

Ocena cech litogenetycznych piaskowców fliszowych na podstawie badań ultradźwiękowych

Agnieszka Kłopotowska¹, Dominik Łukasiak¹



A. Kłopotowska D. Łukasiak

Estimation of lithogenetic features of flysch sandstones based on ultrasonic tests. Prz. Geol., 65: 177–182.

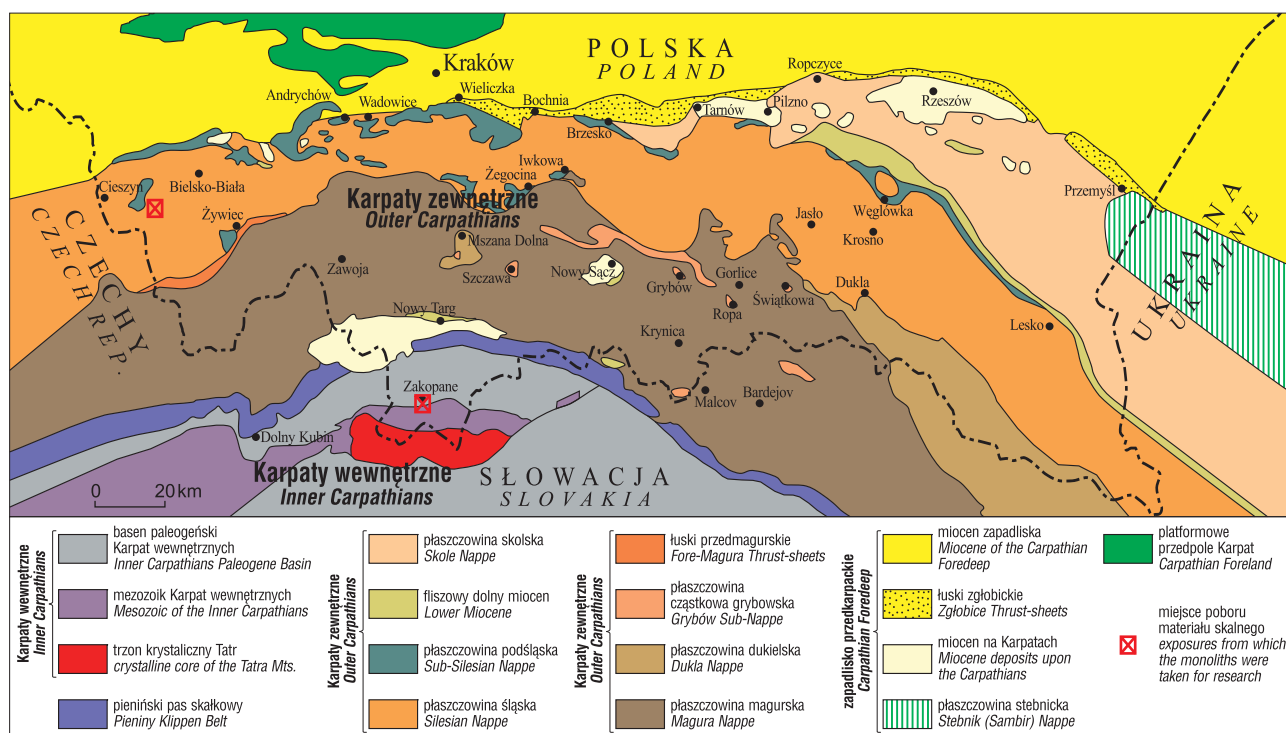
Abstract. Non-destructive ultrasonic tests were used to determine the lithogenetic features responsible for the anisotropy of flysch sandstones. The studied material consisted of the Godula and Zakopane sandstones. These rocks are characterized by significant anisotropy of the geo-mechanical properties. As a result of ultrasonic testing the characteristic directions of propagation of longitudinal waves were determined and subsequently correlated with the microscopic image of thin sections as well as the evident orientation of joints observed in situ. The analysis shows that the recorded changes in the propagation of ultrasonic waves indicate the privileged direction resulting from both the orientation of mineral grains and spatial orientation of microcracks. It has a bearing on the direction of turbidity currents in the sedimentary basin and the variable stress field during the formation of the Carpathians.

Keywords: ultrasonic tests, Godula Sandstones, Zakopane Sandstones, longitudinal wave propagation velocity

GeoSym 2016

Masyw skalny jest ośrodkiem nieciągłym, a występujące w nim skały nie są ośrodkami w pełni jednorodnymi, izotropowymi i sprężystymi, ponieważ ich struktura i tekstura zostały ukształtowane etapowo w trakcie procesów sedymentacyjnych i diagenetycznych. Obecność

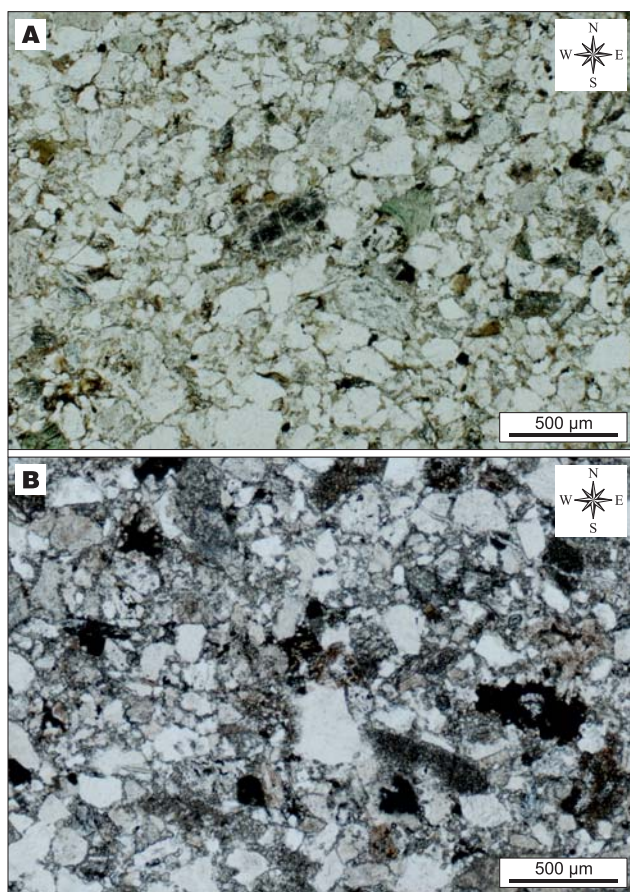
przestrzeni porowych, kierunkowość ułożenia minerałów, ich wielkość oraz rodzaj spoiwa powodują zmienność właściwości ośrodka skalnego. Obecność nieciągłości skutkuje obniżeniem ogólnej wytrzymałości masywu, zwiększeniem odkształcalności i przepuszczalności oraz sprzyja przemieszczaniu się bloków skalnych (Pinińska & Dziedzic, 2006; Domonik, 2012). Oprócz wspomnianych cech, istotny wpływ na anizotropię ośrodków skalnych ma także lokalny reżim tektoniczny, który w zależności od rozkładu, rodzaju i wielkości naprężeń wywołuje jawne



Ryc. 1. Szkic tektoniczny polskich Karpat (za Żytko i in., 1989; Oszczytko i in., 2008, modyfikowany)

Fig. 1. Tectonic sketch map of the Polish Carpathians (after Żytko et al., 1989; Oszczytko et al., 2008, modified)

¹ Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; a.kłopotowska@uw.edu.pl, dominik.lukasiak@uw.edu.pl.



Ryc. 2. Obraz mikroskopowy płytek cienkich przy równoległych nicołach: **A** – piaskowca godulskiego, **B** – piaskowca zakopiańskiego
Fig. 2. Microscopic image of thin sections under normally transmitted light: **A** – Godula Sandstone, **B** – Zakopane Sandstone

spękania ciosowe lub ukryte osłabienia budowy wewnętrznej (Domonik, 2007). Te niejako zapisane w skale główne kierunki wzmożonych naprężeń (nieciągłości strukturalne) ujawniają się w miarę postępu procesów denudacyjno-erozyjnych oraz podczas odprężania masywu skalnego związanego z dalszym wypiętrzaniem (Boretti-Onyszkiewicz, 1968).

Anizotropia właściwości fizyczno-mechanicznych skał jest wynikiem wielu złożonych i nakładających się procesów sedimentacyjnych, diagenetycznych oraz tektonicznych. Anizotropię tę obserwuje się wyraźnie w skałach fliszowych. W zależności od typu litologicznego udział tych procesów jest jednak różny. Dokumentuje to niniejsza publikacja.

Celem pracy jest zatem wykazanie przydatności badań ultradźwiękowych w ocenie charakteru i orientacji zmienności cech litogenetycznych oraz wynikających z tego implikacji w wybranych piaskowcach fliszowych Polski. Jest to istotne z punktu widzenia rozważań tektonicznych pod kątem realizacji projektów geologiczno-inżynierskich podejmowanych w spękanym środowisku skalnym.

MATERIAŁ BADAWCZY

Materiał badawczy stanowiły piaskowce pochodzące z Polskich Karpat fliszowych (ryc. 1). Piaskowce godulskie pobrano z czynnego kamieniołomu Głębiec w Brennej, zaś piaskowce zakopiańskie z odsłonięcia w Potoku Białym w Zakopanem.

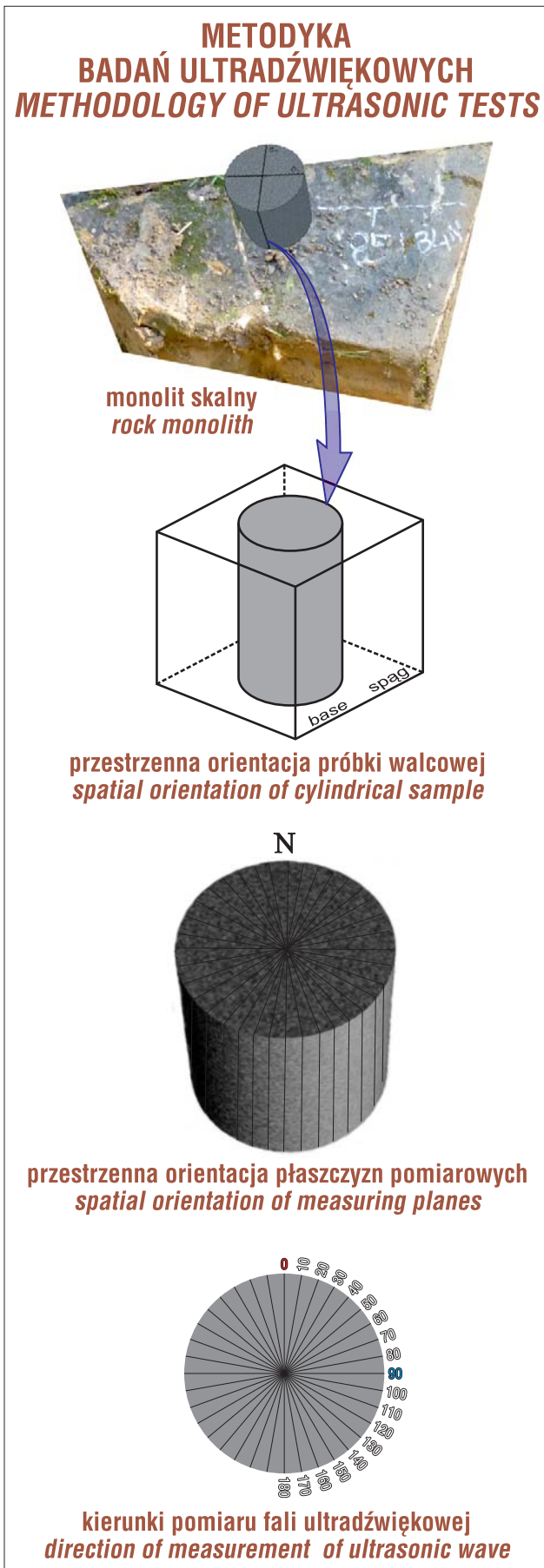
Piaskowce godulskie z Brennej należą do środkowego poziomu warstw godulskich, które tworzyły się w basenie śląskim. Piaskowce te są polimineralną skałą (ryc. 2A) składającą się z ziaren kwarcu, ich zawartość określono średnio od 50,2% (Jonczy, 2000) do 57,9% (Kamieński i in., 1968), oraz dużej ilości fragmentów skalnych – średnio od 10,9% (Jonczy, 2000) do 13,3% (Kamieński i in., 1968). Litoklasty te są utworzone głównie ze skał metamorficznych (Pinińska, 2003). Pozostałe składniki występują w mniejszym udziale, są to głównie skalenie oraz lyszczyki i glaukonit. Spoiwo piaskowca buduje przede wszystkim krzemionka oraz substancja ilasta, podrzędnie węglany (Kłopotowska & Łukasiak, 2011).

Piaskowce zakopiańskie należą do warstw zakopiańskich dolnych fliszu podhalańskiego. Ich wiek datuje się na oligocen (Gedl, 2000). Charakteryzują się słabym wysortowaniem oraz bardzo drobnym i drobnym uziarnieniem. Dominują w nich słabo i średnio obtoczone ziarna monokrystalicznego kwarcu o pokroju izometrycznym lub słabo anizometrycznym. Materiał detrytyczny jest w nich ułożony bezładnie, tekstura jest bezkierunkowa, a ze względu na stopień wypełnienia przestrzeni przez składniki mineralne – masywna. W piaskowcach tych oprócz monokrystalicznego kwarcu w mniejszej ilości występuje również kwarc polikrystaliczny, okruchy kwarcytów i skał węglanowych, ziarna częściowo zmienionych skaleń/plagioklazów oraz blaszki muskowitu. Przestrzeń międzyziarnowa jest szczelnie wypełniona spoiwem węglanowym zbudowanym z różnokrystalicznego kalcytu, a lokalnie także ze skupień krystalicznego pirytu (ryc. 2B).

METODYKA BADAŃ

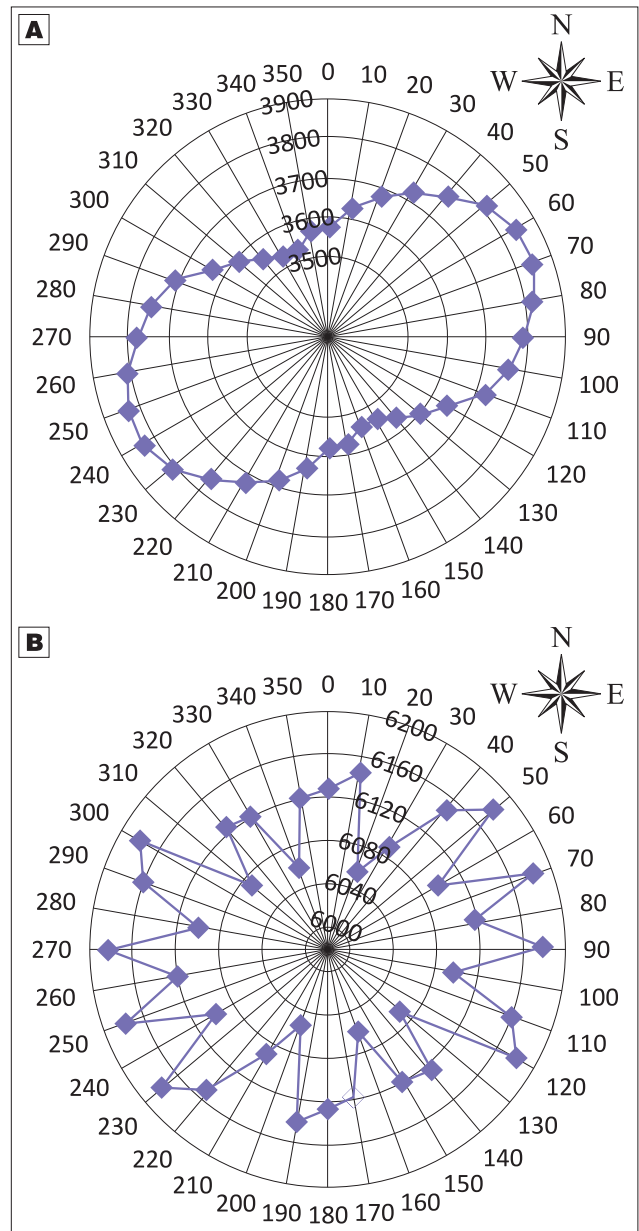
Do badań pobrano monolity skalne zorientowane względem kierunku północnego. Oznaczenie to miało pomóc w określeniu ewentualnego wpływu paleonaprężeń oraz kierunku transportu materiału klastycznego w basenie sedymentacyjnym na zróżnicowanie właściwości fizyczno-mechanicznych analizowanych piaskowców. Próbkę walcową były wycinane z monolitów skalnych prostopadłe do spągu warstwy (ryc. 3). W przypadku piaskowców godulskich próbki zorientowano również równoległe do uławicenia warstw. Na każdej wyznaczono następnie osiemnaście kierunków pomiarowych przechodzących przez środek próbki. Płaszczyzny orientowano co 10 stopni. Badania wykonano na 69 próbkach piaskowca zakopiańskiego oraz 112 piaskowca godulskiego.

Ocenę cech litogenetycznych przeprowadzono za pomocą badań ultradźwiękowych. Cechy fizyczne ośrodków warunkują prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych. Określa się ją mierząc czas przejścia fali przez badane ciało o znanej geometrii. Dla danego ośrodka wartość ta jest cechą charakterystyczną, pochodną jego właściwości fizycznych, m.in. gęstości, porowatości, szczelności czy jednorodności (Dziedzic, 2005). Każda mikroszczelina prostopadła lub nachylona do wiązki pod pewnym kątem tłumi lub całkowicie wycisza impuls przejścia fali, jaki normalnie występuje w obszarze bez defektów. Defektoskopia jest więc ważnym narzędziem pozwalającym wychwycić nie tylko samą obecność mikronieciągłości, ale również ich przestrzenne rozmieszczenie w próbce (Domonik, 2007).



Ryc. 3. Metodyka badań ultradźwiękowych (Domonik, 2007; zmodyfikowana)

Fig. 3. Methodology of ultrasonic tests (Domonik, 2007; modified)

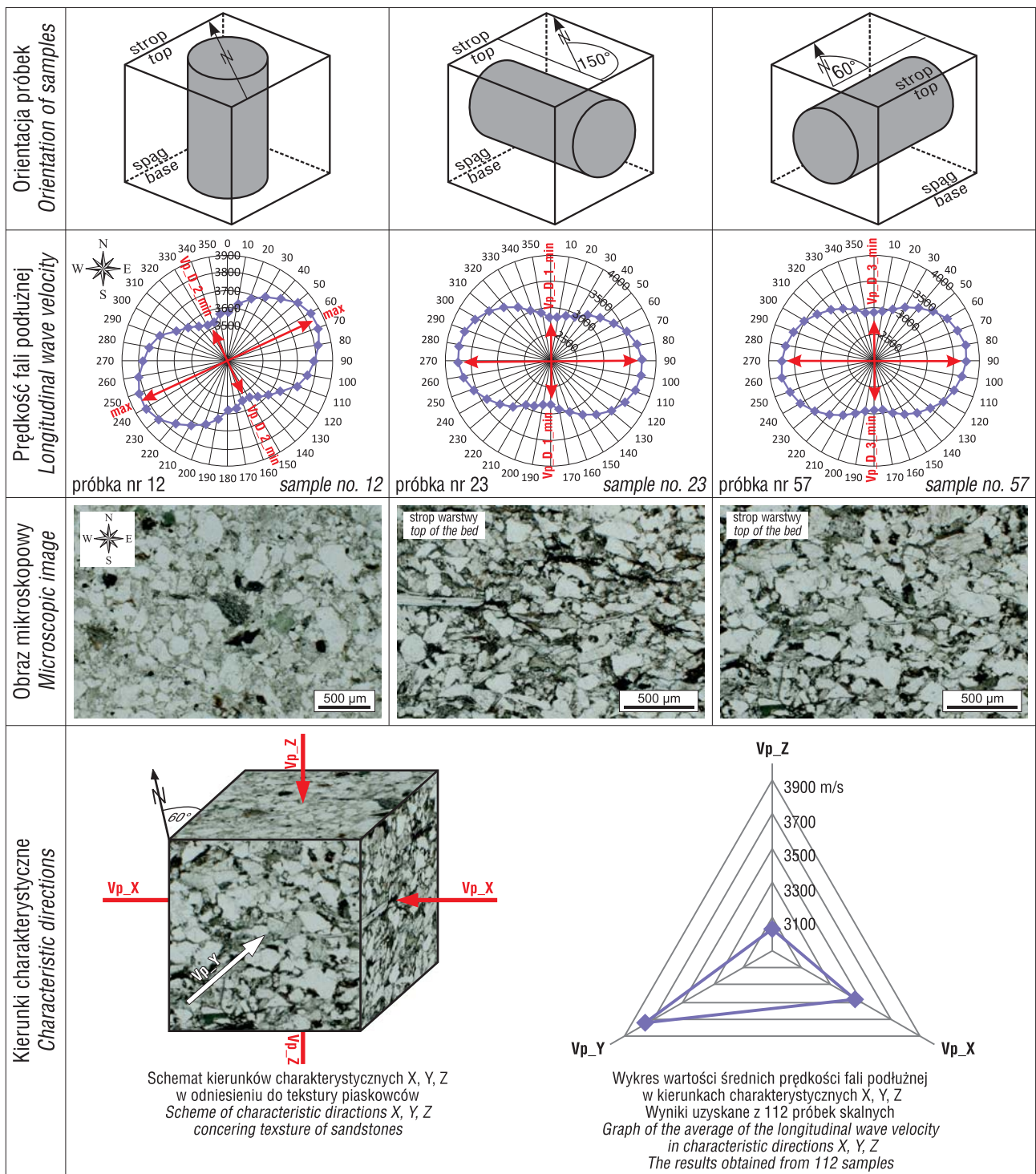


Ryc. 4. Zmienność prędkości fali podłużnej: A – piaskowiec godulski, B – piaskowiec zakopiański

Fig. 4. Variability of longitudinal wave velocity: A – Godula Sandstone, B – Zakopane Sandstone

Jako urządzenie rejestrujące zastosowano zestaw pomiarowy, w skład którego wchodził defektoskop UMT-12 firmy Unipan z oprogramowaniem typu ULTRAMET wyposażony w głowice nadawczo-odbiorcze o częstotliwości 1MHz. Pomiary prowadzono metodą przejścia, polegającą na bezpośrednim pomiarze czasu przechodzenia impulsu dźwiękowego pomiędzy głowicami nadawczą i odbiorczą na odcinku drogi o długości równej średnicy próbki. Pomiary wykonano wzdłuż opisanych powyżej 18 kierunków po obwodzie walca.

W praktyce laboratoryjnej najczęściej mierzy się czas przejścia fali przez próbkę skalną, otrzymując w ten sposób wypadkową prędkość czoła fali. Prędkość ta zależy od litologii, struktury i tekstury skały lub też stopnia upakowania ziaren mineralnych (Pinińska i in., 2015; Thiel, 1980; Pinińska, 1981; Karska, 1987), stanowiąc w ten sposób właściwy danej skale parametr cech sprężystych (Dziedzic, 2005).



Ryc. 5. Wpływ cech litogenetycznych piaskowców godulskich na prędkość fali podłużnej
Fig. 5. Influence of lithogenetic Godula sandstones on the longitudinal wave velocity

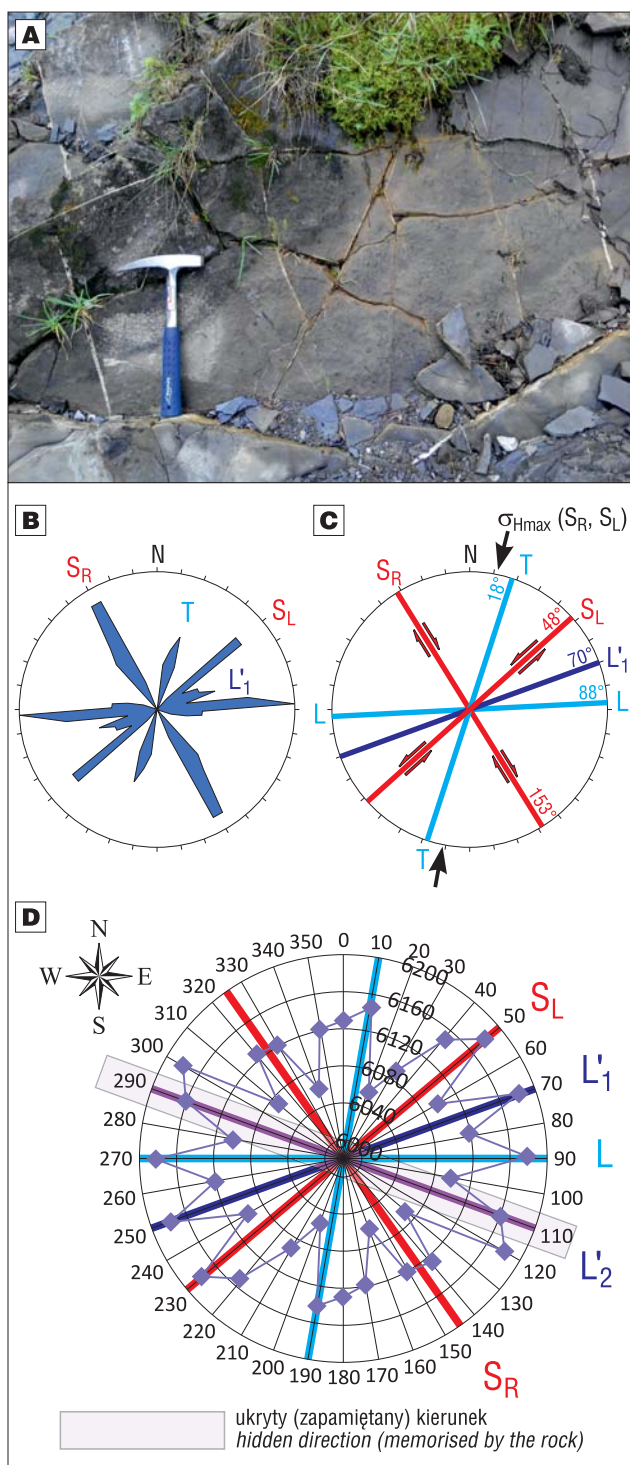
WYNIKI BADAŃ

Z przeprowadzonej analizy wynika, że rejestrowane zmiany propagacji fal ultradźwiękowych wskazują charakterystyczne kierunki właściwości sprężystych w analizowanych piaskowcach (ryc. 4). Jednak zmienność ta jest efektem różnych procesów geologicznych.

W przypadku piaskowców godulskich zróżnicowanie prędkości fali podłużnej wynika z warunków sedimentacyjnych panujących w basenie śląskim podczas tworzenia się osadu w wyniku prądów zawieszinowych. Charaktery-

styczne dla osadów fliszowych warstwowanie materiału skalnego wpływa na anizotropię akustyczną. Jeżeli chodzi o piaskowce godulskie, to fala jest w największym stopniu tłumiona w kierunku Z, prostopadłym do stropu warstwy, natomiast w kierunku Y rejestrowano największe prędkości fali podłużnej, co jest zgodne z ułożeniem dłuższych osi ziaren mineralnych (ryc. 5).

W przypadku piaskowców zakopiańskich badania laboratoryjne zostały poprzedzone obserwacjami i pomiarami spękań ciosowych w warstwie piaskowca odsłaniającego się w Potoku Biały (ryc. 6A), z której następnie



Ryc. 6. A – spęknięcia ciosowe w warstwie piaskowców zakopiańskich w Potoku Biały (fot. A. Kłopotowska); B – diagram rozetowy orientacji zespołów spęknięć ciosowych; C – dominanty głównych zespołów spęknięć ciosowych; D – zmienność prędkości fali podłużnej

Fig. 6. A – joints within a Zakopane Sandstone bed in the Biały Stream (photo by A. Kłopotowska); B – rose diagram of the orientation of joint sets; C – dominants of the main sets of joints; D – variability of longitudinal wave velocity

pobrano materiał do dalszych badań. Wstępny podział orientacji spęknięć na zespoły przeprowadzono w terenie. Biorąc pod uwagę współczesną orientację spęknięć względem regionalnej rozciągłości synklinorium podhalańskiego, wyróżniono pięć zespołów spęknięć: dwa skośne (S_R i S_L),

które połączono w system diagonalny, oraz poprzeczny (T), podłużny (L) i subpodłużny (L_1).

Ze względu na przyjętą za Pricem (1959) grawitacyjno-odprężeniową teorię powstawania ciosu, z zastrzeżeniami Al Kadhiego i Hancocka (1980), próbki z warstwy odrotowano do poziomu wraz ze spęknięciami ciosowymi. W pierwszej kolejności odrotowano powierzchnie ławic w obydwu skrzydłach synklinorium do poziomego położenia osi, a następnie warstwy wraz ze spęknięciami do poziomu (Mastella i in., 1997; Ludwiniak, 2008). Podczas opracowania statystycznego wykorzystano ze specjalistycznego oprogramowania firmy Tectonics FP. Dane przedstawiono w postaci rozetowego diagramu sumarycznej orientacji zespołów spęknięć w odświeżeniu oraz diagramu położenia dominant orientacji poszczególnych zespołów (ryc. 6B, C).

W przypadku piaskowców zakopiańskich charakterystyczne kierunki spęknięć są zgodne z kierunkami jawnych powierzchni ciosowych obserwowanych w terenie (ryc. 6A). Dodatkowo badania ultradźwiękowe wykazały istnienie młodszego, nowego, ale zapamiętanego przez skałę kierunku spęknięć, którego nie obserwuje się w terenie. Może to oznaczać, że w toku dalszego wypiętrzania i odprężania Karpat w tym kierunku będzie postępowało pęknięcie. Jednocześnie w podlegającym erozji odprężanym masywie skalnym będą się ujawniać spęknięcia należące do starszych zespołów (Ludwiniak, 2008).

PODSUMOWANIE

W toku przeprowadzonych badań stwierdzono, że badania ultradźwiękowe dają możliwość ustalenia zmienności budowy wewnętrznej materiału skalnego. Wszelkie zmiany w budowie wewnętrznej, tj. pory, laminy, mikroszczeliny, kierunkowość ułożenia ziaren mineralnych czy mineralizacja, są przyczyną zróżnicowanego tłumienia fal ultradźwiękowych. W kierunkach zgodnych z powierzchniami ciosowymi czy też w kierunkach wydłużenia ziaren mineralnych fala podłużna jest znacznie mniej tłumiona. Wskazuje to na kierunkową anizotropię.

Mikronieciągłości wykryte metodą defektoskopii ultradźwiękowej należy traktować jako załączki spęknięć analogicznych do spęknięć ciosowych obserwowanych w terenie, a ich funkcją jest ukryta anizotropia ciosowa całego masywu fliszowego (Boretti-Onyszkiewicz, 1968). Powierzchnie ułatwionego podziału, założone w wyniku nagromadzenia energii sprężystej, będą się ujawniały podczas dalszego odprężania masywu skalnego związanego z wypiętrzaniem Karpat. Dlatego też dokładne rozpoznanie orientacji anizotropii akustycznej pozwala m.in. uniknąć błędów inżynierskich podczas realizacji wszelkich projektów geologiczno-inżynierskich podejmowanych w spęknanym masywie skalnym.

Autorzy serdecznie dziękują recenzentowi dr hab. inż. Iwonie Joczcy za poświęcony czas i cenne uwagi. Praca była finansowana ze środków badań statutowych Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego (BST-173501 oraz DSM 108023).

LITERATURA

AL KADHI A. & HANCOCK P.L. 1980 – Structure of the Durma-Nisah segment of the central Arabian graben system. Saudi Arabian Directorate General of Mineral Resources Bulletin, 16: 1–40.

- BORETTI-ONYSZKIEWICZ W. 1968 – Anizotropia ciosowa piaskowców fliszowych Podhala Zachodniego w świetle badań wytrzymałościowych. *Biul. Geol. UW*, 10: 115–152.
- DOMONIK A. 2007 – Anizotropia właściwości wytrzymałościowych skał fliszowych jako efekt oddziaływania naprężeń na przykładzie piaskowców cergowskich z Komańczy. *Geologos*, 11: 133–141.
- DOMONIK A. (red.) 2012 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. VI. Centralne Karpaty Zachodnie. Zakład Geomechaniki IHiGI Wydz. Geol. UW, Warszawa: 1–126.
- DZIEDZIC A. 2005 – Ocena cech strukturalnych piaskowców krośnieńskich z Mucharza (Beskid Mały) na podstawie pomiarów prędkości ultradźwiękowej fali podłużnej. *Prz. Geol.*, 53 (7): 601–604.
- GEDL P. 2000 – Biostratygrafia i paleośrodowisko paleogenu Podhala w świetle badań palinologicznych. Cz. I. *Stud. Geol. Polon.*, 117: 69–154.
- JONCZY I. 2000 – Uwagi o charakterystyce petrograficznej piaskowców godulskich ze złóż w Brennej. *Zesz. Nauk. PŚl. Gór.*, 246: 195–211.
- KAMIENSKI M., PESZAT C. & RUTKOWSKI J. 1968 – O wykształceniu i własnościach technicznych piaskowców godulskich. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia*, 12: 86.
- KARSKA Z. 1987 – Geologiczno-inżynierska ocena własności wytrzymałościowych i akustycznych skał otaczających złożę barytu w kopalni „Stanisławów” w Górach Kaczawskich. *Arch. Wydz. Geol. UW, Warszawa*.
- KŁOPOTOWSKA A. & ŁUKASIAK D. 2011 – Zmienność wytrzymałościowa piaskowców w warunkach krystalizacji siarczanu sodu oraz oddziaływania dwutlenku siarki. *Biul. Państ. Inst. Geol.*, 446: 143–148.
- LUDWINIAK M. 2008 – Ewolucja sieci spękań ciosowych we fliszu zachodniego Podhala (Karpaty wewnętrzne, Polska). *Prz. Geol.*, 56 (12): 1092–1099.
- MASTELLA L., ZUCHIEWICZ W., TOKARSKI A.K., RUBINKIEWICZ J., LEONOWICZ P. & SZCZĘSNY R. 1997 – Application of joint analysis for paleostress reconstructions in structurally complicated settings: Case study from Silesian nappe, Outer Carpathians (Poland). *Prz. Geol.*, 45: 1064–1066.
- OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A. & ŻYTKO K. 2008 – Regionalizacja tektoniczna Polski – Karpaty zewnętrzne i zapadlisko przedkarpackie. *Prz. Geol.*, 56 (10): 927–935.
- PINIŃSKA J. 2003 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Część IV. Karpaty fliszowe. Katalog. Zakład Geomechaniki Wydz. Geol. UW, Warszawa.
- PINIŃSKA J. 1981 – Zastosowanie ultradźwięków do oceny wytrzymałości skał. *Technika Poszukiwań Geologicznych.*, 4: 22–28.
- PINIŃSKA J., DOMONIK A., DZIEDZIC A. & ŁUKASIAK D. 2015 – The methodology of a complex engineering-geological approach to establish a geopark: Case study of the Małopolska Wisła River Gorge. *Geol. Quart.*, 59 (2): 408–418.
- PINIŃSKA J. & DZIEDZIC A. 2006 – Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. V. Region Lubelski. Katalog. Zakład Geomechaniki IHiGI Wydz. Geol. UW, Warszawa: 1–97.
- PRICE N.J. 1959 – Mechanics of jointing in rocks. *Geol. Mag.*, 96: 149–167.
- THIEL K. 1980 – *Mechanika skał w inżynierii wodnej*. PWN.
- ŻYTKO K., ZAJĄC R., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., GARLICKA I., NEMČOK J., ELIÁŠ M., MENČIK E. & STRÁNIK Z. 1989 – Map of the tectonic elements of the Western Outer Carpathians and their foreland. [W:] Poprawa D. & Nemèok J. (red.), *Geological atlas of the Western Outer Carpathians and their foreland*. Wyd. Geol., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 11.05.2016 r.
Akceptowano do druku 4.10.2016 r.