

Katarzyna GUZIK¹

PIASKOWCE FORMACJI OSTROWIECKIEJ OKOLIC OPOCZNA I ŻARNOWA JAKO KAMIEŃ ARCHITEKTONICZNY

Piaskowce formacji ostrowieckiej wydobywane z licznych złóż, położonych na północny-wschód od Opoczna i południowy-zachód od Żarnowa, wykazują zmienną jakość i przydatność gospodarczą. W dziewięciu analizowanych kamieniołomach wyróżniono siedem odmian piaskowców, które scharakteryzowano pod kątem wykształcenia litologicznego, składu petrograficznego oraz właściwości fizyko-mechanicznych. Na tej podstawie wskazano odmiany piaskowców o najkorzystniejszych właściwościach technicznych.

1. WSTĘP

Wraz z notowanym w ostatniej dekadzie rozwojem zapotrzebowania na płyty okładzinowe do aplikacji architektonicznych obserwowany jest regularny wzrost wydobywania piaskowców w rejonie świętokrzyskim. W północnozachodnim obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich największe znaczenie gospodarcze mają dolnojurajskie piaskowce formacji ostrowieckiej, wydobywane ze złóż położonych na południowy-zachód od Żarnowa (w Sielcu i Treście Wesołej) oraz na północny-wschód od Opoczna (w Kraszkowie i Mroczkowie Gościnnym). W przeszłości skały te znajdowały szereg zastosowań jak kamienie młyńskie, żarna, toczydła czy osełki. Prowadzono również badania nad ich przydatnością do produkcji materiałów kwasoodpornych. Długie tradycje wydobywania i użytkowania w architekturze dotyczą przede wszystkim piaskowców okolic Żarnowa, znanych na rynku kamieniarskim pod lokalną na-

¹ Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, guzik@min-pan.krakow.pl
doi: 10.5277/mscma1622306

zwą żarnowskich lub żarnowieckich. Wzmianki o ich eksploatacji pojawiają się w wielu opracowaniach surowcowych (Kozydra 1961; Peszet 1973). Jednym z najstarszych zastosowań tych skał jest prawdopodobnie neogotycka rozbudowa kościoła św. Mikołaja w Żarnowie, a jest niewykluczone, że również we wcześniejszych etapach konstrukcji tej romańskiej świątyni (Krystek 2009; Walendowski 2015). Piaskowce formacji ostrowieckiej, stanowiące w przeszłości surowiec głównie o znaczeniu lokalnym, cieszą się obecnie uznaniem na terenie całego kraju. Przykłady aplikacji architektonicznych wykonanych z nich płyt okładzinowych obejmują szereg obiektów; w Warszawie (budynek kina Praha, Giełdy Papierów Wartościowych, siedziby Fundacji im. Stefana Batorego, Citibanku Handlowego i liczne apartamentowce), Łodzi, Poznaniu, Toruniu i Płocku (Guzik 2013; Walendowski 2015).

Wydobywane w rejonie Opoczna i Żarnowa piaskowce formacji ostrowieckiej wykazują zmienną jakość w obrębie poszczególnych złóż. Najbardziej pożądane odmiany piaskowców średnio i gruboławicowych, wykorzystywanych jako kamienie bloczne, pozyskiwane są w czterech kopalniach w rejonie Żarnowa (Żarnów 1, Sielec I, Sielec II, Sielec IV). Wydaje się, że znaczne perspektywy rozwoju wydobywania tych materiałów kamiennych istnieją też w pobliskich złóżach w Treście Wesolej, gdzie ostatnio odsłonięty został strop kompleksu piaskowców gruboławicowych. Do niedawna przedmiotem eksploatacji z kilku złóż był wyłącznie nadległy kompleks piaskowców cienko- i średnioławicowych. Ze względu na niekorzystne uławiczenie przydatności jako kamień bloczny nie wykazują piaskowce ze złóż w Mroczkowie Gościnnym i Kraszkowie. Popularnym kierunkiem ich zastosowania jest produkcja cienkich kształtek, potocznie „dzikówki” bądź „łupanki”, wykorzystywanych głównie w architekturze ogrodowej.

2. PRZEDMIOT I ZAKRES BADAŃ

Piaskowce formacji ostrowieckiej ze złóż okolic Opoczna i Żarnowa (województwo łódzkie, powiat opoczyński) zostały udokumentowane w 23 złóżach o łącznych zasobach 3109 tys. Mg (Bilans zasobów...2015). Spośród nich 16 rozpoznanych zostało w ciągu ostatnich 10 lat, niejednokrotnie w miejscach prowadzonej wcześniej wieloletniej eksploatacji. Są to na ogół złoża małe, skupione w bliskim sąsiedztwie (np. 7 złóż w Treście Wesolej, 8 złóż w Mroczkowie Gościnnym), o powierzchni poniżej 1 ha. Największym z nich jest złożo Żarnów – 1,61 ha o zasobach 507 tys. Mg oraz wydzielone z niego złożo Żarnów 1 – 1,76 ha z zasobami 337 tys. Mg (MIDAS 2016). Wydobywanie piaskowców, w ilości 7 do 49 tys. Mg/r., pochodzi z kilkunastu kopalń, dostarczających szeroki asortyment materiałów kamiennych. Urabianie kopaliny prowadzone jest prostymi metodami, w tym rozpierania materiałem pęczniącym *Cevamit* oraz rozłupywaniem przez ręczne klinowanie (piaskowców cienkoławicowe). Największe wydobywanie wykazują kopalnie w pobliżu Żarnowa (Sielec I, Sielec IV,

Żarnów 1), z których każda dostarcza od 1 do 17 tys. Mg/r. kopaliny (Bilans zasobów...2015 i wcześniejsze).

Do badań wybranych zostało 9 złóż (rys. 1), w tym 6 z rejonu Żarnowa (złoże Sielec I, -II, -IV, Żarnów I, Tresta Wesoła I, -IV) i 3 z okolic Opoczna (złoże Kraszków 1, Mroczków Gościnnie-1, -6). Złoża te były w ostatnich latach przedmiotem czynnej bądź okresowej eksploatacji. Wybór ten podyktowany był dostępnością profili złóżowych do obserwacji terenowych oraz możliwością pobrania prób do badań laboratoryjnych. W pierwszej kolejności wykonano pomiary terenowe, obejmujące szczegółową charakterystykę piaskowców pod kątem ich wykształcenia i litologii. Na podstawie zróżnicowania skał w zakresie uławicenia, barwy, struktury, tekstury oraz stopnia zwięzłości wydzielono typy piaskowców o odmiennych walorach użytkowych. Drugi etap badań obejmował prace laboratoryjne, w ramach których przeprowadzono charakterystykę petrograficzną wyróżnionych odmian piaskowców wraz z określeniem ich właściwości fizyko-mechanicznych. Dla każdego z wydzielonych typów piaskowców przedstawiono zakres zmienności badanych parametrów, w tym gęstości pozornej, nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie oraz prędkości fal ultradźwiękowych w stanie powietrzno-suchym i po nasączeniu wodą. Na podstawie uzyskanych wyników ustalono związek między wykształceniem litologiczno-sedymentacyjnym piaskowców a ich właściwościami technicznymi.



Rys. 1. Rozmieszczenie złóż piaskowców formacji ostrowieckiej w rejonie Żarnowa i Opoczna (pogrubioną czcionką zaznaczono złoża stanowiące przedmiot badań)

Fig. 1. Occurrence of the Ostrowiec Fm. sandstones deposits in Żarnów and Opoczno area (names of analyzed deposits in bold)

3. CHARAKTERYSTYKA WYRÓŻNIONYCH ODMIAN PIASKOWCÓW

Możliwości wykorzystania piaskowców jako kamieni architektonicznych uzależnione są m.in. od ich wykształcenia litologicznego i parametrów fizyko-mechanicznych. Cechy te kształtowane są głównie w wyniku sedymentacji, a także przemian diagenetycznych i wietrzeniowych. Zróznicowany przebieg tych procesów skutkuje odmienną jakością i przydatnością gospodarczą piaskowców, zaliczanych do różnych jednostek litostratygraficznych dolnej jury, a często również reprezentujących równowiekowe kompleksy skalne. Na podstawie przeprowadzonych obserwacji terenowych w dziewięciu analizowanych złożach wydzielono siedem odmian piaskowców o różnych walorach użytkowych (tab. 1). Najbardziej interesujące spośród nich są cztery odmiany piaskowców blocznych, wykorzystywane do produkcji płyt okładzinowych. Pozostałe trzy to odmiany o podzielności płytowej.

Tab. 1. Litologia i warunki sedymentacji wyróżnionych odmian piaskowców (Guzik 2015)

Tab. 1. Lithology and sedimentary environment of the analyzed varieties of sandstones

Odmiana	Środowisko sedymentacji*		Występowanie/ /Złoże	Piaskowce – litologia
I	STREFA PRZYBRZEŻNA ZBIORNIKA BRAKICZNO-MORSKIEGO	górne/średniokowe przybrzeże	Sielec I	bardzo gruboławicowe, jasnoszare i jasnożółte, drobnoziarniste o teksturze bezładnej i słabo widocznej laminacji
II		dolne/średniokowe przybrzeże	Sielec IV	średnio- i gruboławicowe, wielobarwne, bardzo drobnoziarniste o płaskiej laminacji; tzw. piaskowiec „dębowy”
III			Sielec I, Sielec IV, Tresta Wesoła I Żarnów 1	średnio- i gruboławicowe, jasnoszare i jasnożółte, bardzo drobnoziarniste o teksturze kierunkowej; tzw. piaskowiec „z liściem”
IV			Sielec II, Sielec IV, Żarnów 1, Tresta Wesoła I	średnio- i gruboławicowe, jasnoszare, bardzo drobno- i drobnoziarniste o teksturze bezładnej
V			Tresta Wesoła I, IV	cienko- i, średnioławicowe jasnoszare, żółte i czerwone; drobnoziarniste o poziomej i przekątnej laminacji
VI	DELTY/RZEKI MEANDRUJĄCE?/ /SZELF?		Kraszków 1	cienko- i średnioławicowe żółte i brunatne; drobnoziarniste o poziomej laminacji
VII			Mroczków Gościnnie-2, -6	cienko- i średnioławicowe, jasnoszare i żółte drobnoziarniste; o poziomej i przekątnej laminacji

* źródło: (Pieńkowski 2004; Złonkiewicz 2006, 2013), obserwacje własne

3.1. WYKSZTAŁCENIE LITOLOGICZNE I ŚRODOWISKO SEDYMENTACJI

Występujące w północno-zachodniej części obrzeżenia Gór Świętokrzyskich piaskowce formacji ostrowieckiej (datowane na synemur) reprezentują osady przybrzeżne płytkiego zbiornika brakiczno-morskiego; złoża okolic Żarnowa (Pieńkowski 2004; Złonkiewicz 2013), a prawdopodobnie również środowisk deltowych; złoża okolic Opoczna. Niewykluczone, że drugie z wymienionych stanowią również osady szelfowe i rzeczne (Złonkiewicz 2006). Szczegółowe rozważania na temat wykształcenia litologicznego i środowiska sedymentacji wyróżnionych odmian piaskowców przedstawiono w publikacji (Guzik 2015). Syntezę tych informacji zawiera tabela 1.

3.2. OPIS PETROGRAFICZNY

Ogólna charakterystyka petrograficzna osadów serii ostrowieckiej i koszorowskiej, stanowiących odpowiednik obecnie wydzielanej formacji ostrowieckiej (Pieńkowski 2004), przedstawiona została dotychczas m.in. przez Teofilak-Maliszewską (1968). Badania petrograficzne wyróżnionych w artykule odmian piaskowców obejmowały obserwacje 27 płytek cienkich w mikroskopie polaryzacyjnym do światła przechodzącego. Dla wybranych z nich wykonano analizę ilościową metodą punktową z zastosowaniem stolika integracyjnego ELTINOR. Przeprowadzone obserwacje wykazały, że piaskowce wykazują charakterystyczne dla strefy przybrzeżnej płytkiego morza bardzo dobre (odmiana II, III, IV) i dobre² wysortowanie składników ziarnowych (I, V, VI). Najslabiej pod tym względem prezentują się średnio wysortowane piaskowce odmiany VII z Mroczkowa Gościnnego, stanowiące prawdopodobnie osady akumulacji deltowej. Uziarnienie skał jest na ogół bardzo drobne (odmiana II, III) i drobne (odmiana IV, V, VI, VII), a tylko sporadycznie odpowiada frakcji gruboziarnistych pyłowców (pojedyncze preparaty piaskowców odmiany III i IV). Piaskowce cechuje dojrzałość petrograficzna składników szkieletu ziarnowego (tab. 2), zbudowanego w przewadze z kwarcu (od 64,0 do 92,1% obj.), z podrzędnym udziałem okruchów skał (0,3–4,0% obj.), łyszczyków (do 6,8 % obj.) oraz sporadycznie skaleni (do 1,4% obj.). Minerale ciężkie reprezentowane przez cyrkon (zdecydowana przewaga ilościowa), rutil, turmalin, minerały nieprzezroczyste, a podrzędnie amfibole, lokalnie tworzą większe koncentracje (w odmianie III w formie lamin poziomych i przekątnych), a ich udział kształtuje się na poziomie 0,3–2,8% obj. (tab. 2).

Największy udział kwarcu stwierdzono w piaskowcach odmiany III, najmniejszy w odmianach II i I. Piaskowce odmiany I wyróżnia obecność wydłużonych okruchów skał zbudowanych z kwarcu, blaszek miki, minerałów ilastych oraz związków żelaza. Jest to zapewne materiał redeponowany z podłoża. Większe nagromadzenia łyszczyków występują w odmianie II i IV (tab. 2).

² Ocena na podstawie wzorca do wizualnej oceny wysortowania materiału okruchowego (Pettijohn i in. 1987).

Szkielet ziarnowy piaskowców wykazuje zróżnicowane upakowanie – na ogół bardziej ściśle w piaskowcach odmiany I, III i IV, VII o przewodzie kontaktów prostych i wklęsło-wypukłych, słabsze w piaskowcach odmiany II i VI, o przewodzie kontaktów punktowych. W dwóch ostatnich odmianach znacznych rozmiarów przestrzenie porowe (wskazujące na słabą kompakcję osadu) częściowo zabudowane zostały przez tlenki żelaza, a w kilku przypadkach również przez sparytowy cement węglanowy (odmiana II).

Tab. 2. Skład petrograficzny analizowanych odmian piaskowców, [% obj.]
Tab. 2. Petrographic composition of the analyzed varieties of sandstone

Rodzaj składnika	Odmiany					
	I	II	III	IV	V–VII	
kwarc	76,5–76,6	64,0–76,6	82,3–87,8	68,3–92,1	74,2–82,6	
okruszy skał	3,2–4,0	1,7–3,1	1,1–1,8	1,4–3,1	0,3–2,0	
skalenie	0,6–1,4	0,0–0,4	0,4–1,4	0,0–0,7	0,0–0,6	
łyszczki	0,6–2,4	4,1–4,6	0,4–2,4	0,4–6,8	0,0–2,7	
minerały ciężkie	0,3–1,6	1,9–2,1	0,7–2,1	0,3–2,8	0,0–1,4	
spoiwo krzemionkowo- ilasto-żelaziste	suma	15,4–17,5	15,2–26,1	6,7–12,8	3,7–21,0	15,2–18,8
	krzemionkowe	7,9–8,4	6,1–7,3	5,7–9,5	2,8–11,2	6,1–9,2
	żelaziste	0,0–4,8	3,8–14,3	0,0–0,3	0,0–3,8	1,6–11,5
	krzemionkowo- ilaste	4,8–7,0	0,4–4,1	0,7–3,3	0,9–8,3	2,5–6,3
spoiwo węglanowe	–	0,0–0,3	–	–	–	

Spoiwo piaskowców stanowi mieszanina krzemionki, związków żelaza oraz minerałów ilastych, lokalnie z domieszką materiału okruszowego. Zarówno proporcje ilościowe tych składników, jak też ich łączny udział w skale wykazują znaczne zróżnicowanie. Sumaryczna ilość spoiwa w omawianych piaskowcach zawiera się w przedziale od 3,7 do 26,1% obj. (tab. 2). Najważniejszym składnikiem spoiwa jest krzemionka (2,8–11,2%), wykształcona głównie w postaci fragmentarycznych obwóddek regeneracyjnych, a tylko sporadycznie skupień mikrokrystalicznych w przestrzeniach porowych. Największy udział tego cementu obserwowany jest w blocznych piaskowcach odmian I, III i IV oraz cienko- i średnioławicowych piaskowcach odmiany V (złoża w Treście Wesołej) oraz odmiany VII (złoża w Mroczkowie Gościnnym). Mniejszy stopień regeneracji wykazują wielobarwne piaskowce odmiany II ze złoża Sielec IV oraz odmiana IV ze złoża Kraszków-1. Drugi rodzaj spoiwa, z udziałem 0,4–8,3% obj., wykształcony jest w postaci minerałów ilastych (głównie kaolinitu), które samodzielnie bądź wraz drobnymi blaszkami łyszczków, krzemionką i związkami żelaza wypełniają przestrzenie porowe. Do tej grupy zaliczone zostały również detrytyczne ziarna kwarcu o średnicy poniżej 0,061 mm. Większe ilości tego rodzaju spoiwa występują w piaskowcach odmiany VII ze złoża w Mroczkowie Gościnnym, a także odmiany I ze złoża Sielec I. Spoiwo żelaziste, o charakterze kontaktowym

i kontaktowo-porowym wykształcone jest w formie amorficznych związków, a także wodorotlenków i tlenków. Lokalnie jego obecność podkreśla laminację skały. Kuliste agregaty hematytu, impregnujące ziarna kwarcu oraz występujące na kontaktach międzyziarnowych stwierdzono w czerwonych piaskowcach odmiany V ze złoża Tresta Wesoła I. Zróżnicowany udział i forma występujących związków żelaza wpływa na zmienną barwę piaskowców. W wielobarwnych piaskowcach odmiany II ze złoża Sielec IV ich udział dochodzi do 14,3% obj., a w piaskowcach odmiany VI ze złoża Kraszków-1 do 11,5%. Poza trzema najczęściej wyróżnianymi rodzajami spoiwa w piaskowcach odmiany II stwierdzono kilka nieregularnych skupień sparytowego cementu węglanowego. Zgodnie z klasyfikacją (Pettijohn 1972) i późniejszymi jej modyfikacjami odmiany tych piaskowców należą do arenitów kwarcowych. Wyjątek stanowią dwie próbki odmiany IV oraz jedna odmiany I. Z uwagi na większy udział okruchów skał i łyszczyków (powyżej 5% obj.) reprezentują arenity sublityczne.

3.3. WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNO-MECHANICZNE

Oznaczenie właściwości fizyczno-mechanicznych przeprowadzono na 35 kostkach sześciennych o wyszlifowanych powierzchniach i długości krawędzi 5 cm. Pomiar wykonano w oparciu o wymagania norm PN-EN 1926:2001 i PN-EN 13755:2008. Pomiar prędkości fali podłużnej przeprowadzono metodą przejścia za pomocą defektoskopu ultradźwiękowego. Do badania wykorzystano głowice o częstotliwości 1 MHz. Zgodnie z normą PN-84/B-01080:1984 badane piaskowce należą do skał średnio ciężkich, średnio nasiąkliwych, o słabej, sporadycznie tylko średniej wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym (tab. 2).

Tab. 3. Zmienność podstawowych właściwości fizyczno-mechanicznych piaskowców z analizowanych złóż

Tab. 3. Variability of the basic physic-mechanical properties of Ostrowiec Fm. sandstones from examined deposits

Parametr	Gęstość objętościowa [Mg/m ³]	Nasiąkliwość wagowa [%]	Nasiąkliwość objętościowa [%]	Wytrzymałość na ściskanie [MPa]
wartość minimalna	1,95	5,66	12,05	19,12
wartość maksymalna	2,19	9,03	17,61	66,05
średnia arytmetyczna	2,06	7,07	14,53	43,34
odchylenie standardowe	0,05	0,85	1,41	11,22
współczynnik zmienności [%]	2,43	12,02	9,70	25,89

Gęstość objętościowa piaskowców, kształtująca się w przedziale 1,95–2,19 Mg/m³, wykazuje najmniejszą zmienność spośród analizowanych parametrów, na co wskazuje niska wartość odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności (tab. 3).

Omawiana właściwość pozostaje w ścisłym związku ze składem mineralnym oraz jej porowatością. Najmniejszą gęstością charakteryzują się bardzo drobnoziarniste piaskowce odmiany II (tab. 4), o słabym upakowaniu szkieletu ziarnowego, a także grubiej od nich uziarnione i słabiej wysortowane piaskowce odmiany I (z większym udziałem spoiwa ilastego i okruchów skał ilastych). Na podobnym poziomie kształtuje się gęstość pojedynczych próbek piaskowców odmiany IV, o grubszym ziarnie i mniejszym udziale spoiwa. Najwyższą gęstość objętościową wykazują cienko- i średnioławicowe piaskowce odmian V-VII, o wysokiej zawartości kwarcu w składzie mineralnym oraz znacznym udziale spoiwa (tab. 2, 4). W piaskowcach tych odmian obserwowane są również większe nagromadzenia związków żelaza w formie smug i żyłek (złoże Kraszków-1) oraz skupień hematytu (czerwone piaskowce ze złoża Tresta Wesoła I).

Nasiąkliwość wagowa badanych próbek jest zmienna; 5,66–9,03%, średnio 7,07% (tab. 4). Nasiąkliwość objętościowa, stanowiąca odpowiednik otwartej porowatości, kształtuje się na dwukrotnie wyższym poziomie (12,05–17,61%, średnio 14,53%). Odchylenie standardowe oraz współczynnik zmienności w przypadku tych parametrów przyjmują wartości wyższe od notowanych dla gęstości objętościowej. Najmniejszą nasiąkliwość wykazują odmiany drobnoziarnistych piaskowców cienko- i średnioławicowych o średnim i dobrym wysortowaniu ziaren (V–VII), a także odmiany III–IV stanowiące bardzo drobno- i drobnoziarniste piaskowce o silnym upakowaniu szkieletu ziarnowego (tab. 5). Największą nasiąkliwością charakteryzują się natomiast piaskowce odmiany I o drobnym uziarnieniu.

Wytrzymałość na ściskanie analizowanych próbek wynosi od 19,12 do 66,05 MPa, średnio 43,34 MPa (tab. 4). W górnych zakresach tych wartości plasują się piaskowce odmian blocznych I i III o znacznym udziale spoiwa krzemionkowego (tab. 2, tab. 4). Spośród odmian piaskowców cienko- i średnioławicowych największą wytrzymałość wykazują skały ze złoża Tresta Wesoła I i -IV oraz Mroczków Gościenny-2 i -6, zaliczane do odmian V i VII, w odróżnieniu od piaskowców odmiany VI ze złoża Kraszków-1 o słabiej zaznaczającej się regeneracji ziaren kwarcu. Na niskim poziomie kształtuje się również wytrzymałość wielobarwnych, laminowanych piaskowców odmiany II, o mniejszym udziale krzemionki i słabszym upakowaniu materiału detrytycznego. Należy podkreślić, iż wartość analizowanego parametru wykazuje szeroki przedział zmienności – odchylenie standardowe wynosi 11,22 MPa, a współczynnik zmienności 25,89% (tab. 3).

Porównując uzyskane wyniki oznaczeń z prezentowanymi w pracy (Peszet 1973) dla jurajskich piaskowców z rejonu Szydłowca, Kunowa i Podola stwierdzono, że średnie wartości gęstości objętościowej i wytrzymałości na ściskanie są zbliżone, a średnie wartości nasiąkliwości wagowej nieznacznie niższe. Z kolei w stosunku do rezultatów badań piaskowców z Szydłowca prowadzonych przez Pinińską (1994), uzyskano mniejszą nasiąkliwość, przy wyższych wartościach pozostałych parametrów. W pracy tej autorki przedstawiono również dane dotyczące ścieralności na tar-

czy Boehmego, kształtującej się na poziomie 27,5 mm, co odpowiada najwyższej spośród wydzielonych w normie PN-84/B-01080:1984 klas ścieralności. W ramach badań stanowiących przedmiot artykułu, z uwagi na ograniczoną przydatność piaskowców na okładziny poziome (znaczna nasiąkliwość, średnia wytrzymałość), zrezygnowano z oznaczenia tego parametru. Nie przeprowadzono również oznaczeń mrozoodporności, aczkolwiek na odpowiednie wartości tego parametru wskazuje dobry stan zachowania piaskowców w obiektach architektonicznych. Reasumując, przeprowadzone badania wykazały porównywalne, a czasami nawet korzystniejsze parametry techniczne analizowanych piaskowców dolnojurajskich w stosunku do odmian pozytywnych w innych miejscach eksploatacji. Korzystne właściwości fizyko-mechaniczne tych skał zweryfikowane zostały również w czasie wieloletniej, a niekiedy nawet wielowiekowej praktyki ich użytkowania.

Tab. 4. Podstawowe właściwości fizyczno-mechaniczne analizowanych odmian piaskowców
Tab. 4. Basic physico-mechanical properties of the analyzed varieties of sandstones

Parametr		Odmiany				
		I	II	III	IV	V-VII
gęstość pozorna [Mg/m ³]	wahania	1,98–2,03	1,98–2,03	2,03–2,08	1,95–2,14	2,09–2,19
	średnia arytm.	2,01	2,00	2,06	2,04	2,13
nasiąkliwość wagowa [%]	wahania	7,63–8,61	7,57–8,47	6,31–7,55	6,07–9,03	5,66–7,03
	średnia arytm.	8,12	7,95	6,89	7,39	6,32
nasiąkliwość objętościowa [%]	wahania	15,54–17,04	15,38–16,77	13,11–15,32	12,85–17,61	12,05–15,32
	średnia arytm.	16,29	15,94	14,20	15,02	13,47
wytrzymałość na ściskanie * [MPa]	wahania	48,70–48,90	21,00–45,84	19,12–65,03	26,52–50,91	27,73–66,05
	średnia arytm.	48,80	31,21	46,49	41,46	43,13

* w stanie powietrzno-suchym

Uzupełnieniem badań wytrzymałościowych są badania ultradźwiękowe prędkość fali podłużnej w stanie powietrzno-suchym i nasycenia wodą (tab. 6, 7). W każdym przypadku badania przeprowadzono w trzech kierunkach – a i b (zgodnie z uławiczeniem) oraz c (prostopadle do uławiczenia), a następnie wyniki pomiarów dla kierunków a i b uśredniono. Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie współczynnika anizotropii A , stanowiącego iloraz prędkości fali w dwóch prostopadłych kierunkach. Zróznicowanie tych parametrów stwierdzone zostało m.in. dla różnowiekowych piaskowców świętokrzyskich (Pinińska 1994), a także karpaccich ze złoża Górka-Mucharz (Dziedzic 2005). Drugim wyznaczonym parametrem był wskaźnik zmiany prędkości B , wyrażający zmianę prędkości fali podłużnej po nasyceniu wodą (Pinińska 1994), obliczony wg wzoru

$$B = \frac{V_{pH_2O} - V_{pps}}{V_{pps}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

V_{pH_2O} – prędkość propagacji fal podłużnych w stanie nasycenia wodą, [m/s],

V_{pps} – prędkość propagacji fal podłużnych w stanie powietrzno-suchym, [m/s].

Pomiary prędkości fali podłużnej dostarczają istotnych informacji o budowie wewnętrznej i niejednorodności skały. Wartość tego parametru uzależniona jest od szeregu czynników litologicznych, m.in. składu mineralnego, rodzaju spoiwa, struktury, tekstury, upakowania szkieletu ziarnowego i występującej mineralizacji (Pinińska & Płatek 2002). Istotny wpływ na tłumienie fal ultradźwiękowych, a tym samym mniejszą prędkość fali podłużnej, mają występujące w skałach pory (niska prędkość fali w powietrzu – ok. 0,3 km/s) oraz mikroszczeliny (Kanciruk 2008). Wyniki badań ultradźwiękowych wykazują związek z innymi parametrami fizyczno-mechanicznymi skał, tj. wzrastają wraz ze wzrostem gęstości i wytrzymałości na ściskanie, a spadają wraz z rosnącą nasiąkliwością (Pinińska & Płatek 2002).

Wyniki badań ultradźwiękowych wykazują szeroki przedział zmienności. Na podstawie pomiarów prędkości propagacji fali podłużnej na próbkach suchych w kierunku prostopadłym do uławicenia skały ustalono, że wartość tego parametru w analizowanych piaskowcach zmienia się w przedziale 1587–3446 m/s. W kierunku równoległym uzyskano wartości średnio o 6% wyższe (tab. 6). Współczynniki zmienności wynoszą odpowiednio 18% i 19%. Najwyższą prędkość fali podłużnej posiadają piaskowce odmiany III i IV oraz V–VII, co potwierdza ich korzystne właściwości stwierdzone podczas oznaczeń gęstości, nasiąkliwości i wytrzymałości na ściskanie. Są to skały o stosunkowo ściśle upakowanym szkielecie ziarnowym i większej ilości krzemionkowego spoiwa. Wyjątek stanowią piaskowce ze złoża Kraszków-1; wysokie wartości tego parametru wiązać można z dużą zawartością związków żelaza. Najmniejszą prędkość fali podłużnej odnotowano dla piaskowców odmiany II, o najslabszych parametrach wytrzymałościowych. Największe różnice prędkości w zależności od kierunku pomiaru stwierdzono w piaskowcach odmiany I i II (wzrost w kierunku zgodnym z uławiceniem o ok. 10%), najmniejsze w piaskowcach odmiany III o bardzo drobnym uziarnieniu i ścisłym upakowaniu składników ziarnowych (wzrost o ok. 3%). Kierunkowa zmienność propagacji fali ultradźwiękowej w analizowanych piaskowcach, związana jest głównie z występującą laminacją oraz różnym stopniem upakowania składników ziarnowych.

Po nasyceniu próbek wodą, w której fala ultradźwiękowa uzyskuje znacznie większą prędkość niż w powietrzu, otrzymane wyniki pomiarów są na ogół wyższe. Stwierdzono wzrost o średnio 5,2% w kierunku prostopadłym do uławicenia i o 0,2%

w kierunku równoległym, przy bardzo wysokich wartościach współczynnika zmienności (tab. 5). Wyjątek stanowią piaskowce odmian I, II i VI, charakteryzujące się spadkiem prędkości fali podłużnej mierzonej w obu kierunkach. Warto podkreślić, iż są to skały o na ogół najsłabszych spośród analizowanych odmian właściwościach technicznych. Przyczyną obniżenia prędkości fal ultradźwiękowych próbek nasączonych wodą może być występowanie w spoiwie skały minerałów ilastych (Bały 2009).

Poziomem odniesienia dla uzyskanych prędkości są wyniki badań dolnojurajskich piaskowców z Szydłowca (Pinińska 1994); 2691–3510 m/s, a także 3355–3798 m/s (Kłopotowska 2011). Spośród odmian blocznych najbliższej tych wartości są piaskowce odmiany III.

Tab. 5. Zmienność prędkości propagacji fali podłużnej w piaskowcach z analizowanych złóż
 Tab. 5. Variability of the longitudinal wave velocity of Ostrowiec Fm. sandstones from examined deposits

Parametr	Prędkość fali podłużnej V_p [m/s], współczynnik anizotropii A					
	w stanie powietrzno-suchym			po nasyceniu H_2O		
	$V_{p\perp}$	$V_{p\parallel}$	A	$V_{p\perp}$	$V_{p\parallel}$	A
wartość minimalna	1587	1648	0,76	1075	1158	0,80
wartość maksymalna	3446	3779	1,14	3874	3869	1,32
średnia arytmetyczna	2652	2779	0,94	2779	2825	1,03
odchylenie standardowe	481,32	522,89	0,08	705,82	660,02	0,11
współczynnik zmienności [%]	18,15	18,82	8,51	25,40	23,36	10,68

Tab. 6. Prędkość propagacji fali podłużnej w analizowanych odmianach piaskowców, [m/s]
 Tab. 6. Longitudinal wave velocity in the analysed varieties of sandstones

Parametr			Odmiany				
			I	II	III	IV	V–VII
stan powietrzno-suchy	$V_{p\perp}$	wahania	2044–2206	1587–2058	2080–3446	1874–3007	1861–3129
		średnia arytm.	2125	1764	2820	2592	2616
	$V_{p\parallel}$	wahania	2356–2520	1992–2097	2074–3779	1648–3459	2282–3209
		średnia arytm.	2438	2057	3054	2723	2710
po nasyceniu wodą	$V_{p\perp}$	wahania	1776–1847	1075–1887	2323–3639	2639–3875	1703–3305
		średnia arytm.	1812	1425	3101	3121	2789
	$V_{p\parallel}$	wahania	2047–2342	1158–1819	2304–3869	2661–3796	2169–3183
		średnia arytm.	2195	1524	3179	3175	3183

4. PODSUMOWANIE

W rejonie Opoczna i Żarnowa rozpoznano dotychczas 23 złoża piaskowców formacji ostrowieckiej. Udokumentowane w nich kopaliny wykazują zróżnicowane przydatności do produkcji elementów architektonicznych. W artykule przedstawiono zależności między wykształceniem litologicznym piaskowców, ich składem petrograficznym oraz właściwościami fizyko-mechanicznymi. Zespół tych czynników decyduje o jakości kopaliny i możliwościach jej gospodarczego wykorzystania. Na podstawie zmienności uławicenia, cech teksturalno-strukturalnych, zwięzłości skały i jej barwy wyróżniono 7 odmian użytkowych piaskowców, w tym cztery odmiany bloczne. Pozostałe 3 odmiany, wykazują przydatność do produkcji cienkich kształtek wykorzystywanych głównie w architekturze ogrodowej. Przeprowadzone badania wykazały, iż mimo zróżnicowania pod względem cech wizualnych piaskowce charakteryzują się na ogół stałym składem petrograficznym. Są to skały niemal monomineralne, zbudowane z kwarcu (64–88%), lokalnie z większą domieszką okruchów skał (do 4% w odmianie I), łyszczyków (do ok. 7% w gruboziarnistych pyłowcach odmiany IV) i minerałów ciężkich (w odmianie III koncentrujących się w formie lamin). Ustalono, że o właściwościach fizyczno-mechanicznych tych skał decyduje przede wszystkim zmienny udział spoiwa krzemionkowo-ilasto-żelazistego, wielkość ziaren budujących szkielet ziarnowy i ich upakowanie oraz stopień wysortowania skały (najlepszy w piaskowcach odmiany II i III, najślabszy w odmianie VII). Przeprowadzone badania gęstości pozornej, nasiąkliwości, wytrzymałości na ściskanie oraz prędkości fali podłużnej pozwoliły na wskazanie odmian o najkorzystniejszych właściwościach technicznych. Są to dwie odmiany piaskowców blocznych (jasnoszare, bezstrukturalne oraz jasnoszare i jasnożółte, laminowane poziomo i przekątnie) ze złóż Sielec I, Sielec II, Żarnów 1, Tresta Wesoła I oraz dwie odmiany piaskowców cienko- i średnioławicowych, ze złóż Tresta Wesoła I, - IV i Mroczków Gościny-2 i -6 (jasnoszare i żółte o poziomej i przekątnej laminacji).

LITERATURA

- BAŁA M., 2009, *Badanie wpływu anizotropii i zasilenia na prędkości rozchodzenia się fal podłużnych i poprzecznych oraz innych parametrów sprężystych skał klastycznych*, Zeszyty Naukowe AGH, Geologia, t. 35, z. 2/1.
- Bilans zasobów złóż kopaliny w Polsce wg stanu na 31.12.2014 r.*, Wyd. PIG-PIB, Warszawa 2015 (i wydania wcześniejsze).
- DZIEDZIC A., 2005, *Ocena cech strukturalnych piaskowców krośnieńskich z Mucharza (Beskid Mały) na podstawie pomiarów prędkości fali podłużnej*, Przegląd Geol., t. 53, nr 7.
- GUZIK K., 2013, *Zróżnicowanie litologiczne piaskowców jurajskich i kredowych NW obrzeżenia Gór Świętokrzyskich w kontekście ich przydatności w budownictwie*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa PWr., Górnictwo i Geologia nr 136, Studia i Materiały nr 43, 73–83.

- GUZIK K., 2015, *Piaskowce formacji ostrowieckiej północno-zachodniego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich – zmienność litologii i parametrów fizyczno-mechanicznych, a możliwości surowcowego wykorzystania*, Zeszyty Naukowe IGSMiE PAN, nr 92 (w druku).
- KANCIRUK A., 2008, *Metoda pomiaru prędkości fal ultradźwiękowych w próbkach skalnych podczas testów laboratoryjnych*, Kwartalnik AGH, Górnictwo i Inżynieria, r. 32, z. 1.
- KŁOPOTOWSKA A.K., 2011, *Odporność piaskowca szydłowieckiego na krystalizację soli w aspekcie wzmacniania strukturalnego*, Górnictwo i Geoinżynieria, r. 35, z. 2.
- KOZYDRA Z., 1961, *Geologiczne warunki występowania surowców skalnych w dolnej jurze północnego obrzeżenia Gór Świętokrzyskich*, Kwart. Geol., t. 5, nr 4, Warszawa.
- KRYSTEK M., 2009, *Badania petroarcheologiczne i petroarchitektoniczne romańskich kościołów w Inowłodzu i Żarnowie*, Przegląd Geol., t. 57, nr. 4.
- MIDAS, 2016, *Baza danych PIG-PIB*, Warszawa.
- PESZAT C., 1973, *Właściwości techniczne piaskowców Gór Świętokrzyskich*, Zeszyty Naukowe AGH, nr 378, Geologia, z. 18.
- PETTIJOHN F.J., POTTER P.E., SIEVER R., 1972; 1987, *Sand and sandstone*, Springer-Verlag, New York.
- PIEŃKOWSKI G., 2004, *The epicontinental Lower Jurassic of Poland*, Polish Geol. Inst. Spec. Papers, 12.
- PINIŃSKA J. (red.), 1994, *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał, cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego*, Zakład Geomechaniki UW.
- PINIŃSKA J., PŁATEK P., 2002, *Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałości skał*, Górn. Odkr. nr 2–3.
- PN-84/B-01080:1984 *Kamień dla budownictwa i drogownictwa. Podział i zastosowanie wg własności fizyko-mechanicznych*.
- PN-EN 1926:2001 *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie wytrzymałości na ściskanie*.
- PN-EN 13755:2008 *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym*.
- TEOFILAK-MALISZEWSKA A., 1968, *Petrografia osadów liasu w północnym obrzeżeniu Gór Świętokrzyskich*, Inst. Geol. Biul., 216, Warszawa.
- WALENDOWSKI H., 2015, *Piaskowce z Sielca*, Nowy Kamieniarz, nr 84.
- ZŁONKIEWICZ Z., 2006, *Charakterystyka litologiczna. Jura dolna*, [w:] Kowalczewski Z., (red.), *Profilę głębokich otworów wiertniczych PIG*, Opoczno, PIG 2, z. 111.
- ZŁONKIEWICZ Z., 2013, *Struktury sedymentacyjne w piaskowcach żarnowskich (formacja ostrowiecka, dolny synemur) w Sielcu koło Żarnowa (zachodnie obrzeżenie Gór Świętokrzyskich)* [w:] Krobicki M., Feldman-Olszewska (red.), V Polska Konferencja Sedymentologiczna, POKOS.

OSTROWIEC FORMATION SANDSTONES FROM OPOCZNO AND ŻARNÓW AREA AS AN ARCHITECTURAL STONE

Ostrowiec Fm. sandstones extracted from numerous deposits situated on the North-East of Opoczno and South-West of Żarnów, exhibit various quality and suitability as an architectural stone. In the nine of the analyzed quarries seven varieties of sandstones has been distinguished. They were described in terms of lithology, petrographic composition as well as physic-mechanical properties. On the basis of these research the sandstone varieties of the best technical qualities has been indicated.

Keywords: *architectural sandstones, lithology, properties*