

Maria KARWASIECKA, Jan KWARCINŃSKI

WYNIKI BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH SKAŁ

ZAKRES WYKONANYCH BADAŃ

Badania właściwości fizycznych skał wykonane na próbkach z otworu Chełmek IG 1 dotyczyły wyłącznie osadów karbonu. Zakres zaprojektowanych i wykonanych badań był bardzo szeroki i obejmował:

- masowe pomiary gęstości objętościowej;
- pomiary prędkości fali akustycznej;
- pomiary właściwości cieplnych;

- badania parametrów geotechnicznych.

Wykonawcą pomiarów gęstości objętościowej, prędkości fali akustycznej i parametrów cieplnych skał było Przedsiębiorstwo Badań Geofizycznych w Warszawie, natomiast badania właściwości geotechnicznych skał wykonano w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Budownictwa Górniczego „BUDOKOP” w Mysłowicach.

MASOWE POMIARY GĘSTOŚCI OBJĘTOŚCIOWEJ

Pomiary gęstości objętościowej wykonano na próbkach skał z całego rdzeniowanego odcinka skał karbonu, przy użyciu gęstościomierza GS-3 na próbkach skał nasączonych wodą przez okres 24 godzin. Próbkę do badań pobierano ze stałym krokiem opróbowania wynoszącym 0,25 m. Ogółem badania gęstości objętościowej wykonano na 7125 próbkach skał. Sposób pobierania i opisywania próbek pozwalał na jednoznaczne określenie litologii każdej próbki. Liczba próbek reprezentujących poszczególne typy litolo-

giczne skał jest odzwierciedleniem udziału tych typów w profilu litologicznym karbonu.

Na podstawie analizy zmian średniej gęstości objętościowej poszczególnych typów litologicznych skał płonnych w profilu utworów karbonu można ocenić stopień diagenezy skał. Analizę przeprowadzono dla czterech najczęściej reprezentowanych typów litologicznych skał: mułowce (łącznie z mułowcami piaszczystymi) oraz piaskowce w rozbiciu na piaskowce drobno-, średnio- i gruboziarniste (tab. 43).

POMIARY PRĘDKOŚCI FALI AKUSTYCZNEJ

Pomiary prędkości fali podłużnej wykonano metodą przeświecania przy użyciu aparatury ISU-1 produkcji radzieckiej. Pomiary prędkości fali poprzecznej wykonano aparaturą produkcji IPPT PAN. Komplet badań obejmował pomiary prędkości fali podłużnej i poprzecznej, w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, osobno dla próbek skał w stanie powietrzno-suchym oraz w stanie nasączonym. Próbkę skał przygotowane do badań przed wykonaniem pomiarów były suszone w suszarce próżniowej, a następnie nasączone 5% roztworem NaCl. Ogółem pobrano 164 próbki do badań prędkości fali akustycznej. W procesie wycinania kształtek pomiarowych oraz podczas nasycania część próbek uległa zniszczeniu. Przedmiotem analizy wyników prędkości fali akustycznej w kierunku równoległym do osi otworu wiertniczego (rdzenia) były 82 próbki, natomiast w kierunku prostopadłym do osi otworu – 96 próbki (tab. 44,

45). Próbkę te reprezentowały głównie piaskowce o różnym uziarnieniu.

Średni współczynnik anizotropii prędkości fali akustycznej (stosunek prędkości fali akustycznej, mierzonej w kierunku prostopadłym do osi otworu, do prędkości fali akustycznej, mierzonej równoległe do osi otworu) dla skał grubookruchowych (piaskowców) wynosi:

- prędkość fali podłużnej, dla próbek w stanie powietrzno-suchym – 1,1297 (PSC DR), 1,0786 (PSC ŚR);
- prędkość fali podłużnej, dla próbek w stanie nasączonym – 1,0618 (PSC DR), 1,0143 (PSC ŚR);
- prędkość fali poprzecznej – 1,0074 (PSC DR), 1,0011 (PSC ŚR).

Dla wszystkich analizowanych typów litologicznych skał, rodzajów fali akustycznej, stanu próbki oraz kierunków prowadzenia pomiarów obserwujemy wzrost prędkości fali akustycznej z głębokością pobrania próbki (fig. 28).

Tabela 43

Średnie gęstości objętościowe podstawowych typów litologicznych skał

Average densities of basic lithological types of rocks

Litostratygrafia Lithostratigraphy	Litologia próby (warstwy) Lithology of samples (layers)			
	mułowce mudstones	piaskowce sandstones		
		drobnoziarniste fine-grained	średnioziarniste medium-grained	gruboziarniste coarse-grained
	średnia gęstość objętościowa [g/cm ³]/ (liczba pomiarów) average densities of basic [g/cm ³]/ (number of measurements)			
krakowska seria piaskowcowa warstwy libiąskie	2,374 (27)	2,215 (65)	2,119 (194)	2,113 (148)
krakowska seria piaskowcowa warstwy łaziskie	2,504 (144)	2,355 (118)	2,242 (666)	2,216 (433)
seria mułowcowa warstwy orzeskie s.s. + warstwy załęskie	2,600 (352)	2,413 (266)	2,317 (51)	–
górnoląska seria piaskowcowa warstwy rudzkie s.s.	–	2,436 (32)	2,498 (26)	–
seria paraliczna warstwy grodzieckie	2,592 (129)	2,501 (218)	2,407 (75)	2,398 (5)
seria paraliczna warstwy florowskie	2,628 (784)	2,577 (684)	2,461 (116)	–
seria paraliczna warstwy sarnowskie	2,635 (42)	2,566 (227)	–	–
warstwy malinowickie	2,676 (210)	2,593 (196)	–	–

Tabela 44

Średnie wartości prędkości fali akustycznej w kierunku równoległym do osi otworu wiertniczego

Average value of velocity of acoustic wave parallel to the axis of the borehole

Typ litologiczny Lithology	Prędkość fali podłużnej [m/s]/ (liczba pomiarów) Longitudinal wave velocity [m/s]/ number of measurements		Prędkość fali poprzecznej [m/s]/ liczba pomiarów Transverse wave velocity [m/s]/ number of measurements
	Stan powietrzno-suchy Dry surface condition	stan nasycony saturated state	
PSC DR	3177 (57)	3607 (57)	2168 (57)
PSC ŚR	2645 (20)	3015 (20)	1772 (20)
PSC GR	1900 (1)	2000 (1)	1250 (1)
PSC RZN	2438 (4)	2838 (4)	1650 (4)

PSC – piaskowiec; DR – drobnoziarnisty; ŚR – średnioziarnisty; GR – gruboziarnisty; RZN – różnoziarnisty
PSC – sandstone; DR – fine-grained; ŚR – medium-grained; GR – coarse-grained; RZN – varied size grains

Tabela 45

Średnie wartości prędkości fali akustycznej w kierunku prostopadłym do osi otworu wiertniczego

Average value of velocity of acoustic wave perpendicular to the axis of the borehole

Typ litologiczny Lithology	Prędkość fali podłużnej [m/s]/ (liczba pomiarów) Longitudinal wave velocity [m/s]/ number of measurements		Prędkość fali poprzecznej [m/s]/ (liczba pomiarów) Transverse wave velocity [m/s]/ (number of measurements)
	stan powietrzno-suchy dry surface condition	stan nasycony saturated state	
ILC PYL	4175 (1)	3475 (1)	2550 (1)
MLC	4255 (5)	4025 (5)	2550 (5)
PSC BDR	4119 (4)	4375 (4)	2531 (4)
PSC DR	3589 (59)	3830 (59)	2184 (59)
PSC ŚR	2853 (22)	3058 (22)	1774 (22)
PSC GR	2075 (1)	1975 (1)	1225 (1)
PSC RZN	2788 (4)	3044 (4)	

ILC PYL – iłowiec pylasty; MLC – mułowiec; PSC – piaskowiec; BDR – bardzo drobnoziarnisty; DR – drobnoziarnisty; ŚR – średnioziarnisty; GR – gruboziarnisty; RZN – różnoziarnisty

ILC PYL – silty claystone; MLC – mudstone; PSC – sandstone; BDR – very fine-grained; DR – fine-grained; ŚR – medium-grained; GR – coarse-grained; RZN – varied size grains

Do obliczeń wartości prędkości fali akustycznej wzięto wartość średnią z dwóch wzajemnie prostopadłych kierunków.

For the calculation of the acoustic wave velocity, the average value of two perpendicular directions was taken.

POMIARY WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH

Pomiary przewodności cieplnej skał wykonywane były w warunkach stacjonarnego przepływu ciepła przy zastosowaniu aparatury λ M-2 skonstruowanej w Politechnice Szczecińskiej, a następnie wielokrotnie modernizowanej w Przedsiębiorstwie Badań Geofizycznych w Warszawie. Podstawową zaletą metod realizowanych w warunkach stacjonarnych jest wysoka dokładność (1%). Wadą jest natomiast konieczność wykonania znormalizowanych kształtek i długi czas pomiaru.

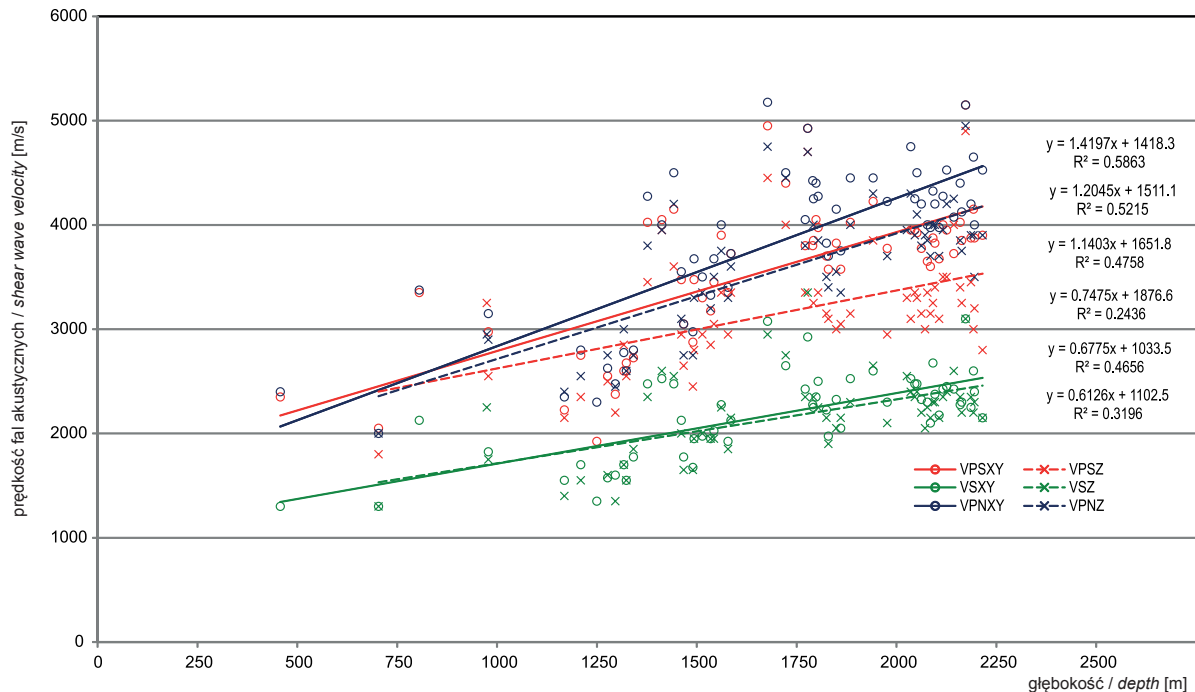
Próbki przygotowane do badań przed wykonaniem pomiarów były suszone w suszarce próżniowej, a następnie nasycone 5% roztworem NaCl. Powierzchnie kształtek próbek pokryte były pastą silikonową w celu minimalizacji oporności kontaktowej. Powierzchnie boczne kształtek

były zabezpieczone izolacyjnym materiałem. Pomiary właściwej pojemności cieplnej realizowano metodą kalorymetryczną, pomiary wykonano dla próbek suchych. Gęstość próbek określano gęstościomierzem GS-3. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów przewodności cieplnej, pojemności cieplnej i gęstości obliczono współczynnik wyrównania temperatury. Pomiary właściwości cieplnych skał wykonano ogółem dla 198 próbek, przy czym 151 pomiarów wykonano prostopadle do osi otworu wiertniczego (p), natomiast 47 pomiarów wykonano w kierunku równoległym do osi rdzenia (r). Średnie wartości parametrów cieplnych dla poszczególnych podstawowych typów litologicznych skał karbońskich z otworu Chełmek IG 1 zestawiono w tabeli 46.

BADANIA PARAMETRÓW GEOTECHNICZNYCH

Badania parametrów geotechnicznych przeprowadzono na próbkach rdzenia wiertniczego ze stropowej części utworów karbonu, do głęb. ok. 1000 m. Zasięg głębokościowy badań odpowiadał głębokości projektowanych (w latach 80. XX w.) kopalń węgla kamiennego. Ogółem pobrano 73 próbki skał, przy czym 32 próbki reprezentowały utwory kra-

kowskiej serii piaskowcowej – warstwy libiąskie, natomiast 41 utwory krakowskiej serii piaskowcowej – warstwy łąskie (Karwasiecka, Kwarciański, 1988). Niewielki stopień zdiagenezowania utworów krakowskiej serii piaskowcowej spowodował, że próbki do badań pobierano zarówno ze skał zwięzłych, jak i skał luźnych. Ogółem ze skał luźnych po-



VPSXY – średnia prędkość fali podłużnej w kierunku prostopadłym do osi rdzenia, stan suchy,
average velocity of the longitudinal wave perpendicular to the core axis, dry state

VPSZ – prędkość fali podłużnej w kierunku równoległym do osi rdzenia, stan suchy,
longitudinal wave velocity parallel to the axis of the core, dry state

VPNXY – średnia prędkość fali podłużnej w kierunku prostopadłym do osi rdzenia, w stanie nasyconym,
average longitudinal wave velocity perpendicular to the core axis, saturated state

VPNZ – prędkość fali podłużnej w kierunku równoległym do osi rdzenia, w stanie nasyconym,
longitudinal wave velocity parallel to the axis of the core, saturated state

VSXY – średnia prędkość fali poprzecznej w kierunku prostopadłym do osi rdzenia,
average transverse wave velocity perpendicular to the axis of the core

VSZ – prędkość fali poprzecznej w kierunku równoległym do osi rdzenia
transverse wave velocity parallel to the axis of the core

Fig. 28. Wykresy pomiarów prędkości fali akustycznej z głębokością – dla próbek piaskowców średnioziarnistych (PSC SRZ)

Acoustic wave velocity diagrams with depth – for medium-grained sandstones samples (PSC SRZ)

Tabela 46

Średnie wartości parametrów cieplnych skał

Average value of thermal properties of rocks

Litologia próby Lithology of samples	Średnie wartości parametrów cieplnych/ (liczba pomiarów) Average value of thermal properties/ (number of measurements)					
	Przewodność cieplna (próba nasycona) Thermal conductivity [W/m ² K]		Właściwa pojemność cieplna Thermal capacity [J/g ² K]		Współczynnik wyrównania temperatury Thermal diffusivity [m ² /s]	
	kierunek „p” direction „p”	kierunek „r” direction „r”	pr. sucha samples to dry	pr. nasycona samples to saturated	kierunek „p” direction „p”	kierunek „r” direction „r”
MLC	2,58 (40)	1,80 (17)	0,880 (57)	0,940 (57)	1,044 (40)	0,723 (17)
MLC PSC	2,41 (8)	1,77 (2)	0,877 (10)	0,937 (10)	0,971 (8)	0,710 (2)
PSC DR	3,35 (63)	2,87 (16)	0,846 (79)	0,951 (79)	1,404 (63)	1,196 (16)
PSC ŚR	3,09 (27)	3,04 (8)	0,832 (35)	0,997 (35)	1,300 (27)	1,282 (8)
PSC GR	1,97 (2)	–	0,903 (2)	1,118 (20)	0,762 (2)	–
PSC RZN	2,67 (6)	–	0,822 (7)	1,019 (7)	1,129 (6)	–

MLC – mułowiec; MLC PSC – mułowiec piaszczysty; PSC – piaskowiec; DR – drobnoziarnisty; ŚR – średnioziarnisty; GR – gruboziarnisty; RZN – różnoziarnisty

MLC – mudstone; MLC PSC – sandy mudstone; PSC – sandstone; DR – fine-grained; ŚR – medium-grained; GR – coarse-grained; RZN – varied size grains

Tabela 47

**Zestawienie wyników badań parametrów geotechnicznych skał z krakowskiej serii piaskowcowej – warstwy libiąskie
(interwał zmienności średnich wartości dla poszczególnych próbek skał)**

Results of geotechnical parameters of rocks (average value of individual samples of rocks) – Cracow Sandstone Series – Libiąż Beds

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Hy (6) Clays	Piaski (13) Sands	Mułowce (2) Mudstones	Piaskowce drobnoziarniste (7) Fine-grained sandstone	Piaskowce średnioziarniste (1) Medium-grained sandstone	Piaskowce gruboziarniste (2) Coarse-grained sandstone	Zlepienie (1) Conglomerate
Właściwości fizyczne skał								
gęstość właściwa	kg/m ³ 10 ³	2,58–2,68	2,62–2,71	2,56–2,57	2,60–2,65	2,59	2,61–2,65	2,65
gęstość objętościowa w stanie wilgotnym	kg/m ³ 10 ³	2,17–2,28	2,10–2,27	2,27–2,39	2,02–2,17	2,21	2,00–2,38	2,03
gęstość objętościowa w stanie suchym	kg/m ³ 10 ³	1,90–2,05	1,88–2,13	2,20–2,30	1,81–2,02	2,08	1,83–2,31	1,87
wilgotność	%	11,02–13,93	6,59–11,72	3,36–3,70	7,19–10,41	10,06	3,36–9,40	8,48
porowatość całkowita	%	20–27	21–30	10–14	23–32	20	11–31	29
rozmałalność (skala GIG)	–	0,1–0,6	<0,75	0,4–0,6	0,31–0,65	0,59	0,44–0,58	0,24
Wskaźniki wytrzymałości i sprężystości skał								
wytrzymałość na ściskanie w stanie wilgotnym	MPa	–	–	8,4–11	1,0–9,1	9,2	1,8–12	1,4
wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym	MPa	–	–	–	2,1–13	10	3,1–27	5,9
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	–	–	0,8–0,9	0,1–0,7	0,9	0,2–0,7	0,2
moduł Younga	MPa 10 ³	–	–	–	0,72–1,34	1,50	4,05	–
graniczne odkształcenie właściwe podłużne	10 ⁻⁴	–	–	–	38–70	38	33	–
liczba Poissona	–	–	–	–	0,28–0,47	0,30	0,32	–
Wskaźniki wytrzymałości w trójosiowym stanie naprężeń próbek								
spójność	MPa	0,25–0,65	0,02–0,25	6,5	1,4–3,1	–	–	–
kąt tarcia wewnętrznego	°	19–26	26–35	38	40–43	–	–	–
Właściwości reologiczne								
czas opóźnienia sprężystego	min	–	–	224	217–276	–	–	–
współczynnik lepkości	MPa min 10 ³	–	–	413	120–312	–	–	–
czas relaksacji naprężeń	min	–	–	172	92	–	–	–

Tabela 48

Zestawienie wyników badań parametrów geotechnicznych skał krakowskiej serii piaskowcowej – warstwy laziskie
(interwał zmienności średnich wartości dla poszczególnych próbek skał)

Results of geotechnical parameters of rocks (average value of individual samples of rocks) – Cracow Sandstone Series – Łaziska Beds

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Iły (I) Clays	Piaski (S) Sands	Ilowce (I) Claystones	Mulowce (3) Mudstones	Piaskowce drobnoziarniste (15) Fine-grained sandstone	Piaskowce średnioziarniste (11) Medium-grained sandstone	Piaskowce gruboziarniste (5) Coarse-grained sandstone
Właściwości fizyczne skał								
gęstość właściwa	kg/m ³ 10 ³	2,75	2,62–2,68	2,69	2,67–2,69	2,62–2,69	2,60–2,66	2,63–2,65
gęstość objętościowa w stanie wilgotnym	kg/m ³ 10 ³	2,48	2,12–2,29	2,50	2,39–2,44	1,94–2,41	1,95–2,19	2,02–2,16
gęstość objętościowa w stanie suchym	kg/m ³ 10 ³	2,29	1,99–2,08	2,39	2,32–2,36	1,79–2,32	1,79–2,06	1,88–2,07
wilgotność	%	8,32	8,99–10,88	4,56	1,51–3,87	3,64–8,60	6,07–9,03	6,37–7,25
porowatość całkowita	%	17	21–27	11	12–13	13–32	22–32	23–29
rozmałość (skala GIG)	–	<0,75	<0,75	0,80	0,80	0,30–0,79	0,11–0,85	0,32–0,89
Wskaźniki wytrzymałości i sprężystości skał								
wytrzymałość na ściskanie w stanie wilgotnym	MPa	–	–	16	20–26	1,0–26	0,7–11	1,3–9,8
wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym	MPa	–	–	–	–	3,4–33	2,0–26	4,1–14
wytrzymałość na rozciąganie	MPa	–	–	1,0	1,2–2,3	0,1–1,0	0,1–0,9	0,2–0,7
moduł Younga	MPa 10 ³	–	–	–	4,28–5,87	0,91–5,50	1,26–2,44	1,38–2,31
graniczne odkształcenie właściwe podłużne	10 ⁻⁴	–	–	–	61–84	34–72	30–46	37–38
liczba Poissona	–	–	–	–	0,16–0,32	0,20–0,45	0,20–0,42	0,43–0,47
Wskaźniki wytrzymałości w trójosiowym stanie naprężeń próbek								
spójność	MPa	0,9	0,2–0,5	8,5	–	2,4–4,2	1,0–5,0	2,0
kąt tarcia wewnętrzznego	°	23	28–34	39	–	34–41	37–42	48
Właściwości reologiczne								
czas opóźnienia sprężystego	min	–	–	147	–	195	175–196	–
współczynnik lepkości	MPa min 10 ³	–	–	148	–	446	228–260	–
czas relaksacji naprężeń	min	–	–	161	–	98–140	102–120	123

brano 25 próbek, natomiast ze skał zwięzłych – 48 próbek. Zakres rzeczowy wykonanych badań na próbkach skał zwięzłych obejmował:

- badania właściwości fizycznych skał;
- badania wskaźników wytrzymałości jednoosiowej
- badania wskaźników wytrzymałości w trójosiowym stanie naprężeń próbek;
- badanie właściwości sprężystych;
- badanie parametrów reologicznych.

Na próbkach ze skał luźnych zakres badań ograniczał się do badania właściwości fizycznych i wskaźników wytrzymałości w trójosiowym stanie naprężeń próbek. Przed wykonaniem badań na próbkach luźnych były one zagęszczane (konsolidowane) pod obciążeniem odpowiadającym warunkom panującym w górotworze.

Szeroki zakres badań był podyktowany wymogami projektowania górniczego oraz koniecznością oceny zagrożeń naturalnych już na etapie projektowania. Długość próbek rdzenia do badań standardowych, to jest właściwości fizycznych oraz wskaźników wytrzymałości i sprężystości, wynosiła ok. 1,0 m, natomiast do badań rozszerzonych uwzględniających badanie wskaźników wytrzymałościowych w trójosiowym stanie naprężeń i parametrów reologicznych pobierano próbki o długości ok. 2,0 m. Dla każdej próbki wykonywano po kilka oznaczeń poszczególnych parametrów geotechnicznych (od 2 do 5). Po krytycznej ocenie poszczególnych oznaczeń (wyeliminowanie pomiarów błędnych), każdej z próbek przyporządkowano wartość średnią badanego parametru geotechnicznego jako średnią arytmetyczną poszczególnych wyników pomiarów. Zestawienie wyników badań przedstawiono w [tabelach 47 i 48](#).