

Adam Kanciruk\*

## METODA POMIARU PRĘDKOŚCI FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH W PRÓBKACH SKALNYCH PODCZAS TESTÓW LABORATORYJNYCH

---

### 1. Wstęp

Defektoskopia jest to zespół nieniszczących metod służących do wykrywania wad w materiałach, zwłaszcza metalach i ich stopach. Jedną z tych metod wykorzystuje zjawisko rozchodzenia się i odbicia fal ultradźwiękowych. Wewnętrzne pęknięcia, wtrącenia ciał obcych i inne niejednorodności mają znaczący wpływ na tłumienie fal, czas ich propagacji i powstawanie fal odbitych innych niż wywołanych przez ścianki badanej bryły materiału. Nic nie stoi na przeszkodzie, aby w ten sposób sprawdzać strukturę wewnętrzną materiałów kruchych, takich jak próbki skalne przygotowywane do testów wytrzymałościowych. Choć skały są ze swej natury materiałami niejednorodnymi, sprawdzanie takie może być użyteczne w eliminacji próbek, których struktura nie jest reprezentatywna dla badanego bloku skalnego lub została zmieniona wskutek obróbki.

Wewnętrzne pęknięcia próbek nie muszą być wyłącznie pochodzenia naturalnego. Skały zazwyczaj złożone są z różnych minerałów o różnej rozszerzalności cieplnej. Z tego względu proces nagrzewania próbki do pewnej temperatury i schładzanie jej do temperatury wyjściowej może wywoływać powstawanie spękań. Mogą one też powstawać podczas wspomnianych już testów wytrzymałościowych w fazie poprzedzającej całkowite zniszczenie próbki. Dysponując odpowiednią aparaturą można mierzyć parametry fal przechodzących przez próbkę, i to zarówno podłużnych (typu P), jak i poprzecznych (typu S). Określenie typu fal zapożyczone jest z sejsmografii. Fale podłużne przemieszczają się szybciej w skorupie ziemskiej niż fale poprzeczne i wcześniej są rejestrowane przez sejsmografy znajdujące się w pewnej odległości od hipocentrum wstrząsu. Dlatego zostały one nazwane *primary*, w odróżnieniu od poprzecznych — *secondary*. W defektoskopii wyrobów metalowych powszechnie stosowana jest detekcja wewnętrznych pęknięć i niejednorodności przez

---

\* Instytut Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków

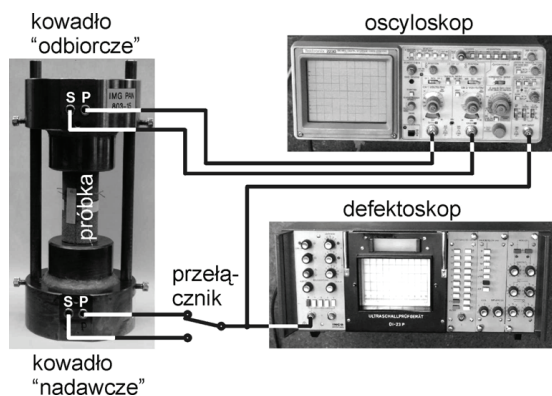
obserwację fal od nich odbitych (metoda echa) [1]. W przypadku skał metoda ta jest nieprzydatna. Ich naturalna niejednorodność i powstawanie podczas destrukcji nie pojedynczych pęknięć, lecz ich sieci, daje echo rozmyte i niejednoznaczne.

## 2. Aparatura do badań rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w próbkach skalnych podczas testu jednoosiowego ściskania

Do badań rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w próbkach skalnych podczas testu jednoosiowego ściskania z pewnością najlepiej jest używać specjalistycznej aparatury opracowanej tylko do tego celu. Zazwyczaj jednak taka aparatura jest produkowana w niewielkiej liczbie egzemplarzy, co pociąga za sobą jej wysoki koszt. Częściowo można ją zastąpić urządzeniami uniwersalnymi, przynajmniej w początkowym okresie prowadzenia badań tego typu. Ze względów ekonomicznych jest to z wszech miar korzystne.

W Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie wykorzystuje się w tym celu następujący zestaw (rys. 1):

- zestaw 2 kowadeł wyposażonych w przetworniki ultradźwiękowe,
- defektoskop ultradźwiękowy,
- oscyloskop analogowo-cyfrowy,
- urządzenie do badań wytrzymałościowych.



Rys. 1. Aparatura do badań rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w próbkach skalnych

Z wymienionych urządzeń tylko pierwsze zostało wykonane specjalnie do opisywanych badań. Producent kowadeł — Instytut Wysokich Ciśnień PAN — zaprojektował je tak, aby zdolne były do przenoszenia sił ściskających do 400 kN. Każde z nich wyposażone jest w dwa piezoelektryczne przetworniki ultradźwiękowe: jeden do generacji lub odbioru fal podłużnych (typu P), drugi — fal poprzecznych (typu S). Poza rozmieszczeniem

przetworników kowadła są identyczne. Częstotliwości rezonansowe wszystkich przetworników są równe i wynoszą 1 MHz.

Defektoskop ultradźwiękowy DI23-P produkcji Inco Warszawa to typowy przemysłowy przyrząd do detekcji wewnętrznych uszkodzeń wyrobów metalowych, takich jak np. szyny kolejowe. Produkowany w latach 70. XX wieku jest obecnie urządzeniem archaicznym, nie nadającym się do samodzielnego pomiaru czasu propagacji fal w próbkach skalnych ze względu na daleko niewystarczającą jego rozdzielczość. Zawiera on jednak użyteczny podzespół — generator impulsów pobudzających przetworniki do generacji fal. Do jego budowy wykorzystano lampę elektronową PL500 stosowaną niegdyś w układach odchylenia poziomego czarno-białych telewizorów (!). Do dziś funkcjonuje poprawnie, wytwarzając impulsy elektryczne o amplitudzie regulowanej w zakresie od 500 do 1500 V, czasie trwania ok. 2  $\mu$ s i okresie repetycji 20 lub 3,5 ms. Parametry te do pomiarów są w zupełności wystarczające.

Analogowo-cyfrowy oscyloskop Tektronix typu 2230, choć produkowany w końcu lat 80. XX wieku, jest urządzeniem wciąż dość nowoczesnym i precyzyjnym. W trybie pracy cyfrowej umożliwia obserwację sygnałów nieokresowych i okresowych. Dodatkową jego funkcją jest pomiar czasu i różnicy napięć. W przypadku sygnałów nieokresowych pomiar czasu jest wykonywany z rozdzielczością do 50 ns. W przypadku okresowych — nawet do 0,5 ns. Pomiar różnicy napięć w zakresie 0÷5 V w obu przypadkach realizowany jest z rozdzielczością 5 mV. Rozdzielczość pomiaru czasu zależy oczywiście od ustawionego zakresu. Dla typowych cylindrycznych próbek skalnych o średnicy 50 mm i wysokości 100 mm zakres 80  $\mu$ s jest wystarczający. Odpowiadająca mu rozdzielczość to 20 ns, która przez ekstrapolację może być obniżona do 10 ns.

Impulsy wzbudzające z defektoskopu kierowane są do pary przetworników „nadawczych” jednego z kowadeł poprzez zwykły przełącznik. Przetworniki drugiego kowadła — „odbiorcze” — dołączone są do wejść kanałów ‘1’ i ‘2’ oscyloskopu. Pomiar wykonywany jest zatem naprzemiennie. Dodatkowo, dla ustalenia punktu odniesienia pomiarów, wyjście z defektoskopu jest połączone (poprzez nieuwzględniony na rysunku dzielnik napięcia) z wejściem synchronizującym ‘EXT’ oscyloskopu.

Będące wyposażeniem Instytutu urządzenie do badań wytrzymałościowych Instron 8500 to znakomity system badawczy złożony ze sztywnej prasy hydraulicznej, zasilacza hydraulicznego, wieży sterującej i komputera. Szczególnie nadaje się on do badań materiałów kruchych. System, w układzie sprzężenia zwrotnego, umożliwia realizację złożonych ścieżek obciążeń. Badana próbka może być tym sprzężeniem objęta. Maksymalny nacisk prasy wynosi 5 MN, suw siłownika — 110 mm, wypadkowa sztywność — 30 MN/mm. Pomiar siły i przemieszczeń zapewniają precyzyjne przetworniki. Komputer służy zarówno do sterowania procesem badawczym, jak i do rejestracji wyników pomiarowych.

### 3. Przygotowanie eksperymentu

Opóźnienie fali ultradźwiękowej w drodze od przetwornika nadawczego do odbiorczego powstaje nie tylko wskutek przejścia przez badaną próbkę. Kowadła również mają

w nim swój udział, dlatego przed eksperymentem zwiera się kowadła powierzchniami kontaktowymi i mierzy tzw. czas martwy. Jest to czas pomiędzy opadającym zboczem impulsu wzbudzającego (jest on ujemny) a szczytem pierwszego impulsu odbieranego. Jest on różny dla fal P i S. Powierzchnie kowadeł nigdy idealnie nie przylegają do siebie, tak samo jak do próbki. Minimalne niedopasowanie stanowi poważną przeszkodę dla fal, dlatego konieczne jest każdorazowe pokrywanie tych powierzchni cienką warstwą substancji ułatwiającej kontakt tzw. kuplantu.

Po wieloletnich doświadczeniach (stosowano początkowo m.in. glicerynę, żel do medycznych badań USG, smary) ustalono, że najlepszym kuplantem, zwłaszcza do próbek porowatych, jest spożywczy miód pszczeli. Gatunek nie ma znaczenia, jedynym wymogiem jest brak w nim wykrywalnego cukru.

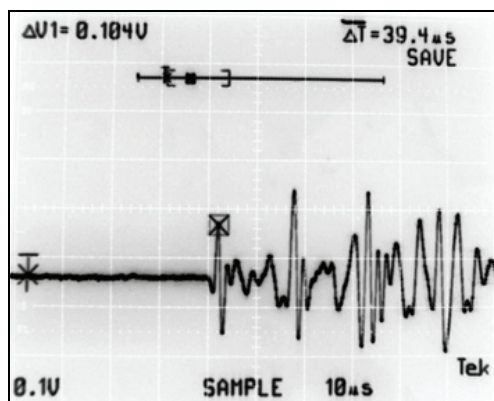
Do pomiaru odkształcenia próbki w strefie mało zaburzonej tarciami jej podstaw o kowadła stosowane są 4 tensometry kratowe, o podkładce papierowej, naklejane bezpośrednio na próbkę w połowie jej wysokości: 2 równolegle do jej osi do pomiaru odkształcenia podłużnego  $\epsilon_1$  i 2 prostopadle — do pomiaru odkształcenia poprzecznego  $\epsilon_3$ . Tensometry parami umieszczane są naprzeciwko siebie tak, aby możliwa była eliminacja ewentualnego momentu zginającego próbkę na wynik pomiaru. Odkształcenia mierzone są czterokanałowo z wykorzystaniem miernika odkształceń SGM-1C81 konstrukcji autora [2], choć do dalszych obliczeń wyniki z obydwu par tensometrów są uśredniane. Podłączona do miernika próbka, po posmarowaniu jej podstaw tak jak wspomniano miodem, umieszczana jest osiowo pomiędzy zestawem kowadeł i wraz z nimi i dynamometrem — pomiędzy płytami prasy. Zakres pomiaru siły wynosi 250 kN + margines 75 kN, zadawany jest posuw tłoka siłownika z prędkością 0,25  $\mu\text{m/s}$ .

#### 4. Przebieg eksperymentu

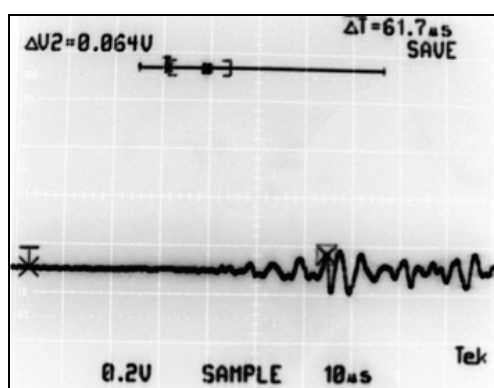
Zarówno urządzenie do badań wytrzymałościowych Instron 8500, jak i miernik odkształceń SGM-1C81 mogą pracować w trybie automatycznym, zatem po odpowiednim ich zaprogramowaniu i zainicjowaniu pracy funkcjonują bezobsługowo przez cały eksperyment. Pomiar okresów przejścia fal ultradźwiękowych przez badaną próbkę jest prowadzony manualnie. Nie zapewnia to dużej częstotliwości pomiarów, ale przy odpowiednio małej szybkości narastania obciążenia naprzemienne pomiary co 30÷40 sekund dają po kilkadziesiąt wyników pomiarowych. Typowy eksperyment trwa około 1 godziny.

Jak każdy proces pomiarowy prowadzony ręcznie, tak i ten wymaga od operatora odpowiedniej wprawy. Występujące tu problemy ilustruje zestaw rysunków — fotografii ekranu oscyloskopu (rys. 2–9).

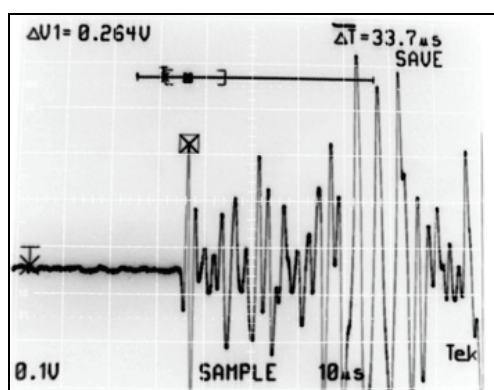
Wszystkie fotografie wykonano po umieszczeniu między kowadłami cylindrycznej próbki o średnicy 32 mm i wysokości 64 mm wyciętej z piaskowca Tumlin, pochodzącego z kamieniołomu w Górach Świętokrzyskich o tej samej nazwie. Jest to przykład skały o drobnym uziarnieniu, dość jednorodnej, o minimalnej anizotropii.



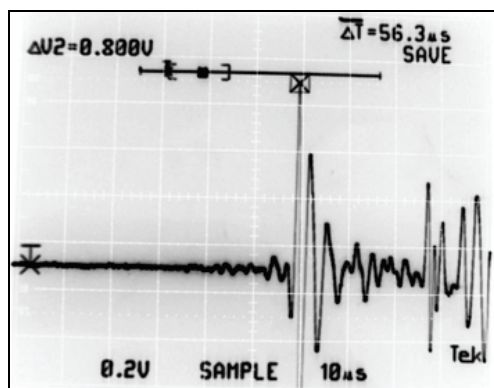
Rys. 2. Fala typu P, nacisk  $F = 0$  kN, podstawa czasu  $10 \mu\text{s}/\text{cm}$



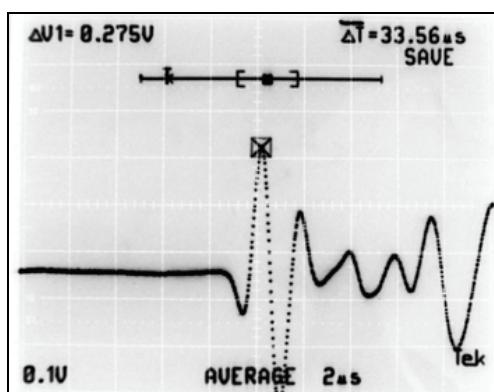
Rys. 3. Fala typu S, nacisk  $F = 0$  kN, podstawa czasu  $10 \mu\text{s}/\text{cm}$



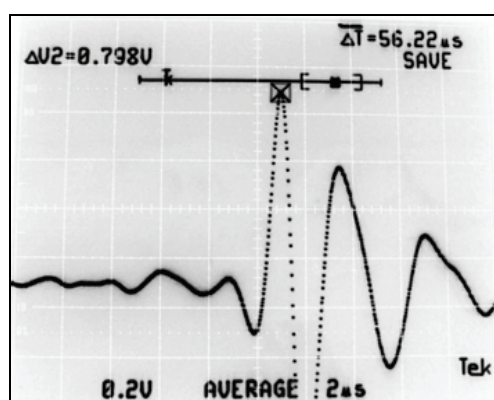
Rys. 4. Fala typu P, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $10 \mu\text{s}/\text{cm}$



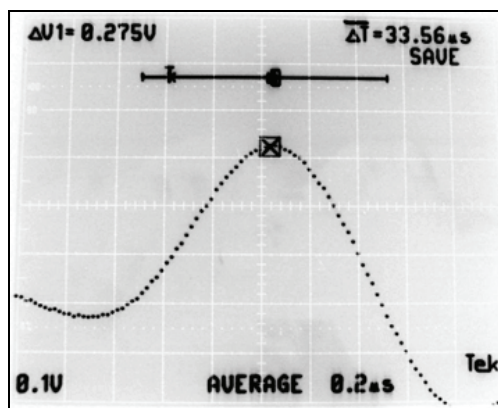
Rys. 5. Fala typu S, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $10 \mu\text{s/cm}$



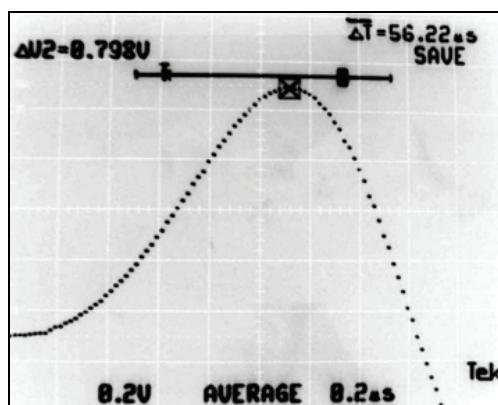
Rys. 6. Fala typu P, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $2 \mu\text{s/cm}$



Rys. 7. Fala typu S, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $2 \mu\text{s/cm}$



Rys. 8. Fala typu P, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $0,2 \mu\text{s}/\text{cm}$



Rys. 9. Fala typu S, nacisk  $F = 10$  kN, podstawa czasu  $0,2 \mu\text{s}/\text{cm}$

Na rysunkach 2 i 3 przedstawiono obraz sygnału odebranego z przetworników kowadła „odbiorczego”. Podstawę czasu wybrano tak, aby widoczny był na nim moment pojawienia się impulsu synchronizującego, czyli wzbudzającego falę. Oznacza go litera „T” (przy lewym brzegu ekranu). Na punkt ten naprowadzony jest nieruchomy kursor — ukośny krzyżyk. Kursor ruchomy — krzyżyk wpisany w kwadrat — naprowadzony jest ręcznie na szczyt pierwszego dodatniego impulsu fali odebranej. W przypadku fali P (rys. 2) impuls ten ma prawidłowy kształt wycinka sinusoidy i jest dobrze widoczny. Impulsy następujące po nim nie są brane pod uwagę, gdyż nie reprezentują bezpośredniego przejścia fali po najkrótszej drodze. W przypadku fali S, gorzej przechodzącej przez półpłynną warstwę kuplantu, impuls jest słabszy i ginie wśród niekształtnych przebiegów. Może być wykryty tylko dzięki „ładniejszemu” kształtowi, co nie zawsze jest jednoznaczne. Konieczne jest tu odpowiednie doświadczenie operatora. Wspomniane niekształtne przebiegi są najprawdopodobniej skutkiem częściowego przekształcania się fali poprzecznej w podłużną w nieregularnej

strukturze próbki. Fala podłużna biegnie, jak wspomniano, szybciej i dlatego niepożądane impulsy wyprzedzają impuls właściwy. Wybór jego szybko jest potwierdzany wraz ze wzrostem nacisku na próbkę — kontakt poprawia się i amplituda impulsu gwałtownie rośnie, co przedstawia rysunek 5. Amplituda impulsu fali P też rośnie, ale w mniejszym stopniu (rys. 4). Nacisk 10 kN stanowi około 12% granicy wytrzymałości próbki.

Oscyloskop pamięta wartości sygnałów z przedziału czasu ponad 4 razy dłuższego niż obrazowanego na ekranie. Zatem będąc pewnym, że kursor nieruchomy jest zawsze w punkcie „złapania” synchronizacji (oznaczonym jako „T”), można podstawę czasu zmniejszyć pięciokrotnie, jak to obrazują rysunki 6 i 7. Dalsze zwiększenie rozdzielczości pomiaru czasu pomiędzy kursorem nieruchomym a ruchomym następuje po zastosowaniu tzw. rozciągu podstawy czasu, tak jak przedstawiają rysunki 8 i 9. Jak widać obraz impulsu jest wystarczająco wyraźny i umieszczenie kursora w szczytowym jego punkcie nie stanowi problemu. Pomiar czasu między kursorem nieruchomym a ruchomym można realizować z rozdzielczością 0,02  $\mu$ s.

## 5. Przykładowe eksperymenty

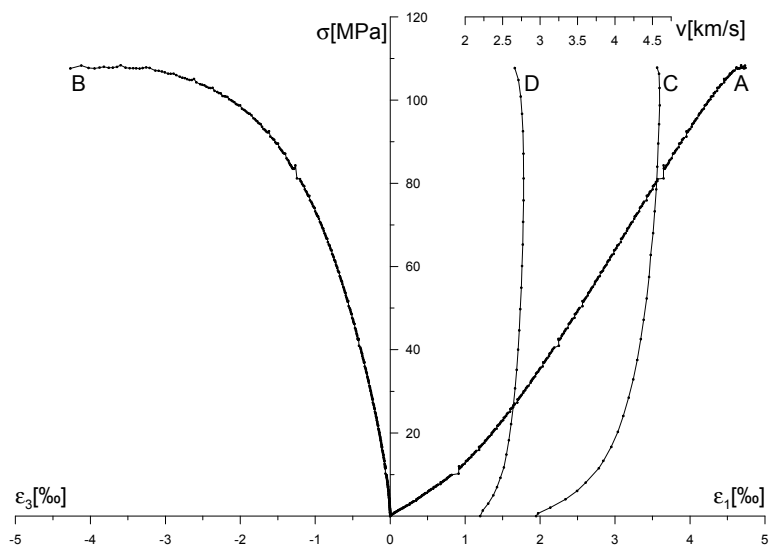
Do przykładowych eksperymentów wybrano 2 rodzaje skał osadowych, różniących się zasadniczo strukturą. Są to wspomniane piaskowiec Tumlin i wapień Czatkowice z Wyżyny Krakowsko-Częstochowskiej. Piaskowiec stanowią twarde ziarna kwarcu spojone słabym materiałem wiążącym. Jego porowatość jest rzędu 10%. Wapień jest materiałem jednorodnym, złożonym niemal całkowicie z kalcytu, bardzo zbitym, o porowatości nie przekraczającej 2%. Nic zatem dziwnego, że wyniki testów są odmienne.

Rysunek 10 przedstawia wykresy obrazujące test jednoosiowy próbki piaskowca. Na osi odciętych naniesiono wartości odkształceń: podłużnego, ściskającego (dodatnie) i poprzecznego, rozciągającego (ujemne). Na osi rzędnych zaś — wartości naprężeń. Na dodatkowej, krótszej osi odciętych (w górnej części rysunku) — wartości prędkości fal. Próbkę ściskana była aż do momentu zniszczenia. Wykres „ $\sigma - \epsilon_1$ ” oznaczony na rysunku literą „A” w zakresie sprężystym jest niemal liniowy, podobnie jak wykres „ $\sigma - \epsilon_3$ ” („B”). W zakresie plastycznym wykresy są nieliniowe, następuje znaczny wzrost odkształcenia  $\epsilon_3$  w porównaniu do  $\epsilon_1$ , które tuż przed zniszczeniem osiągają niemal równe wartości. Zatem w zakresie plastycznym następuje wzrost objętości próbki przez powstawanie w jej strukturze nowych spękań. Wykresy „C” i „D” przedstawiają odpowiednio charakterystyki „ $\sigma - v_p$ ” i „ $\sigma - v_s$ ”, gdzie  $v_p$  i  $v_s$  to prędkości fal: podłużnej i poprzecznej. Wyraźnie widoczny jest wpływ naprężenia w próbce na prędkości fal, zwłaszcza poprzecznej, która w zakresie sprężystym wzrasta, a w zakresie plastycznym maleje. Prędkość fali podłużnej maleje dopiero w strefie bezpośrednio poprzedzającej zniszczenie.

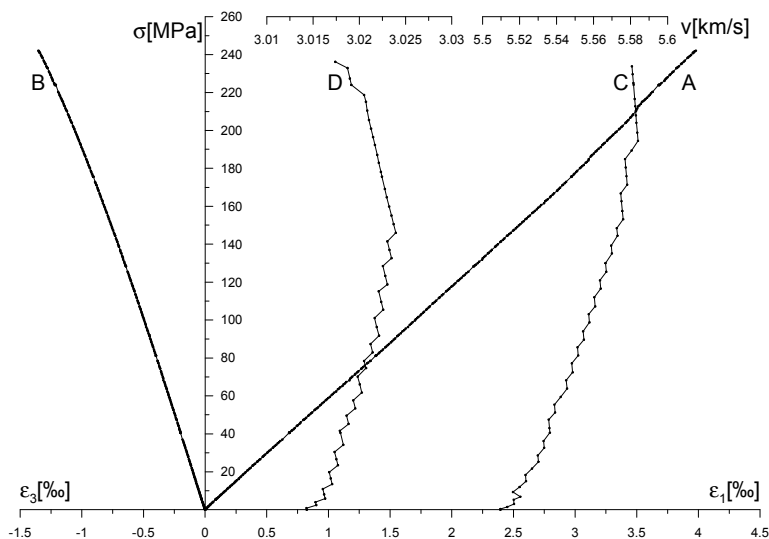
Rysunek 11 obrazuje wykresy testu jednoosiowego próbki wapienia. Osie naniesiono podobnie, dla lepszej czytelności wykresów wprowadzono osobne osie prędkości dla fal „P” i „S”. Identyfikacyjnie oznaczono wykresy. Wykresy „ $\sigma - \epsilon_1$ ” i „ $\sigma - \epsilon_3$ ” są w całym zakresie niemal liniowe. Próbkę zachowuje się sprężyste aż do jej efektywnego zniszczenia, zakres



odkształceń plastycznych jest niezauważalny. Charakterystyki „ $\sigma - v_p$ ” i „ $\sigma - v_s$ ” są bardzo strome, zmiany prędkości fal bardzo niewielkie, zbliżone do rozdzielczości pomiarowej aparatury. Jednakże i tutaj można zauważyć początkowy wzrost i końcowy spadek prędkości, zwłaszcza fali poprzecznej.



Rys. 10. Test jednoosiowy piaskowca Tumlin



Rys. 11. Test jednoosiowy wapienia Czatkowice

## 6. Podsumowanie

Przedstawiona metoda pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych podłużnych i poprzecznych w próbkach skalnych podczas testów jednoosiowych, mimo stosowania do tego celu aparatury w większości niespecjalistycznej, daje dobre wyniki dla skał o różnej budowie. Jest jednym ze sposobów monitorowania stopnia destrukcji próbek. Wyniki pomiarów są wykorzystywane do określania dynamicznych stałych materiałowych, tak jak to już opisano w literaturze [3]. Ręczne prowadzenie pomiarów jest jednak uciążliwe i nie zapewnia porównywalnej z pomiarami odkształceń ich częstotliwości. Dlatego przewiduje się na podstawie uzyskanych doświadczeń, opracowanie do tego celu automatycznego przyrządu pomiarowo-rejestrującego.

### LITERATURA

- [1] *Zagajewski T. i inni*: Elektronika przemysłowa. Warszawa, WNT 1975
- [2] *Kanciruk A.*: Miernik tensometryczny SGM-1C. „XVII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej”. Politechnika Wrocławska, Szklarska Poręba 13–18 marca 1995, s. 171–178
- [3] *Nowakowski A.*: The static and dynamic elasticity constants of sandstone and shales from the hard coal mine „Jasmos” determined in the laboratory conditions. „Eurock 2005 — Impact of human activity on the geological environment”. A.A. Balkema Publishers, Brno 18–20 May 2005, s. 419–422