

## METODYKA BADANIA WYBRANYCH SKAŁ POLSKI W WARUNKACH WYSOKIEGO CIŚNIENIA I TEMPERATURY

### METHODS OF STUDYING OF SELECTED ROCKS IN POLAND UNDER CONDITIONS OF HIGH PRESSURE AND TEMPERATURE

ARTUR DZIEDZIC<sup>1</sup>, PAWEŁ ŁUKASZEWSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** W artykule przedstawiono opis metodyki badań wytrzymałościowych skał w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Badania wytrzymałościowe prowadzono w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania z równoczesną rejestracją zmian prędkości fali ultradźwiękowej. Zestaw badawczy wykorzystywany w Zakładzie Geomechaniki UW, składający się ze sztywnej prasy wytrzymałościowej wyposażonej w komorę termociśnieniową oraz z ultradźwiękowego systemu pomiarowego, umożliwia automatyczną, zsynchronizowaną rejestrację zmian naprężenia, odkształcenia oraz prędkości fali podłużnej w próbkach skalnych poddanych ściskaniu w komorze termociśnieniowej. Dzięki zastosowaniu opisanej metodyki możliwe jest porównanie uzyskanych danych z wynikami geofizycznych badań *in situ*.

**Słowa kluczowe:** konwencjonalne trójosiowe ściskanie, prędkość fali podłużnej, ultradźwięki, wytrzymałość i odkształcalność skał, metrologia.

**Abstract.** The study presents methodology for rock testing in conventional triaxial conditions with simultaneous recording of longitudinal wave speed velocity. Assembled at Department of Geomechanics of Warsaw University, the testing unit consists of a rigid strength press equipped with thermal pressure vessel and ultrasonic measuring system. Testing set is able to records automatically the changes of stress, strain and longitudinal wave velocity during strength test conducted in the thermal pressure vessel. Described methodology allows comparing obtained data with *in situ* geophysical investigations.

**Key words:** conventional triaxial compression, longitudinal wave velocity, ultrasonics, strength and strain of rocks, metrology.

### WSTĘP

Złożoność budowy geologicznej oraz stan naprężeń w skorupie ziemskiej powodują, że teoretyczny opis deformacji w górotworze jest bardzo uproszczony, a rezultaty badań otrzymane w jednych warunkach nie mają zastosowania w innych. Efekt wpływu wysokich ciśnień występujących w górotworze na właściwości materiału skalnego jest wynikiem złożonych procesów opisywanych zasadami mechaniki i termodynamiki, które obejmują jego sprężyste, niesprę-

żyste i lepkie zachowanie. Ze względu na różnorodność tych opisów analizy teoretyczne w tym zakresie muszą być weryfikowane badaniami doświadczalnymi.

W analizach strukturalnych skorupy ziemskiej największe znaczenie przypisywane jest cechom sprężystym skał, opisanych „stałymi sprężystości”. Dane do opisu uzyskiwane są na drodze analiz teoretycznych, badań *in situ* i badań laboratoryjnych skał z odsłoneń, z wierceń geologicznych

---

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; artur.dziedzic@uw.edu.pl; pawel.lukaszewski@uw.edu.pl

lub też ze zdalnych badań geofizycznych w niedostępnych partiach litosfery.

Kompleksowa ocena właściwości geomechanicznych odmiennych litologicznie ośrodków skalnych wymaga prowadzenia badań wytrzymałościowych w warunkach jednoosiowego oraz trójosiowego ściskania w różnych wariantach ciśnienia ( $P$ ) i temperatury ( $T$ ) z jednoczesną rejestracją prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej (Pinińska, Dziedzic, 2010).

W Zakładzie Geomechaniki Wydziału Geologii UW w latach 2007–2010 realizowano projekt badawczy poświęcony

ocenie właściwości wytrzymałościowo-odkształceniowych skał w warunkach wysokich ciśnień i temperatur. Badaniom poddano 6 różnych odmian litologicznych skał Polski, pochodzących z odsłoneń powierzchniowych oraz z rdzeni wiertniczych:

- skały osadowe okruchowe – piaskowce ciężkowickie i krośnieńskie z obszaru Karpat fliszowych,
- skały siarczanowe i węglanowe – anhydryty i dolomity z obszaru monokliny przedsudeckiej,
- skały magmowe – bazalty i granity sudeckie.

## METODYKA BADAŃ

W badaniach przyjęto wielowariantowy program modelujący ciśnieniem ( $P$ ) i temperaturą ( $T$ ) warunki odpowiadające głębokości do około 3,5 km. Badania prowadzono dla 8 wariantów głębokościowych w interwałach co 500 m, przyjmując dla modelowanych warunków gradient temperatury równy 3°C na 100 m głębokości oraz wzrost ciśnienia 0,1 MPa na każde 4 m (tab. 1).

Dla wariantu 1, odpowiadającego warunkom występującym na powierzchni ( $P = 0$  MPa,  $T = 25^\circ\text{C}$ ), wykonano testy jednoosiowego ściskania, a dla pozostałych wariantów prowadzono pojedyncze testy klasyczne w warunkach konwencjonalnego, trójosiowego ściskania, zgodnie z zaleceniami ISRM (Kovari i in., 1983). Należy podkreślić, że pojedyncze testy klasyczne są najczęściej wykonywanymi testami trójosiowymi zalecanymi przez ISRM (Nowakowski, 1994; Łukaszewski, 2005).

**Aparatura.** Do badań wytrzymałościowych wykorzystano aparaturę badawczą amerykańskiej firmy MTS Systems Corporation, wyposażoną w komorę termociśnieniową, uzupełnioną o zestaw pomiarowy rejestrujący w warunkach wzrastającego ciśnienia i temperatury przebieg podłużnej fali ultradźwiękowej (fig. 1). Zastosowany zestaw umożliwia badanie próbek skał o maksymalnej średnicy 54 mm

i wysokości 152 mm. Podczas badań stosowano próbki skalne o średnicy ok. 50 mm i wysokości ok. 100 mm (smukłość = 2), wycięte z monolitów pobranych z odsłoneń powierzchniowych oraz z rdzeni wiertniczych. Prasa sztywne MTS 815 z komorą termociśnieniową umożliwia uzyskanie maksymalnej siły ściskającej 2600 kN oraz ciśnienia okólnego w komorze do 140 MPa, a ciecz termoprzewodząca może zostać podgrzana do temperatury 200°C.

Na bezpieczne uzyskanie wysokiego ciśnienia okólnego pozwala specjalna konstrukcja komory ze stali o grubości ścianek ok. 63,5 mm, stanowiąca statyczny układ tłok–cylinder, wykonany ze stali specjalnej. Naprężenie osiowe jest monitorowane przez czujnik siły zainstalowany w środku komory, w bezpośrednim sąsiedztwie próbki skalnej. Odkształcenia podłużne i poprzeczne mierzone są za pomocą dwóch specjalnych czujników przystosowanych do badań w warunkach wysokich ciśnień i temperatury, mocowanych

Tabela 1

### Przyjęte warianty badawcze modelujące zmienne poziomy głębokościowe

Established testing stages simulating variable depth levels

Wariant Variant	Głębokość Depth [m]	Temperatura $T$ Temperature [°C]	Ciśnienie okólne $P$ Confining pressure [MPa]
1	0	25 (pokojowa)	0
2	500	25 (pokojowa)	12
3	1000	30	25
4	1500	45	37
5	2000	60	50
6	2500	75	62
7	3000s	90	75
8	ok. 3500	120	90



Fig. 1. Zestaw do badań wytrzymałościowych wyposażony w komorę termociśnieniową

Testing system equipped with thermal pressure vessel

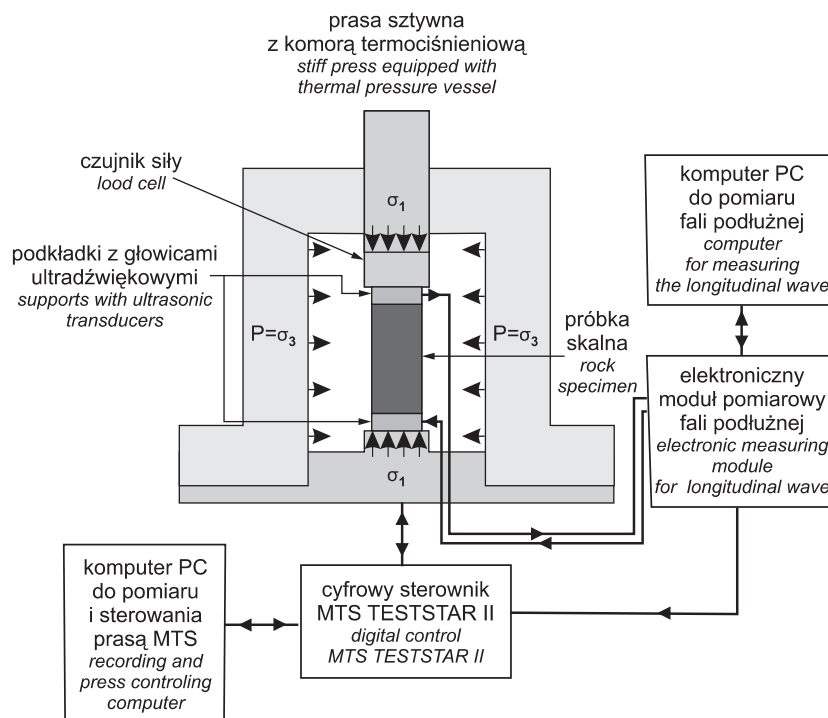


Fig. 2. Schemat pracy zestawu badawczego składającego się z prasy sztywnej wyposażonej w komorę termociśnieniową oraz z ultradźwiękowego systemu pomiarowego

Working scheme of testing system which consists of stiff strength press equipped with thermal pressure vessel and ultrasonic measuring system

bezpośrednio na próbce. Ciśnienie okólne w komorze wywierane jest przez dynamiczny układ generacji ciśnienia za pomocą hydraulicznego siłownika tłokowego. Temperatura kontrolowana jest przez układ składający się z grzejników, termopar, sterownika temperatury oraz panelu pomiarowego. Wzrost temperatury generują 3 grzałki elektryczne o mocy 2000 W każda, przytwierdzone w formie 3 pierścieni na zewnętrznych ściankach komory.

**System pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej.** Podczas testów wytrzymałościowych prowadzono pomiary prędkości fali podłużnej za pomocą ultradźwiękowego systemu pomiarowego firmy M. Lew Labs oraz specjalistycznych głowic. Rejestrację prędkości fali zsynchronizowano z innymi wykonywanymi równolegle zapisami siły, przemieszczeń oraz temperatury i zintegrowano ze stosowanym w aparaturze wytrzymałościowej MTS układem akwizycji danych tak, aby umożliwić bezpośrednie porównywanie wszystkich mierzonych parametrów (Dziedzic, Łukaszewski, 2010). Schemat pracy całego zestawu do badań wytrzymałościowych z równoczesnym pomiarem prędkości fali podłużnej w próbce ściskanej trójosiowo przedstawiono na figurze 2.

Pomiar polega na rejestracji czasu przejścia fali podłużnej przez walcową próbkę w kierunku zgodnym z obciążeniem osiowym i jest oparty na standardowym algorytmie korelacyjnym. Metoda korelacyjna zapewnia stosunkowo dużą odporność na zakłócenia oraz pozwala na pomiary przy małej amplitudzie sygnałów odbiorczych. W celu zwiększenia niezawodności pomiarów użytkownik określa okno czasowe (pomiędzy niebieskimi trójkątami), w którym powinien się

znaleźć impuls odbiorczy (fig. 3). W systemie wykorzystano prototypowy zestaw głowic ultradźwiękowych (przetworników piezoceramicznych) o częstotliwości 1 MHz, przystosowanych do pracy w warunkach wysokiego ciśnienia i temperatury. Głowice wbudowano w podkładki ze specjalnej, wysokiej jakości stali, dodatkowo utwardzanej, a sygnały wyprowadzono na zewnątrz przewodami do dostępnych, wolnych gniazd w komorze termociśnieniowej.

**Przygotowanie materiału badawczego.** Do badań stosowano próbki cylindryczne, których oś podłużną orientowano w sposób zunifikowany w relacji do struktur geolo-

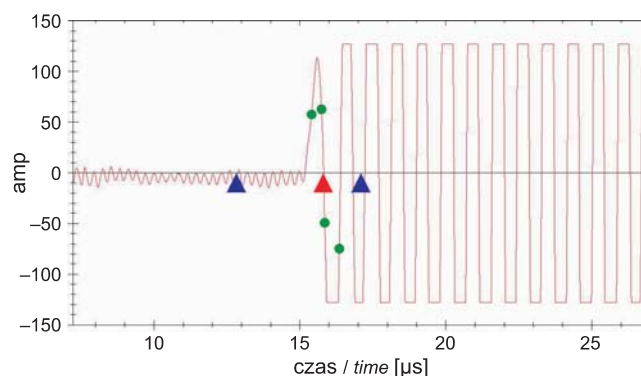
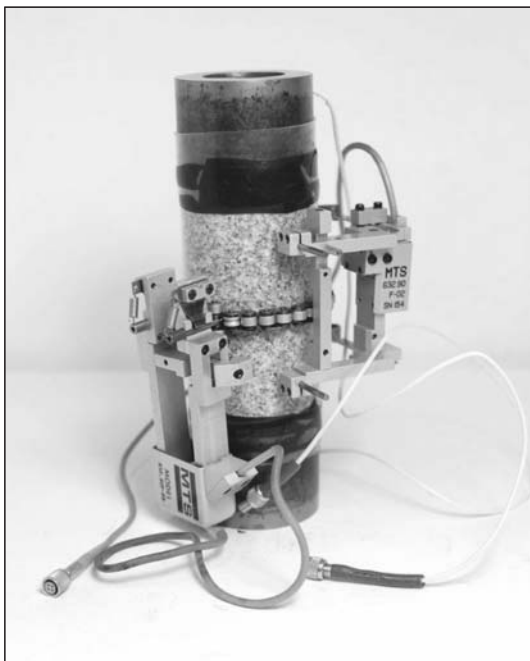


Fig. 3. Przykładowy zapis impulsu odbiorczego fali podłużnej w badaniach ultradźwiękowych

Example of receiving signal record during ultrasonic measurements



**Fig. 4. Próbkę granitu ze Strzelina przygotowaną do badania trójosiowego ściskania**

Sample of granite from Strzelin prepared for triaxial compression

gicznych lub kierunku rdzeniowania. W przypadku skał klastycznych (piaskowiec ciężkowicki oraz piaskowiec krośnieński) oś podłużna walca była prostopadła do uławicenia masywu skalnego w odsłonięciu. Skały siarczanowe i węglanowe (anhydryty i dolomity) zostały pozyskane z odwiertów badawczych KGHM i generalna orientacja względem struk-

tur geologicznych nie była znana, natomiast oś podłużna przygotowanych próbek walcowych była zgodna z kierunkiem rdzeniowania.

W przypadku bazaltów sudeckich z Wilkowa próbki wycinano w nawiązaniu do obserwowanego w odsłonięciu ciosu słupowego, orientując oś podłużną równoległe do niego, natomiast próbki granitu strzelińskiego orientowano prostopadłe do widocznego w odsłonięciu horyzontalnego układu spękań.

Na płaskich powierzchniach walcowych próbek umieszczano podkładki z głowicami ultradźwiękowymi, tak aby w trakcie ściskania kierunek propagacji fali odpowiadał kierunkowi największego naprężenia. Jako środka sprzęgającego używano żelu do medycznych badań USG, co ograniczało tłumienie i minimalizowało odbicia na granicy ośrodków o różnych gęstościach.

Ciśnienie okólne w komorze do badań trójosiowych było wytwarzane przez sprężenie oleju. Zastosowanie ciekłego medium wymusza, aby próbki skalne były na powierzchni chronione przed jego wnikaniem do przestrzeni porowych i mikroszczelin. Dlatego przed badaniem wszystkie próbki pokrywano folią termokurczliwą, podgrzewaną w temperaturze 200°C, tak aby przylegała do powierzchni próbki skalnej na całej jej długości. Procedurę przygotowania próbek skalnych do badań realizowano zgodnie z wytycznymi producenta osłonek, jak również stosując się do zaleceń producenta całego zestawu wytrzymałościowego, firmy MTS System Corporation.

Na figurze 4 przedstawiono próbkę granitu strzelińskiego przygotowaną do badań wytrzymałościowych, powleczoną osłonką termokurczliwą, z założonymi czujnikami do pomiaru odkształceń na jej powierzchni oraz z metalowymi podkładkami z wbudowanymi głowicami ultradźwiękowymi.

## PROCEDURY INTERPRETACYJNE

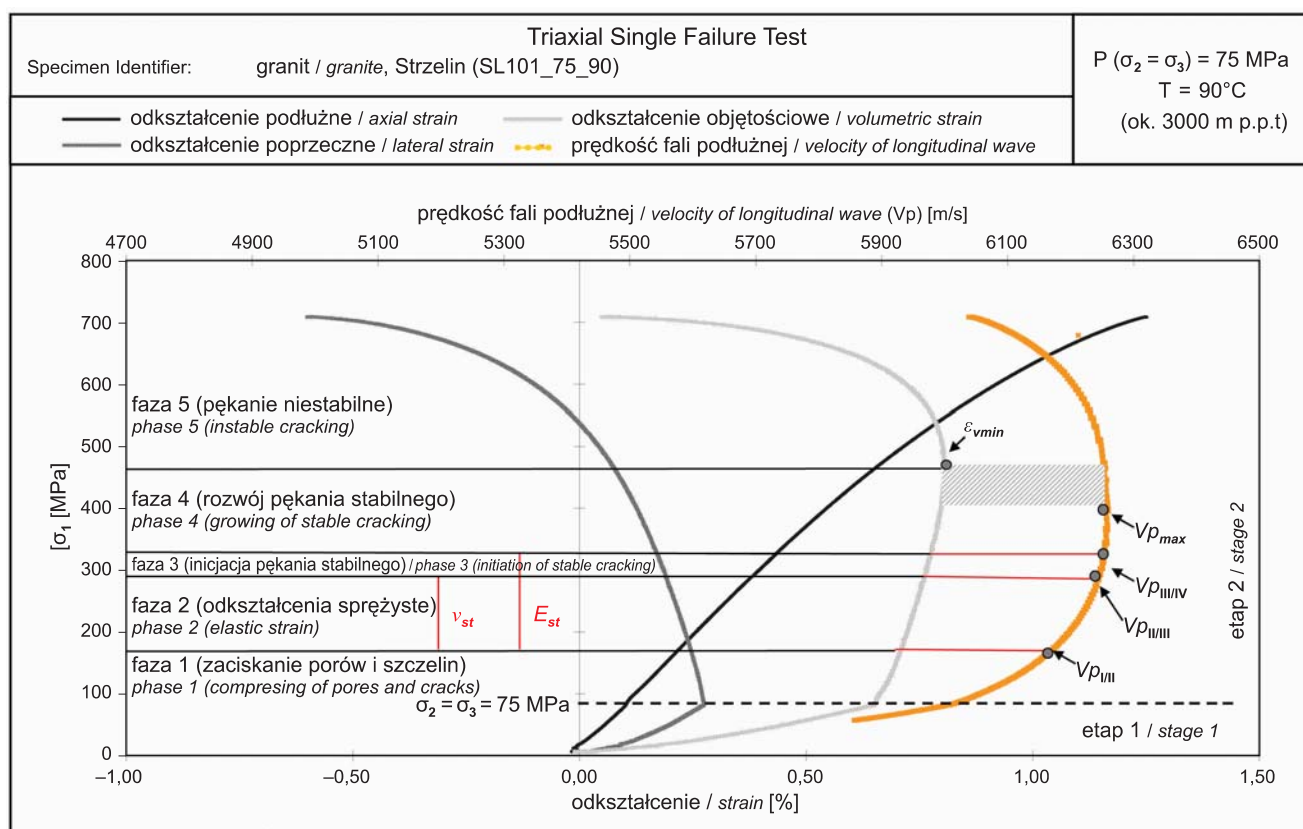
Wyniki wielowariantowych badań wytrzymałościowych w warunkach trójosiowego i jednoosiowego ściskania wraz z równoczesną rejestracją prędkości fali ultradźwiękowej wymagają odpowiednich procedur interpretacyjnych dostosowanych do procedur badawczych i systemów akwizycji danych. Rejestrację wskazań czujników prowadzono od momentu umieszczenia próbki skalnej w prasie wytrzymałościowej aż do zakończenia badania. W każdym badaniu notowano wartość początkową prędkości fali podłużnej ( $V_{p0}$ ), a w przebiegu każdego doświadczenia wydzielano dwa etapy: I – warunki niestabilne, związane kolejno ze wzrostem temperatury i wzrostem ciśnienia oleju w komorze (wzrost  $T$  i  $P$ ), II – ustabilizowane warunki ciśnieniowo-temperaturowe (stałe  $P$  i  $T$ ).

W I etapie zwiększano temperaturę ze średnią prędkością około 1°C/min, a ciśnienie okólne ze stałą prędkością 6 MPa/s. Etap II miał początek, po ustabilizowaniu  $P$  i  $T$  na zakładanym, docelowym poziomie, w momencie, gdy rozpoczęło się ściskanie próbki ze stałą prędkością odkształcenia

równą  $10^{-5}$ /s. Ciągła rejestracja danych pozwoliła na wizualizację graficzną kompletnej ścieżki każdej z charakterystyk deformacji oraz prędkości fali, zarówno łącznie, jak i rozdzielnie dla etapu I i II (fig. 5).

W etapie II wydzielono progi i fazy deformacji przedkrytycznej, zgodnie z fenomenologicznym opisem deformacji skał w warunkach rosnącego naprężenia osiowego (Hallbauer i in., 1973). Przyjęto zatem, że na początku deformacji osiowej, w tzw. fazie kompaktacji (faza I na fig. 5), zachodzą odkształcenia nieliniowe, tylko częściowo odwracalne i stanowiące kontynuację odkształceń etapu I. Fazę I kończy próg liniowości odkształceń, od którego rozpoczyna się faza 2, związana ze sprężystym odkształcaniem się szkieletu mineralnego. Na krzywej deformacji charakteryzuje się ona liniowością odkształceń podłużnych i poprzecznych. Próg liniowości odkształceń poprzecznych jest początkiem fazy 3, w której tylko odkształcenia podłużne utrzymują swój liniowy charakter. W fazie tej rozpoczynają się inicjalne procesy zniszczenia struktury skały.





**Fig. 5. Krzywe deformacji i zmian prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej z zaznaczonymi fazami, progami oraz punktami pomiarowymi na obu etapach badania**

Deformation curves and velocity changes of ultrasonic longitudinal wave with phases, thresholds and measuring points marked on both testing stages

Próg liniowości odkształceń podłużnych rozdziela fazę 3 od fazy 4, w której wszystkie odkształcenia mają charakter nieliniowy, zachodzą procesy stabilnej propagacji spękań oraz rozwijają się procesy dylatacji. Zmiany objętościowe z reguły szybko osiągają wartość graniczną, wyznaczając próg makrodylatacji, od którego rozpoczyna się faza 5 i występujący w niej niestabilny, niekontrolowany rozwój spękań.

Wraz z rozwojem deformacji monitorowany był równocześnie przebieg ścieżki zmian prędkości fali podłużnej. Cechuje ją zbliżony kształt do charakterystyki zmian odkształceń objętościowych ( $\epsilon_v$ ). Dzięki takiej kompilacji krzywych możliwe jest określenie wartości  $V_p$ , towarzyszących kolejnym fazom i progom deformacji. Co ciekawe, niejednokrotnie zauważano rozbieżność wartości naprężenia  $\sigma_1$  na

progu makrodylatacji z wartością  $\sigma_1$  przy maksymalnej prędkości fali podłużnej ( $V_{pmax}$ ).

Na wszystkich progach oraz fazach deformacji wyznaczono charakterystyczne wartości prędkości ( $V_p$ ) oraz jej przyrosty ( $\Delta V_p$ ) w relacji do wartości początkowej ( $V_{p0}$ ) w poszczególnych etapach doświadczenia i w różnych fazach deformacji.

Parametry odkształcalności – statyczny moduł Younga ( $E_{st}$ ) oraz statyczny współczynnik Poissona ( $\nu_{st}$ ) – wyznaczano na podstawie analizy krzywych deformacji, przyjmując kryteria zgodne z opisem Hallbauera i in. (1973). Współczynnik Poissona definiowano dla fazy 2, natomiast moduł Younga dla fazy 2 i 3 deformacji przedkrytycznej.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone w Zakładzie Geomechaniki Wydziału Geologii UW badania doświadczalne głównych cech geomechanicznych wybranych ośrodków skalnych – prędkości fal sprężystych, wytrzymałości i odkształcalności w warunkach nawiązujących do rzeczywistości panujących we głębokich partiach litosfery – mają charakter pilotujący i nowa-

torski. Wypracowano i wdrożono metody laboratoryjnych badań właściwości wytrzymałościowych i odkształceniowych ośrodków skalnych na dużych głębokościach, poddanych działaniu wysokich ciśnień i temperatury. Metody geomechaniczne (wytrzymałościowe) zsynchronizowano z niezależnie rejestrowanymi pomiarami prędkości sprężystej fali

podłużnej. Wykorzystując specjalnie skonstruowany system pomiarowy, w doświadczeniach uzyskano symultaniczne pomiary prędkości fali sprężystej oraz charakterystyki odkształcalności w warunkach jednoosiowego i trójosiowego ściskania. Na tej podstawie, dla danego ośrodka skalnego, można było ustalić, jak na skutek zmian cech odkształceniowych oraz gęstości skały z głębokością zmienia się prędkość fali, a także jaką prędkość fali na danej głębokości można przypisać ośrodkowi o danych cechach geomechanicznych.

Poziom ciśnienia okólnego i temperatury w komorze termocisnieniowej dostosowano do warunków modelujących co 500 m naprężenia i temperaturę w górotworze, od powierzchni terenu do głębokości około 3,5 km. Warunki ba-

dania można jednak dla innych potrzeb dostosować do dowolnych wymagań poznawczych i projektowych, w zakresie możliwości technicznych aparatury.

Ustalono również wymagania techniczne, w jakich muszą być prowadzone eksperymenty, aby zapewnić poprawne i wiarygodne rezultaty badań oraz umiejętne dopasowywanie testów badawczych do ekwiwalentnych zachowań ośrodków skalnych w ściśle kontrolowanych warunkach. Wypracowane metody badawcze są zatem podstawą do prowadzenia dalszych badań dla konkretnych warunków inżynierskich, wynikających z potrzeb danej inwestycji.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2010 jako projekt rozwojowy.*

## LITERATURA

- DZIEDZIC A., ŁUKASZEWSKI P., 2010 — Pomiary fali podłużnej w badaniach trójosiowego ściskania. *Górnictwo i Geoinżynieria, Kwart. AGH*, **34**, 2: 223–230.
- HALLBAUER D.K., WAGNER H., COOK N.G.W., 1973 — Some observations concerning the microscopic and mechanical behaviour of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., Abstracts*, **10**: 713–726.
- KOVARI K., TISE A., EINSTEIN H.H., FRANKLIN J.A., 1983 — Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: Revised version. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech., Abstracts*, **20**: 285–290.
- ŁUKASZEWSKI P., 2005 — Ocena wytrzymałości piaskowców fliszowych przy różnych ścieżkach obciążenia w warunkach konwencjonalnego trójosiowego ściskania. *Prz. Geol.*, **53**, 7: 596–601.
- NOWAKOWSKI A., 1994 — Trzy testy trójosiowego ściskania – sposób wykonania, zalety, wady i ewentualne możliwości wykorzystania wyników. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. Hydrotech. PWrocł.*, **65**: 155–161.
- PINIŃSKA J., DZIEDZIC A., 2010 — Symultaniczne pomiary prędkości fali podłużnej oraz procesów deformacji sprężystej skał w warunkach trójosiowego ściskania w wysokich ciśnieniach i temperaturze. *W: Geofizyka w geologii i górnictwie: 86–87. Wyzd. Nauk o Ziemi UŚL., Sosnowiec.*

## SUMMARY

The article presents the description of methods of studying of rocks under conditions of high pressure and temperature. Strength tests were conducted under conditions of conventional triaxial compression with a simultaneous registration of changes of ultrasonic wave's velocity. The set of tools gathered in the Department of Geomechanics of Warsaw University consists of a rigid resistance press with a thermocompression (thermopressure) chamber and ultrasonic measurement system which enables automatic and synchronized registration of changes of stress, strain as well as longitudinal wave in triaxially compressed samples. Circumferential confining pressure and temperature levels in the chamber were suitably selected in order to model the rock massive conditions from the surface level down to about 3.5 km at intervals of 500 m.

The article presents a detailed description of the strength tests equipment, system of ultrasonic wave velocity measurement, preparing of the research material as well as research procedures and interpretations. The study consisted of 2 stages: I – increase of temperature and pressure up to the value of model conditions for specified depth, II – axial compressing under stabilized pressure and temperature condi-

tions. Stage II included separation of deformation thresholds and stages, for which distinctive values of longitudinal wave velocity were designated (accordingly to phenomenological description of rocks deformation in conditions of increasing axial stress by Hallbauer et. al. (1973). Owing to the application of the abovementioned methodology it is also possible to compare received data with the results of geomechanical in situ studies.

During the experiments, the results of simultaneous measurements of elastic wave velocity and deformation characteristic in conditions of high pressure and temperature were obtained. On this basis it was determined for a selected rock, how the wave velocity changes as a result of changes of deformation features and rock density, as well as which value of wave velocity at selected depth can be designated to a rock with certain geomechanical features.

Technical requirements of the experiments were also determined in order to provide correct and reliable results. The developed methods are a basis for further studies for specific engineering conditions, resulting from the requirements of the investment.