

Zmienność właściwości wytrzymałościowych w profilu pionowym skał osadowych platformy wschodnioeuropejskiej w dolinie Dniestru

Joanna Pinińska*, Petro Wołoszyn**, Paweł Łukaszewski*, Paweł Płatek*

Sequential variability of strength and elasticity properties within the sedimentary cover of the East-European Platform in the Dniester River valley (Ukraine). *Prz. Geol.*, 50: 245–251.

Summary. *Undisturbed sedimentary cover of the East-European Platform within the Dniester River drainage basin is a very convenient place for studying paleo-stress variability using geomechanical methods. This paper presents results of preliminary testing of 100 samples from 7 outcrops representing marine and continental sediments of Devonian, Late Cretaceous and Tertiary periods. Variability of geomechanical parameters like volume density, velocity of acoustic wave propagation, dynamic modulus of elasticity is dependent on age, history of diagenesis and mineral composition. Especially marls in carbonate rocks and Devonian sandstones from the Old Red facies show significantly reduced values of geomechanical parameters. Anisotropy of acoustic properties and direction of fissures during strength tests are generally in accordance with the trend of regional joints. Considering the already obtained results, it seems that through further studies, the horizontal orientation of the minimum and maximum paleo-stress axes can be determined.*

Key words: *geomechanics, strength, elasticity of rocks, anisotropy, directions of tectonic stress*

Zmienność wytrzymałościowa skał jest ściśle związana z historią geologiczną regionu. Zazwyczaj poszukuje się wpływu tej historii na ukształtowanie parametrów wytrzymałościowych masywu skalnego. Mniej częste jest spojrzenie odwrotne, wykorzystujące zmienność parametrów wytrzymałościowych skały do interpretacji śladów paleohistorii regionu, gdzie ważnym elementem jest ewolucja regionalnego stanu naprężeń.

Na podstawie laboratoryjnych badań geomechanicznych można ustalić wiele wskaźników odzwierciedlających regionalne sekwencje pola naprężeń, odnoszących się tak do kierunków, jak i do wielkości pionowych (σ_v) i poziomych (σ_h) naprężeń głównych, zapamiętanych w strukturze skały. Są one w trakcie badań geomechanicznych rejestrowane efektami anizotropii wytrzymałościowej lub sejsmicznej, wzmożoną emisją akustyczną lub zmianami odkształcalności ośrodka skalnego (Pinińska, 1992, 1994; Łukaszewski & Bogdańska, 1997).

Badania takie uzupełnione terenowymi obserwacjami ciosu regionalnego mogą być ważkimi nośnikami informacji o ewolucji tektonicznej masywu. Warunkiem powodzenia takiej oceny jest jednak staranność w dobrze zorientowanych próbkach badawczych tak w trakcie pobierania monolitów, jak i całego procesu badawczego.

Przykładem takiej oceny są badania przeprowadzone na skałach osadowych struktury platformowej Ukrainy.

Lokalizacja, pobór próbek i metodyka badań

Badaniami objęto utwory pokrywy osadowej tarczy wołyńsko-podolskiej, w obrębie platformy wschodnioeuropejskiej. Próbkę do badań pobierano głównie w dolinie Dniestru (ryc. 1), gdzie były dostępne, dobrze odsłonięte, grube zespoły skał osadowych, o upadzie nie przekraczającym 2°, reprezentujące sekwencję wiekową od paleozoiku po kenozoik. Dzięki temu można było pobrać monolity skał o znacznie zróżnicowanej historii geologicznej zalegających w pierwotnym, niemal poziomym położeniu, w

których należało się spodziewać przeważającego oddziaływania naprężeń pionowych (σ_v) nad poziomymi (σ_h).

Badania terenowe i pobór monolitów do badań laboratoryjnych z niezwiertzonego masywu skalnego prowadzono przy współpracy Uniwersytetu we Lwowie, a po przygotowaniu specjalistycznych próbek laboratoryjnych w Zakładzie Geomechaniki Wydziału Geologii Uniwersytetu Warszawskiego wykonano cykl badań geomechanicznych.

Obszar badań, strukturalny zrąb podolski, położony na obszarze monokliny wołyńsko-podolskiej (ryc. 2) odznacza się względną stałością cech strukturalnych pokrywy zbudowanej z osadowych kompleksów paleozoiku, mezozoiku i kenozoiku. Kompleksy te pomimo luk stratygraficznych i niewielkich niezgodności kątowych reprezentują urozmaicony profil wiekowy osadów, który może być reprezentatywny dla całego nie sfałdowanego strukturalno-litostratygraficznego zespołu skał osadowych platformy.

W wybranych 7 odsłonięciach utworów syluru, dewonu, kredy oraz miocenu pomierzono główne kierunki spękań ciosowych oraz pobrano 20 zorientowanych próbek-monolitów do badań laboratoryjnych. Wymiary monolitów w większości odsłoneń były wystarczające do uzyskania co najmniej 5 regularnych próbek cylindrycznych, niezbędnych do badań wytrzymałościowych.

Ordowicko-sylurskie piętro strukturalne jest reprezentowane w tym rejonie przez formację węglanową o miąższości od 295 do 466 m, dobrze odsłoniętą w dolinie Dniestru oraz wzdłuż jego lewobrzeżnych dopływów. Przedmiotem badań była sylurska część tej formacji, której monolity pobrano z odsłoneń w Kamieńcu Podolskim oraz Burdiakowicach. Były to odpowiednio morskie i lagunowe dolomity oraz morskie i lagunowo-kontynentalne wapienie margliste.

Osady piętra dewońskiego są tam reprezentowane przez formację węglanową rozciągającą się w sylurskich zapadliskach wzdłuż brzegu perykratona oraz utwory terygeniczne niekiedy reprezentowane przez molasę, w postaci nieregularnie przeławicających się czerwonych aleurytów i piaskowców, znanych jako „podolski old red”.

Monolity formacji węglanowej dewonu pobrano z odsłoneń w Czortkowie. Są to węglanowo-terygeniczne szare i szaroniebieskie, morskie wapienie żedynu typowe dla Podolskiego Przydniastrza. Monolity utworów terygenic-

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

**Wydział Geografii, Uniwersytet Lwowski, ul. Doroszenki 41, 290000 Lwów, Ukraina

nych reprezentowane przez piaskowce kwarcytowe oraz „old red“ pobrano w dolinie Dniestru w Zaleszczykach.

W badanym obszarze bezpośrednio na osadach dewonu spoczywają niezgodnie osady mezozoiczne reprezentowane przez górnokredowe margle i wapienie. Z tego kompleksu pobrano w odsłonięciu Mezehercze k. Halicza monolity margli. Niestety o zbyt małych rozmiarach dla wykonania pełnego zestawu badań wytrzymałościowych.

W analizowanym rejonie strop utworów kredy ma charakter erozyjny i wyżej leżące utwory neogenu są oddzielone ostrą granicą i niezgodnością kątową. Z utworów tych do badań pobrano monolity w rejonie Tarnopola reprezentowane przez serię anhydrytowo-gipsową z odsłonięcia Jezupol, oraz serię wapieni rafowych z odsłonięcia Wielki Głuboczek.

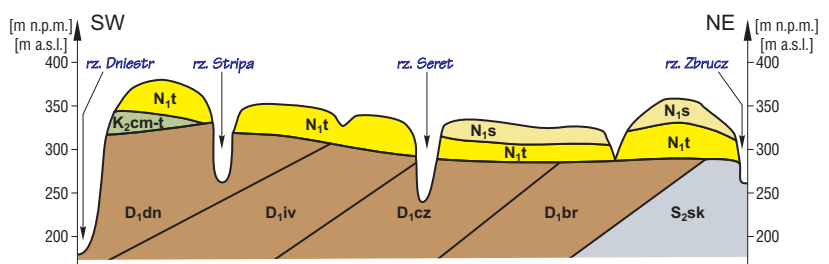
W trakcie badań terenowych we wszystkich odsłonięciach stwierdzono występowanie sieci spękań ciosowych o regionalnym rozprzestrzenieniu (ryc. 3). Sieć ta tworzy zespoły o przeważającej orientacji 58–74° i 18–20° oraz 140–160° i 100–124°, co odpowiada głównym systemom spękań o orientacji ENE–WSW oraz NW–SE (ryc. 4), wyznaczonych w dolinie Seretu w rejonie Zaleszczyk i Czortkowa przez Gerenczuka (1979).

Pomierzone w odsłonięciach kierunki spękań ciosowych zaznaczono na monolitach pobieranych do badań wytrzymałościowych. Monolity te zorientowano także względem północy oraz względem spągu i stropu warstw. Wszystkie te kierunki zostały dokładnie przeniesione na pojedyncze, laboratoryjne próbki cylindryczne, wycinane prostopadłe do uwarstwienia.



Ryc. 1. Mapa lokalizacji miejsc poboru monolitów do badań wytrzymałościowych; A — mapa poglądowa Ukrainy, B — mapa obszaru badań; 1 — Kamieniec Podolski, 2 — Burdiakowice, 3 — Czortków, 4 — Zaleszczyki, 5 — Halicz, 6 — Jezupol, 7 — Wielki Głuboczek

Fig. 1. Location of sampling points: A — sketch map of Ukraine, B — map of study area



Ryc. 2. Schematyczny przekrój geologiczny obrazujący niezgodności sedymentacyjne w badanym rejonie na odcinku Dniestr–Zbrucz (Gerenczuk, 1979)

Fig. 2. General cross-section showing sedimentary discordances of the investigated Dniester–Zbrucz area (Gerenczuk, 1979)

W badaniach laboratoryjnych dysponowano zatem zespołem próbek zorientowanych względem głównego kierunku ciosowych spękań regionalnych oraz spągu i stropu warstw z całego profilu stratygraficznego.

Skąły pobrane do badań są słabo rozpoznane pod względem wytrzymałościowym, stąd wiele badań ma charakter podstawowy.

Wyniki badań

Ogółem zbadano 100 cylindrycznych próbek skalnych o średnicach 36 mm oraz 22 mm i smukłości 1, oznaczając gęstość objętościową, kierunkową zmienność prędkości propagacji fal ultradźwiękowych oraz wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie. W badaniach stosowano procedurę



Ryc. 3. Spękany maszyn skalny w przełomie Dniestru koło Zaleszczyk; A — widok ogólny, B — spękania w łupkach sylurskich

Fig. 3. Fractured rock massive on the Dniester River bank near Zaleszczyki; A — general view, B — fractured Silurian schists

Tab. 1. Podstawowe właściwości geomechaniczne skał osadowych platformy wschodnioeuropejskiej

Table 1. Basic geomechanical properties of sedimentary rocks of the East-European Platform

Miejscowość	Geochronologia	Typ litologiczny	Gęstość objętościowa ρ_o [g/cm ³]	Wytrzymałość R_c [MPa]	Prędkość fali podłużnej V_p [m/s]
Wielki Głuboczek	trzeciorzęd	górnym baden	2,41-2,54 (2,49)	19-35 (26)	3893-5476 (4776)
Jezupol		środkowym baden	1,60-2,21 (2,06)	24-57 (35)	3546-4770 (4188)
Halicz	kreda	margle	2,25 (2,25)	37 (37)	-
Zaleszczyki	dewon	piaskowce ("old red")	2,32-2,37 (2,35)	16-29 (23)	2909-3556 (3297)
Zaleszczyki		piaskowce	2,62-2,65 (2,64)	32-182 (82)	3952-6039 (4880)
Czortków		wapień	2,68 (2,68)	37-60 (50)	4472-5941 (5371)
Burdiakowice	sylur	wapień margliste	2,37-2,48 (2,46)	12-89 (59)	3585-4289 (4069)
Kamieniec Podolski		dolomity	2,66 (2,66)	47-185 (105)	4574-5949 (5251)

w nawiasach podano wartości średnie (tab. 1-5)

przyjętą w regionalnych badaniach właściwości i odkształcalności skał Polski (Pinińska, 1994, 2000). Wyniki oznaczeń zestawiono w tabelach 1 do 5.

Badania wskazują, że gęstość objętościowa (ρ_o) w profilu pionowym analizowanych osadów zmienia się w przedziale od 1,60 g/cm³ do 2,68 g/cm³. Występujące tam skały można zatem określić mianem od bardzo ciężkich do lekkich (PN-84/B-01080). Wysokie wartości ρ_o świadczą o znacznej zwięzłości i zagęszczeniu materiału w osadzie i w tym rozumieniu zwięzłość ta w dużym stopniu wzrasta wraz z wiekiem osadu. Jest jednak także bardzo silnie związana ze zmiennością litologiczną utworów (tab. 1).

Do osadów najsilniej zagęszczonych i zwięzłych należą paleozoiczne utwory syluru i dewonu, wykształcone jako dolomity (Kamieniec Podolski), wapień (Czortków) i piaskowce (Zaleszczyki). Ze względu na ich gęstość objętościową $\rho_o > 2,6$ g/cm³, w klasyfikacji normowej należy je zaliczyć do skał bardzo ciężkich. Sylurskie osady facji marglistej (wapień z Burdiakowic) charakteryzuje nieco niższa gęstość objętościowa $\rho_o < 2,5$ g/cm³ i są to w świetle normy skały ciężkie. Najniższą w kompleksie paleozoicznym gęstością objętościową $\rho_o < 2,4$ g/cm³ charakteryzują się

Tab. 2. Wartości współczynnika Poissona oraz dynamicznego modułu sprężystości w skałach platformy wschodnioeuropejskiej

Table 2. Poisson ratio and dynamic elastic modulus for rocks of the East-European Platform

Miejscowość	Geochronologia	Typ litologiczny	Współczynnik Poissona ν	Moduł sprężystości E_d [GPa]
Wielki Głuboczek	trzeciorzęd	górnym baden	0,30-0,37 (0,33)	36,5-76,2 (57,2)
Jezupol		środkowym baden	0,32	27,7-46,0 (38,7)
Zaleszczyki	dewon	piaskowce ("old red")	0,04	20,1-30,0 (25,1)
Zaleszczyki		piaskowce	0,20-0,40 (0,33)	40,9-96,8 (63,9)
Czortków		wapień	0,33-0,35 (0,34)	53,7-94,8 (77,6)
Burdiakowice	sylur	wapień margliste	0,11-0,35 (0,29)	30,9-45,6 (41,0)
Kamieniec Podolski		dolomity	0,29-0,38 (0,34)	55,6-94,1 (73,5)

piaskowce dewońskiego „old red” lecz także w świetle normy należą do skał ciężkich.

Osady mezozoiczne i kenozoiczne; margliste osady kredy z Halicza i trzeciorzędowe anhydryty z Juzopola charakteryzują wartości gęstości objętościowej $\rho_o < 2,3$ g/cm³, wskazujące, że są to skały mniej zwięzłe od utworów paleozoicznych, a w świetle normy skały średnio ciężkie i nawet lekkie. Na uwagę zasługuje natomiast stosunkowo wysoka gęstość objętościowa neogenskich wapieni z Wielkiego Głuboczka $\rho_o > 2,5$ g/cm³, wskazująca, że mimo młodego wieku są to utwory zwięzłe, które zaliczyć należy do skał ciężkich co pod tym względem upodabnia je do wapieni marglistych syluru.

W całym badanym profilu wiekowym **wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie (R_c)** badana w kierunku prostopadłym do uwarstwienia zmienia się w przedziale od 12 do 185 MPa, a średnio od 26 MPa do 105 MPa (tab. 1). Pod względem wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie badane formacje osadowe można więc wg ISO (2000) sklasyfikować jako skały od średnio słabych do bardzo mocnych lub według normy polskiej (PN-86/B-02480) jako skały o wytrzymałości od bardzo małej do dużej.

Najwyższa wytrzymałość, przekraczająca ekstremalnie 180 MPa charakteryzuje ciężkie, zdiagenezowane dolomity syluru z Kamienia Podolskiego oraz piaskowce dewońskie z Zaleszczyk co wskazuje, że w skali polskiej normy PN-84/B-01080 są to skały o dużej wytrzymałości, a bardzo mocne i mocne w klasach ISO. Wytrzymałość wapieni dewońskich z Czortkowa, mimo ich wysokiej gęstości objętościowej i zaawansowanej diagenety jest znacznie niższa. Maksymalna wytrzymałość 60 MPa kwalifikuje je co najwyżej do skał o średniej wytrzymałości na granicy małej wytrzymałości, a w klasach ISO do skał średnio mocnych i mocnych. Wśród osadów paleozoicznych osobną pozycję zajmują sylurskie wapień margliste z Burdiakowic, o relatywnie niskiej i zmiennej wytrzymałości od bardzo małej do średniej w skali polskiej normy.

Wytrzymałość osadów młodszych, kredowych i trzeciorzędowych jest jeszcze niższa i maksymalnie wynosi 57 MPa. Przeciętnie w świetle polskiej normy są to skały o małej wytrzymałości a słabo lub średnio mocne w klasach ISO.

Nietypowo niska wytrzymałość charakteryzuje podolski „old red”, gdzie stwierdzono minimalną dla całego profilu wytrzymałość 16 MPa. Ogólnie osady te kwalifikują się według polskiej normy do skał o małej wytrzymałości lub klasy skał słabych wg ISO. Anomalia ta nie w pełni koreluje się z ich wiekiem nieco tylko obniżoną gęstością objętościową, gdyż w młodszych i lżejszych anhydrytach z Jezupola spotyka się wyższe wytrzymałości.

Zatem formacje paleozoiczne są ogólnie bardziej wytrzymałe niż formacje młodsze, aczkolwiek wytrzymałość osadów nie zawsze koreluje się bezpośrednio z ich wiekiem. Skały, szczególnie starszych formacji są bowiem osłabione spękaniami ciosowymi i ślady tych spękań ujawniają się w próbkach pod wpływem obciążania. We wcześniejszych fazach deformacji przedkrytycznej powstają w nich prawie pionowe szczeliny inicjalne, których ślady rejestrowane są na krzywej deformacji spadkiem naprężenia (ryc. 5) oraz wzmoczoną emisją akustyczną. Przedkrytyczna

energia potencjalna uległ zatem rozproszeniu i wytrzymałość nawet skał mocnych i silnie zdiagenezowanych jest obniżona się poniżej 50 MPa.

Pionowe, zgodne z kierunkiem obciążania ujawnianie się powierzchni osłabienia inicjalnego w próbkach, wymusza niekorzystne dla ich wytrzymałości warunki w tym kierunku. Osłabienie próbek było związane zatem z kierunkowym czynnikiem tektonicznym i przy innym kierunku obciążania próbki wskazywałyby być może cechy bardziej odpowiadające ich pozycji stratygraficznej. Wskazane byłoby zatem wykonanie dalszych badań wytrzymałościowych na próbkach o innej orientacji obciążeń.

Laboratoryjne badania ultradźwiękowe wskazują, że w całym kompleksie badanych osadów platformowych **prędkość propagacji fali podłużnej (V_p)** zmienia się w zakre-



Ryc. 4. Kierunki głównych spękań w osadach paleozoicznych i mezozoicznych w widłach Dniestru i Seretu (Gerenczuk, 1979)

Fig. 4. Major directions of fractures within Paleozoic and Mesozoic deposits at the Dniester and Seret River area (Gerenczuk, 1979)

Tab. 3. Zestawienie wyników pomiarów orientacji spękań inicjalnych na tle regionalnych kierunków spękań ciosowych w odsłonięciach skał osadowych platformy wschodnioeuropejskiej

Table 3. Initial fracture orientation according to regional joint directions of sedimentary rocks of the East-European Platform

Miejscowość	Geochronologia	Typ litologiczny	Numer próbki	Azymut ciosu regionalnego [°]		Azymut pęknięcia w próbce [°]
Wielki Głuboczek	trzeciorzęd górny baden	wapienie	WG_3	74	-	62
Jezupol		anhydryty	EZ_3	18	100	18
Halicz	kreda	margle	MH_1	68	124	66
Zaleszczyki	dewon	piaskowce ("old red")	ZAL*_2	66	141	44
Zaleszczyki		piaskowce	ZAL_4	20	118	112
Czortków		wapienie	CZ_2	60	160	61
Burdiakowice	sylur	wapienie margliste	BR_7	58	152	153
Kamieniec Podolski		dolomity	KP_3	62	140	44

się od 2909 m/s do 6039 m/s. Najwyższe prędkości spotyka się w ciężkich i bardzo ciężkich skałach paleozoiku: zwięzłych dolomitach sylurskich z Kamieńca Podolskiego, dewońskich wapieniach z Czortkowa oraz dewońskich piaskowcach z Zaleszczyk. Charakterystyczne są tu średnie prędkości fali podłużnej od 4880 do 5371 m/s. Pomiary prędkości wskazują zatem na podobną zwięzłość i zdiagenezowanie również wapieni dewońskich z Czortkowa co nie znajduje odbicia w ich obniżonej wytrzymałości na ściskanie. Natomiast wyjątkowo niskie prędkości $V_p < 3500$ m/s stwierdzone w osadach „old red” z Zaleszczyk potwierdzają ich obniżoną zwięzłość. Wysokie prędkości (średnio V_p bliska 4800 m/s) potwierdzają z kolei stosunkowo wysoką wytrzymałość znacznie młodszych wapieni neogenu z Wielkiego Głuboczka.

Dla marglistych osadów węglanowych syluru (Burdiakowice) oraz badeńskich anhydrytów (Jezupol) charakterystyczne są zbliżone prędkości fali podłużnej poniżej 4800 m/s (średnio ok. 4100 m/s) odpowiadające skałom o zmiennej wytrzymałości, głównie małej i średniej.

Zmienność prędkości fali (V_p) zależnie od gęstości objętościowej próbek skalnych (ρ_o) przedstawiono na rycinie 6. Z ogólnego trendu można wnosić, że skały bardzo ciężkie o dużej zwięzłości wyróżniają się prędkością V_p powyżej 5000 m/s, dla niższych prędkości obraz nie jest już tak jednoznaczny.

Prędkość fali poprzecznej (V_s) dla całego badanego zespołu skał zmienia się w przedziale od 1873 do 2971 m/s (tab. 2). Zależny od charakterystyk V_p i V_s **współczynnik Poissona (ν)** przyjmuje wartość od 0,29 do 0,38, a jedynie w piaskowcach „podolskiego old red” jest ekstremalnie niski (0,04). Dynamiczny moduł sprężystości (E_d) uwarunkowany zmiennością współczynnika Poissona oraz prędkościami V_p i V_s zmienia się w przedziale od 36,5 do 96,8 GPa. Ogólnie można zatem badane formacje zaliczyć do skał o średnim i wysokim module sprężystości.

Najwyższe wartości E_d są charakterystyczne dla zwięzłych, wysokowytrzymałych dolomitów syluru oraz wapieni i piaskowców dewonu, relatywnie wysoki moduł sprężystości wykazują wapienie badenu, a szczególnie niski moduł sprężystości charakteryzuje piaskowce „old red”. Zmienność modułu sprężystości dynamicznej (E_d) na tle zmienności prędkości fali podłużnej (V_p) przedstawiono na rycinie 7.

Z porównania parametrów ultradźwiękowych i wytrzymałościowych badanych osadów platformowych wynika, że tylko w zakresie wysokiej wytrzymałości (R_c) występuje jej korelacja z wysoką, powyżej 5000 m/s, prędkością V_p . Przy niższych wytrzymałościach, gdy ujawniają się pionowe powierzchnie osłabienia, wytrzymałość w kierunku prostopadłym maleje, a prędkości fal są duże. Stąd np. prędkości 4000 do 5000 m/s są właściwe nie tylko skałom o średniej wytrzymałości lecz także spękanym kierunkowo skałom mocnym. Podobne zachowanie cechuje skały o średniej i małej wytrzymałości (ryc. 8).

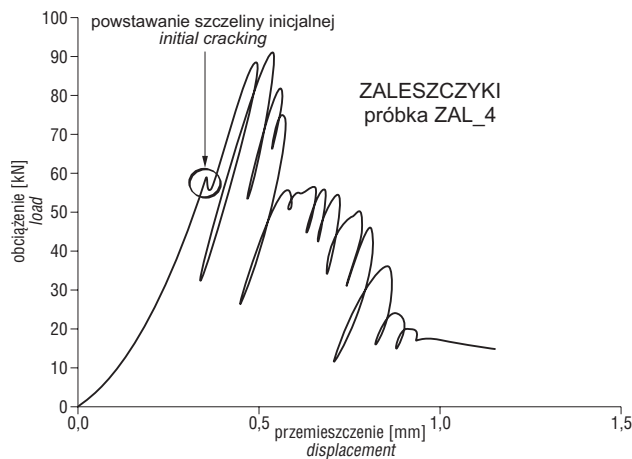
Analiza kierunkowa

Anizotropia wytrzymałościowa związana z pionowymi szczelinami inicjalnymi, ujaw-

niającymi się w trakcie obciążania próbek była asumptem do rejestrowania orientacji kierunków ich przebiegu. Analiza tych kierunków wykazuje zgodność **orientacji śladu szczelin inicjalnych** w próbkach, z głównymi kierunkami orientacji regionalnych spękań ciosowych (ryc. 9), oraz ich zbliżony do pionowego upad. Predyspozycja osadów platformowych do kierunkowego pęknięcia mimo spokojnego zalegania jest zatem śladem ich złożonej i zmiennej historii naprężeń regionalnych.

W osadach najstarszych, paleozoicznych dolomitach syluru i dewońskich wapieniach i piaskowcach „old red” oraz w osadach mezozoicznych, marglach kredowych a także w kenozoicznych: neogeńskich wapieniach i anhydrytach, ślady pęknięcia są zorientowane w kierunku zbliżonym do NE–SW. Natomiast w paleozoicznych osadach marglistych syluru oraz pozostałych piaskowcach dewonu ślady te są zorientowane w kierunku zbliżonym do NW–SE.

Wskazuje to na związek obu głównych regionalnych spękań ciosowych z kierunkami osłabienia, „zapamiętany” w próbkach skalnych (tab. 3) i stanowi zatem ważny element anizotropii wytrzymałościowej badanych skał.



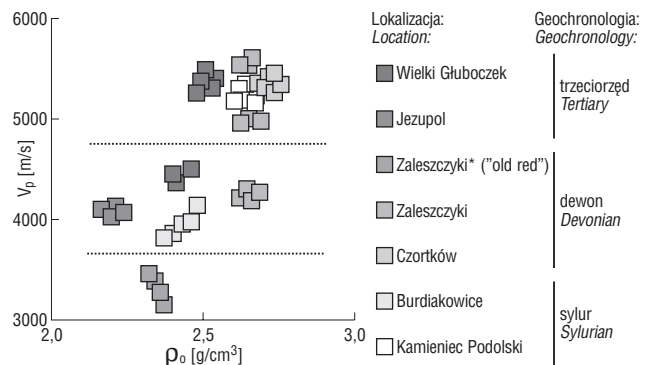
Ryc. 5. Spadki naprężenia na krzywej deformacji, ze wskazaniem powstawania szczeliny inicjalnej (na przykładzie próbki piaskowca z Zaleszczyk)

Fig. 5. Deformation curve of Zaleszczyki sandstone with indication of initial fracture

Anizotropia wytrzymałościowa, związana z kierunkowym pękaniem może się uzewnętrznić anizotropią akustyczną ustaloną dla dwóch kierunków: np. pionowego, zgodnego z kierunkiem obciążenia nadkładem oraz poziomego, mierzonego w jednym wybranym kierunku np. NW–SE. Wykonano zatem kierunkowe badania ultradźwiękowe prędkości fal podłużnych na zorientowanych próbkach laboratoryjnych prostopadle do uwarstwienia (V_{pv}) zgodnie z kierunkiem działania naprężeń głównych, wywołanych obciążeniem nadkładem oraz równoległe do uwarstwienia wzdłuż osi NW–SE (V_{ph}) zgodnie z kierunkiem naprężeń działających równoległe do powierzchni potencjalnego pęknięcia inicjalnego.

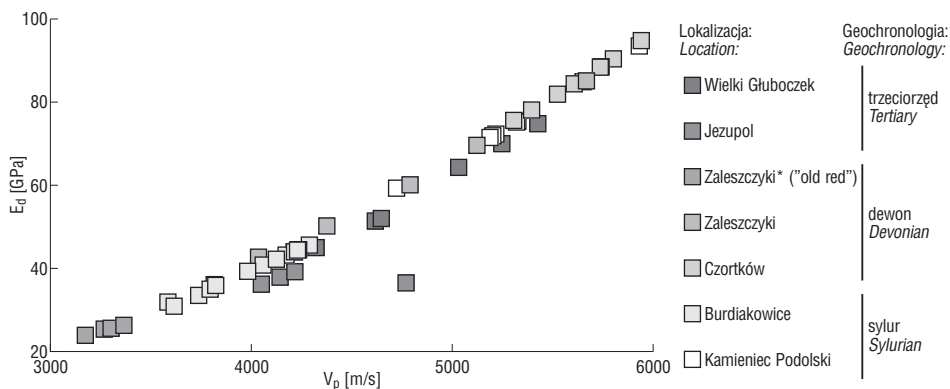
Ustalono na tej podstawie wartość współczynnika anizotropii akustycznej $A_{vp} = V_{pv} / V_{ph \text{ NW-SE}}$ na kierunkach poziomym NW–SE i pionowym dla poszczególnych formacji. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Wartość współczynnika anizotropii A_{vp} , w całym profilu osadów platformowych zmienia się w przedziale od 0,82 do 1,18. Zatem ogólnie osady te na wspomnianych wybranych kierunkach pomiarowych wykazują małą anizotropię akustyczną. Różnice prędkości w granicach do 20% i bliskie jedności wartości średnie A_{vp} kwalifikują ogólnie badane osady do ośrodków praktycznie izotropowych. Stan ten może być zarówno śladem izotropowego stanu paleonaprężeń, w którym $K_0 = \sigma_h / \sigma_v = 1$, jak też jego źródłem może być



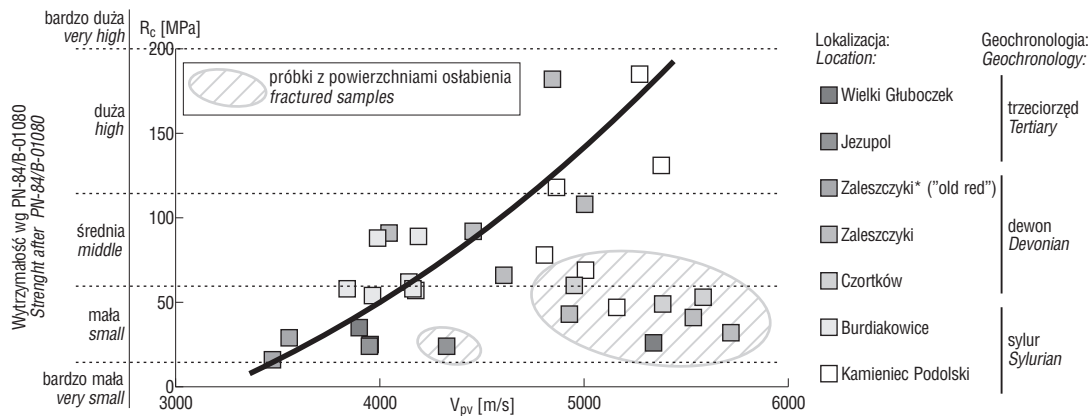
Ryc. 6. Zależność prędkości propagacji fali podłużnej (V_p) od gęstości objętościowej (ρ_o) skał osadowych platformy wschodnioeuropejskiej

Fig. 6. Longitudinal wave velocity (V_p) vs. density (ρ_o) for sedimentary rocks of the East-European Platform



Ryc. 7. Nomogram dla ustalania wartości dynamicznego modułu sprężystości (E_d) na podstawie zmian prędkości V_p w skałach osadowych platformy wschodnioeuropejskiej

Fig. 7. Diagram for dynamic elastic modulus (E_d) vs. longitudinal wave velocity (V_p) for sedimentary rocks of the East-European Platform



Ryc. 8. Zależność wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (R_c) od prędkości propagacji fali podłużnej (V_p) w skałach osadowych platformy wschodnio-europejskiej

Fig. 8. Compression strength (R_c) vs. longitudinal wave velocity (V_p) for sedimentary rocks of the East-European Platform

zwiększona prędkość propagacji wzdłuż utajonych szczelin ciosowych. Czynniki te przy obecnym stanie rozpoznania są trudne do rozdzielenia i wskazują na konieczność badań anizotropii akustycznej także dla innych kierunków.

Niewielkie i lokalne przejawy anizotropii wskazują również współczynnik (A_{Ed}) będący relacją modułów sprężystości w kierunku pionowym (E_{dv}) i kierunku poziomym ($E_{dh,NW-SE}$), który zmienia się w zakresie od 0,77 do 1,4 (tab.

5). Na większą zmienność A_{Ed} niż A_{vp} , wpływa zróżnicowanie gęstości objętościowej i współczynnika Poissona w poszczególnych formacjach.

Mimo ogólnej niewielkiej anizotropii badanych ośrodków skalnych, już na podstawie szczegółowej analizy wartości współczynników anizotropii A_{vp} oraz A_{Ed} dla jednego wybranego kierunku pomiarowego można zauważyć, że przyjmuje on w niektórych formacjach średnią wartość < 1 lub > 1 , co wskazywać może na lokalną reorientację relacji prędkości V_{pv} i V_{ph} , i jest śladem zmiany pola naprężeń i wywołanej nim anizotropii. Tak więc w trzeciorzędowej formacji anhydrytowej (Jezupol) oraz piaskowcowej „old redu” (Zaleszczyki) średnia wartość $A_{vp} < 1$ może wskazywać, że te osady pokrywy platformowej były poddane większym naciskom poziomym niż pionowym, izotropowe ($A_{vp} = 1$) charakter naprężeń wykazują wapienie margliste dewonu z Burdiakowice, a w pozostałych formacjach, gdzie średnio wartość $A_{vp} > 1$ wskazuje na niewielką przewagę naprężeń działających w kierunku pionowym.

Wyjaśnienie wymaga jednak w jakim stopniu na wartość współczynnika anizotropii akustycznej wpływają utajone spekania ciosowe, jest trudne. Przykład wapieni marglistych z Burdiakowice wskazuje jednakże, że gdy pęknięcia inicjalne są zorientowane zgodnie z kierunkiem pomiarowym, propagacja fal wzdłuż spekań jest ułatwiona i prędkości fali w obu kierunkach pomiarowych są duże, a wytrzymałość niska.

Zatem wartość A_{vp} bliska 1 w Burdiakowicach może wynikać z podwyższonej prędkości wzdłuż spekań na linii pomiarowej NW-SE i obserwuje się niewspółmiernie duże prędkości fal w stosunku do niskich wytrzymałości skały. Przykładem, gdzie znaczna anizotropia akustyczna jest zaburzona pomiarem wzdłuż szczeliny inicjalnej są wapienie z Czortkowa. Ślady spekań są zorientowane w kierunku NE-SW i prędkości są znaczne, co nie odzwierciedla się w obniżonej wytrzymałości skały w kierunku pionowym.

Tak więc w zwięzłych i wytrzymałych formacjach węglanowych syluru i dewonu pomiary aku-

Tab. 4. Anizotropia prędkości fali podłużnej wyznaczona na podstawie pomiarów w kierunku pionowym (V_{pv}) i poziomym (V_{ph}) na zorientowanych próbkach skalnych

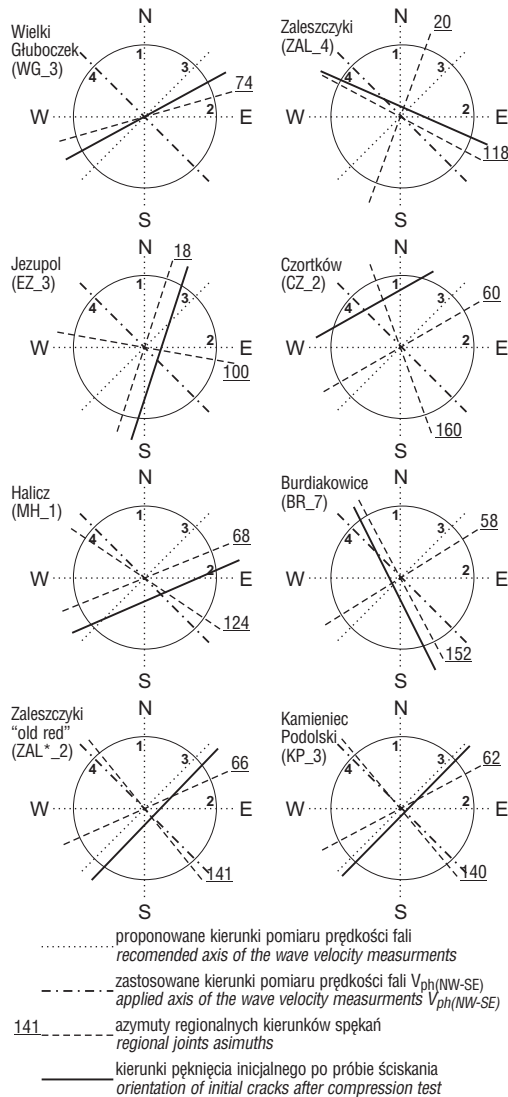
Table 4. Anisotropy of longitudinal waves velocity for oriented samples

Miejscowość	Geochronologia	Typ litologiczny	Prędkość propagacji fali podłużnej [m/s]		Współczynnik anizotropii A_{vp} [-]
			V_{pv}	$V_{ph(NW-SE)}$	
Wielki Głuboczek	trzeciorzęd	górny baden	4322-5426	3899-5340	0,88-1,18 (1,03)
Jezupol		środkowy baden	4050-4770	3949-4327	0,96-1,07 (0,99)
Zaleszczyki	dewon	piaskowce ("old red")	3174-3366	3281-3556	0,95-0,98 (0,96)
Zaleszczyki		piaskowce	4036-5668	4032-5719	0,82-1,17 (1,03)
Czortków		wapienie	5306-5941	4952-5583	1,00-1,17 (1,07)
Burdiakowice	sylur	wapienie margliste	3585-4289	3840-4212	0,90-1,10 (1,00)
Kamieniec Podolski		dolomity	4723-5931	4806-5642	0,84-1,16 (1,03)

Tab. 5. Anizotropia właściwości sprężystych skał osadowych platformy wschodnio-europejskiej

Table 5. Anisotropy of elastic properties of sedimentary rocks of the East-European Platform

Miejscowość	Geochronologia	Typ litologiczny	Moduł sprężystości [GPa]		$A_{Ed-E_{dv}/E_{dh}}$ [-]
			E_{dv} [GPa]	$E_{dh(NW-SE)}$ [GPa]	
Wielki Głuboczek	trzeciorzęd	górny baden	35,0-74,8	36,6-72,5	0,77-1,40 (1,07)
Jezupol		środkowy baden	36,2-39,2	34,4-41,3	0,92-1,14 (1,01)
Zaleszczyki	dewon	piaskowce ("old red")	23,9-26,3	25,6-29,4	0,90-0,95 (0,92)
Zaleszczyki		piaskowce	42,7-85,1	42,6-86,8	0,67-1,37 (1,07)
Czortków		wapienie	75,6-94,8	65,8-83,7	0,99-1,37 (1,14)
Burdiakowice	sylur	wapienie margliste	30,9-45,6	36,6-44,0	0,81-1,21 (1,01)
Kamieniec Podolski		dolomity	59,3-93,5	61,4-84,6	0,70-1,35 (1,08)



Ryc. 9. Zgodność azymutu przebiegu szczeliny inicjalnej z właściwym kierunkiem spękań regionalnych w różnych odsłonięciach platformy wschodnioeuropejskiej
Fig. 9. Correlation of initial fracture orientations and regional joints at the East-European Platform

styczne, nie uwzględniające drugiego kierunku ciosu, nie odzwierciedlają także stanu osłabienia skały oraz jej anizotropii wytrzymałościowej. Niezbędne są pomiary uzupełniające.

Wstępne porównanie badań wytrzymałościowych i akustycznych z analizą przebiegu regionalnych spękań wskazuje zatem na zmienność wytrzymałościową skał pokrywy osadowej platformy wschodnioeuropejskiej. Poza geochronologią i litologią badanych utworów, zmienność ta jest wywołana złożonym stanem naprężeń i prawdopodobną reorientacją kierunków działania naprężeń głównych. Czynniki te odbiły się na wytrzymałości osadów w znacznie wyższym stopniu niż można by tego oczekiwać w formacjach zalegających w pierwotnym niemal poziomym położeniu, na obszarze charakteryzującym się względną stałością cech strukturalnych.

Podsumowanie

W próbkach badanych skał platformy wschodnioeuropejskiej są zachowane ślady pamięci obciążeń geologicznych wyrażające się powstawaniem pod obciążeniem szczelin inicjalnych o orientacji zgodnej z kierunkami ciosu regionalnego NW–SE oraz NE–SW.

Ślady tych kierunków są utajone i badania akustyczne w jednym z wybranych kierunków ciosu regionalnego nie wykazują tego efektu w sposób jednoznaczny.

Zalegające horyzontalnie osady pokrywy platformowej wykazują jednak znaczne ślady oddziaływania naprężenia bocznego w badanym obszarze platformowym, które mogą lokalnie dorównywać naciskowi pionowemu.

Szczegółowa analiza zmienności współczynników anizotropii akustycznej (A_{vp}) i (A_{Ed}) uzyskanych na podstawie pomiarów wartości V_{pv} oraz V_{ph} w kierunkach działania dwóch naprężeń głównych, prostopadle i równoległe do uwarstwienia, czyli w kierunku pionowym i wzdłuż kierunku NW–SE wskazuje, że w kompleksie paleozoicznym kierunek obciążeń mógł ulegać reorientacji, gdyż np. w osadach old redu przeważają ślady przewagi oddziaływania sił poziomych, zachowujące się również niekiedy w dolnych partiach osadów kenozoiku.

Należy więc sądzić, że w podłożu skał osadowych w tym rejonie występuje strefa nieciągłości rozgraniczająca bloki podłoża krystalicznego o zróżnicowanej ruchliwości. Ruchy bloków podłoża wpływały na lokalny wzrost naprężeń w skałach pasywnej pokrywy osadowej. Ślady mogły pozostawić także procesy erozji.

Scharakteryzowanie kierunków oddziaływania najmniejszych i największych naprężeń poziomych oraz ustalenia ich związku z anizotropią wytrzymałościową osadów platformowych, wymaga w dalszej kolejności ustalenia anizotropii cech sprężystych, nie tylko w wybranym kierunku NW–SE lecz również w kierunkach o innej orientacji.

Literatura

- GERENCZUK K. J. (red.) 1979 — Priroda Tarnopilskiej oblasti. Wyż. Szkoła Wyd., Lwów.
 ISO-2000 — Geotechnical engineering. Identification and description of rock. ISO 14689.CEN/TC 250/S.C. 7. N 324.
 LUKASZEWSKI P. & BOGDAŃSKA J. 1997 — Laboratoryjne badania występowania efektu pamięci w skałach osadowych rejonu Górnośląska. Mat. 1. Czesko-Polskie Sympozjum Geomechaniczne. Ostrawa. Wyd. Inst. of Geonics, ASCR: 64–70.
 PINIŃSKA J. 1992 — Emisja akustyczna ośrodków skalnych w stacjach naprężeń pokrywicznych. Prz. Geol., 40: 727–733.
 PINIŃSKA J. 1994 — Właściwości wytrzymałościowe i odkształcenie skał. cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego. t. 1. Katalog. Wyd. Tinta. Warszawa.
 PINIŃSKA J. 2000 — Właściwości wytrzymałościowe i odkształcenie skał. cz. III. Jura Krakowsko-Częstochowska. t. 6. Objaśnienia i interpretacja. Wyd. Inwit. Warszawa.
 Polska Norma PN-84/B-01080 Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyczno-mechanicznych. PKNiM. Warszawa.
 Polska Norma PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów. PKNiM. Warszawa.