

## Wpływ cech strukturalnych piaskowców fliszowych z Mucharza (Beskid Mały) na procesy pękania w warunkach jednoosiowego ściskania

Lukasz Pieczara<sup>1</sup>



**The influence of the structural features in the Krosno Sandstones of Mucharz (Little Beskids) on fracture processes under uniaxial compression conditions.** Prz. Geol., 62: 680–686.

*A b s t r a c t.* The fracture processes of the Krosno Sandstones of Mucharz, southern Poland, were analysed to determine its relation to orientation of the structural features of the rock. The research putted focused estimating influence of characteristic structural features of the rock (arrangement of laminations plane and direction of arrangement of grains). In the initial stage of research, ultrasonic longitudinal wave propagation speed ( $V_p$ ) tests were carried out on samples flysch sandstones. The results of the tests were analysed to determine effects of characteristic structural features of the rock on obtained values of longitudinal wave propagation speed ( $V_p$ ), using on variability of obtained results depending on orientation of mineral elements. In the second part of the study, the point load test was used to determine rock strength under uniaxial compression conditions. In order to estimate uniaxial compressive strength, index-to-strength conversion factors were used. The point load test apparatus and procedure enables economical testing of rock samples in either a field or laboratory setting. Last part of the research was application of computer methods enabled to show technique of analysis microscopic images of the thin – section flysch sandstones samples, tested on point load tests and filled with a staining substance. The study elucidated the structural controls of the fracture processes of the flysch sandstones from Gorka – Mucharz quarry.

**Keywords:** anisotropy, flysch, fracture, Krosno Sandstones, longitudinal wave, point load test, rock mechanics, strength, thin-section

Niszczenie ośrodków skalnych w wyniku pękania polega na gwałtownym rozprzestrzenianiu się szczelin. Aby nastąpił ten procesu potrzebne są miejsca niejednorodności budowy wewnętrznej (defekty strukturalne), które wraz ze wzrostem obciążenia powodują występowanie naprężeń przekraczających wytrzymałość wiązań strukturalnych. Przebieg szczeliny uzależniony jest nie tylko od kierunku działania sił zewnętrznych i genezy skały, ale także od cech występujących w jej budowie wewnętrznej (Pinińska, 1995). Wśród nich szczególną rolę odgrywają m.in. kształt i wytrzymałości poszczególnych składników materiału skalnego, kierunkowość ułożenia ziaren mineralnych, elementy strukturalne ośrodka skalnego, m.in. laminacje, uławiczenia, a także rodzaj spoiwa oraz geometryczny rozkład przestrzeni porowej. Wszystkie wymienione właściwości materiału skalnego warunkują charakter mechanizmu pękania (Pinińska, 2003).

W przypadku ośrodków skalnych wyróżniamy trzy podstawowe typy zniszczenia: intragranularne, intergranularne oraz transgranularne. Różnią się one m.in. czynnikami indukującymi powstawanie szczeliny, rodzajem elementów strukturalnych, które biorą udział w jej propagacji, natężeniem i gwałtownością zachodzącego zjawiska oraz późniejszą wytrzymałością rezydualną (Pinińska, 2004). Pęknięcie intragranularne wywołane jest procesem rozciągania pojedynczych ziaren. Dotyczy ośrodków skalnych charakteryzujących się regularną, ziarnistą i zwartą budową szkieletu mineralnego, spojonego dodatkowo mocnym spoiwem. W pękaniu intragranularnym kluczową rolę w kształtowaniu pola naprężeń odgrywają ziarna mineralne o dużej wytrzymałości. W miejscach ich bezpośredniego kontaktu następuje koncentracja naprężeń, którego efektem jest indukowanie procesu rozdzielczego rozciągania i niszczenie ziaren o największej wytrzymałości w

pierwszej kolejności. Spowodowane jest to hamowaniem propagacji defektów poza obszar ziarna, np. poprzez bardziej wytrzymałe spoiwo. Ten typ pęknięcia charakteryzuje się gwałtownym rozpadem ośrodka skalnego, które połączone jest ze znikomym zachowaniem wytrzymałości rezydualnej (Pinińska, 2004). W przypadku ośrodków skalnych charakteryzujących się losowym rozproszeniem ziaren mineralnych (o kształtach nieforemnych) w słabym spoiwie proces pęknięcia przyjmuje charakter intergranularny i jest zdominowany przez mechanizm ścinania. W tego rodzaju materiale skalnym niszczenie wiązań w strukturze wewnętrznej, ze względu na występujące znaczne opory ścinania i zróżnicowaną powierzchnię między ziarnami, charakteryzuje się powolnym tempem, z zachowaniem znacznej wytrzymałości rezydualnej (Pinińska, 2004). W przypadku pęknięcia transgranularnego pęknięcie przemieszcza się poprzez ziarna ośrodka skalnego. W związku z tym w skale występować mogą zmiany kierunku propagującej szczeliny, wskutek występowania uprzywilejowanych płaszczyzn pęknięcia (zróżnicowane ułożenie atomów sieci krystalicznej poszczególnych ziaren).

Przebieg procesu zniszczenia jest więc indywidualną cechą skały, zależną od jej składu litologicznego, genezy i struktury. W związku z tym dla prognozy kierunku propagacji mikroszczelin w danym ośrodku skalnym bardzo ważne jest ustalenie strukturalnych i teksturalnych warunkowań powstawania i rozwoju stref nieciągniętych wewnątrz materiału, sprzyjających postępującej jego degradacji.

### PRZEDMIOT I CEL BADAŃ

Badania wpływu cech strukturalnych na proces pęknięcia w warunkach jednoosiowego ściskania przeprowadzono

<sup>1</sup> Zakład Geomechaniki, Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; lukaszpieczara@student.uw.edu.pl



Ryc. 1. Lokalizacja kamieniołomu Górka-Mucharz  
Fig. 1. Location of the Gorka-Mucharz quarry

na próbkach piaskowca krośnieńskiego, eksploatowanego w kamieniołomie Górka-Mucharz, we wschodniej części Beskidu Małego (ryc. 1). W odsłonięciu tym występują oligoceńskie, gruboławicowe piaskowce z niewielkimi wkładkami mułowców i łupków, należące do dolnego poziomu warstw krośnieńskich.

Piaskowce krośnieńskie z Mucharza przeważnie posiadają teksturę bezładną lub lekko kierunkową i frakcjonalne ułożenie ziaren. W analizowanych skałach występuje wyraźna laminacja, która podkreślona jest smugowaniem ciemnymi minerałami i związkami żelaza. Ziarna mineralne charakteryzują się niezometrycznym kształtem, kierunkowością ułożenia oraz niskim stopniem obtoczenia. Piaskowce krośnieńskie z Mucharza posiadają barwę szaroniebieską, która pod wpływem procesów wietrzenia zmienia się na żółto-brunatną. W analizie makroskopowej obserwuje się ziarna kwarcu (minerał dominujący), skaleni (głównie potasowych), łyszczyków (przeważnie muskowit oraz bioty) oraz okruchy i fragmenty skał obcych (litoklasty). Poza wymienionymi powyżej minerałami w omawianych skałach występują także glaukonit, minerały ciężkie (akcesoryczne) oraz bioklasty. W analizowanym materiale skalnym poszczególne ziarna spojone są spoiwem wykształconym jako matrix ilasto-węglanowy, któremu towarzyszą zróżnicowane ilości cementu kwarcowego (Pinińska, 2003; Łukaszewski, 2013).

Pod względem petrograficznym badany materiał stanowi średnioziarnistą wakę lityczną lub arkozową ze zrównoważoną ilością skaleni i fragmentów skał obcych, o lekko kierunkowej teksturze z licznymi łyszczycami barwy jasnej i ciemnej. Badany piaskowiec krośnieński pod względem genetycznym należy zaklasyfikować do klastycznych skał fliszowych, a w klasyfikacji petrograficznej

może zostać określony jako waka arkozowa o spoiwie węglanowo-ilastym z licznymi kwarcami i widoczną teksturą kierunkową (Pinińska, 2003; Dziedzic, 2005).

Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu cech strukturalnych piaskowców krośnieńskich z Mucharza na procesy pęknięcia w warunkach jednoosiowego ściskania. Ponadto, przyjęta metodyka umożliwiła realizację kilku dodatkowych celów, wśród których jako najważniejsze wymienić należy: określenie przydatności badań wytrzymałości na punktowe ściskanie jako alternatywy dla klasycznych metod badania wytrzymałości oraz wyznaczenie przybliżonej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie ( $R_c$ ) z zastosowaniem odpowiednio dobranej wartości współczynnika korelacyjnego  $k$ .

Cele te zrealizowano poprzez wybór wzorcowego, anizotropowego materiału skalnego i właściwy dobór metodyki badawczej. Wykorzystano procedury badawcze pozwalające opisać charakterystykę cech strukturalnych oraz właściwości badanego materiału skalnego, wpływające na charakter powstających mikropęknięć.

## METODYKA BADAŃ

Zaproponowany harmonogram badań składał się z czterech zasadniczych etapów. Pierwszym z nich były badania identyfikacyjne, obejmujące analizę makroskopową i mikroskopową próbek materiału skalnego, ze szczególnym zwróceniem uwagi na charakterystyczne cechy budowy wewnętrznej. W ramach badań identyfikacyjnych dokonano ponadto zorientowania próbek skalnych w stosunku do uwarstwienia, laminacji oraz dłuższych osi ziaren. Tak przygotowane próbki otrzymały kody identyfikacyjne charakteryzujące orientację osi próbki pod wzglę-

dem charakterystycznych cech strukturalnych badanego materiału skalnego:

– T – oś próbki prostopadła do uwarstwienia i laminacji,

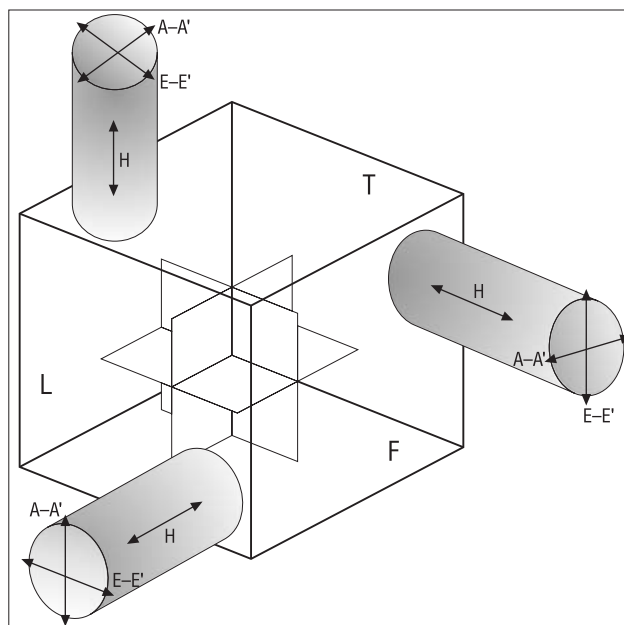
– F – oś próbki równoległa do uwarstwienia i laminacji oraz równoległa do dłuższych osi ziaren mineralnych,

– L – oś próbki równoległa do uwarstwienia i laminacji oraz prostopadła do dłuższych osi ziaren mineralnych.

Ponadto każda próbka otrzymała dodatkowy identyfikator liczbowy (1–7), który informował o numerze bloku skalnego, z którego została ona wycięta. Na tak oznaczone próbki naniesiono trzy główne kierunki badawcze, zorientowane względem przyjętych wcześniej wymuszonych płaszczyzn pęknięcia. W ten sposób powstał układ trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyzn, które były ponadto zorientowane względem cech strukturalnych ośrodka skalnego (ryc. 2). Poza głównymi kierunkami badawczymi pomiary zagęszczono wzdłuż dodatkowych sześciu osi zlokalizowanych na obwodzie próbki. Przyjęty sposób przygotowania materiału badawczego pozwolił na zachowanie w poszczególnych próbkach zmiennej orientacji cech strukturalnych względem kierunków badawczych.

W trakcie drugiego etapu prac wykonano nieniszczące badania ultradźwiękowe. Celem tych badań było określenie wpływu cech strukturalnych na prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej (ocena anizotropii rozchodzenia się prędkości fali, wskazanie kierunków uprzywilejowanych). Duże zróżnicowanie budowy wewnętrznej skały sprawia, iż fale ultradźwiękowe w obrębie pojedynczej próbki mogą propagować z różną prędkością (Pinińska & Płatek, 2002). Stąd też tak ważne jest, aby badania ultradźwiękowe wykonywane były na zorientowanych próbkach skalnych. Właściwości akustyczne piaskowców krośnieńskich z Mucharza badano, stosując metodę przejścia. Polegała ona na bezpośrednim pomiarze czasu przechodzenia impulsu przez próbkę skalną o znormalizowanych wymiarach, pomiędzy głowicą nadawczą a odbiorczą, zgodnie z przyjętymi wcześniej płaszczyznami wymuszonego pęknięcia. W przypadku każdej z piętnastu (po pięć dla każdej z grup) badanych próbek wykonano dziewięć (osiem po obwodzie na wysokości 1/4 próbki, jeden wzdłuż osi) pomiarów prędkości fali podłużnej ( $V_p$ ) po uprzednio zaznaczonych kierunkach badawczych. Badania laboratoryjne, wykorzystujące ultradźwięki, wykonywano przy użyciu defektoskopu, podłączonego do komputera zaopatrzonego w specjalistyczne oprogramowanie. Do pomiarów prędkości rozchodzenia się fali podłużnej zastosowano głowice pomiarowe INCO o częstotliwości 1 MHz, co umożliwiło generowanie fal ultradźwiękowych o długościach kilkukrotnie mniejszych niż rozmiary próbki.

Badania identyfikacyjne oraz ultradźwiękowe były wstępem do zasadniczej grupy badań, mających za zadanie określenie wpływu cech strukturalnych na charakterystykę i przebieg procesów pęknięcia piaskowców krośnieńskich z Mucharza. Kolejny etap prac stanowiły badania wytrzymałościowe, wykonywane z zastosowaniem prasy ręcznej, służącej do oznaczania wytrzymałości skał na obciążenie punktowe (*point load test*). Ze względu na wymiary geometryczne badanych próbek zastosowano test osiowy. Polegał on na centrycznym umieszczeniu wypoziomowanej próbki pomiędzy stożkowatymi zakończeniami



Ryc. 2. Orientacja badanych próbek piaskowców krośnieńskich  
Fig. 2. Orientation of analysed rock samples of Krosno Sandstones

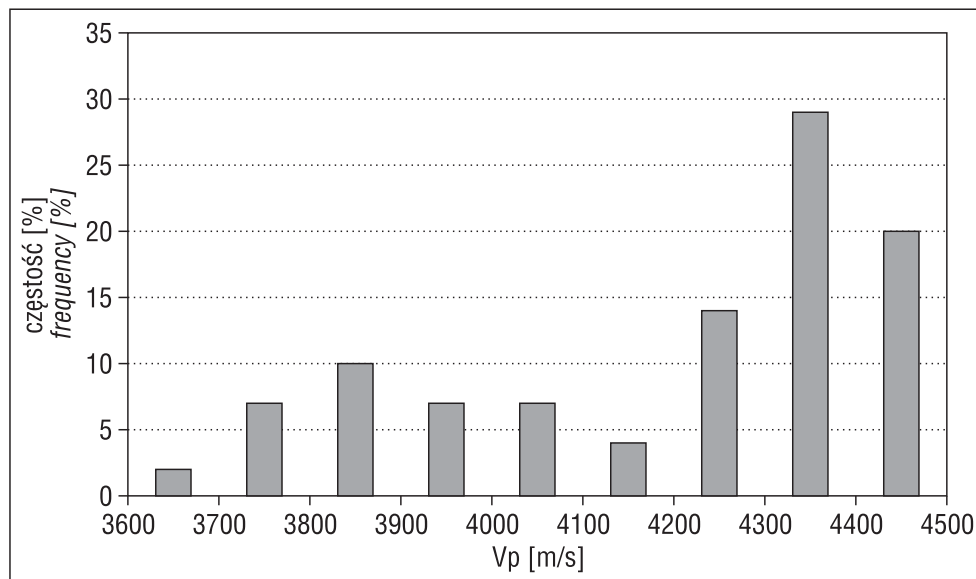
głowic zlokalizowanych w tłoku prasy oraz zadawaniu obciążenia aż do momentu zniszczenia struktury ośrodka skalnego.

Wpływ budowy wewnętrznej i cech strukturalnych na przebieg procesów pęknięcia piaskowców krośnieńskich z Mucharza badano z użyciem analizy mikroskopowej przy zastosowaniu światła przechodzącego, gdzie jako preparaty badawcze wykorzystywano płytki cienkie, które zostały dodatkowo zabarwione. W przypadku badania procesów pęknięcia wnikięcie substancji barwiącej pomiędzy ziarna mineralne w próbce pozwala na lepsze wyeksponowanie przebiegu szczeliny oraz charakteru jej krawędzi. Obserwacje płytek cienkich miały ponadto za zadanie określenie mechanizmu indukującego procesy pęknięcia, ich przebiegu oraz charakterystykę właściwości propagującej szczeliny. Zastosowanie mikroskopu polaryzacyjnego i specjalistycznego oprogramowania pozwoliło na szczegółowe prześledzenie m.in. morfologii powierzchni kontaktowych, kierunku propagacji szczeliny, jej parametrów geometrycznych oraz przebiegu krawędzi. Do badań płytek cienkich wykorzystywano mikroskop polaryzacyjny firmy Nikon z kamerą Nikon Sight DS. Aparatura ta była podłączona do komputera wyposażonego w zaawansowane oprogramowanie tego samego producenta. Pozwalało to na bezpośrednią obserwację na monitorze komputera analizowanych obiektów. Dodatkowo mikroskop wyposażony był w stolik o napędzie elektrycznym, który umożliwiał sprawne przesuwanie preparatu pod obiektywem. W trakcie badań wykorzystywano dwu-, cztero- oraz dziesięciokrotne powiększenia.

## REZULTATY BADAŃ

Pomierzone, wzdłuż przyjętych kierunków, prędkości fali podłużnej ( $V_p$ ) wskazują na występowanie w badanym materiale skalnym anizotropii budowy wewnętrznej. Analizując cały zbiór otrzymanych wyników zauważyć można,





Ryc. 3. Histogram rozkładu prędkości fali podłużnej  $V_p$   
 Fig. 3. Histogram of distribution of longitudinal wave propagation speed ( $V_p$ )

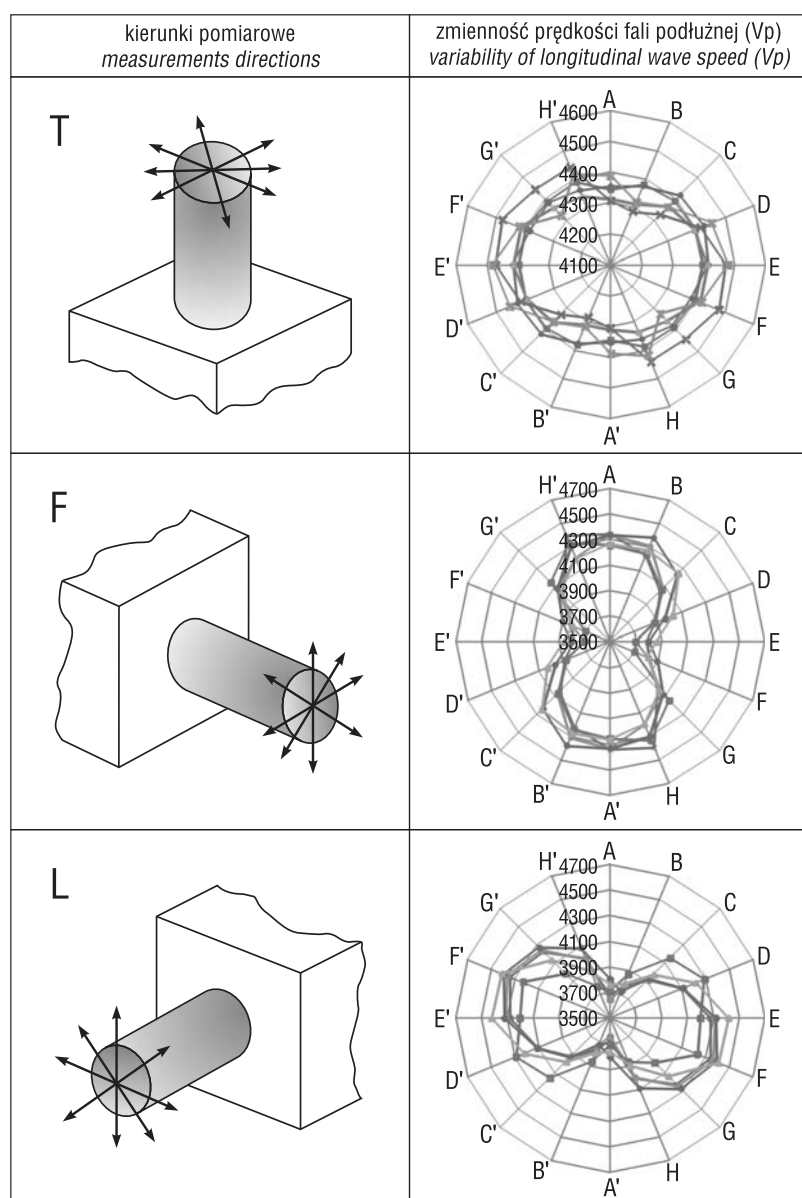
iz zaprezentowane wartości cechują się bardzo dużą zmiennością. Prędkość fali podłużnej zawiera się w przedziale od 3644 m/s do 4483 m/s. Histogram rozkładu wartości  $V_p$  ma charakter dwumodalny (ryc. 3). Maksyma wynoszą odpowiednio 3800 oraz 4300 m/s. Udział tej drugiej wartości jest 3-krotnie większy.

Dostosowany do celu badań, ujednolicony schemat kierunków badawczych umożliwił graficzną prezentację wyników na diagramach kołowych. Wskazują one na uzyskaną stosunkowo wysoką dokładność pomiarów prędkości propagacji fali ultradźwiękowej. Najmniejsze różnicowanie wartości  $V_p$  na poszczególnych kierunkach badawczych zlokalizowanych na obwodzie dotyczy próbek oznaczonych symbolem T, w przypadku pozostałych dwóch typów próbek (oznaczonych symbolami F oraz L) zmiany prędkości są wyraźnie większe. Na podstawie powyższych danych dokonać można analizy zmian parametrów akustycznych w zależności od przyjętego kierunku badawczego (ryc. 4). Fale ultradźwiękowe podłużne najszybciej propagują w kierunkach równoległych do laminacji: zgodnie z dłuższymi osiami ziaren i prostopadle do nich. W tym drugim przypadku zanotowano nieco mniejsze prędkości propagacji fal. Natomiast w kierunku prostopadłym do laminacji i warstwowania zanotowano wyraźnie najniższe prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych. Wyniki powyższych spostrzeżeń i analiz znajdują potwierdzenie we wcześniej prowadzonych badaniach (Dziedzic, 2003; Dziedzic, 2005). Obserwowaną anizotropię budowy wewnętrznej podkreśla także analiza zmienności uzyskanych wyników prędkości w poszczególnych, wyróżnionych kierunkach. Wartość najczęściej występująca dla kierunku równoległego z dłuższymi osiami ziaren wynosi 4400 m/s, natomiast w przypadku kierunku prostopadłego do dłuższych osi ziaren w przypadku kierunku prostopadłego do laminacji i uwarstwienia osiągają wartość około 3800 m/s.

Dwumodalność obserwowana na histogramie rozkładu prędkości rozchodzenia się fali podłużnej dla wszystkich

uzyskanych w trakcie badań pomiarów odzwierciedla więc wyraźną anizotropię właściwości sprężystych analizowanego materiału skalnego, która zależna jest od laminacji. Reasumując, występujące w piaskowcu krośnieńskim z Mucharza charakterystyczne cechy strukturalne są przyczyną kierunkowej zmienności propagacji fali podłużnej. Efektem tego jest obniżenie prędkości o 500–600 m/s, w kierunku prostopadłym do powierzchni laminacji zgodnej z warstwowaniem obserwowanym w masywie. Zwrócić należy także uwagę na niewielkie różnicowanie prędkości fali ultradźwiękowej: między kierunkami prostopadłym i równoległym do dłuższych osi ziaren. Pomimo tego, że spadek  $V_p$  był stosunkowo niewielki (100 m/s), to powtarzalność otrzymywanych w trakcie badań wyników wskazuje, iż także ta cecha strukturalna modyfikuje prędkość rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w analizowanym ośrodku skalnym. Zwiększona prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w kierunku równoległym do dłuższych osi ziaren spowodowana jest mniejszą ilością barier wewnątrz ośrodka skalnego, które mogłyby doprowadzić do tłumienia rozchodzącej się fali.

Najwyższą wytrzymałością na obciążenie punktowe charakteryzowały się próbki o osi zorientowanej prostopadle do uwarstwienia i laminacji, gdzie wytrzymałość w przypadku wszystkich zbadanych próbek przekraczała 7,0 MPa. Dla pozostałych dwóch typów próbek wartość tego parametru była podobna i znajdowała się w przedziale od 6,3 do 6,9 MPa. Biorąc pod uwagę kierunek propagacji szczeliny, pewne zależności można uchwycić dla próbek oznaczonych symbolem T i L. Dla próbek o osi podłużnej zorientowanej prostopadle do uwarstwienia i laminacji (oznaczonych symbolem T) szczelina w dwóch z trzech przypadków propagowała się w kierunku nadawczym A–A' (równoległe do powierzchni laminacji i prostopadle do dłuższych osi ziaren). W przypadku próbek badawczych oznaczonych symbolem L (oś podłużna próbki równoległa do uwarstwienia i laminacji oraz prostopadła do dłuższych osi ziaren mineralnych), dominującym kierunkiem roz-



**Ryc. 4.** Zmienność prędkości fali podłużnej  $V_p$  w zależności od orientacji cech strukturalnych

**Fig. 4.** Variability of longitudinal wave speed ( $V_p$ ) depending on structural features orientation

przestrzeniania się szczeliny był kierunek F–F'. Wynik ten został osiągnięty w każdym z trzech wykonanych badań. Jest to kierunek prawie równoległy do powierzchni laminacji i do dłuższej osi ziaren. Dla próbek o osi równoległej do uwarstwienia i laminacji oraz równoległej do dłuższych osi ziaren mineralnych (oznaczonych symbolem F), trudności sprawia wyznaczenie jednego kierunku propagacji szczeliny, ponieważ w każdej z nich rozprzestrzenia się ona inaczej.

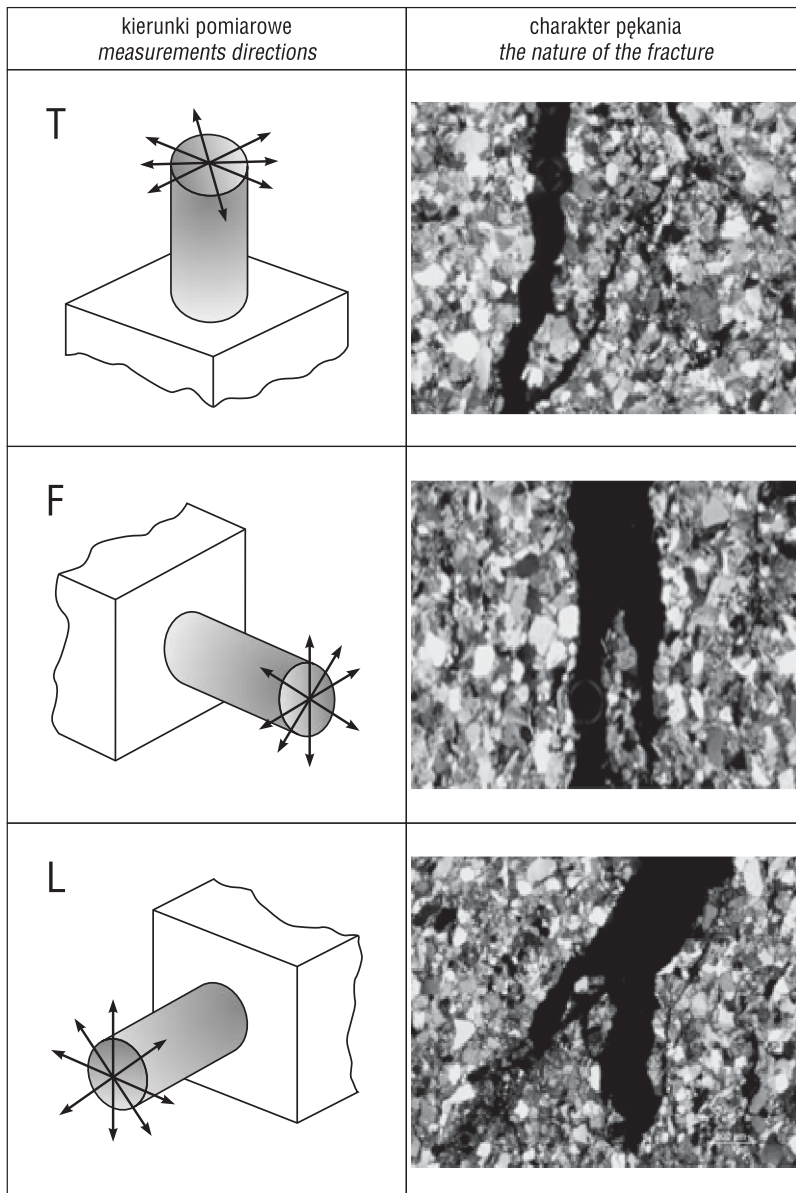
Na podstawie wyznaczonego parametru wytrzymałości na obciążenie punktowe, przy zastosowaniu odpowiedniego współczynnika korelacyjnego ( $k$ ), możliwe staje się wyznaczenie przybliżonej wytrzymałości na ściskanie jednoosiowe. W przypadku piaskowców, publikowana w literaturze wartość współczynnika korelacyjnego  $k$ , dla próbek o podobnej geometrii (średnica około 50 mm, smukłość 1) wynosi 21 (Bieniawski, 1975). Obliczona na

podstawie wytrzymałości na obciążenie punktowe, z wykorzystaniem współczynnika korelacyjnego  $k$ , wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie piaskowców krośnieńskich z Mucharza wahała się od 138,6 MPa do 173,8 MPa. Wyznaczone wyniki tego parametru zawierają się zatem w zakresie wartości literaturowych – od 121,5 MPa do 180,2 MPa (Pinińska, 2003). Reasumując, uzyskane w trakcie badań wyniki w dużym stopniu potwierdzają podawane m.in. przez Bieniawskiego ogólne zależności, charakteryzujące relacje pomiędzy wytrzymałością na obciążenie punktowe a wytrzymałością na jednoosiowe ściskanie (Bieniawski, 1975; Piątek, 2008).

W trakcie analizy mikroskopowej płytek cienkich zauważyć można, iż w przypadku dwóch z trzech próbek (o osi równoległej do uwarstwienia i laminacji oraz prostopadłej do dłuższych osi ziaren mineralnych oraz o osi równoległej do uwarstwienia i laminacji oraz równoległej do dłuższych osi ziaren mineralnych) procesy pęknięcia miały charakter intergranularny, zdominowany mechanizmami ścinania. Trzecia z próbek (oś próbki prostopadła do uwarstwienia i laminacji) cechowała się procesami pęknięcia o charakterze intragranularnym, wywołanymi mechanizmami rozciągania pojedynczych ziaren. W tym wypadku kluczową rolę w indukowaniu pola naprężeń odgrywały ziarna o dużej wytrzymałości (ziarna kwarcu). Każda z analizowanych próbek różniła się przebiegiem oraz właściwościami geometrycznymi utworzonej szczeliny (ryc. 5). W przypadku próbki oznaczonej symbolem T, od podstawy płytki cienkiej do osi horyzontalnej propagująca międzyziarnowa szczelina miała przebieg prostoliniowy i charakter dość jednorodny. Jej średnica wahała się od 550 do 1250  $\mu\text{m}$ . Krawędzie szczeliny charakteryzowały się nieregularnym przebiegiem. Po

obu jej stronach widoczne były „rozerwane”, w wyniku procesu rozdzielczego rozciągania, ziarna mineralne kwarcu o wysokiej wytrzymałości. W niektórych miejscach, wewnątrz szczeliny, widoczne były także niewielkie fragmenty materiału skalnego, świadczące o szybkim tempie propagacji szczeliny. Centralna płaszczyzna płytki cienkiej charakteryzowała się rozdziałem pęknięcia na dwie gałęzie. Znacznie grubsza lewą (widok od przodu płytki) o łukowatym przebiegu i szerokości od 300 do 450  $\mu\text{m}$  (w niektórych miejscach przewężania do 100  $\mu\text{m}$ ) oraz ledwo zauważalną prawą (szerokość od 30 do 60  $\mu\text{m}$ ). W obu szczelinach charakter pęknięcia oraz przebieg krawędzi szczeliny pozostawał w zasadzie niezmienny.

Próbka oznaczona symbolem L charakteryzowała się miarą jednostajnym przebiegiem powstałej szczeliny od podstawy płytki cienkiej aż do jej osi horyzontalnej. Szerokość



Ryc. 5. Charakter pęknięcia w zależności od orientacji cech strukturalnych

Fig. 5. The nature of fracture processes of the Krosno Sandstones of Mucharza depending on structural features orientation

kość wahała się od 900 do 1250  $\mu\text{m}$ , więc była wyraźnie większa niż w przypadku poprzedniej próbki. Krawędź szczeliny wykazywała natomiast podobną nieregularność. W bliskiej od niej odległości po obu stronach sporadycznie występowały mikroszczelinki o długości 1000–1700  $\mu\text{m}$  i szerokości 10  $\mu\text{m}$ , które propagowały w kierunku zgodnym z przebiegiem głównego pęknięcia. Ponadto wewnątrz szczeliny występowały fragmenty okruchów skalnych. W płaszczyźnie centralnej płytki miało miejsce silne zaburzenie głównej szczeliny w postaci nieznacznie spękanego, charakteryzującego się większą wytrzymałością, fragmentu ośrodka skalnego o długości około 4000  $\mu\text{m}$ . Za nim propagująca szczelina wracała do swojego pierwotnego charakteru (szerokość od 900 do 1050  $\mu\text{m}$ ).

Także w przypadku próbki oznaczonej symbolem F następował w miarę jednostajny przebieg szczeliny od podstawy płytki cienkiej aż do jej osi horyzontalnej. Szerokość pęknięcia była mniejsza niż w przypadku poprzedniej

próbki i wahała się od 600 do 850  $\mu\text{m}$ . Krawędź szczeliny charakteryzowała się podobną nieregularnością jak w przypadku próbki oznaczonej jako L. Brak było widocznych w bliskiej odległości od głównego pęknięcia mikroszczelin. Wewnątrz szczeliny widoczne były fragmenty ziaren mineralnych i spoiwa. Także i w tym przypadku, w osi horyzontalnej próbki miało miejsce bardzo silne zaburzenie przebiegu pęknięcia w postaci mało spękanego fragmentu skały. Cechował się on jednak zarówno mniejszą szerokością, jak i długością. Za nim propagująca szczelina wracała do swojego pierwotnego charakteru (szerokość od 700 do 900  $\mu\text{m}$ ).

### PODSUMOWANIE

Realizacja założonych celów opierała się na przeprowadzeniu szeregu badań laboratoryjnych połączonych z analizą informacji zawartych w literaturze. Badania ultradźwiękowe oraz wytrzymałościowe, wsparte mikroskopową obserwacją płytek cienkich, pozwoliły uzyskać wiele cennych informacji dotyczących wpływu budowy wewnętrznej na mechanizmy oraz przebieg procesów pęknięcia piaskowców krośnieńskich z Mucharza. Badania prowadzone były na próbkach piaskowców zróżnicowanych pod względem struktury wewnętrznej, a co za tym idzie charakteryzujących się odmienną kierunkową zmiennością poszczególnych parametrów fizyczno-mechanicznych. Rezultaty przeprowadzonych badań wytrzymałości na ściskanie punktowe, połączone z analizą płytek cienkich, potwierdziły istnienie anizotropii w analizowanym materiale skalnym. Anizotropia struktury wewnętrznej wpływa na mechanizmy oraz przebieg i dynamikę procesów pęknięcia oraz na przestrzenne zróżnicowanie podatności analizowanego materiału

skalnego na procesy pęknięcia. Na skutek niejednorodności budowy wewnętrznej w ośrodku skalnym tworzą się uprzywilejowane kierunki oraz płaszczyzny zniszczenia, których widocznym rezultatem są powstające mikro- i makroszczeliny, charakteryzujące się dużym zróżnicowaniem uwarunkowanym właściwościami ośrodka w którym propagują. Pozwala to na wyznaczenie w analizowanej skale preferowanych kierunków propagacji szczeliny (odznaczających się mniejszą odpornością na pęknięcia) oraz na określenie jej właściwości. Dzięki temu możliwa staje się interpretacja mechanizmów i przebiegu procesów pęknięcia w warunkach jednoosiowego ściskania, uwzględniająca budowę wewnętrzną analizowanego materiału skalnego.

Charakterystyczne cechy związane z budową wewnętrzną piaskowców krośnieńskich z Mucharza w istotny sposób wpływają na proces pęknięcia w warunkach jedno-



osiowego ściskania. W kierunku prostopadłym do uwarstwienia i laminacji następuje istotne zmniejszenie prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych. Występowanie laminacji wpływa więc tłumiąco na możliwości rozprzestrzeniania się fali w kierunku prostopadłym do niej i wpływa w znaczącym stopniu na zmianę parametrów dynamicznych ośrodka.

Powtarzalność otrzymanych w trakcie prowadzonych badań wyników wskazuje, iż przy zastosowaniu nieniszczących badań ultradźwiękowych można z dużą dokładnością badać zmienność budowy wewnętrznej ośrodka skalnego oraz niejednorodność jego cech sprężystych, które wpływają na mechanizmy i przebieg procesów pęknięcia ośrodków skalnych.

Na podstawie analizy i interpretacji przeprowadzonych badań wytrzymałościowych zauważyć można, iż piaskowce krośnieńskie z Mucharza wykazują największą wytrzymałość na ściskanie punktowe w kierunku prostopadłym do laminacji, najniższą zaś w kierunku równoległym do laminacji (bądź zbliżonym).

Obniżona prędkość propagacji fal ultradźwiękowych w kierunku prostopadłym do uwarstwienia i laminacji jest wskaźnikiem zmniejszonej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie. Analizując dostępną literaturę dostrzec można także znaczący wpływ anizotropii piaskowców krośnieńskich z Mucharza na otrzymywane w trakcie badań (*chevron bend*, metoda brazylijska) wartości wskaźników odporności na pęknięcie (KIC). Wartość tego parametru jest średnio o około 30% wyższa w kierunku prostopadłym do laminacji i uwarstwienia. W przypadku kierunkowości ułożenia ziaren cecha ta nie wpływa tak jednoznacznie na różnicowanie się podatności na pęknięcie (Dziedzic, 2003).

Badania parametrów wytrzymałościowych materiałów skalnych prowadzone są najczęściej w wyspecjalizowanych laboratoriach, wyposażonych w skomplikowane i drogie urządzenia, np. prasę sztywną. Oprócz wysokich kosztów, ograniczających możliwości ich powszechnego wykorzystania, wadą, która może wpływać na jakość uzyskanych wyników, są warunki prowadzenia badań, odbiegające od warunków, w jakich skały występują w górotworze. Kłopotliwe jest także zapewnienie w trakcie transportu oraz wycinania próbek z bloków skalnych, m.in. ich naturalnej wilgotności (Piątek, 2008). W związku z tym bardzo ważna staje się potrzeba oznaczenia wytrzymałości skał, przy zastosowaniu metody możliwej do zastosowania w warunkach polowych.

Na podstawie otrzymanych rezultatów badań można stwierdzić, że z powodzeniem w takich warunkach może być stosowana metoda, w której parametry związane z wytrzymałością danego materiału skalnego wyznaczane są za pomocą testu obciążenia punktowego (*point load test*). W tego typu badaniach mogą być wykorzystane polowe, ręczne prasy hydrauliczne. Charakteryzują się one dużą

mobilnością, ze względu na swoją stosunkowo niewielką wagę. Dzięki ich zastosowaniu można w szybki, prosty oraz tani sposób dokonać charakterystyki parametrów wytrzymałościowych ośrodka skalnego.

Analizując otrzymane wyniki badań zauważyć można, że istnieje bezpośrednia zależność procesu niszczenia od budowy wewnętrznej materiału skalnego. Widoczne makroskopowo i mikroskopowo cechy strukturalne i teksturalne rzutują na charakter i przebieg szczelin, powstałych pod wpływem działania sił zewnętrznych.

Analiza mikrospektań w obrazie mikroskopowym płytek cienkich wskazuje, że w płaszczyźnie równoległej do laminacji i uwarstwienia są one intergranularne (międzyziarnowe) i charakteryzują się stosunkowo dużą szerokością. W tym przypadku rozwój pęknięcia był stabilny i kontrolowany, uwarunkowany luźnym rozmieszczeniem ziaren. W przypadku tych próbek pęknięcie propagowało się stosunkowo powoli, z wykorzystaniem stref mniej odpornych, np. przestrzeni międzyziarnowych wypełnionych słabszym od otaczających je ziaren spoiwem ilasto-węglanowym. W płaszczyźnie prostopadłej do uwarstwienia i laminacji charakter pęknięcia jest natomiast intragranularny (śródziarnowy). Wynika to z przewagi mechanizmów rozciągania pojedynczych ziaren nad mechanizmami ścinania. Propagująca szczelina rozwija się w płaszczyźnie prostopadłej do osi ziaren i przecina je poprzecznie. Krawędzie szczeliny charakteryzują się nieregularnym przebiegiem, pomiędzy nimi obserwuje się niewielkie ilości pokruszonych, małych fragmentów skalnych. Świadczy to o szybkim i gwałtownym tempie propagacji szczeliny.

## LITERATURA

- BIENIAWSKI Z.T. 1975 – The point-load test in geotechnical practice. *Engineering Geology*, 9: 1–11.
- DZIEDZIC A. 2003 – Structural control on fracture toughness (brittle cracking) in the Krosno Sandstones of Mucharz, southern Poland. *Geol. Quart.*, 47: 21–28.
- DZIEDZIC A. 2005 – Ocena cech strukturalnych piaskowców krośnieńskich z Mucharza (Beskid Mały) na podstawie pomiarów prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej. *Prz. Geol.*, 53: 601–604.
- ŁUKASZEWSKI P. 2013 – Odształcalność piaskowców fliszowych w złożonym stanie naprężeń. *Wyd. UW.*
- PIĄTEK P. 2008 – Test punktowy, test brazylijski i test na jednoosiowe ściskanie – badania porównawcze. *Górn. i Geoinż.*, 32: 285–292.
- PINIŃSKA J. 1995 – Procesy kruche pęknięcia w skałach osadowych przy jednoosiowym ściskaniu ze stałą prędkością odształcania. *Prz. Geol.*, 43: 546–553.
- PINIŃSKA J. & PŁATEK P. 2002 – Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałości skał. *Górn. Odkrywk.*, 2/3: 89–96.
- PINIŃSKA J. 2003 – Właściwości wytrzymałościowe i odształceniowe skał Karpaty Fliszowe. *Katalog. Zakł. Geomech. IHiGI, Wyd. Geol. UW.*
- PINIŃSKA J. 2004 – Właściwości wytrzymałościowe i odształceniowe skał Karpaty Fliszowe. *Objaśnienia i interpretacja. Zakł. Geomech. IHiGI, Wyd. Geol. UW.*