

Artur Dzedzic*, Paweł Łukaszewski*

POMIARY FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ W BADANIACH TRÓJOSIOWEGO ŚCISKANIA**

1. Wstęp

Nieniszczące badania ultradźwiękowe są powszechnie stosowane w praktyce geomechanicznej do oceny właściwości sprężystych ośrodków skalnych, a ich wyniki służą tworzeniu empirycznych zależności z parametrami wytrzymałościowymi. Istotną cechą badań ultradźwiękowych jest również ich podobieństwo do geofizycznych badań *in situ*, co umożliwia tworzenie korelacyjnych związków i bezpośrednie porównywanie uzyskiwanych na tych drogach oznaczeń.

Laboratoryjne badania ultradźwiękowe polegają w głównej mierze na oznaczaniu czasu przejścia fali przez próbkę skalną o znanych wymiarach, co w efekcie umożliwia określenie prędkości przebiegu fali ultradźwiękowej. Wykorzystując prędkości fal, podłużnej i poprzecznej, można ustalić wartości dynamicznych stałych materiałowych, np. dynamicznego modułu Younga, czy też dynamicznego współczynnika Poissona.

Nieniszczący charakter badań ultradźwiękowych powoduje, że są one cennym narzędziem do monitoringu przeobrażeń strukturalnych w materiale skalnym zachodzących pod wpływem czynników deterioracyjnych, takich jak woda i jej roztwory, zmiany temperatury [4] lub naturalne procesy starzenia się kamiennych obiektów zabytkowych [5, 6].

Przydatność badań ultradźwiękowych wzrasta, jeśli uda się je wkomponować w tradycyjne, geomechaniczne procedury badawcze oparte na ocenie wytrzymałości i odkształcalności skał. Wymaga to dołączenia systemu pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej do komputerowo sterowanej aparatury wytrzymałościowej. Próby tego rodzaju są podejmowane w różnych ośrodkach badawczych, zaś stosowane metody są zróżnicowane i dopasowane do lokalnych uwarunkowań oraz celów badawczych [1–3].

* Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa

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

W Zakładzie Geomechaniki UW skonstruowano i wdrożono system pomiaru prędkości podłużnej fali ultradźwiękowej w warunkach wysokich ciśnień i temperatury, modernizując stanowisko badawcze MTS 815. Wykonano dotychczas kilkadziesiąt badań trójosiowego ściskania z równoczesnym pomiarem prędkości fal w zmiennych warunkach ciśnienia i temperatury na zróżnicowanych litologicznie skałach pochodzących z różnych rejonów Polski.

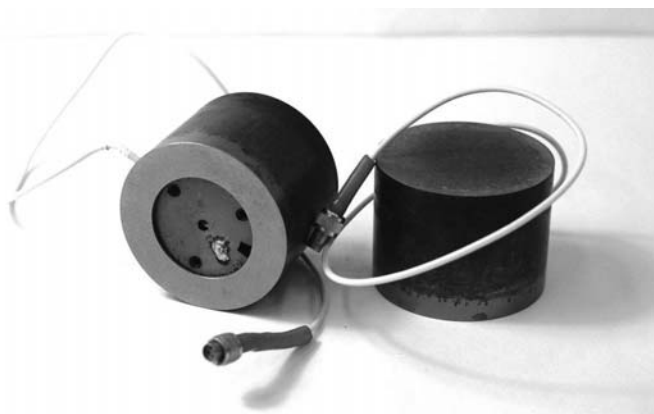
2. Opis systemu pomiarowego

Założeniem projektu modernizującego stanowisko badawcze MTS 815 było stworzenie systemu pomiarowego uzupełniającego możliwości laboratorium badawczego Zakładu Geomechaniki UW o zsynchronizowany w czasie z badaniami wytrzymałościowymi pomiar propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej. Zakładano pełną integrację z funkcjonującym systemem akwizycji danych pomiarowych MTS w taki sposób, aby zapewnić ujednolicone i wiarygodne pomiary tych parametrów w funkcji obciążenia próbki.

W skład całego systemu pomiarowego wchodzi:

- głowice ultradźwiękowe o częstotliwości 1 MHz,
- system pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej,
- prasa sztywna MTS 815 z komorą trójosiową.

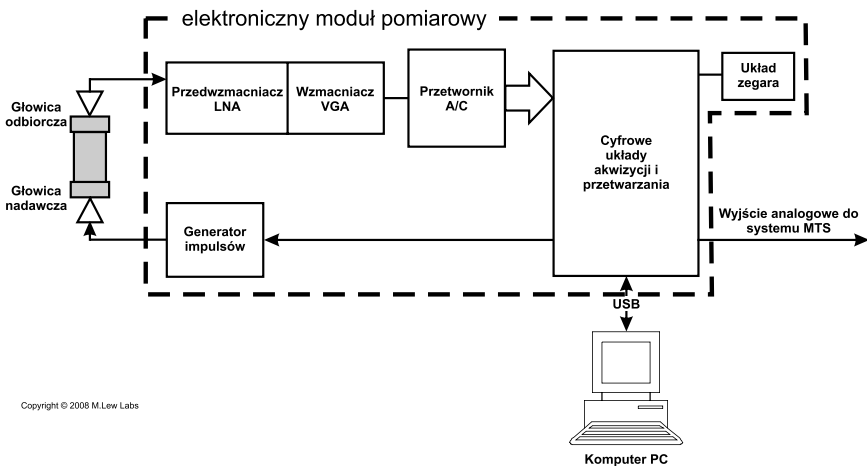
Pomiar prędkości fali polega na rejestracji czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez walcową próbkę w kierunku zgodnym z obciążeniem osiowym. W systemie wykorzystano prototypowy zestaw głowic ultradźwiękowych (przetworników piezoceramicznych) o częstotliwości 1 MHz firmy IPPT z Warszawy. Głowice wbudowane są w podkładki ze specjalnej, wysokiej jakości stali, dodatkowo utwardzanej (rys. 1). Sygnały do/z głowic są wyprowadzone przewodami na zewnątrz do dostępnych, wolnych gniazd w komorze przy trójosiowym ściskaniu lub bezpośrednio do układu pomiarowego przy ściskaniu jednoosiowym.



Rys. 1. Wbudowane w podkładki głowice ultradźwiękowe o częstotliwości 1 MHz

Zintegrowany ze stanowiskiem badawczym MTS 815 system pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej składający się z elektronicznego modułu pomiarowego oraz oprogramowania sterującego (aplikacji kontrolno-pomiarowej) wykonała firma M.Lew Labs z Warszawy.

Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy systemu pomiarowego. Moduł elektroniczny zawiera układy nadawcze i odbiorcze, przetworniki A/C (analogowo-cyfrowe) i C/A (cyfrowo-analogowe), wzmacniacz sygnału oraz układ zegara. W trybie pomiaru system generuje impulsy nadawcze, a następnie odbiera, wzmacnia i przetwarza na postać cyfrową sygnały z głowicy odbiorczej, które są w dalszej kolejności przekazywane poprzez interfejs USB do komputera PC.



Rys. 2. Schemat blokowy ultradźwiękowego systemu pomiarowego

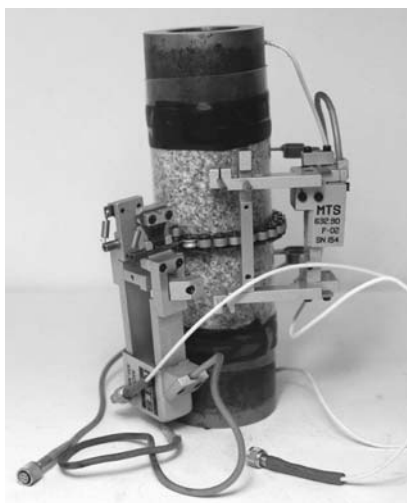
Dedykowane oprogramowanie umożliwia podgląd odebranych przebiegów fal oraz ustalenie odpowiedniego poziomu progowego, używanego do automatycznego określenia czasu przejścia fali przez próbkę. Zmierzony czas jest zapamiętywany na komputerze w postaci pliku tekstowego oraz zamieniany na postać analogową na wyjściu połączonym z systemem MTS.

Badania wytrzymałościowe wykonywane są w prasie sztywnej MTS 815, od lat wykorzystywanej w Zakładzie Geomechaniki UW. Umożliwia ona ciągłą rejestrację wielkości siły działającej na próbkę skalną oraz pomiar odkształceń osiowych i obwodowych za pomocą odpowiednich ekstensometrów. Elektroniczny moduł sterujący pozwala na wykonywanie zróżnicowanych procesów badawczych, w zmiennych warunkach zmian pola naprężeń oraz pozwala na szeroki zakres kontroli procesu deformacji i niszczenia badanych materiałów skalnych.

Stosowana w badaniach trójosiowego ściskania komora trójosiowa umożliwia prowadzenie badań w warunkach wysokiego ciśnienia okólnego (do 140 MPa) oraz przy temperaturze dochodzącej do 200°C, pozwalając na symulację warunków panujących w rzeczywistym górotworze do głębokości około 5000 m.

3. Przygotowanie próbki do badań oraz pomiar czasu przejścia fali ultradźwiękowej

Przygotowując próbkę do badań umieszcza się podkładki z głowicami na górze i na dole próbki, wypełniając strefę kontaktu środkiem sprzegającym. Wykorzystywany jest do tego celu żel do USG. Aby zminimalizować poślizg wzdłuż powierzchni kontaktu oraz „wygładzić” przejście pomiędzy próbką i podkładkami, strefę brzeżną okleja się taśmą samowulkanizującą o dużej elastyczności i lepkości, a całą próbkę z podkładkami osłania się specjalną folią termokurczliwą. Na tak zabezpieczonych próbkach mocowane są ekstensometry stosowane w badaniach wytrzymałościowych (rys. 3).

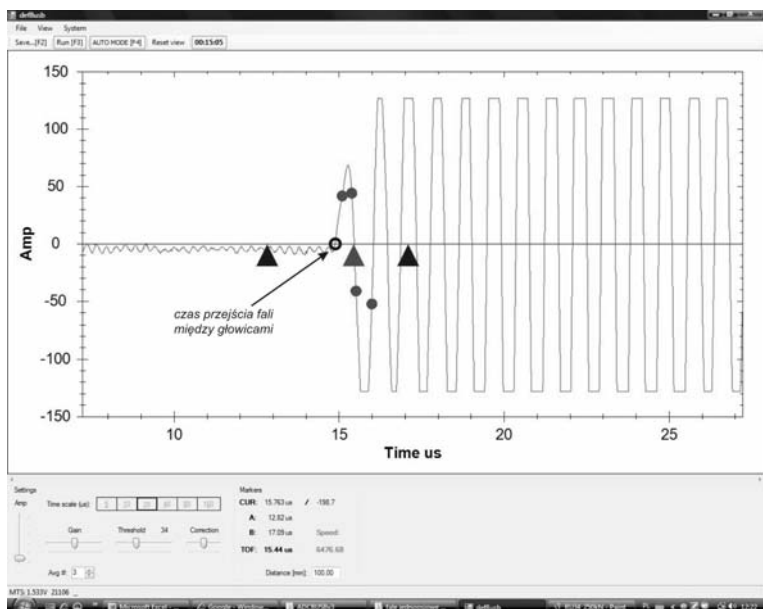


Rys. 3. Próbkę skalną przygotowaną do badań trójosiowego ściskania

System pomiaru prędkości fali został dostosowany do metodyki prowadzonych w Zakładzie Geomechaniki UW badań wytrzymałościowych, co wymagało zsynchronizowania w czasie danych z czujników pomiarowych i rejestrowanych impulsów ultradźwiękowych.

Obserwację oraz rejestrację czasu przejścia fali przez obciążoną próbkę umożliwia specjalistyczne oprogramowanie wykonane przez firmę M.Lew Labs. Sygnał z głowic pomiarowych obserwowany jest w oknie programu w postaci sinusoidy (rys. 4), której kształt można regulować poprzez zmianę napięcia nadajnika (suwak „Amp”), wzmocnienie odbiornika (suwak „Gain”) lub zwiększenie liczby uśrednień przebiegu sygnału (pole „Avg”).

Zastosowany algorytm pomiarowy umożliwia ciągłe, zautomatyzowane śledzenie sygnału w czasie rzeczywistym oraz zapis pobieranych danych zgodnie ze schematem prowadzonej procedury badawczej, ustalonym przy programowaniu badania wytrzymałościowego w systemie MTS.



Rys. 4. Okno programu sterującego pomiarami ultradźwiękowymi z wyraźną sinusoidą fali

Zastosowane w aparaturze ultradźwiękowej komponenty elektroniczne umożliwiają dokładność pomiarów na poziomie $0,01 \mu\text{s}$, zaś sam pomiar czasu przejścia fali przez próbkę oparty jest o standardowy algorytm korelacyjny. Metoda korelacyjna zapewnia stosunkowo dużą odporność na zakłócenia oraz pozwala na pomiary przy małej amplitudzie sygnałów odbiorczych. Dodatkowo algorytm korelacyjny może zostać rozbudowany o interpolację, która pozwala na znaczącą poprawę rozdzielczości pomiarowej.

Ze względu na prototypowy charakter stosowanego rozwiązania i dla zabezpieczenia przed ewentualną utratą wyników badań wykorzystano dwojaki sposób zapisu danych pomiarowych. Priorytetem było wprowadzenie mierzonych automatycznie wartości czasu przejścia fali przez próbkę w kanały rejestracyjne (analogowe) istniejącego systemu pomiarowego MTS. Dzięki temu wszystkie rejestrowane parametry (siła, przemieszczenia, czas przejścia fali itd.) są zapisywane w jednym pliku, co w istotny sposób ułatwia ich analizę. Zgodnie z tymi założeniami zmierzone wartości czasu przejścia zamieniane są najpierw na postać cyfrową w celu ich akwizycji i przetwarzania, a następnie znowu zmieniane na postać analogową i wprowadzane zwrótnie do systemu MTS jako wartości napięcia prądu. Dzięki temu prędkość fali ultradźwiękowej może być analizowana w funkcji obciążenia lub innych parametrów mierzonych przez system MTS. Drugim, kontrolnym sposobem zapisu jest bezpośrednia rejestracja mierzonych wartości czasu przejścia fali w niezależnym pliku tekstowym na komputerze z uruchomionym programem sterującym pomiarami ultradźwiękowymi.

W oknie programu sterującego odbiór sygnału przez głowicę ultradźwiękową obrazowany jest jako pierwsze wyraźne ramię sinusoidy (rys. 4), którego przecięcie z osią poziomą

wskazuje czas przejścia fali między głowicami. Śledząc zmieniające się w trakcie ściskania położenie tego punktu, można czas ten na bieżąco odczytywać i rejestrować.

W zastosowanym systemie proces pomiaru został zautomatyzowany. Ustawiając na ramionach sinusoidy stałe punkty kontrolne, wskazuje się programowi „punkt obserwacyjny”. Na rysunku 4 jest to odcinek sinusoidy między dwiema parami czarnych kółek, którego przecięcie z osią poziomą zaznacza środkowy trójkąt. Suwakiem „Threshold” można zwiększać lub zmniejszać rozpiętość punktów kontrolnych tak, aby ograniczyć zmianę ich położenia.

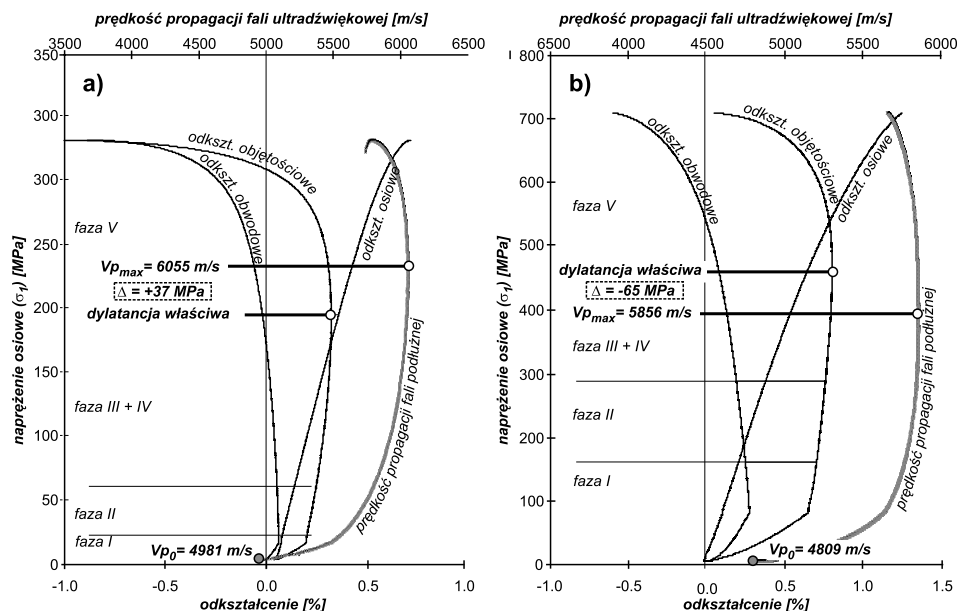
Ze względu na to, że pierwsze ramię sinusoidy jest z reguły niepełne i ma stosunkowo małą amplitudę, pewniejszym jest śledzenie dowolnego, innego punktu przecięcia, a prawdziwy czas przejścia uzyskuje się wprowadzając suwakiem „Correction” poprawkę na odpowiednią liczbę okresów bądź półokresów sinusoidy. Na przedstawionym rysunku 4 korekta ta wynosi $-\frac{1}{2}$ okresu, co dla głowic o częstotliwości 1 MHz odpowiada około 0,5 μ s. Zapamiętywany czas przejścia fali uwzględnia poprawkę i odpowiada w ten sposób punktowi przecięcia się z osią poziomą pierwszego ramienia sinusoidy.

Wyjście analogowe systemu pomiarowego prędkości fali ultradźwiękowej daje zakres napięcia do 5V. Konwertowany sygnał cyfrowy musi się więc w tym zakresie zmieścić, co narzuca poniekąd jego rozdzielczość. W trakcie ściskania próbki czas przejścia fali się zmienia, w niektórych odmianach skalnych znacznie, sinusoida się przesuwają i aby zachować ciągłość rejestracji przy optymalnej rozdzielczości należy odpowiednio ustawić przedział pomiarowy. Służą do tego 2 skrajne wskaźniki trójkątne na rysunku 4, które można w oknie programu przesuwają przy użyciu urządzenia wskazującego.

Informacje o mierzonych wielkościach wyświetlane są w dolnej części ekranu. A i B to położenie skrajnych trójkątów, TOF to czas przejścia fali przez próbkę skalną (trójkąt środkowy), natomiast przybliżoną wartość aktualnej prędkości fali można uzyskać wprowadzając w polu „Distance” wysokość próbki.

Wyniki pomiarów czasu przejścia fali przez próbkę, przekonwertowane na wartości napięcia są zapamiętywane w pliku na komputerze sterującym systemem MTS, razem z pozostałymi mierzonymi wartościami. Po przeprowadzeniu niezbędnych obliczeń uzyskuje się plik w formacie Excela, w którym wszystkie dane rozmieszczone są w kolumnach. Takie zestawienie mierzonych wartości pozwala szybko i w szerokim zakresie analizować rezultaty badań, w tym też zmienność propagacji fali ultradźwiękowej na całej ścieżce obciążenia, np. na tle kolejnych faz deformacji przedkrytycznej (rys. 5).

Na rysunku 5 przedstawiono dwie charakterystyki naprężenie-odkształcenie granitu strzelińskiego ściskanego w komorze trójosiowej, na których zaznaczono progi deformacji przedkrytycznej oraz przebieg zmian prędkości fali podłużnej w trakcie ściskania. Rysunek 5a obrazuje badanie przy ciśnieniu okólnym wynoszącym 12 MPa i przy temperaturze 27°C, zaś rysunek 5b to 75 MPa ciśnienia okólnego i 90°C. Zauważalne jest zróżnicowanie położenia maksymalnej prędkości fali podłużnej ($V_{p_{max}}$), która przy niższych wartościach ciśnienia i temperatury (mniejsza głębokość) znajduje się powyżej progu dyatacji właściwej, natomiast w warunkach odpowiadających większej głębokości $V_{p_{max}}$ pojawia się wyraźnie wcześniej.



Rys. 5. Przykładowe krzywe deformacji granitu strzełińskiego z przebiegiem zmian prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej podczas ściskania trójosiowego: a) ciśnienie okólne 12 MPa, temperatura 27°C, b) ciśnienie okólne 75 MPa, temperatura 90°C

4. Podsumowanie

Stworzony w Zakładzie Geomechaniki UW automatyczny system rejestracji prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej w trakcie badań wytrzymałościowych jest przydatnym narzędziem do analizy zmienności cech sprężystych ośrodków skalnych. Przebieg zmiennej propagacji fali ultradźwiękowej w zestawieniu z kompletną ścieżką deformacji próbek skalnych pozwala również prześledzić wpływ wzrastającego obciążenia na rejestrowane wartości V_p . Dzięki zastosowaniu systemu pomiarowego w warunkach trójosiowego ściskania przy wysokich ciśnieniach i temperaturze możliwe jest także porównywanie uzyskiwanych danych z wynikami geofizycznych badań *in situ*. Stworzenie w laboratorium geomechanicznym warunków zbliżonych do panujących na różnych poziomach skorupy ziemskiej pozwala na bezpośrednie tworzenie związków korelacyjnych, zaś ewentualne zróżnicowanie mierzonych parametrów umożliwia zdefiniowanie współczynników korekcyjnych, związanych bezpośrednio ze zmiennym polem naprężeń.

LITERATURA

- [1] *Gustkiewicz J.* (red.): Właściwości fizyczne wybranych skał karbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Kraków, Sigmie PAN, Kraków 1999
- [2] *Kanciruk A.*: Metoda pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych w próbkach skalnych podczas testów laboratoryjnych, *Kwartalnik AGH, Górnictwo i Inżynieria*, rok 32, z. 1, 2008, s. 129–139

- [3] *Moustachi O., Thimus J.F.*: P-Wave Attenuation in Creeping Rock and System Identification. *Rock Mech. Rock. Engng.* 30 (4), 1997, p. 169–180
- [4] *Nowakowski A., Młynareczuk M., Ratajezak T., Gustkiewicz J.*: Wpływ warunków termicznych na zmianę niektórych właściwości fizycznych i strukturalnych wybranych skał. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Rozprawy, Monografie* 5, 2003, s. 1–101
- [5] *Pinińska J.*: Inżynieria skalna zabytkowych elementów kamiennych, *Prace Naukowe Instytutu Geotechniki i Hydrotechniki Politechniki Wrocławskiej*. Tom 75, 2005, s. 451–462
- [6] *Weiss T., Rasolofosaon P.N.J., Siegesmund S.*: Ultrasonic Wave Velocities as a Diagnostic Tool for the Quality Assessment of Marble. *Geological Society, Special Publications*, v. 205, 2002, p. 149–164