jak zmieniają się wartości prędkości fal sprężystych i dynamicznych modułów sprężystych w trójosiowym stanie naprężenia. Pomiary wykonano z wykorzystaniem nowatorskiego zestawu będącego na wyposażeniu Katedry Geofizyki, WGGiOŚ, AGH. Zestaw pomiarowy składa się z komory ciśnieniowej, prasy hydraulicznej i dźwigu oraz generatora fal sprężystych i specjalistycznego oprogramowania. Umożliwia pomiary prędkości fal podłużnych P i poprzecznych S wraz z pełną charakterystyką naprężeniowo-odkształceniową w trójosiowym stanie naprężenia. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane dla ciśnień okólnych odpowiednio dobranych dla głębokości występowania oraz wieku poszczególnych próbek. Pomiary wykonywano do momentu zniszczenia próbki. Wykonano analizę zmian prędkości przy stopniowym osiowym obciążaniu próbki. W efekcie uzyskano prędkości fal sprężystych oraz charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe. Uzyskano wyższe wartości prędkości fal sprężystych przy symulowanych ciśnieniach złożowych niż podczas pomiarów w warunkach atmosferycznych. Wyniki zestawiono z pozostałymi, dostępnymi rezultatami badań laboratoryjnych, np. porównaniami wyznaczonymi z eksperymentów NMR i porozymetrii rtęciowej. Równoczesne pomiary prędkości fal sprężystych P i S oraz charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa przy symulowanym ciśnieniu górotworu są efektywnym narzędziem do odtworzenia w laboratorium warunków złożowych i uzyskania wiarygodnych wartości dynamicznych i statycznych parametrów sprężystych i geomechanicznych.

Słowa kluczowe: badania laboratoryjne skał, prędkości fal sprężystych, charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa, skały klastyczne, skały węglanowe

* Dr inż., ** Prof. dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Katedra Geofizyki WGGiOŚ; e-mail: puskar@agh.edu.pl

Elastic wave velocities measurements and stress-strain characteristics under triaxial compression conditions for clastic and carbonate rock samples

Abstract: The results of laboratory measurements performed on samples with varied lithology were analyzed. The main objective was to see how the values of elastic wave velocity at triaxial stress conditions change. Measurements were made using the innovative equipment located at the Department of Geophysics, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, AGH University of Science and Technology. The measuring set consists of a pressure chamber, a hydraulic press, a crane and specialized software. It enables the measurements of the velocity of longitudinal (P) and transverse (S) waves along with full stress-strain characteristics in triaxial stress conditions. The results of the measurements were obtained at reservoir pressure, suitably selected for the depth and age of the individual samples. Measurements were made until the sample was fractured. As a result, the velocity of the elastic waves and the stress-strain characteristics were obtained. A velocity analysis with simulated reservoir pressure conditions was performed, referring to the deformation characteristics of the samples. Higher velocity values were obtained at simulated reservoir pressures than during atmospheric measurements. The results were compiled with the other available laboratory results, such as porosities determined by NMR and mercury porosimetry experiments. The simultaneous measurements of P and S wave velocity and stress-strain characteristics at simulated reservoir pressure are an effective tool for reproducing reservoir conditions in laboratory conditions and obtaining reliable dynamic and static elastic and geomechanical parameters.

Keywords: rocks lab measurements, elastic wave velocities, stress-strain characteristics, clastic, carbonates

Wprowadzenie

Laboratoryjne pomiary parametrów sprężystych i mechanicznych skał, pomimo swojego punktowego charakteru, są wiarygodnym źródłem informacji o własnościach geomechanicznych skał. Z powodzeniem mogą stanowić źródło odniesienia do korelacji i weryfikacji pomiarów otworowych i powierzchniowych. Wyznaczone w laboratorium prędkości fal podłużnej P i poprzecznej S oraz dynamiczne i statyczne moduły sprężyste są dowiązywane zarówno do wyników profilowania akustycznego, jak i do pomiarów sejsmicznych. Najlepszą spójność danych uzyskuje się w sytuacji, gdy w laboratorium pomiary wykonywane są w symulowanych warunkach złożowych.

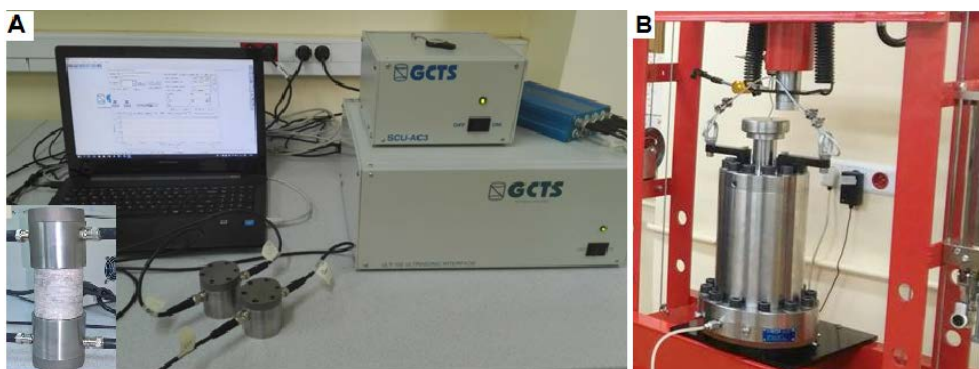
W artykule przedstawiono wyniki testów wytrzymałościowych w komorze ciśnieniowej w trójosiowym stanie naprężeń z pełną rejestracją stanu naprężeń i odkształceń, wraz z równoczesnym pomiarem prędkości fal podłużnej i poprzecznej. Obliczono również i porównano dynamiczne moduły sprężystości. Dodatkowym celem pracy było wykonanie badań pilotażowych z wykorzystaniem zestawu do badań własności sprężystych i geomechanicznych, ULT-100 i HTRX-070 (GCTS, USA), będących na wyposażeniu Laboratorium Badań Własności Sprężystych i Mechanicznych Katedry Geofizyki, WGGiOŚ, AGH.

1. Metodyka badań i materiał badawczy

Badania przeprowadzono w Laboratorium Badań Własności Sprężystych i Mechanicznych Katedry Geofizyki, WGGiOŚ, AGH.

Do badań parametrów sprężystych wykorzystano zestaw P&S Ultrasonic Velocity System ULT-100, firmy GCTS, USA (ULT-100; CATS, 1994–2004) (rys. 1A). Aparat-

tura pomiarowa składa się z generatora fal sprężystych oraz czujników, które posiadają płytki testowe z wbudowanymi kryształami piezoelektrycznymi (wykorzystano czujniki o częstotliwości własnej drgań 200 kHz). Zestaw umożliwia rejestrację pełnych obrazów falowych fal *P* i *S* oraz wyliczenie dynamicznych modułów sprężystych w warunkach ciśnienia atmosferycznego. Zapis wyników pomiarów wraz z automatyczną, cyfrową rejestracją przebiegów falowych wykonano z użyciem specjalistycznego oprogramowania GCTS Ultrasonic Velocity.



Rys. 1. Zestaw Ultrasonic Velocity System ULT-100, firmy GCTS, USA, do pomiarów parametrów sprężystych (A) oraz zestaw do testów wytrzymałościowych High Pressure Triaxial Cell HTRX-070, firmy GCTS, USA (B)

Fig. 1. Ultrasonic Velocity System ULT-100, GCTS, USA for elastic parameter measurements (A) and High Pressure Triaxial Cell HTRX-070, GCTS, USA for endurance tests (B)

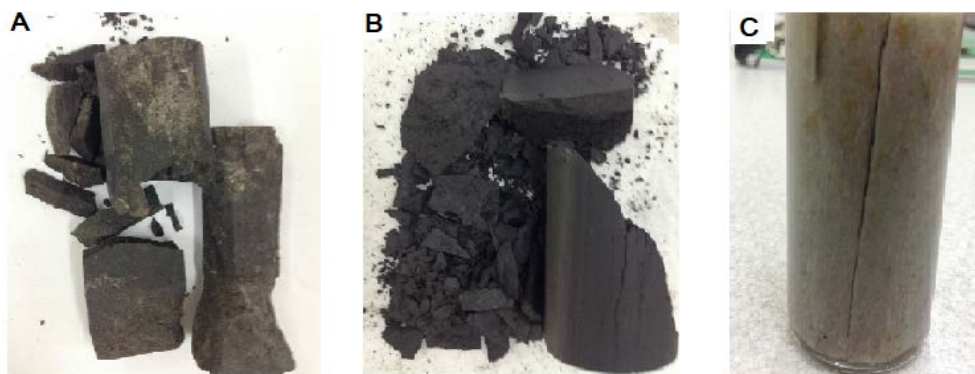
Zestaw ULT-100 został połączony z komorą ciśnieniową, dzięki czemu rejestracja prędkości fal sprężystych i dynamicznych modułów sprężystości może odbywać się równocześnie z testami wytrzymałościowymi – próbkę wewnątrz komory umieszcza się między dodatkowymi czujnikami (tutaj: o częstotliwości drgań własnych 200 kHz), które połączone są z zewnętrznym generatorem fal sprężystych i rejestrują pełne obrazy falowe (odbiornik) podczas testu wytrzymałościowego. Pomiar prędkości i dynamicznych modułów sprężystości odbywa się automatycznie co 30 s, symultanicznie wykonywane są pomiary prędkości fal *P* i *S*.

Testy wytrzymałościowe wykonano z wykorzystaniem komory ciśnieniowej High Pressure Triaxial Cell HTRX-070, firmy GCTS, USA ([HTRX-070L](#)) (rys. 1B), umożliwiającej pomiar pełnej charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej w warunkach jedno- i trójosiowego stanu naprężeń wraz z równoczesną rejestracją prędkości fal *P* i *S*. W skład zestawu pomiarowego wchodzi: sztywna prasa hydrauliczna z systemem do rejestracji wytrzymałości i odkształcalności, dźwig, kompresor, zestaw czujników, komora ciśnieniowa oraz dedykowane oprogramowanie. Maksymalne wartości ciśnienia osiowego oraz obciążenia osiowego możliwe do zaaplikowania wynoszą odpowiednio 70 MPa i 500 kN. Czułość czujników do pomiarów odkształceń osiowych i radialnych wynosi odpowiednio 10^{-3} i 10^{-4} mm. Do pomiarów wykorzystano czujniki pozwalające na po-

miary rdzeni o średnicach 2,5 cm oraz długości 5 cm. Możliwość wykonania pomiarów dla małych średnic próbek rdzeni jest dużym ułatwieniem, zwłaszcza w sytuacji badań na rdzeniach pobranych z otworów wiertniczych, gdzie często nie dysponuje się dużą ilością materiału badawczego.

Materiał badawczy stanowiły rdzenie pobrane z poziomów, które są traktowane jako potencjalne, niekonwencjonalne skały zbiornikowe dla węglowodorów. Wszystkie próbki zostały pobrane z poziomów utworów paleozoiku. W pracy przedstawiono wyniki dla trzech próbek, reprezentujących trzy typy litologiczne:

- a) próbka nr 1 (rys. 2A) – dolomit dewoński, dolomit wapnisty, skrytokrystaliczny. Porowatość efektywna wynosi 4,5%, przepuszczalność $< 0,01$ mD, natomiast gęstość objętościowa $2,77$ g/cm³;
- b) próbka nr 2 (rys. 2B) – łupek sylurski, mułowiec ilasty, bezwapnisty, z widoczną alternacją mułowców ciemnoszarych i szarzielonych. Porowatość ogólna wynosi 6,3%, porowatość efektywna (z porozymetrii rtęciowej MIP) 2,15%, przepuszczalność 0,176 mD, zawartość TOC (*Total Organic Carbon*) 2,01% wag., natomiast gęstość objętościowa i właściwa szkieletu wynoszą odpowiednio $2,52$ i $2,58$ g/cm³;
- c) próbka nr 3 (rys. 2C) – piaskowiec kambryjski, średnioziarnisty, o znacznej zawartości pirytu, próbka pobrana z poziomu kambru środkowego, podczas wiercenia zarejestrowano ślady ropy. Porowatość efektywna (z magnetycznego rezonansu jądrowego NMR) wynosi 3,24%, przepuszczalność 3 mD oraz gęstość objętościowa $2,58$ g/cm³.



Rys. 2. Zdjęcia próbek 1A, 2B i 3C po teście wytrzymałościowym

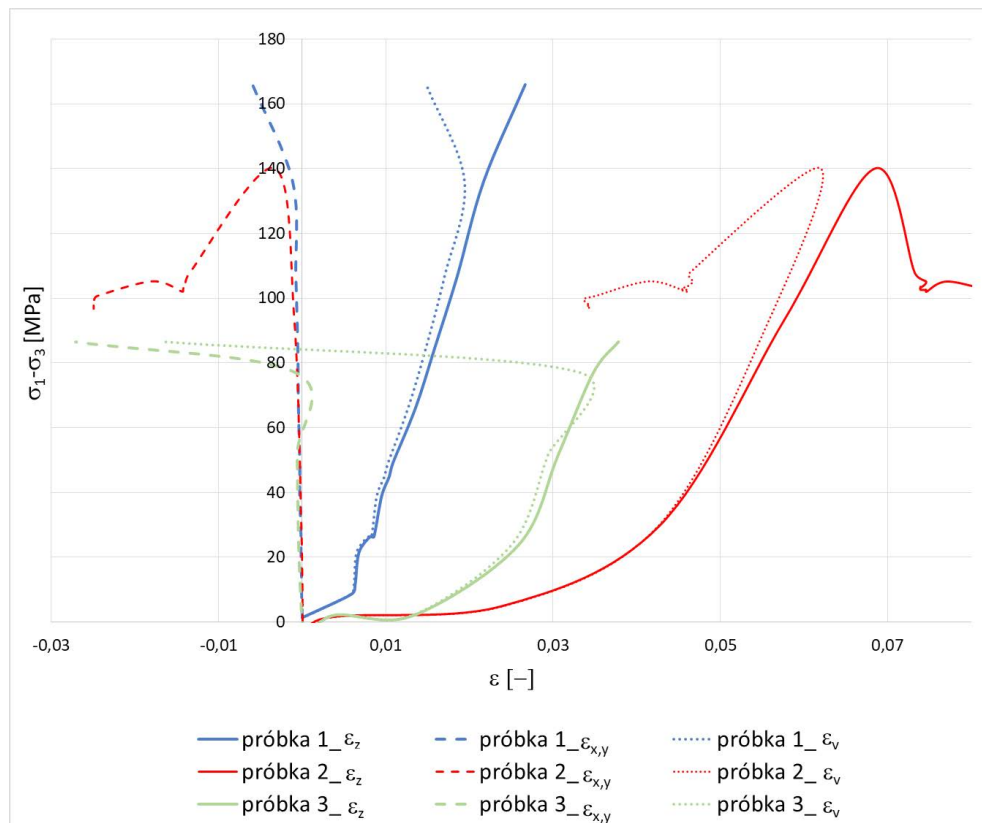
Fig. 2. Picture of 1(A), 2(B) and 3(C) samples after endurance test

Przed wykonaniem właściwych pomiarów wykonano szereg pomiarów testowych w celu jak najlepszego doboru parametrów pomiaru. W pracy zaprezentowano wyniki testu trójosiowego ściskania, polegającego na zadaniu założonego ciśnienia okólnego (dobranego dla próbek indywidualnie, w zależności od głębokości poboru próbki), a następnie stopniowego obciążania osiowego próbki, aż do momentu zniszczenia. Dla próbek 1, 2 i 3, na podstawie informacji o głębokości ich zalegania, dobrano wartości ciśnienia okólnego wynoszące

odpowiednio 50, 30 i 20 MPa. Zastosowana metodyka pomiarowa i interpretacyjna była zgodna z normami ASTM D-4543, ASTM D7012 oraz zaleceniami ISRM (*International Society for Rock Mechanics*). Pomiary sterowane były stałą prędkością obciążania osiowego. W pracy nie badano wpływu temperatury (pomiaru wykonano w temperaturze 21°C), a jedynie wpływ ciśnienia na własności sprężyste skał.

2. Analiza wyników badań

Dla analizowanych próbek sporządzono wykresy przedstawiające charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowe (rys. 3). Wykresy rozróżniono kolorystycznie ze względu na numer próbki oraz szrafurą w zależności od rejestrowanych odkształceń. Dla każdego typu litologicznego zaobserwowano różny charakter przebiegu. Próbki 1 i 2 charakteryzowa-



Rys. 3. Charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa zarejestrowana dla próbek 1, 2 i 3.

Symbole: $\sigma_1-\sigma_3$ – naprężenie różnicowe, ϵ_z – odkształcenie osiowe, $\epsilon_{x,y}$ – odkształcenie radialne, ϵ_v – odkształcenie objętościowe

Fig. 3. Stress-strain characteristics recorded for samples 1, 2 and 3

Symbols: $\sigma_1-\sigma_3$ – differential stress, ϵ_z – axial strain, $\epsilon_{x,y}$ – radial strain, ϵ_v – bulk strain

ły się liniowością w zakresie naprężeń różnicowych 70–130 MPa, próbka 3 w zakresie 30–75 MPa. Próbka mułowcowa charakteryzowała się dużą plastycznością, natomiast próbka piaskowcowa uległa zniszczeniu przy najniższych wartościach naprężeń. Odzwierciedlaniem tych własności jest też sposób pęknięcia próbek podczas testu wytrzymałościowego (rys. 2), próbka mułowcowa rozsypała się, podczas gdy próbki piaskowcowa i węglanowa uległy spękaniami. Dla wszystkich analizowanych próbek wydzielić można kolejne fazy i progi deformacji, zgodnie z fenomenologicznym opisem Hallbauer i in. (1973) oraz Kwaśniewskiego (1986). W początkowym etapie deformacji ma miejsce nieliniowe odkształcenie skały, następuje zaciskanie i zamykanie mikroszczelin. Na rysunku 3 zauważyć można ten etap jako wygięcie początkowego odcinka odkształceń, szczególnie osiowych i objętościowych. Następnym etapem jest faza liniowej deformacji skały, zauważalna jako liniowy przebieg trzech charakterystyk (rys. 3). Jest to etap sprężystych odkształceń szkieletu. W fazie tej wyróżnić można dwie części, po przekroczeniu progu mikrodylatacji następuje propagacja istniejących wcześniej mikroszczelin, aż do granicy liniowości. W fazie czwartej charakterystyki znowu przyjmują kształt nieliniowy, nasila się propagacja szczelin. Maksymalny wzrost odkształceń objętościowych wyznacza próg makrodylatacji, powyżej którego następuje niestabilny rozwój spękań, doprowadzający do zniszczenia próbki. Dla próbek 1 i 2 próg makrodylatacji osiągnięty został na poziomie 130–140 MPa, podczas gdy dla próbki 3 przy wartości naprężenia różnicowego rzędu 80 MPa.

Na podstawie wartości naprężenia oraz odkształceń osiowych i radialnych wyznaczono średnie moduły sprężystości. Bezpośrednio, na podstawie charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej (rys. 3) wyznaczono moduł Younga (E_s) oraz współczynnik Poissona (ν_s). Moduł Younga zdefiniowano jako zależność między naprężeniem różnicowym ($\sigma_1 - \sigma_3$) a odkształceniami osiowymi (ϵ_z) na odcinku prostoliniowym krzywej. Dla tego samego zakresu wyznaczono współczynnik Poissona jako zależność między wielkością odkształceń osiowych (ϵ_z) i radialnych ($\epsilon_{x,y}$). Następnie wyznaczono moduły Kirchhoffa (G_s) i Helmholtza (κ_s). Zestawienie wyników statycznych modułów sprężystych przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Wartości modułów statycznych średnich, wyznaczonych w obszarze liniowości charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej

TABLE 1. Values of the average static modules, defined in the linearity region of the stress-strain curve

Parametr	Próbka 1 (wapień)	Próbka 2 (mułowiec)	Próbka 3 (piaskowiec)
E_s [GPa]	8,2	4,3	7,7
ν_s [-]	0,06	0,21	0,03
G_s [GPa]	3,8	1,8	3,7
κ_s [GPa]	3,1	2,6	2,8

Symbole: E_s – moduł Younga statyczny, ν_s – statyczny współczynnik Poissona, G_s – moduł Kirchhoffa statyczny, κ_s – moduł Helmholtza statyczny.

W trakcie testu wytrzymałościowego mierzono równocześnie prędkości fal P i S. Następnie wyliczono dynamiczne moduły sprężyste z zależności prędkości i gęstości. W tabeli 2

zestawiono średnie prędkości i dynamiczne moduły sprężyste zarejestrowane podczas etapu sprężystych odkształceń szkieletu.

TABELA 2. Wartości prędkości fal P i S oraz średnich modułów dynamicznych, wyznaczonych w obszarze liniowości charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej

TABLE 2. Values of the P and S wave velocities and average dynamic modules, defined in the linearity region of the stress-strain curve

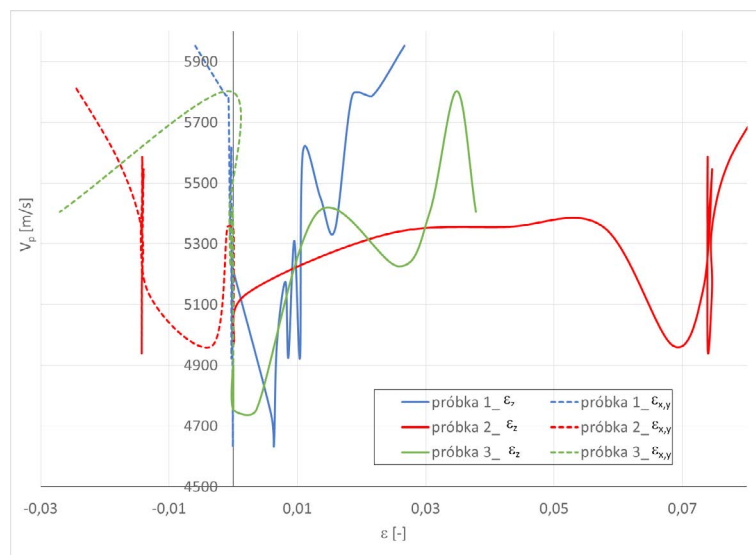
Parametr	Próbka 1 (wapień)	Próbka 2 (mułowiec)	Próbka 3 (piaskowiec)
V_p [m/s]	5 529	5 160	5 315
V_s [m/s]	3 533	2 929	1 908
E_d [GPa]	80	56	27
ν_d [-]	0,15	0,26	0,4
G_d [GPa]	35	22	9,4
κ_d [GPa]	38	39	60

Symbole: V_p – prędkość fali podłużnej, V_s – prędkość fali poprzecznej, E_d – moduł Younga dynamiczny, ν_d – dynamiczny współczynnik Poissona, G_d – moduł Kirchhoffa dynamiczny, κ_d – moduł Helmholtza dynamiczny.

Wartości modułów dynamicznych otrzymanych w obszarze liniowości charakterystyki naprężeniowo-odkształceniowej dla próbek mułowcowe są zbliżone do średnich wartości tych modułów rejestrowanych do momentu zniszczenia próbki. Dla próbek węglanowej i piaskowcowej obserwuje się rozbieżności, ale brak jest jednoznacznej tendencji zmian. Uwagę zwraca wysoka wartość κ_d , zarejestrowana dla próbki 3.

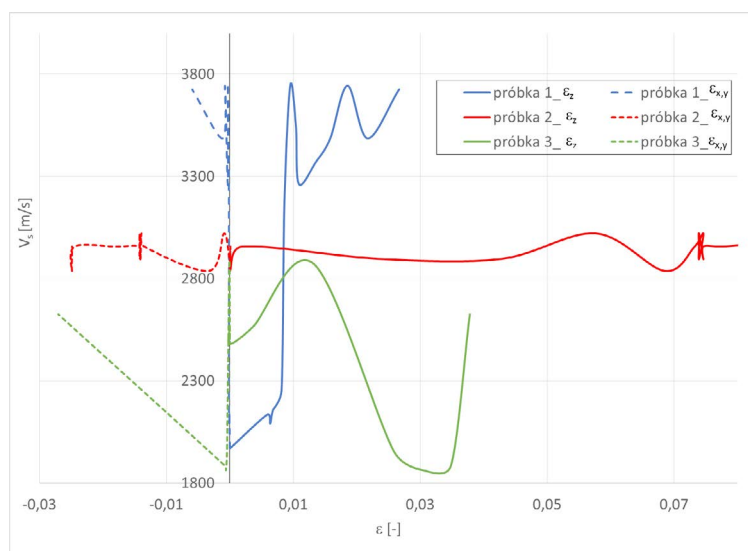
Wyznaczone średnie statyczne moduły sprężyste osiągają znacznie niższe wartości niż dynamiczne moduły sprężyste obliczone na podstawie pomiarów prędkości fal w trakcie testu wytrzymałościowego.

Przedstawiono wykresy zmian prędkości fal P i S w trakcie trwania testu wytrzymałościowego. Na wykresach (rys. 4–5) przedstawiono prędkości w zależności od odkształceń osiowych i radialnych. Dla wszystkich próbek zaobserwowano wzrost prędkości w trakcie ściskania, przy czym dla fali podłużnej zarejestrowano większą zmienność. Dla próbki węglanowej 1 V_p rośnie w zakresie od 4965 do 5577 m/s osiągniętej w momencie maksymalnego naprężenia. Następnie prędkość dalej rośnie. Prędkość fali poprzecznej rośnie od 2837 m/s, wartość maksymalną – 3021 m/s – osiąga w fazie odkształceń liniowych, po czym naprzemiennie maleje i rośnie. Probka 2, mułowcowa, charakteryzuje się przyrostem V_p w zakresie 4754–5813 m/s. W fazie liniowości relacji naprężenie – odkształcenie zauważyć można stopniowy przyrost V_p . Dla V_s nie zauważono znacznej zmiany w trakcie testu wytrzymałościowego. Probka 3, piaskowcowa, w początkowej fazie testu (pierwsze 100 s, faza zamykania mikroszczelin) wykazuje obniżenie prędkości fali podłużnej, po czym następuje wzrost od 4754 do 5803 m/s. V_s w początkowej fazie testu wykazuje spadek, następnie rośnie do wartości 2872 m/s w fazie liniowości, po czym gwałtownie maleje.



Rys. 4. Zmiany prędkości fali podłużnej rejestrowanej podczas testu wytrzymałościowego, w odniesieniu do odkształceń osiowych (linia ciągła) i radialnych (linia przerywana)

Fig. 4. Changes of longitudinal wave velocity recorded during the endurance test, in relation to axial strain (solid line) and radial strain (dashed line)



Rys. 5. Zmiany prędkości fali poprzecznej rejestrowanej podczas testu wytrzymałościowego, w odniesieniu do odkształceń osiowych (linia ciągła) i radialnych (linia przerywana)

Fig. 5. Changes of transverse wave velocity recorded during the endurance test, in relation to axial strain (solid line) and radial strain (dashed line)

Podsumowanie i wnioski

Artykuł prezentuje wstępne wyniki laboratoryjnych testów wytrzymałościowych i równoczesnych badań prędkości fal sprężystych oraz dynamicznych modułów sprężystości w komorze ciśnieniowej. Celem pracy było sprawdzenie możliwości pomiarowych zestawów ULT 100 oraz HTRX-070. Uzyskano precyzyjne wyniki zarówno parametrów mechanicznych, jak i sprężystych, w warunkach ciśnień złożowych.

W pracy przeanalizowano próbki o stosunkowo niskich porowatościach i przepuszczalnościach. Wykonano testy wytrzymałościowe w trójosiowym stanie naprężenia, doprowadzając do zniszczenia próbki. Ciśnienia okólne dobierano indywidualnie dla poszczególnych próbek, w zależności od głębokości zalegania w warunkach *in situ*. Dokładna charakterystyka naprężeniowo-odkształceniowa i rozpoznanie geomechanicznych własności skały może pomóc w doborze właściwej metodyki (typu i parametrów szczelinowania) wydobywania węglowodorów z tych potencjalnie zbiornikowych poziomów (*shale gas* i *tight gas*).

Wyznaczenie dynamicznych modułów i prędkości w warunkach powietrzno-suchych może dać zaniżone wartości ze względu na powietrze wypełniające pory oraz rozprężenie próbki. Pomiar w warunkach symulowanych ciśnień złożowych jest szansą na uzyskanie rzeczywistych wartości prędkości fal sprężystych oraz modułów sprężystości. Tak uzyskane wartości mogą być z powodzeniem wykorzystywane do korelacji z wynikami profilowania akustycznego oraz włączone do kalibracji prędkości przed obliczaniem sejsmogramów syntetycznych na potrzeby sejsmiki.

Prezentowane w pracy przykłady dla próbek pochodzących z różnych poziomów litostratygraficznych, przy dużym zróżnicowaniu ich własności geomechanicznych i sprężystych/dynamicznych, pokazują potrzebę wykonywania takich pomiarów dla rozpoznania danego złoża. Wyniki badań obarczone są wpływem wielu parametrów, m.in. porowatości, gęstości, nasycenia i typu medium porowego. Wykonanie serii pomiarów w symulowanych warunkach złożowych oraz połączenie ich z charakterystyką geomechaniczną jest przydatnym narzędziem do pełnego rozpoznania własności badanych skał. Równoczesne pomiary prędkości fal sprężystych P i S oraz charakterystyk naprężeniowo-odkształceniowych przy symulowanym ciśnieniu górotworu są efektywnym narzędziem do odtworzenia w laboratorium warunków złożowych i uzyskania wiarygodnych wartości dynamicznych i statycznych parametrów sprężystych i geomechanicznych.

W przyszłości planowane jest rozszerzenie pomiarów o badanie wpływu temperatury podczas testu wytrzymałościowego i pomiarów prędkości fal sprężystych.

Praca została sfinansowana w ramach prac statutowych Katedry Geofizyki, WGGiOŚ, AGH, nr 11.11.140.645. Autorki dziękują Peterowi Goguenowi za pomoc i cenne wskazówki przy kompletowaniu i uruchomieniu aparatury oraz wykonaniu pomiarów.

Literatura

- ASTM D4543-01 Standard Practices for Preparing Rock Core as Cylindrical Test Specimens and Verifying Conformance to Dimensional and Shape Tolerances.
- ASTM D7012-14e1 Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures.
- CATS Ultrasonics 1.95. User's Guide and Reference, 1994–2004, Geotechnical Consulting & Testing Systems.
- Hallbauer i in. 1973 – Hallbauer, D.K., Wagner, H. i Cook, N.G.W. 1973. Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 10, s. 713–726.
- ISRM 2007. Suggested Method for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression. [W:] The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization Testing and Monitoring: 1974–2006. Ed.: Ulusay R., Hudson J.A.
- Kwaśniewski, M. 1986. Dylatacja jako zwiastun zniszczenia skały. Część II. Dylatacyjny mechanizm zjawisk poprzedzających zniszczenie. *Przegląd Górniczy* 6.
- ULT-100 [Online] Dostępne w: <https://www.gcts.com/pdf/ULT-100.pdf> [Dostęp: 15.07.2017].
- HTRX-070L [Online] Dostępne w: [https://www.gcts.com/pdf/products/High-Pressure-Triaxial-Cell-\(HTRX-070L\).pdf](https://www.gcts.com/pdf/products/High-Pressure-Triaxial-Cell-(HTRX-070L).pdf) [Dostęp: 15.07.2017].