

## OCENA MIKROSTRUKTUR KIERUNKOWYCH I ICH ZNACZENIE DLA WŁAŚCIWOŚCI TECHNICZNYCH PIASKOWCÓW

### DIRECTIONAL MICROSTRUCTURES AND TECHNICAL PROPERTIES OF SANDSTONES

Beata Figarska-Warchoń, Grażyna Stańczak - WGGiOŚ, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*Badaniom poddano przykładowe piaskowce, różniące się genezą i wykształceniem, w celu określenia wpływu mikrostruktur kierunkowych na ich właściwości. Dla pobranych prób przeprowadzono obserwacje petrograficzne oraz wykonano badania właściwości fizycznych i mechanicznych. Mikrostruktury kierunkowe objawiały się występowaniem w próbach wydłużonych ziaren ułożonych w preferowanych kierunkach, obecnością laminacji równoległej bądź przekątnej, związanej z wysortowaniem ziaren i laminarnym nagromadzeniem substancji spoiwa czy mikrospękań lub ich wtórnych wypełnień. Próbką ilościowej oceny wymienionych cech było określenie poza graficznymi parametrami uziarnienia, także wskaźnika kształtu ziaren kwarcu. Badania prędkości fal podłużnych i ścieralności na tarczy Boehmego przeprowadzone na zorientowanych sześciennych próbkach wykazały istnienie anizotropii tych parametrów, co powiązano z obecnością struktur liniowych. Przedstawiono wartości współczynnika anizotropii także dla innych kierunkowo uwarunkowanych właściwości, przewidując zależność pomiędzy jego wielkością a zdolnością pęknięcia i niszczenia skały wzdłuż preferowanych powierzchni.*

**Słowa kluczowe:** piaskowce, mikrostruktura kierunkowa, wskaźnik kształtu, prędkość fal ultradźwiękowych, ścieralność, wytrzymałość na ściskanie, anizotropia

*Sandstones of different genesis and development were studied with the aim of establishing an impact of directional microstructures on rock properties. The investigations included petrographical observations and physico-mechanical determinations. The microstructures were manifested in the presence of elongated grains arranged along preferred directions, in the parallel or diagonal lamination resulting from grain sorting and laminar accumulation of cement substances, and also in microfractures filled with secondary mineral substances. An attempt of quantitative estimation of these characteristics was achieved by calculation of the shape index of quartz grains, besides the graphic grain-size parameters. Measurements of the velocity of ultrasonic waves and abrasion resistance of the sandstones using Böhme tests conducted on oriented sandstone cubes have revealed an anisotropy of the rock properties, which has been attributed to the presence of linear structures of the sandstones. The values of the anisotropy coefficient have also been established for other, directionally controlled rock properties, predicting the dependence between this coefficient and the fracturing and damaging of sandstones along preferred surfaces.*

**Keywords:** sandstones, directional microstructures, shape index, velocity of ultrasonic waves, abrasion resistance, compressive strength, anisotropy

#### Wstęp

Anizotropia jest cechą skał znaną ludziom od niepamiętnych czasów, manifestowaną przede wszystkim poprzez różny charakter zniszczeń odmiennie zorientowanych płaszczyzn kamienia. Rozpad skał wzdłuż płaszczyzn nieciągłości o intensywności zależnej od kierunku wykorzystywany był w celach czysto praktycznych do wznoszenia budowli z izometrycznych bloków lub płaskich płyt w zależności od zapotrzebowania. W polskiej literaturze geologicznej jednym z pierwszych, który zwrócił uwagę na zależność pomiędzy wytrzymałością na ściskanie a kierunkiem pomiaru w próbach opok senońskich był Kowalski [16]. W związku ze stwierdzonymi zależnościami obecne ustalenia normatywne wymagają wykonywanie niektórych badań na ściśle zorientowanych ścianach próbek.

Anizotropię ciosową, związaną z tektonicznymi naprężeniami masywu i ich wpływem na właściwości wytrzymałościowe opisała dla piaskowców Boretti-Onyszkievicz już w 1968 r. [1]. Jej obserwacje potwierdzone zostały późniejszymi

badaniami [7, 9, 20], wykorzystującymi m. in. przejście przez próbkę fal ultradźwiękowych. Znaczenie anizotropii ciosowej skał na właściwości uzyskiwanych z nich kruszyw łamanych zostało omówione w pracach Bromowicza i Figarskiej-Warchoń [3, 13]. Czynniki wpływającymi w istotnym stopniu na anizotropię wielu właściwości są cechy strukturalne skały, do których przede wszystkim należy sposób wykształcenia i ułożenie jej składników. Wpływ anizotropii strukturalnej na uzyskiwane wyniki badań jest częstym problemem podejmowanym w pracach wielu autorów [9, 10, 22–27].

Stopień ujawniania się struktur kierunkowych wyraża się w przypadku różnych badań w wielkości anizotropii uzyskiwanych wyników. Można zatem zakładać, że od wielkości współczynnika anizotropii zależeć będzie zdolność skały do pęknięcia wzdłuż preferowanych powierzchni, najczęściej, choć nie zawsze, równoległych do płaszczyzn uławicenia. W celu oceny takiej zależności przeprowadzono badania kilku parametrów petrograficznych i fizyczno-mechanicznych dla próbek piaskowców, pochodzących z różnych genetycznie złóż.

## Pochodzenie materiału do badań

Materiał do badań pochodził z trzech złóż piaskowców o zróżnicowanej genezie. Ich wspólną cechą była obecność widocznych struktur kierunkowych, wyrażających się przede wszystkim laminacją. Z niecki śródsudeckiej ze złoża Bieganów pochodziły piaskowce wieku dolnego czerwonego spągowca, reprezentujące fluwialne osady piaskowca budowlanego [11, 15], a z obrzeżenia Gór Świętokrzyskich ze złoża Tumlin-Gród pobrano próby eolicznych osadów dolnego pstrego piaskowca, wchodzące w skład formacji zagnańskiej [12, 15]. Materiał badawczy reprezentowały także próby piaskowca fliszowego jednostki śląskiej ze złoża Sobolów należące do piaskowców istebniańskich dolnych [19, 21].

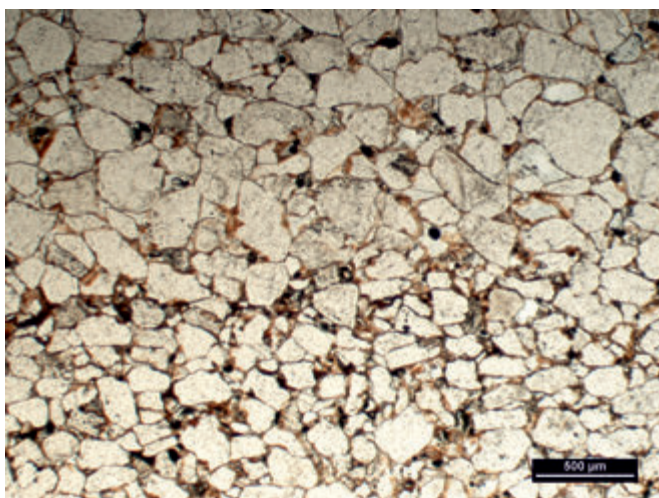
Poszczególne próbki z każdego złoża reprezentowały tę samą odmianę litologiczną. Z próbek wycięto zorientowane w stosunku do uławicenia sześciiany o boku 5 cm, wykonując dla nich obserwacje makro- i mikroskopowe oraz wykorzystując je do określenia podstawowych właściwości fizycznych, prędkości fal podłużnych i ścieralności na tarczy Boehmego. Przyjęto w pracy następujące oznaczenia ścian: A i B – ściany próbki prostopadłe do uławicenia, C – ściana leżąca w płaszczyźnie równoległej do uławicenia.

## Wykształcenie petrograficzne prób

Próbki ze złoża Bieganów i Tumlin reprezentują laminowane poziomo drobno- i średnioziarniste piaskowce o czerwonych barwach, bardziej intensywnych w przypadku pierwszego złoża (rys. 1). Laminy, zarówno w piaskowcach dolnośląskich, jak i tumlińskich uwiadcniają się w wyniku zmian zabarwienia, z którymi wiąże się zróżnicowanie uziarnienia poszczególnych warstewek. Generalnie laminy o jaśniejszych barwach są grubiej uziarnione, natomiast laminy ciemniejsze zawierają drobniejszą frakcję ziarnową (rys. 2), ponadto te pierwsze są bardziej miększe. W przypadku piaskowców z Bieganowa laminy jaśniejsze (jasno wiśniowo-czerwone) mają grubość 1–13 mm, a ich granice są niewyraźne (rozmyte). Materiał okruskowy je budujący, którego wielkość waha się w zakresie 0,2–0,3 mm jest słabiej obtoczony i gorzej wysortowany. Natomiast w próbce piaskowca z Tumlina laminy jasne (barwy szaroczerwone) o grubościach 1–10 mm są bardziej regularnie rozłożone, posiadają znacznie bardziej czytelne granice, zaś materiał detrytyczny je budujący, wielkości 0,3–0,5 mm, jest zdecydowanie lepiej obtoczony i wysortowany w porównaniu z materiałem jasnych lamin piaskowca z Bieganowa. Z kolei laminy ciemniejsze w obu omawianych próbkach piaskowców dolnośląskiego i tumlińskiego, są drobniej uziarnione, bogat-



Rys. 1. Makroskopowa struktura próbek piaskowców  
Fig. 1. Macroscopic structure of sandstone samples



Rys. 2. Piaskowiec z Tumlina przy nikolach równoległych. Widoczne laminy: ciemna (drobniejsze ziarna) w dolnej części zdjęcia i jasna (grubsze ziarna) w górnej części  
Fig. 2. Tumlin sandstone in plane-polarized light. Dark-coloured lamina with finer grains (lower part of the photograph) and light-coloured lamina with coarser grains (upper part of the photograph)

sze we frakcję matriks, ziarna detrytyczne w tych laminach są gorzej obtoczone, ale względnie lepiej wysortowane w porównaniu do odpowiednich lamin jasnych tych próbek. Mięszkość lamin ciemnych jest mniejsza w porównaniu do warstewek jasnych, odpowiednio 2–8 mm (próbka z Bieganowa) oraz 0,5–3 mm (próbka z Tumlina), zaś wielkość materiału okruskowego zgromadzonego w tych laminach zmienia się w zakresie 0,15–0,25 mm dla obu próbek.

Skład mineralny materiału okruskowego piaskowca tumlińskiego jest zdominowany przez ziarna kwarcu, których sumaryczny udział sięga 80%, w podrzędnej ilości pojawiają się okruchy krzemionkowych skał osadowych (do 4%) oraz ziarna minerałów ciężkich (ok. 0,5%) i blaszki łuszczyków (ok. 0,5%). Ziarna zarówno grubszych, jak i drobniejszych frakcji są w większości wydłużone i dłuższą osią ułożone równolegle do przebiegu lamin.

Spoivo piaskowców tumlińskich głównie żelazisto-ilaste z domieszką krzemionki formuje cienkie obwódki otaczające ziarna detrytyczne. Jego obecność zaznacza się na kontaktach głównie prostych i punktowych pomiędzy ziarnami, a

częściowo pojawia się również w porach międzyziarnowych, jednak przy wklęsło-wypukłych i ząbwiących kontaktach ziaren obwódki żelazisto-ilaste zanikają. W laminach drobniej uziarnionych (ciemniejszych) udział tego spoiwa jest wyższy (spoiwo kontaktowo-porowe), natomiast jasne warstewki o grubszym ziarnie zawierają mniejsze jego ilości (spoiwo głównie kontaktowe), przy równoczesnym większym udziale wolnych porów (5–9%).

W próbce piaskowca z Tumlina zaznacza się bardzo jasna lamina miąższości 2–3 mm, w której ziarna kwarcu, obleczone powłoką żelazistą, spojone są obfitym regeneracyjnym cementem kwarcowym, zaś okruchy skał krzemionkowych posiadają jedynie powłokę żelazistą (bez obwódki kwarcowej). Przeważnie składniki detrytyczne tej laminy zawieszono są w cemencie kwarcowym (ziarna „pływające”), znacznie rzadziej kontaktują się punktowo lub prosto za pośrednictwem obwódek żelazistych.

Skład mineralny materiału detrytycznego piaskowca z Bieganowa jest bardziej urozmaicony, gdyż oprócz ziaren kwarcu, których udział jest mniejszy i sięga ok. 66%, występują skaleni potasowe oraz plagioklasy (łączna zawartość ok. 15%), a także okruchy skał obcych (ok. 10%) i łyszczyki (ok. 1%). Wśród okruchów skał obcych zarejestrowano gnejsy, łupki kwarcowo-łyszczykowe oraz podrzędnie okruchy skał krzemionkowych. Zwiertzałe ziarna skaleni obleczone cienką powłoką żelazistą zazwyczaj otoczone są regeneracyjną obwódką skaleniową. Regeneracja silnie rozwija się na ziarnach skaleni potasowych, w mniejszym stopniu na plagioklazach, na których obwódki te są znacznie cieńsze i nie w pełni rozwinięte. Podobnie ziarna kwarcu otoczone są rdzawą obwódką żelazistą, wokół której rozwija się regeneracyjna otoczka kwarcowa, bardzo często szczątkowa.

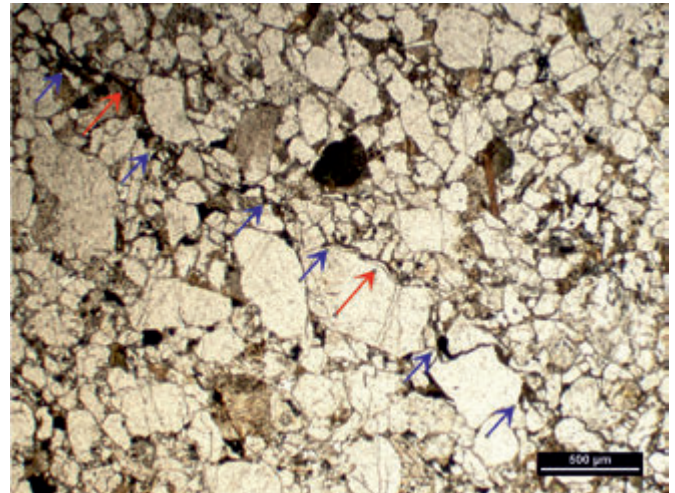
Spoivo piaskowców z Bieganowa jest polimineralne: przeważa ilościowo składnik żelazisty, nad autigenicznym skaleniem i kwarcem. W laminach ciemnych zwiększa się ilościowy udział spoiwa żelazistego, które nie tylko tworzy obwódki ale wypełnia pory międzyziarnowe (spoiwo kontaktowo-porowe).

Charakterystyczne jest występowanie w środkowych częściach ciemniejszych lamin cienkich warstewek, zbudowanych z dużych ziaren o wielkościach dochodzących do ok. 1 mm. W ich składzie zauważa się znaczny wzrost udziału skaleni i osadowych okruchów skał krzemionkowych, ułożonych często równoległe swoimi dłuższymi osiami do powierzchni laminacji.

Próbki ze złoża Sobolów reprezentują szaro żółtawozielonkawy, drobnoziarnisty piaskowiec, stanowiący najbardziej jednorodną skałę. Na wszystkich powierzchniach próbek, w szczególności na równoległych do uławicenia połyskują niewielkie (max. 1 mm) blaszki mik. Strukturę skały urozmaica jedynie obecność ciemnoszarych, cienkich smug o charakterze warstwowania przekątnego rynnowego, podkreślających prawdopodobnie granice nakładających się na siebie riplemarków prądowych.

W obrazie mikroskopowym zaobserwowano bardzo cieniutkie warstewki o wyraźnie zwiększonym nagromadzeniu związków żelaza i minerałów ilastych, któremu towarzyszą niekiedy drobne i cienkie blaszki łyszczyków. Te ilasto-żelaziste laminy mają charakter szwu stylolitowego o zmiennej miąższości (0,1–0,5 mm) i zygzakowatym przebiegu, który często na styku sąsiadujących ze sobą ziaren kwarcu kontynuuje się

jako ząbwiący kontakt międzyziarnowy. Generalnie przebieg takiej ilasto-żelazistej strefy stylolitowej jest ukośny względem uławicenia. Ponadto, większe ziarna o wydłużonych kształtach dłuższymi osiami ułożone są równoległe do tej ukośnie biegnącej strefy ilasto-żelazistej (rys. 3).



Rys. 3. Piaskowiec z Sobolowa przy nikolach równoległych. Widoczny przebieg ciemnej smugi podkreślonej nagromadzeniami związków żelaza (niebieskie strzałki) i ułożeniem wydłużonych ziaren oraz blaszek łyszczyków (czerwone strzałki)

Fig. 3. Sobolów sandstone in plane-polarized light. Dark streak in the rock is expressed by accumulations of iron compounds (blue arrows) and orientation of elongated grains and mica flakes (red arrows)

Skład mineralny składników szkieletowych tej skały jest najbardziej urozmaicony, gdyż oprócz ziaren kwarcu (ok. 60%), skaleni (ok. 6%), minerałów akcesorycznych (do 0,5%) oraz blaszek łyszczyków (biotytu, muskowitu i chlorytu, łącznie 6%) pojawia się glaukonit (ok. 4%), a wśród okruchów skał obcych (łącznie 7%) rozpoznano klasty kwarcowo-skaleniowe, gnejsy, łupki łyszczykowe, kwarcowo-łyszczykowe i serycytowe oraz okruchy piaskowców i skał krzemionkowych.

Spoivo piaskowców z Sobolowa jest ilasto-krzemionkowe, przy czym przeważa składnik ilasty nad krzemionką. Na ziarnach kwarcu rozwinęły się w postaci wyrostków (*outgrowths*) zaczątkowe formy obwódek regeneracyjnych. Natomiast minerały ilaste, którym towarzyszą związki żelaza tworzą cieniutkie otoczki na składnikach okruchowych i wypełniają pory międzyziarnowe (spoiwo kontaktowo-porowe). Niekiedy rolę spoiwa przejmują skompaktowane ziarna glaukonitu.

Uwagę zwraca również słabe wysortowanie materiału okruchowego piaskowców z Sobolowa widoczne dopiero pod mikroskopem. Wśród przeważających okruchów o wielkości 0,15–0,20 mm tkwią zarówno bardzo drobne ziarna, jak i ziarna o wielkości 1,0–1,6 mm. Wśród tych największych spotyka się głównie kwarc, rzadziej fragmenty skał obcych, takich jak granitoidy, skały krzemionkowe, a podrzędnie skalenie. Stopień obtoczenia tych większych okruchów jest z reguły lepszy niż tych drobnych. Duże ziarna kwarcu przecinają liczne spękania o pionowej orientacji.

### Wyniki badań granulometrycznych i wskaźnika kształtu

Dla prób pochodzących z poszczególnych złóż dokonano analizy wielkości oraz kształtu ziaren. Wykorzystano do tego celu szlify mikroskopowe wykonane w płaszczyznach prostopadłej (A, B) i równoległej (C) do uławicenia. Pomiar wykonywano dla maksymalnej i odpowiadającej jej prosto-

padłej średnicy ziaren przy pomocy kamery Nikon DS-Fi1 i oprogramowania do analizy obrazu NIS-Elements BR. Dla maksymalnych średnic ziaren obliczono parametry rozkładu wielkości ziarna w oparciu o wzory Folka i Warda [14]. Wykorzystując także pomiary drugiej średnicy wyznaczono wskaźnik kształtu (WK) dla ziaren jako stosunek krótszej osi do dłuższej, nawiązując częściowo do wskaźników zaproponowanych przez Zingga [33]. Uzyskana wielkość mogła przyjmować wartość maksymalną 1 dla ziaren izometrycznych lub dążyć do zera dla ziaren wydłużonych w widocznym przekroju. Dzięki temu umożliwiono ocenę ilościową cechy, którą zwykle określa się w płytkach cienkich wizualnie, korzystając z wzorców dwuwymiarowej kulistości Krumbein'a [18].

Dla prób ze złoże Bieganów pomiary maksymalnej średnicy i wskaźnika kształtu wykonano metodą punktową (150 pomiarów) w regularnej siatce dla wszystkich obserwowanych ziaren kwarcu, reprezentującego zarówno mono-, jak i polikrystaliczne osobniki (tab. 1). Za wyborem tego składnika przemawiał jego przeważający udział w składzie mineralno-petrograficznym w piaskowcach oraz łatwa identyfikacja ziaren tego minerału.

wysortowanie. Najwyższym wysortowaniem (umiarkowanie dobrym do dobrego) odznaczają się piaskowce z Tumlina, zwłaszcza w szlifie zorientowanym równolegle do płaszczyzny uławicenia, a więc obejmującym jedną tylko laminę. Wielkość ziaren w piaskowcach z tego złoże mieści się w granicach 1–2,5 $\Phi$  (0,18–0,50 mm) i parametr ten charakteryzuje się rozkładem jednomodalnym w obrębie pojedynczej laminy lub wielomodalnym, jeśli analizowany jest przekrój obejmujący ich zestaw. W obu przypadkach zaznacza się prawostronna skośność rozkładów, związana z obecnością pomiędzy większymi ziarnami nieznacznej ilości drobnych frakcji przy braku ziaren większych od 0,6 mm.

Porównując wyniki wykonane dla dwóch, różnie zorientowanych szlifów stwierdzono, że w każdym przypadku średnia wielkość ziarna, wyrażona parametrem GSS, jest wyższa w przekrojach równoległych do uławicenia (C), co wynika z układania się wielu ziaren równolegle do laminacji i późniejszych pomiarów ich największych osi, co nie zawsze jest spełnione w płaszczyźnie poprzecznej (A).

Wysortowanie (parametr GSO) mierzone w przekroju C jest wyższe niż w przekroju A tylko w laminowanych, eolicz-

Tab. 1. Parametry rozkładu wielkości ziarna i wskaźnik kształtu ziaren dla prób piaskowców

Tab. 1. Parameters of the grain-size distribution and the shape index of grains of the sandstones tested

Próbki ze złoże	Bieganów (A)	Bieganów (C)	Tumlin (A)	Tumlin (C)	Sobolów (A)	Sobolów (C)	
Orientacja szlif	⊥		⊥		⊥		
Min [ $\Phi$ ]	0,48	0,57	0,65	0,76	-0,44	-0,71	
Max [ $\Phi$ ]	4,61	4,06	4,97	3,51	4,37	3,60	
Moda [ $\Phi$ ]	2,25	1,75; 1,13; 2,38	1,63; 2,63, 4,40	1,63	1,70; 2,30; 0,70; 3,30	1,90; 2,50; 3,50	
GSS [ $\Phi$ ]	2,30	1,95	1,91	1,71	1,77	1,70	
GSO [ $\Phi$ ]	0,63	0,67	0,72	0,51	0,93	0,97	
GSK	0,25	0,06	0,31	0,20	-0,01	-0,23	
WK	dla szlif	0,231–0,986 0,619	0,185–0,991 0,641	0,200–0,990 0,625	0,152–0,986 0,653	0,258–0,994 0,661	0,253–0,993 0,690
	dla frakcji grubszej	0,421 $\Phi < 1,2$	0,620 $\Phi < 1,2$	0,571 $\Phi < 1,2$	0,578 $\Phi < 1,2$	0,639 $\Phi < 0,5$	0,675 $\Phi < 0,5$
	dla frakcji średniej	0,619 $1,2 \leq \Phi < 3,0$	-	0,632 $1,2 \leq \Phi < 2,3$	0,672 $1,2 \leq \Phi < 2,3$	0,654 $0,5 \leq \Phi < 3,2$	0,693 $0,5 \leq \Phi < 3,2$
	dla frakcji drobniejszej	0,701 $\Phi \geq 3,0$	0,644 $\Phi \geq 1,2$	0,631 $\Phi \geq 2,3$	0,619 $\Phi \geq 2,3$	0,798 $\Phi \geq 3,2$	0,679 $\Phi \geq 3,2$

Objaśnienia: Orientacja szlif prostopadła (⊥) i równoległa do uławicenia (||). GSS – graficzna średnica ziarna. GSO – graficzne odchylenie standardowe  
GSK – graficzna skośność. WK – wskaźnik kształtu

Explanations: Orientation of thin section: perpendicular to bedding (⊥) and parallel to bedding (||). GSS – graphic dimension of grains.  
GSO – graphic standard deviation. GSK – graphic skewness. WK – shape index

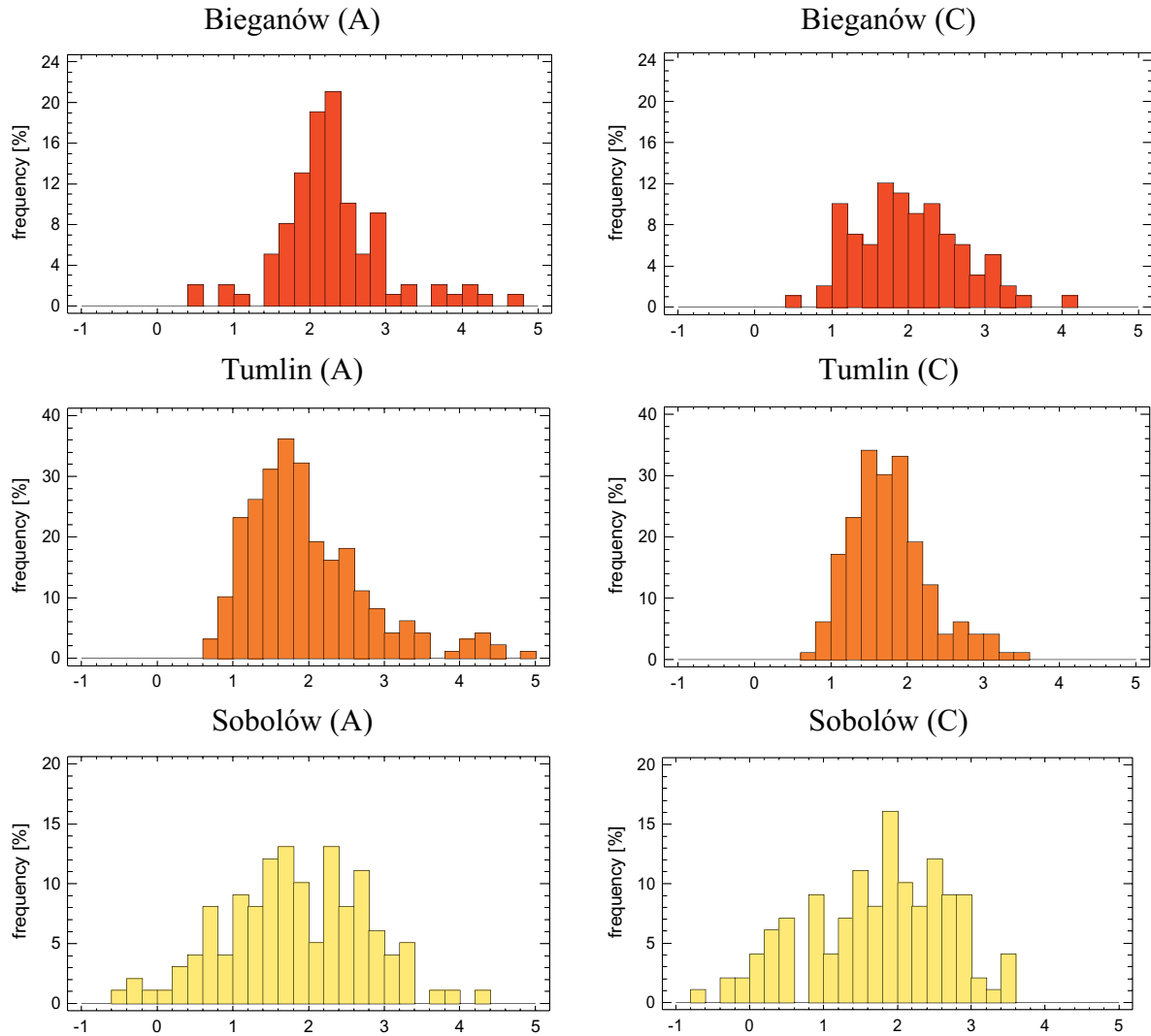
Uzyskane w trakcie pomiarów wielkości ziaren wahały się od frakcji bardzo grubego piasku –0,71 $\Phi$  (1,63 mm) do gruboziarnistego pyłu ok. 5 $\Phi$  (0,031 mm), przy czym najszerszym zakresem średnic charakteryzował się materiał ze złoże Sobolów. O ich zróżnicowanych wielkościach świadczy najwyższa spośród wszystkich wartości graficznego odchylenia standardowego (GSO) bliska 1, odpowiadająca wysortowaniu umiarkowanemu na granicy ze złym. Z kolei graficzna średnia średnica ziarna (GSS), jak i uzyskany rozkład wskazują na obecność najgrubszego materiału klastycznego w tych właśnie piaskowcach. Najmniejszą wielkością ziarna (GSS dla kwarcu w granicach 1,95–2,30) charakteryzują się piaskowce ze złoże Bieganów, jednocześnie wykazując umiarkowanie dobre

nych piaskowcach z Tumlina, w których budowie wewnętrznej zaznacza się wyraźne zróżnicowanie w wielkości ziarna w kolejnych, równoległych laminach. W pozostałych przypadkach jest odwrotnie, choć różnice w wartościach GSO uzyskiwane dla szlifów A i C nie są duże. W szlifach z Sobolowa może to wynikać z przecinania zarówno powierzchnią A, jak i C wielu płaszczyzn laminacji rynnowej i obserwowanie dzięki temu zróżnicowanych przekrojów ziaren kwarcu. Natomiast w przypadku Bieganowa wpływ na taki wynik może mieć zmienna orientacja ziaren kwarcu w stosunku do płaszczyzn laminacji lub, tak jak w innych próbach, przecinanie płaszczyzną C przypadkowej laminy, które w tych piaskowcach mają dużo bardziej zróżnicowane uziarnienie niż w Tumlinie.

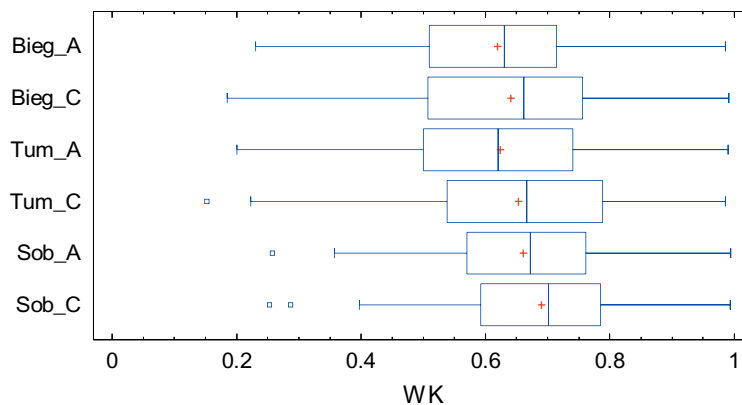
Analiza skośności rozkładów nasuwa spostrzeżenie, o przesunięciu wartości parametru GSK od pozytywnych skośności, mierzonych dla przekroju A, do mniej pozytywnych lub nawet negatywnych mierzonych w płaszczyźnie C (rys. 4). Wynika to z możliwości obserwacji frakcji najdrobniejszych w płaszczyznach równoległych do uławicenia, przecinających zróżnicowane frakcyjnie laminy i jednocześnie pomiar długości osi ziaren widocznych niejednokrotnie w takiej płaszczyźnie

w swoim najmniejszym przekroju. Koreluje się to ze wspomnianym wyżej wzrostem wartości GSS dla płaszczyzny C, co oznacza ogólne zwiększenie wielkości widocznych wówczas ziaren.

Wartości wskaźnika kształtu (WK) obliczono, tak jak w przypadku graficznych parametrów uziarnienia tylko dla ziaren kwarcu (rys. 5), przyjmując że ich duży udział wpływa zasadniczo na wartość WK dla całej próby. Należy jednak zaznaczyć, że

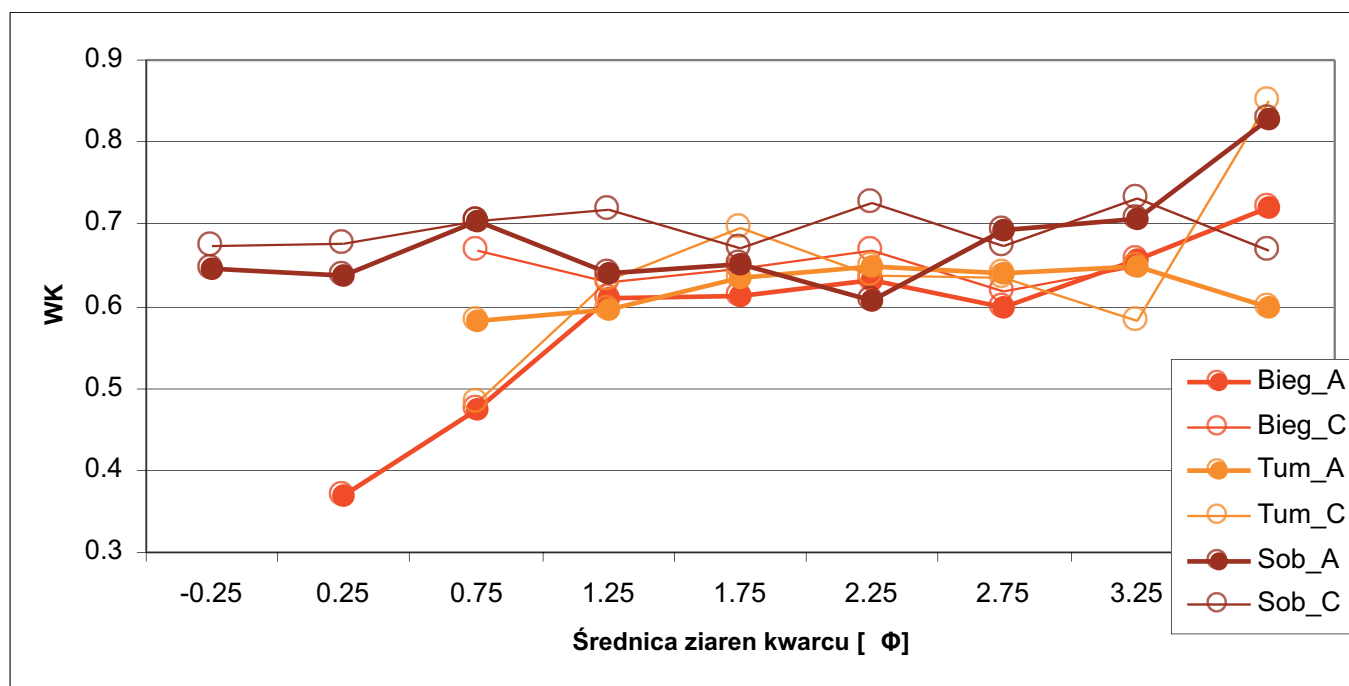


Rys. 4. Rozkłady wielkości ziarna w badanych piaskowcach w zlifach zorientowanych: A – prostopadle do uławicenia, C – równoległe do uławicenia  
 Fig. 4. Grain-size distributions of the sandstones in the thin sections: A – perpendicular to bedding, C – parallel to bedding



Rys. 5. Rozkład wielkości wskaźnika kształtu ziaren kwarcu (WK) dla badanych prób w zlifach mikroskopowych zorientowanych: A – prostopadle, C – równoległe do uławicenia

Fig. 5. Distribution of the shape index values of quartz (WK) in the thin sections: A – perpendicular to bedding, C – parallel to bedding



Rys. 6. Wskaźnik kształtu (WK) w zależności od średnicy ziaren kwarcu i orientacji szlifów  
 Fig. 6. Dependence of the shape index (WK) upon the grain size of quartz and the thin section orientation

obecność składników wydłużonych może obniżyć wartość tego parametru. Przykładowa analiza wykonana dla szlifów z Bieganowa wykazała, że dla łupków metamorficznych WK wynosi 0,506 i 0,516 odpowiednio dla przekroju A i C, a dla łyszczyków 0,343 i 0,420 w tak samo zorientowanych szlifach.

Wartości WK uzyskane dla kwarcu we wszystkich próbach kwalifikują te ziarna do elipsoidalnych i wrzecionowatych, co świadczy o zauważalnym ich wydłużeniu, które w większym stopniu obserwowane jest w przekroju prostopadłym do uławiczenia, a to za sprawą pokroju przyjmowanego przez kryształy tego minerału i sprzyjaniu układaniu się ich ziaren dłuższymi osiami zgodnie z kierunkiem działania prądu wody. Stosunkowo najbardziej izometryczne ziarna kwarcu obserwuje się w preparatach ze złoża Sobolów. Przyjmują one wartość WK średnio dla szlif

0,661–0,690, przy czym wartości te są podwyższone przez obecność najdrobniejszych, najbardziej izometrycznych ziaren. Kwarc większej frakcji ( $\Phi < 0,5$ ) jest zwykle wydłużony, ale obserwuje się w takich osobnikach spękania, które mogły doprowadzić do powstania licznych drobniejszych, izometrycznych i źle oboczonych ziaren, jakie obecnie przeważają w skale. Ponadto kierunki dłuższych osi tych większych, wydłużonych osobników kwarcu i innych ziaren mineralnych pokrywają się często z kierunkiem laminacji, która w preparatach z Sobolowa ma charakter rynnowej.

Izometryczność ziaren jest większa w przekrojach C, niż w przekrojach A, co kolejny raz sugeruje równoległe w stosunku do laminacji ułożenie ziaren wydłużonych. Na średnią wartość WK wpływa udział poszczególnych klas wielkości ziarna, ponieważ wielkość ta jest dodatkowo skorelowana ze zmniejszaniem się

Tab. 2. Właściwości fizyczne badanych piaskowców  
 Tab. 2. Physical properties of the sandstones

Parametr	Bieganów		Tumlin		Sobolów	
	średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.	średnia	odch. stand.
Gęstość pozorna [Mg/m <sup>3</sup> ]	2.18	0.02	2.32	0.00	2.37	0.01
Nasiąkliwość wagowa [%]	6.13	0.17	2.95	0.04	3.26	0.09
Nasiąkliwość objętościowa [%]	13.33	0.28	6.83	0.09	7.65	0.14
Porowatość (całkowita) [%]	16.98	0.65	13.22	0.06	10.31	0.31
Właściwości fizyczne wg danych innych Autorów:						
Gęstość [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,64 <sup>(1)</sup> ;		2,67 <sup>(1)</sup> ; 2,67 <sup>(3)</sup>		2,65–2,66 <sup>(1)</sup>	
Gęstość pozorna [Mg/m <sup>3</sup> ]	2,34 <sup>(1)</sup> ; 2,19–2,64 <sup>(3)</sup>		2,40 <sup>(1)</sup> ; 2,40 <sup>(3)</sup> ; 2,31–2,36 <sup>(4)</sup>		2,26–2,57 <sup>(1)</sup> ; 2,28–2,32 <sup>(4)</sup> ; 2,29–2,55 <sup>(5)</sup>	
Nasiąkliwość wagowa [%]	3,64 <sup>(1)</sup> ; 3,64–5,25 <sup>(2)</sup> ; 3,5 <sup>(3)</sup> ; 3,21 <sup>(6)</sup> ;		2,87 <sup>(1)</sup> ; 2,87 <sup>(3)</sup> ; 2,5–2,9 <sup>(4)</sup> ; 2,47 <sup>(6)</sup>		1,02–5,29 <sup>(1)</sup> ; 4,18–4,48 <sup>(4)</sup> ; 1,32–4,80 <sup>(5)</sup> ; 3,92 <sup>(6)</sup>	

Pochodzenie danych: (1) Dębski [4–6]; (2) Don J. [8]; (3) Kozłowski [17]; (4) Pinińska [23–26]; (5) Bromowicz [2]; (6) Rembiś [32]  
 Source of data: (1) Dębski [4–6]; (2) Don J. [8]; (3) Kozłowski [17]; (4) Pinińska [23–26]; (5) Bromowicz [2]; (6) Rembiś [32]

ziaren (rys. 6). Najbardziej wydłużone osobniki kwarcu ( $WK < 0,4$ ) obserwuje się wśród największych ziaren o wielkości  $\Phi < 1,2$  (powyżej 0,434 mm) występujących w niewielkim udziale w próbkach ze złoża Tumlin i Bieganów.

### Wyniki badań laboratoryjnych – właściwości fizyczne

Dla pełniejszej charakterystyki omawianych skał obok oceny petrograficznej przeprowadzono badania ich podstawowych właściwości fizycznych, korzystając z norm dotyczących badań tych parametrów (PN-EN 1936:2010; PN-EN 13755:2008) [29, 30]. Z jednorodnych partii materiału, pochodzących z poszczególnych złóż, przygotowano od kilku do kilkunastu sześciennych próbek o długości boku  $50 \pm 1$  mm. Na podstawie uzyskanych mas próbek oraz danych zawartych w literaturze, a dotyczących gęstości właściwej badanych piaskowców wyznaczono dla nich gęstość pozorną, nasiąkliwość wagową, porowatość otwartą, związaną z porami dostępnymi dla wody oraz porowatość całkowitą, uwzględniającą także objętość porów zamkniętych (tab. 2).

Uzyskane wyniki gęstości pozornej i nasiąkliwości wagowej odpowiadają w większości wartościom odnotowanym przez innych Autorów. Pewne odstępstwa od podawanych w literaturze wyników mogą wynikać z faktu wyboru do analizy pojedynczych odmian litologicznych z każdego złoża, jednak uzyskiwane odchylenia standardowe świadczą o dużej jednorodności badanego materiału.

Wśród badanych próbek najmniejszą gęstością pozorną ( $2,18 \text{ g/cm}^3$ ) odznaczały się piaskowce ze złoża Bieganów, czemu towarzyszyła największa nasiąkliwość wagowa przekraczająca 6%. Pozostałe piaskowce miały wyraźnie większą gęstość i jednocześnie około 2-krotnie mniejszą nasiąkliwość. Obliczona porowatość, przy przyjętych z literatury wartościach gęstości

właściwej, waha się wokół kilkunastu procent dla wszystkich próbek, ale jest ona największa (prawie 17%) dla piaskowców dolnopermskich. W trakcie obserwacji i pomiarów mikroskopowych uzyskana wielkość porowatości była znacznie niższa (do 5%), co oznacza, że w większości związana jest z mikroporami w obrębie spoiwa. Przeciwnieństwem są próbki z Tumlina, w których już w badaniach mikroskopowych stwierdzono udział 5–9% porów wykształconych w postaci stosunkowo dużych, otwartych przestrzeni pomiędzy ziarnami kwarcu. Warto także zwrócić uwagę na fakt, że w przypadku prób z Bieganowa obliczoną porowatość stanowi w większości system porów otwartych, co wpływa na wysoką nasiąkliwość wagową. Natomiast w pozostałych złożach duża ilość porów to izolowane pustki, co może się wiązać z obserwowanym lokalnie rozwojem obwoidek regeneracyjnych.

### Wyniki badań laboratoryjnych – właściwości o zmienności kierunkowej

Zorientowane w stosunku do uławiczenia próby posłużyły do oznaczenia prędkości przebiegu podłużnych fal ultradźwiękowych, a następnie do określenia ścieralności na tarczy Boehmego. Badania ultradźwiękowe wykonywane były metodą przejścia na sześciennych próbkach o boku  $50 \pm 1$  mm w stanie powietrzno-suchym przy użyciu defektoskopu firmy Ultramet UMT-17 z głowicami wytwarzającymi fale podłużne o częstotliwości 500 MHz. Minimalny czas przejścia fali mierzono pomiędzy płaszczyznami A i pomiędzy płaszczyznami B, prostopadłymi do uławiczenia oraz pomiędzy płaszczyznami C, równoległymi do płaszczyzn uławiczenia. Na tej podstawie obliczano prędkość fali podłużnej ( $V_p$ ) jako stosunek długości drogi, jaką przebyła fala (wymiar próbki) do czasu przejścia impulsu (tab. 3).

Tab. 3. Wyniki prędkości podłużnych fal ultradźwiękowych i szacunkowa wartość wytrzymałości na ściskanie w stanie powietrzno-suchym dla badanych piaskowców

Tab. 3. Velocity of longitudinal ultrasonic waves and estimated compressive strength in the air-dry state of the sandstones

Pomiędzy płaszczyznami:	Prędkość fal ultradźwiękowych $V_p$ [m/s] średnia, zakres wartości, rozstęp			Prostopadłe do płaszczyzn:	Wytrzymałość na ściskanie w stanie powietrzno-suchym $R_{cs}^*$ [MPa]		
	Bieganów	Tumlin	Sobolów		Bieganów	Tumlin	Sobolów
A	2802	4176	2347	C	65	103	42
	2783–2830	4161–4189	2180–2428				
	47	28	248				
B	2731	4244	2522	A lub B	62	109	51
	2716–2745	4158–4315	2400–2687				
	29	157	287				
C	2676	3244	2795	dla wszystkich kierunków	59	88	65
	2652–2707	3175–3352	2684–2916				
	55	177	232				
dla wszystkich kierunków	2736	3888	2555	dla wszystkich kierunków	62	100	52
	2652–2830	3175–4315	2180–2916				
	178	1140	736				
Dane z literatury:							
Pinińska [23–26]	b.d.	3182 2781–3698 917	2326 2209–2476 267	b.d.		78 60–96 36	102,6 98,8–108,9 10,1
Rembiś [32]	3420	3330	2320		77,1	57,0	61,7

Objaśnienia:  $V_p$  – prędkość podłużnej fali ultradźwiękowej,  $R_{cs}^*$  – średnia wartość wytrzymałości na ściskanie w stanie pow.-suchym oszacowana na podstawie zależności wg Pinińskiej, Płatka [27]. Płaszczyzny: A i B – prostopadłe do uławiczenia, C – równoległe do uławiczenia  
 Explanations:  $V_p$  – velocity of longitudinal ultrasonic waves,  $R_{cs}^*$  – mean compression strength in the air-dry state estimated according to Pinińska and Płatek [27]. Plains: A and B – perpendicular to bedding, C – parallel to bedding

Wielkość tego parametru była bardzo silnie uzależniona od składu mineralno-petrograficznego i wykształcenia spoiwa w próbach piaskowców, a nawet w ich pojedynczych laminach, co zauważono szczególnie na przykładzie prób ze złoża Tumlin. Prędkość przebiegu fal mierzona między płaszczyznami równoległymi do uławicenia (C), czyli prostopadle do laminacji była aż o ponad 1 km/s niższa od prędkości mierzonych w pozostałych kierunkach. Wynikało to przede wszystkim z obecności w środkowej części próbek wyraźnie widocznej zarówno mikro-, jak i nawet makroskopowo bardzo jasnej laminy o grubości ok. 2–3 mm. Pod mikroskopem w jej budowie zwracał uwagę duży udział regeneracyjnego spoiwa krzemionkowego, co obniżało znacznie jej porowatość. Takie wykształcenie próbek powodowało, że w trakcie pomiaru prędkości pomiędzy płaszczyznami A i B czoło fali najszybciej przebiegało przez tę laminy, co dawało w efekcie bardzo wysokie, jak na piaskowce, wartości  $V_p$  (4,1–4,3 km/s). Różnice pomiędzy wynikami dla tych dwóch kierunków były stosunkowo nieduże i nie przekraczały 150 m/s, przy czym obydwa kierunki były pod tym względem równoważne. Przy pomiarze poprzecznym do lamin, oprócz zmiennego składu, na niższy wynik wpływały także większa porowatość wielu lamin, przez które przebiegała fala oraz obecność płaszczyzn nieciągłości, związanych z nagromadzeniami ilastymi na granicach lamin. Prędkości fal podłużnych dla piaskowców z Tumlina zamieszczone w pracach innych Autorów odpowiadały swoim zakresem prędkościom uzyskanym dla kierunku C (ok. 3,1–3,3 km/s). Zwraca uwagę w innych pracach również duży rozrzut wszystkich wyników (ponad 900 m/s), co może wynikać z silnej kierunkowej anizotropii tych skał.

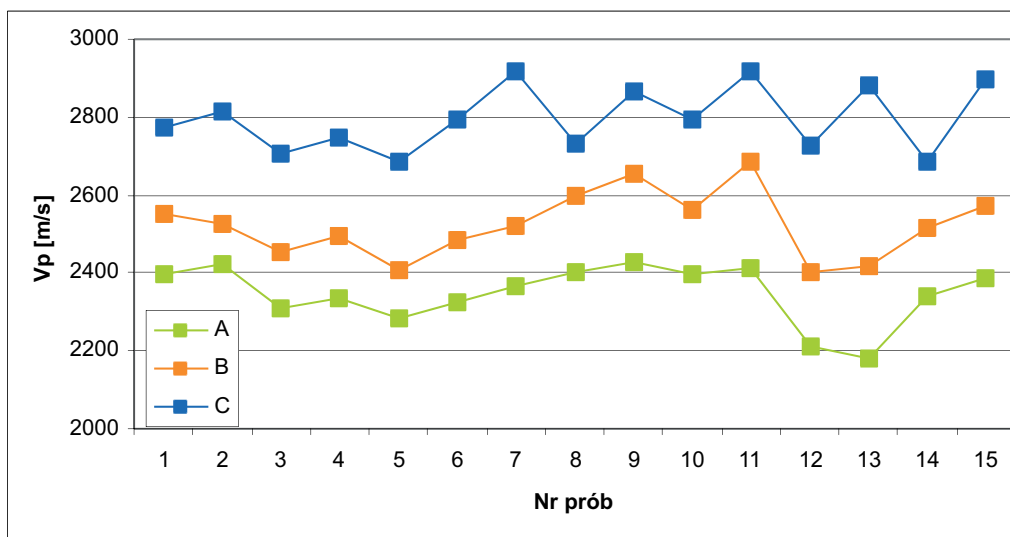
Mniejsze różnice pomiędzy prędkościami mierzonymi dla różnych kierunków uzyskano dla prób ze złoża Bieganów. Różnice te dla poszczególnych próbek wynosiły 55–125 m/s, chociaż wyraźnie w jednym z kierunków prostopadłych do laminacji (pomiędzy płaszczyznami A) prędkość fal podłużnych (średnio 2802 m/s) była wyższa niż w pozostałych. Podobnie, jak w przypadku piaskowców z Tumlina, i tutaj obecność laminacji wpłynęła na zmniejszenie prędkości mierzonej prostopadle do uławicenia (średnio 2676 m/s). Na uwagę zasługuje niewielki rozrzut wyników uzyskiwanych dla różnych próbek, ale w obrębie

tego samego kierunku pomiaru. Wahania nie przekraczają 55 m/s. Świadczy to o jednorodnym wykształceniu tych piaskowców na przestrzeni kilkudziesięciu cm, gdyż z bryły o takiej wielkości pochodziły próby.

Największym zróżnicowaniem pod względem uzyskiwanych prędkości przechodzenia fal charakteryzowały się fliszowe piaskowce ze złoża Sobolów (rys. 7). Wahania dla pomiarów wykonanych w tym samym kierunku sięgały prawie 290 m/s, natomiast różnice pomiędzy wynikami dla różnych kierunków dochodziły do 450 m/s, zwłaszcza pomiędzy kierunkiem A (średnio 2347 m/s) i C (średnio 2795 m/s). Jednak tym razem najwyższe prędkości osiągnęto w kierunku prostopadłym do uławicenia. Podobną wartość średnią, odpowiadającą prędkościom w kierunku A i stosunkowo duży rozrzut wyników dla piaskowców z tego złoża uzyskali też inni Autorzy. Takie zróżnicowanie wartości wpływa na silną anizotropię prędkości fal oraz wszystkich związanych z nią parametrów mechanicznych.

Na podstawie przedstawionej przez Pinińską i Płatka [27] zależności dla skał klastycznych pomiędzy prędkością fal podłużnych ( $V_p$ ) a wytrzymałością na ściskanie w stanie powietrzno-suchym ( $R_{cs}$ ) dokonano oszacowania średnich wartości  $R_{cs}$ , jakie mogą uzyskiwać badane próby, przy ściskaniu w różnych kierunkach (tab. 3). Wspomniana zależność ma generalnie charakter wykładniczy, ale w zakresie prędkości 2000–3500 m/s wartości  $R_{cs}$  zmieniają się w szerokim zakresie 30–120 MPa, a sama zależność jest dużo słabsza. Dlatego dla tej części danych zastosowano zależność prostoliniową. W związku z faktem, że najwyższą wytrzymałość wykazują próby ściskane prostopadle do uławicenia, do obliczeń takich wykorzystano prędkości mierzone pomiędzy płaszczyznami A i B. Odwrotnie, przy założeniu, że próby będą ściskane równolegle do kierunku laminacji użyto prędkości przebiegu fal między płaszczyznami C. Dla próbek ze wszystkich złóż uzyskano wartości  $R_{cs}$  mieszczące się zwykle w granicach średniej wytrzymałości na ściskanie (60–120 MPa), jednak dla próbek z Tumlina wartości te są wyraźnie wyższe, zwłaszcza przy założeniu ściskania w kierunku prostopadłym do uławicenia (103–109 MPa).

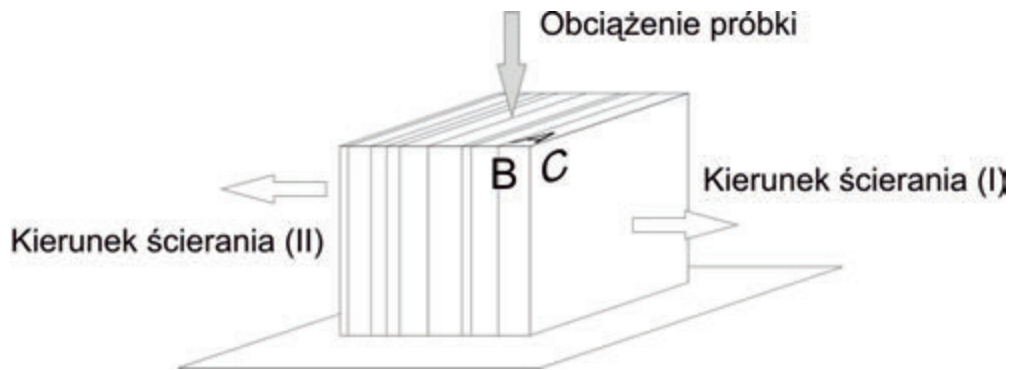
Dla wybranych próbek, wyciętych z jednej monolitycznej



Rys. 7. Prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych ( $V_p$ ) dla piaskowców z Sobolowa mierzona poprzecznie do ścian próbki o określonej orientacji. Objasnienia: Płaszczyzny A i B – prostopadle do uławicenia, pomiar  $V_p$  – równolegle do uławicenia. Płaszczyzny C – równolegle do uławicenia, pomiar  $V_p$  – prostopadle do uławicenia

Fig. 7. Velocity of longitudinal ultrasonic waves ( $V_p$ ) in the Sobolów sandstones measured crosswise to the sample walls with a specified orientation. Explanations: Plains A and B are perpendicular to bedding, direction of  $V_p$  measurement is parallel to bedding. Plains C are parallel to bedding, direction of  $V_p$  measurement is perpendicular to bedding





Rys. 8. Zasada ścierania próbek. Przykład: ścieranie powierzchni A prostopadłej do uławicenia i laminacji w kierunku ściany C, czyli poprzecznie do głównego kierunku przebiegu lamin, przy kilkukrotnym obracaniu próbki o 180° (w kierunkach I i II)

Fig. 8. The principle of sample abrasion. Example: abrasion of the surface A that is perpendicular to bedding and lamination in the direction of the sample wall C, i.e., crosswise to the major orientation of laminae. The sample was rotated several times at 180° (in the directions I and II)

Tab. 4. Wyniki ścieralności na tarczy Boehme'go (S) badanych piaskowców i odpowiadające im prędkości fal podłużnych (Vp)

Tab. 4. Results of Böhme abrasion test of the sandstones (S) and corresponding velocity of longitudinal ultrasonic waves (Vp)

Złoże	Nr próby	Powierzchnia ścierana	Powierzchnia prowadząca	S [mm]	S średnia [mm]			Vp dla próby mierzona w kierunku prostopadłym do powierzchni ścierania [m/s]
					dla próby	dla ściany	dla złoża	
Bieganów	21	A	B (wzdłuż) C (poprz.)	4.59 4.58	4.59	3.81	3.96	2807
	25	A	B (wzdłuż) C (poprz.)	3.55 2.50	3.02		(3,9–5,2) <sup>1</sup> (3.90) <sup>4</sup>	2830
	24	C	A B	4.39 4.12	4.26	4.26		2652
Tumlin	34	A	B (wzdłuż) C (poprz.)	3.06 2.22	2.64	3.01	3.52	4189
	35	A	B (wzdłuż) C (poprz.)	3.37 3.65	3.51		(6.0) <sup>2</sup> (3.06) <sup>4</sup>	4179
	32	C	A B	4.83 4.00	4.41	4.41		3255
Sobolów	5	A	B (wzdłuż) C (poprz.)	4.47 4.05	4.26	4.26	4.11	2284
	7	C	A B	4.41 3.50	3.96	3.96	(1.8) <sup>2</sup> (9,5) <sup>3</sup> (2.04) <sup>4</sup>	2915

Objaśnienia: 1) wg Don 1979; 2) wg Pinińska 1994–2003; 3) wg Bromowicz 2001; 4) wg Rembiś 2013.

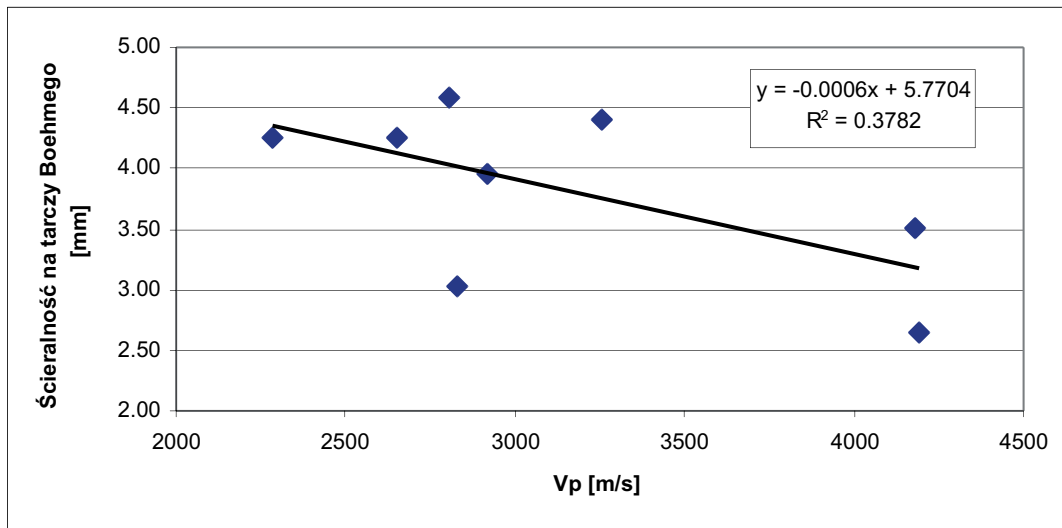
Explanations: 1) after Don 1979; 2) after Pinińska 1994–2003; 3) after Bromowicz 2001; 4) after Rembiś 2013

bryły, dokonano pomiarów ścieralności na tarczy Boehme'go, modyfikując na potrzeby badania zapisy norm PN-B-04111:1984 [28] oraz PN-EN 14157:2005 [31]. Do oznaczeń użyto prób sześciennych o boku 50±1 mm zorientowanych w stosunku do uławicenia. Przy zachowaniu geometrii ramienia i tarczy Boehme'go, opisanej w normie PN-EN 14157:2005 [31], zmniejszono masę obciążnika i ilość proszku elektrokorundowego stosownie do wymiarów powierzchni ścieranej próbek, aby zachować nacisk wymagany przez normy. Próbkę poddawano ścieraniu przez 16 cykli (po 22 obroty każdy), przy czym po każdym cyklu obracano próbkę o 180° wokół jej osi pionowej. Ścieralność obliczano jako średnią arytmetyczną straty wysokości otrzymaną dla każdej z czterech krawędzi

podstawy próbki.

Dzięki obracaniu próbek o 180°, a nie jak sugerują normy o 90°, można było porównać wyniki ścieralności powierzchni A i B prowadząc próbkę po torze na tarczy wzdłuż kierunku laminacji lub poprzecznie do niego (rys. 8). Również w przypadku ścierania powierzchni C, równoległych do uławicenia, można było określić różnicę w uzyskanej ścieralności. Do badań wybierano ściany prób, które odpowiadały kierunkom o najbardziej różniących się między sobą prędkościach fal podłużnych.

Uzyskane wartości ścieralności na tarczy Boehme'go wahały się w granicach 2,22–4,83 mm i dla prób z Bieganowa i Tumlina nie odbiegały znacznie od ścieralności podawanych



Rys. 9. Zależność: prędkość fal ultradźwiękowych (Vp) mierzona między zorientowanymi płaszczyznami próbek piaskowców vs. ścieralność na tarczy Boehmego badana dla jednej z tych powierzchni

Fig. 9. Relation: longitudinal velocity of ultrasonic waves (Vp) measured between parallel sample surfaces vs. Bohme abrasion resistance measured for one of these surfaces

przez innych Autorów, natomiast dla Sobolowa były dwukrotnie wyższe (tab. 4). Należy jednak zaznaczyć, że przyjęta metodyka tych badań odbiegała od ogólnie stosowanej, dlatego porównanie takie ma charakter jedynie orientacyjny. Bardziej istotnym dla dalszych rozważań jest fakt dużego zróżnicowania uzyskiwanych ścieralności pomiędzy próbkami, ścieranymi ścianami, a nawet kierunkami ścierania.

Najniższą średnią ścieralność uzyskano dla piaskowców z Tumlina (3,52 mm), chociaż ścieralność poszczególnych prób wahała się w granicach od 2,64 mm do 4,41 mm. Biorąc pod uwagę wyniki dla ścieranych ścian stwierdzono zależność, polegającą na wyższej ścieralności ścian, dla których prędkość podłużnych fal ultradźwiękowych, przechodzących prostopadle do nich była niższa (rys. 9). Różnica pomiędzy ścieralnością ściany A i C sięgała 1,77 mm. Ścieranie ściany C mogło dodatkowo ułatwiać „wyrywanie” płasko leżących na tej powierzchni ziaren.

Wszystkie badane próby charakteryzowała, wykształcona w różny sposób, laminacja. Próby z poszczególnych złóż badano pod kątem ścieralności dla powierzchni poprzecznej do laminacji (A), prowadząc próbkę w urządzeniu wzdłuż lub poprzecznie do przebiegu lamin. We wszystkich przypadkach (poza jednym dla próby z Tumlina) uzyskano wyższe ścieralności podczas ścierania prób wzdłuż kierunku laminacji. Różnice pomiędzy tak uzyskanymi wynikami sięgały 1 mm. Podobnie wysokie różnice (do 0,9 mm) otrzymywano prowadząc na tarczy ścianę C w kierunku ściany A lub B. Znajduje to odbicie w różnicy prędkości fal mierzonych pomiędzy ścianami A oraz między ścianami B. Im wyższa jest ta różnica, tym wyższa różnica w ścieralności powierzchni C przesuwanej w kierunkach obu tych ścian.

W przypadku prób z Tumlina bez względu na kierunek, w którym przemieszczana była próbka na tarczy, na powierzchni A wypracowywana zostawała opisywana wyżej, wyjątkowo odporna, jasna lamina, przez którą przebiegały fale ultradźwiękowe z bardzo dużą prędkością. Jej obecność zapewne znacznie zmniejszała ścieralność całej ściany A i co za tym idzie, ścieralność próby. Taka zmienność w wykształceniu i właściwościach poszczególnych lamin w piaskowcach z Tumlina czy Bieganowa może powodować powstawanie dużych różnic w uzyskiwanych wynikach badań wielu parametrów. Z jednej

strony odporne laminy, powodują zmniejszanie ścieralności, z drugiej – słabsze laminy ścierają się szybko, powodując powstanie nierównej powierzchni próbki w postaci wystających lamin odpornych. Przy zmniejszonej w ten sposób powierzchni próbki zwiększa się wywierany na nią nacisk, co sprzyja mimo odporności pozostałych lamin, szybszemu ich ścieraniu. W warunkach użytkowych kamień zastosowany np. jako płyty chodnikowe czy progi będzie ścierany intensywniej w miejscach mniej odpornych, w związku z czym mogą powstawać duże zagłębienia na roboczej powierzchni kamienia.

### Analiza anizotropii i wnioski

W piaskowcach, klastycznych skałach osadowych, istotną rolę w wykształceniu i wynikających z tego właściwościach odgrywa, związana głównie z sedymentacją, obecność struktur kierunkowych. Wyrażana jest ona przede wszystkim występowaniem wydłużonych składników ziarnistych (w szczególności łyszczyków i łupków łyszczykowych), ich kierunkowym ułożeniem i obecnością laminacji.

W badanych szlifach łyszczyki występują w kilkuprocentowym udziale tylko w przypadku prób ze złoża Sobolów. Ponadto towarzyszą im w nieco mniejszym udziale okruchy skał metamorficznych, które zwykle również charakteryzują się wydłużonym kształtem, o czym świadczy niski wskaźnik kształtu. Znacznie mniejszą ilość łyszczyków obserwuje się w próbach z Bieganowa, a już całkiem sporadycznie pojawiają się w szlifach z Tumlina. Te ostatnie praktycznie nie zawierają w swoim składzie łupków metamorficznych, reprezentując osady o dużej dojrzałości, składające się w znaczącej przewadze z ziaren kwarcu.

Z kolei badany kwarc o największych rozmiarach stwierdzonych dla prób z Sobolowa i Tumlina, odznacza się stosunkowo dużą izometrycznością, największą w tych samych próbach bez względu na frakcję. Niemniej jednak, zauważalne wydłużenie ziaren tego, najliczniej reprezentowanego, minerału wpływa na jego układanie się dłuższą osią równoległą do płaszczyzn laminacji.

Obecność laminacji wiąże się z reguły z wysortowaniem materiału ziarnowego, a to w następstwie ze składem mineralno-petrograficznym samych lamin i, co istotne, charakterem

spoiwa w ich obrębie. Determinuje ono późniejsze ich właściwości, a co za tym idzie właściwości całej skały. Różnice właściwości fizyczno-mechanicznych, układających się planarnie stref, jakimi są laminy powoduje powstanie na ich granicy płaszczyzn nieciągłości, sprzyjających powstawaniu spękań pod działaniem naprężeń. Dodatkowym czynnikiem podkreślającym występowanie takich płaszczyzn jest gromadzenie się na ich powierzchni bardzo drobnoziarnistych substancji tj. minerały ilaste, tlenki i wodorotlenki żelaza czy drobne łuski mik. Laminy są szczególnie zróżnicowane w próbkach z Tumlina, nieco słabiej w piaskowcach z Bieganowa, a we fliszowych piaskowcach z Sobolowa ich obecność podkreślana jest jedynie obecnością cienkich nagromadzeń ilasto-żelazistych na granicy riplemarków i lineacją wydłużonych ziaren.

Splaszczanie składników skały i ich kierunkowe ułożenie w stosunku do powierzchni warstwowania wpływa na wartości parametrów fizyczno-mechanicznych próbek mierzonych w różnych kierunkach. Szczególnie łatwym sposobem potwierdzenia tego faktu są pomiary prędkości przebiegu fal ultradźwiękowych, których zróżnicowane wartości zostały opisane powyżej. Korzystając z wprowadzonego przez Kowalskiego (1961) współczynnika anizotropii, obliczanego jako stosunek prędkości fal podłużnych mierzonych w dwóch prostopadłych do siebie kierunkach, zaproponowano podobne współczynniki także dla innych badanych wielkości. Zastosowane przy tym wzory zamieszczone zostały w tabeli 5.

prędkości fal podłużnych, ścieralności i przewidywanej wytrzymałości na ściskanie.

Nieco niższe wielkości współczynników anizotropii uzyskano dla prób ze złoza Bieganów. Tutaj orientacja prób okazała się szczególnie istotna dla określenia średniej średnicy ziarna, jego kształtu (zwłaszcza dla najgrubszych frakcji) oraz ścieralności i wytrzymałości na ściskanie. Dwa ostatnie parametry, dla prób z tego i pozostałych złóż, wykazywały wzajemną korelację, polegającą na wyższej ścieralności tych ścian próbek, które poddawane prostopadłym do nich, jednoosiowym naprężeniom wykazywały wyższą wytrzymałość na ściskanie. Ma to znaczenie dla możliwości wykorzystania takich skał, które zastosowane jako płyty chodnikowe, będą przy większej odporności na pęknięcie intensywniej ścierane.

Kierunek pomiaru miał najmniejsze znaczenie dla używanych parametrów w przypadku próbek piaskowców fliszowych z Sobolowa. Poza tym stwierdzana anizotropia miała dla niektórych właściwości (np. prędkość fal podłużnych, ścieralność) odwrotny charakter niż dla prób z pozostałych złóż. Z pewnością istotną rolę odgrywał w tym przypadku inny charakter warstwowania (przekątne rynnowe o małej skali). Towarzyszące granicznym powierzchniom riplemarków nagromadzenia ilasto-żelaziste obecne są wielokrotnie zarówno w przekroju pionowym, jak i poziomym prób, w związku z czym nie mają one większego znaczenia dla uzyskiwanych różnic w prędkości fali. W tego typu piaskowcach ważniejszą

Tab. 5. Współczynniki anizotropii właściwości teksturalnych i mechanicznych dla badanych piaskowców  
Tab. 5. Anisotropy indices of the textural and mechanical properties of the sandstones

Współczynnik anizotropii	Bieganów	Tumlin	Sobolów
AGSS = GSSA / GSSC	1,18	1,12	1,04
AGSO = GSOA / GSOC	0,94	1,41	0,96
AWK = WKC / WKA dla szlif	1,04	1,04	1,04
AWK = WKC / WKA dla frakcji grubszej	1,47	1,01	1,06
AVp = VpA / VpC	1,05	1,29	0,84
AS = SC / SA	1,12	1,47	0,93
ARcs = RcsC / RcsA	1,10	1,24	0,65

Objaśnienia: Skróty literowe, jak w tekście i tabelach powyżej  
Explanations: for letter abbreviations see the text and the tables above

Uzyskane wyniki, potwierdzają po raz kolejny, omawiane w pracy zależności pomiędzy cechami skały badanymi w różnie zorientowanych w stosunku do uławicenia kierunkach. Wymienione powyżej struktury kierunkowe najsilniej zaznaczały się w piaskowcach z Tumlina, mimo braku lub niewielkiej ilości łuszczyków. Dla tych prób współczynniki anizotropii zmieniały się w granicach od 1,01 do 1,47. Pierwsza wartość odpowiada anizotropii, związanej z uzyskanym wskaźnikiem kształtu grubszych (powyżej 0,43 mm) ziaren kwarcu. Wartość bliska 1 oznacza praktyczny brak wpływu orientacji szlif na uzyskany wynik wskaźnika kształtu ziaren kwarcu, które w przypadku prób z tego złoza reprezentują najbardziej wydłużone osobniki. Zresztą wydłużenie ziaren, oceniane właśnie za pomocą wskaźnika kształtu, było parametrem, na który w najmniejszym stopniu wywierała wpływ orientacja próbki, chociaż sama wielkość tego parametru różniła się pomiędzy próbkami. Poza wskaźnikiem kształtu pozostałe parametry dla prób z Tumlina wykazują silne uzależnienie od kierunku pomiaru. W szczególności dotyczy to wysortowania ziaren,

rolę może pełnić stopień kompresji, wyższy w kierunku prostopadłym do warstwowania, wpływający następnie na wyniki wielu parametrów.

Ujawniająca się w różnym stopniu anizotropia właściwości piaskowców wpływa na inne parametry techniczne tych skał, badane w zależności od celu wykorzystania. Orientacja produktu zależeć powinna nie tylko od właściwości dekoracyjnych skały, ale od jej skłonności do pęknięcia, ścierania czy podsiąkania w uprzywilejowanych kierunkach. Rzadko oceniana w trakcie dokumentowania złoza cecha, jaką jest prędkość przebiegu fal ultradźwiękowych, zwłaszcza w odniesieniu do zorientowanych prób może dostarczyć wiele cennych informacji o jakości wykorzystywanego później surowca. Jej wielkość uzależniona jest nie tylko od podstawowych parametrów fizycznych, takich jak gęstość pozorna czy nasiąkliwość, ale także od wykształcenia strukturalnego skały. Ilościowy opis składu mineralno-petrograficznego, uziarnienia, wydłużenia i rozmieszczenia składników może dostarczyć dodatkowych informacji na temat stopnia anizotropii w skale.

Wpływ anizotropii strukturalnej związanej z wykształceniem i ułożeniem składników skały na szereg właściwości fizyczno-mechanicznych, uwzględnianych w trakcie oceny jakościowej, powoduje, że istotne znaczenie mają badania parametrów teksturalnych tj. wielkość ziaren czy ich wysortowanie, wykonywanych w różnych przekrojach. Przykładowo wysoka anizotropia wysortowania ziaren kwarcu mierzona dla szlifów wykonanych w płaszczyznach prostopadłej i równoległej do uławicenia może stanowić wskaźnik stopnia laminacji równoległej w piaskowcach. W próbach zawierających znaczny udział składników wydłużonych pomocą przy określaniu anizotropii może być ocena wskaźnika kształtu, który wpływać będzie na kierunkowe układanie się poszczególnych ziaren. Stopień anizotropii powinien stanowić dodatkową informację podawaną wraz z wartościami wielu parametrów fizyczno-mechanicznych złóż.

*Autorki pragną podziękować Profesorowi Janowi Bromowiczowi za mentalne wsparcie w trakcie badań.*

*Praca finansowana w ramach badań statutowych WGGiOŚ, AGH nr 11.11.140.320.*

## Literatura

- [1] Boretti-Onyszkiewicz W., *Anizotropia ciosowa piaskowców fliszowych Podhala Zachodniego w świetle badań wytrzymałościowych*. Biuletyn Geologiczny UW, 10: 115–152, 1968
- [2] Bromowicz J., *Ocena możliwości wykorzystania skal z okolic Krakowa do rekonstrukcji kamiennych elementów architektonicznych*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi 17, 1: 5–73, 2001
- [3] Bromowicz J., Figarska-Warchoł B., *Znaczenie orientacji spękań skal macierzystych dla kształtu ziaren kruszywa*. Górnictwo i Geoinżynieria, Kwartalnik AGH, 34, 4: 85–100, 2010
- [4] Dębski W. (red.), *Monografia złóż materiałów kamiennych w Polsce i ich przydatność do celów drogowych. Okręg południowy Polski*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1963
- [5] Dębski W. (red.), *Monografia złóż materiałów kamiennych w Polsce i ich przydatność do celów drogowych. Okręg południowo-centralny Polski*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1966
- [6] Dębski W. (red.), *Monografia złóż materiałów kamiennych w Polsce i ich przydatność do celów drogowych. Okręgi południowo-zachodni i północno-centralny Polski*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1968
- [7] Domonik A., *Odzworowanie powierzchni ciosowych piaskowców fliszu podhalańskiego w badaniach wytrzymałościowych z wybranych odstonięć niecki podhalańskiej*. Przegląd Geologiczny, 51, 5: 430–435, 2003
- [8] Don J., *Piaskowce czerwonego spągowca depresji śródsudeckiej*. [w:] Dziedzic K., Kozłowski S., Majerowicz A., Sawicki L. (red.) *Surowce mineralne Dolnego Śląska*. Zakład Narodowy im. Ossolińskich, Wydawnictwo PAN, Wrocław, 386–387, 1979
- [9] Dziedzic A., *Structural control on fracture toughness (brittle cracking) in the Krosno Sandstones of Mucharż, southern Poland*. Geological Quarterly, 47, 1: 21–28, 2003
- [10] Dziedzic A., *Odporność na pękanie a właściwości dynamiczne piaskowców krośnieńskich z Mucharza*. XXVIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górnotworu i Geoinżynierii. Inst. Geotech. i Hydrotech. PWr, Wrocław, 101–108, 2005
- [11] Dziedzic K., *Utwory dolnopermskie w niecce śródsudeckiej*. Studia Geologica Polonica, 6: 1–121, 1961
- [12] Gradziński R., Gągol J., Ślaczka A., *The Tumlin Sandstone (Holy Cross Mts., Central Poland): Lower Triassic deposits of aeolian dunes and interdune areas*. Acta Geologica Polonica, 29: 151–175, 1979
- [13] Figarska-Warchoł B., Bromowicz J., *The influence of joint and microfractures on the limestone aggregate shape and quality*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 26, 4: 89–108, 2010
- [14] Folk R.L., Ward W.C., *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters*. Journal of Sedimentary Petrology, 27, 1, 3–26, 1957
- [15] Kamieński M., Kubicz A., *Kwasoodporność piaskowców Gór Świętokrzyskich i Dolnego Śląska*. Biuletyn Instytutu Geologicznego, 178: 1–115, 1962
- [16] Kowalski W.C., *Wytrzymałość na ściskanie budowlanych skal senońskich przelomowego odcinka Wisły środkowej na tle ich litologii*. Biuletyn Geologiczny UW, 1, 2: 1–113, 1961
- [17] Kozłowski S., *Surowce skalne Polski*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa, 1986
- [18] Krumbein W.C., *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. Journal of Sedimentary Petrology, 11: 64–72, 1941
- [19] Leśniak T., Słomka T., *Środowisko sedimentacji warstw istebniańskich dolnych (górnego senonu) rejonu Dobczyc*. Geologia. Kwartalnik AGH, 26, 1: 51–65, 2000
- [20] Łukasiak D., *Zmienność wytrzymałościowa piaskowców godulskich z Brennej w warunkach jednoosiowego ściskania*. Górnictwo i Geoinżynieria, 34, 2: 435–441, 2010
- [21] Peszat C., Buczek-Pułka M., *Zmienność właściwości fizyczno-mechanicznych budowlanych piaskowców istebniańskich obszaru Karpat*. Zeszyty Naukowe AGH, Geologia, 10, 1: 5–34, 1984
- [22] Pieczara Ł., *Wpływ cech strukturalnych piaskowców fliszowych z Mucharza (Beskid Mały) na procesy pękania w warunkach jednoosiowego ściskania*. Przegląd Geologiczny, 62, 10/2, 680–686, 2014

- [23] Pinińska J. (red.), *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. I. Skały osadowe regionu świętokrzyskiego*. Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydż. Geol. UW, Warszawa, 1994
- [24] Pinińska J. (red.), *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. II. Skały magmowe, osadowe i metamorficzne regionu Sudetów. T. 3*. Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydż. Geol. UW, Warszawa, 1996
- [25] Pinińska J. (red.), *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. II. Skały magmowe, osadowe i metamorficzne regionu Sudetów. T. 4*. Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydż. Geol. UW, Warszawa, 1997
- [26] Pinińska J. (red.), *Właściwości wytrzymałościowe i odkształceniowe skał. Cz. IV. Karpaty fliszowe*. Zakład Geomechaniki IHiGI, Wydż. Geol. UW, Warszawa, 2003
- [27] Pinińska J., Płatek P., *Badania ultradźwiękowe w ocenie wytrzymałościowej skał*. *Górnictwo Odkrywkowe* 2–3, 89–96, 2002
- [28] PN-B-04111:1984, *Materiały kamienne. Oznaczanie ścieralności na tarczy Boehmego*. PKNMiJ, Warszawa
- [29] PN-EN 1936:2010, *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczanie gęstości i gęstości objętościowej oraz całkowitej i otwartej porowatości*. PKN, Warszawa
- [30] PN-EN 13755:2008, *Metody badań kamienia naturalnego. Oznaczenia nasiąkliwości przy ciśnieniu atmosferycznym*. PKN, Warszawa
- [31] PN-EN 14157:2005, *Kamień naturalny. Oznaczanie odporności na ścieranie*. PKN, Warszawa
- [32] Rembiś M., *Modyfikacja fizyczno-mechanicznych właściwości piaskowców metodą strukturalnego wzmocnienia skał preparatami zawierającymi tetraetoksyilan*. *Rozprawy i Monografie 270*, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2013
- [33] Zingg T., *Beitrag zur Schotteranalyse*. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen* 15, 39–140, 1935



Kopalnia Truskawica, Zakład przeróbczy

fol. A. Borowicz