

Jan Bromowicz, Beata Figarska-Warchoł**

ZNACZENIE ORIENTACJI SPĘKAŃ SKAŁ MACIERZYSTYCH DLA KSZTAŁTU ZIAREN KRUSZYWA**

1. Wstęp

Skały dzielą się w sposób naturalny wzdłuż powierzchni nieciągłości lub osłabień wywołanych różnymi czynnikami. Należą do nich procesy sedymentacji w skałach osadowych, zmiany termiczne w skałach magmowych, obydwa powyższe czynniki w metamorficznych, a we wszystkich wymienionych pojawiają się płaszczyzny spękań pochodzenia tektonicznego. Część z powstałych osłabień ujawniła się już w postaci pęknięć, część jest w trakcie ujawniania w postaci zanikających nieciągłości, część zaś pozostaje w skale ukryta. Naprężenia spowodowane falami wywołanymi przez eksplozje materiałów wybuchowych w procesie eksploatacji, a także towarzyszące kruszeniu w procesie przeróbki skał, prowadzą do ich ujawnienia. Proces ten indukuje kształt ziarn uzyskiwanego kruszywa, co ma istotny wpływ na jego jakość i możliwości wykorzystania [4, 5].

Celem przeprowadzonych badań było ustalenie związków pomiędzy orientacją spękań rejestrowanych w ścianach kamieniołomów, a kształtem ziarn uzyskiwanego kruszywa. Stosowny dobór materiału badawczego zarówno w zakresie własności fizyczno-mechanicznych skał, jak też i wielkości frakcji ocenianych ziarn kruszyw miał za zadanie ustalenie wpływu litologii i zakresu oddziaływania osłabień.

2. Przedmiot badań

Badano granity, bazalty, piaskowce i wapienie. Dwie pierwsze z wymienionych skał pochodzą z kamieniołomów złóż Dolnego Śląska, piaskowce z Karpat, wapienie zaś z Jury Krakowsko-Częstochowskiej.

* Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Badania sfinansował Minister Nauki i Szkolnictwa Wyższego, umowa nr 4044/B/T02/2008/34; 18.18.140.696

Podstawowe właściwości fizyczno-mechaniczne pochodzące z dokumentacji geologicznych złóż, z których pobrano próby badanych skał są silnie zróżnicowane. Skały magmowe wykazują małą nasiąkliwość i dużą wytrzymałość na ściskanie, podczas gdy osadowe, a szczególnie wapienie przy dosyć znacznej nasiąkliwości mają niewielką wytrzymałość na ściskanie (tab. 1).

TABELA 1

Podstawowe właściwości fizyczno-mechaniczne badanych skał

Własności Skały	Gęstość pozorna, [t/m ³]	Nasiąkliwość, [%]	Wytrzymałość na ściskanie, [MPa]
	średnia	wahania	ilość prób, [szt.]
	odchylenie standardowe	współczynnik zmienności, [%]	
Granity	2,60 117 2,53–2,68 0,02 0,77	0,47 73 0,4–0,6 0,03 6,4	187,5 114 130–236 20,1 10,7
Bazalty	3,00 – 2,86–3,16 – –	0,4 – 0,1–0,8 0,28 70	196 – 160–248 39,2 20,9
Piaskowce	2,60 85 2,54–2,64 0,02 0,77	0,98 85 0,49–1,69 0,21 21,4	99,3 43 54,0–131,0 19,9v20,0
Wapienie	2,44 61 2,21–2,65 0,13 5,33	3,3 52 0,53–6,99 1,94 58,8	64,1 54 21–98 24,9 38,8

Forma i częstość porów w obrazach mikroskopowych badanych skał jest różna. Najrzadziej spotykane są w skałach magmowych, gdzie ich pochodzenie związane jest z objawami serycytucji skalenia w granitach i izolowanymi pustkami w bazaltach. Podobnie izolowane pory obserwowano w piaskowcach, gdzie związane były z większymi nagromadzeniami minerałów ilastych. Jedynie w wapieniach pojawiły się prócz częstych, izolowanych porów, zwykle częściowo wypełnionych sparytem, prostolinijne spękania o przebiegu dostosowanym do większych składników.

Granity są drobno- i równokrystaliczne, dwumikowe z silną przewagą biotyту. Ich największe kryształy o średnicach do 3 mm należą do plagioklazów. Opisywane skały są barwy jasnoszarej o strukturze zbitej i kierunkowym ułożeniu blaszek mik, bez jakichkolwiek oznak wietrzenia nieujawnionych też w obserwacjach mikroskopowych, gdzie stwierdzono przewagę plagioklazów nad skaleniami potasowymi, zaś udział kwarcu oceniono na około

30%. Skalenie są dobrze zachowane, jedynie z objawami serycytyzacji w plagioklazach. Błaszki mik mają szerokości od 0,1 do 0,5 mm i długości do 1,3 mm. Biotyt jest świeży, o wyraźnym pleochroizmie, zaś muskowit znacznie rzadszy i w drobniejszych blaszkach.

Bazalt jest barwy czarnej, z rzadkimi, bezładnie rozmieszczonymi prakryształami oliwinów i piroksenów o wielkości do 1,5 mm. Posiada pustki, o średnicach do 5 mm po silnie zmienionych prakryształach lub też stanowiące pęcherze pogazowe. W obserwacjach mikroskopowych ustalono 7% udział prakryształów w drobnokrystalicznym cieście skalnym z kryształami o wielkości do 0,05 mm i równomiernie rozmieszczonym, drobniejszym, czarnym magnetytem. Pirokseny i rzadsze oliwiny z delikatnie tylko zaznaczonym procesem serpentynizacji są dobrze zachowane, podobnie jak nefeliny oraz sporadycznie pojawiające się fragmenty szkliwa.

Piaskowce są zwarte, drobno- i równoziarniste o strukturze bezładnej, barwie szarej. W obrazie mikroskopowym jedynie pojedyncze ziarna sięgają 0,50 mm, przy znacznej przewadze ziarn o średnicach poniżej 0,25 mm.

W składzie mineralnym obok kwarcu i skaleni spory jest udział okruchów skał obcych, a spoiwo jest krzemionkowo-ilasto-węglanowe.

Wapienie jurajskie są barwy jasno-szarobrązowej, pelityczne z wyraźnie widocznymi bioklastami i intraklastami o średnicach sięgających 1 cm. Ich podstawowymi składnikami w obrazach mikroskopowych są obłego kształtu skupienia o wielkościach 0,03–0,4 mm zwane pelletami oraz mikryt w obrębie, których dosyć nieregularnie rozmieszczone są intraklasty i fragmenty szczątków organicznych.

3. Metodyka

3.1. Pomiary i opróbowanie

Masowe pomiary orientacji płaszczyzn podzielnosci wykonywano w nieczynnych fragmentach ścian eksploatacyjnych o długości 20–50 m. Zasięg pionowy pomiarów ograniczony był możliwościami ręcznego wykonania. Ze ścian tych pobrano po kilka prób materiału skalnego o wadze od kilkudziesięciu do około 100 kg każda. Próby rozdrobniono w kruszarce szczękowej i podzielono na 5 frakcji: 2÷4; 4÷8; 8÷16; 16÷31,5; 31,5÷63 mm. W celu uniknięcia wpływu sposobu kruszenia na właściwości ziaren [3] zachowywano te same parametry urządzenia kruszącego.

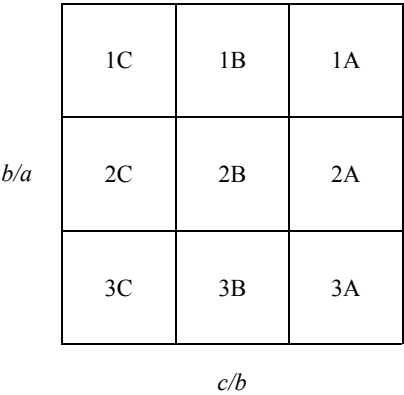
3.2. Pomiary kształtu ziaren kruszywa w różnych frakcjach

Pomiary długości trzech osi każdego ziarna (a — długość, b — szerokość, c — grubość), wykonywano ręcznie przy użyciu elektronicznej suwmiarki. Liczba pomierzonych ziaren największej frakcji 31,5–63 mm wahała się od 45 dla wapieni do 96 dla bazaltów (tab. 2). W pozostałych frakcjach starano się pobrać do badań około 150 ziaren metodą uśredniania i kwartowania, przy czym wielkości te wahały się ostatecznie w zakresie od 140 do

229. Wyniki tych pomiarów przedstawiono na diagramach Zingga (oś X — c/b , oś Y — b/a) oddzielnie dla każdej frakcji poszczególnych skał [7]. Wartości 1/3 i 2/3 wymienionych wyżej wskaźników formy podzieliły diagram na 9 sektorów umownie oznaczonych symbolami A , B , C i 1, 2, 3 — wskazującymi odpowiednio na wzrost spłaszczenia i wydłużenia ziaren (rys. 1).

TABELA 2
Liczba ziaren poddanych badaniu kształtu

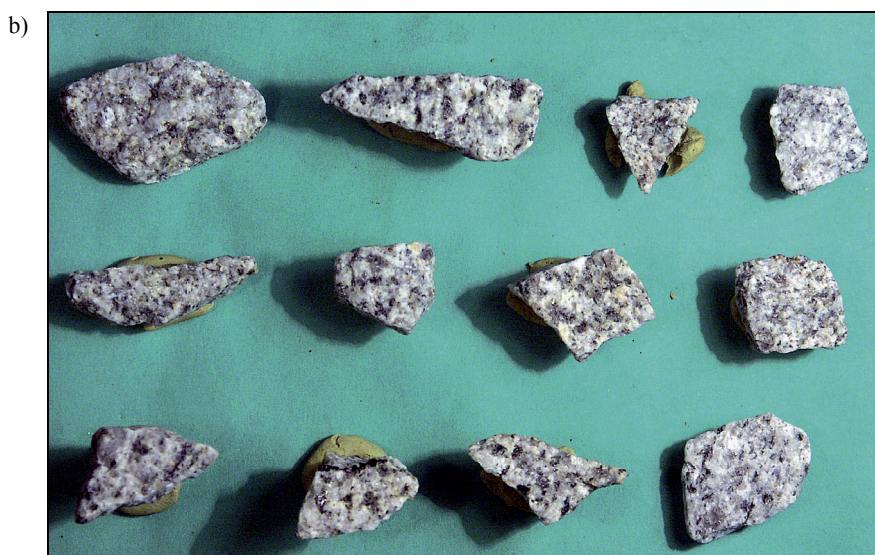
Skąły Frakcje, [mm]	Granity	Baząły	Piaskowce	Wapienie
31,5–63,0	64	96	84	45
16,0–31,5	184	149	144	229
8,0–16,0	141	165	140	149
4,0–8,0	203	158	162	226
2,0–4,0	185	149	143	162



Rys. 1. Umowny podział sektorów na diagramie Zingga

3.3. Pomiary kątów dwuściennych ziaren

Te same próbki kruszyw zostały wykorzystane do pomiarów kątów dwuściennych ziaren. Poszczególne ziarna umieszczano w tym celu na plastycznej powierzchni, starając się by ich najbardziej płaskie i ograniczone ścianami o prostoliniowym przebiegu powierzchnie były skierowane prostopadle do obiektywu aparatu cyfrowego (rys. 2).



Rys. 2. Przykład zdjęć cyfrowych wykorzystywanych do pomiaru dwuściennych kątów ziaren kruszywa granitowego: frakcji 31,5–63 mm (a), frakcji 8–16 mm (b) (skała niezachowana)

Wykonane zdjęcia przedstawiały ziarna o kształcie wieloboków, których kąty wewnętrzne mierzone były na ekranie komputera przy użyciu odpowiedniego oprogramowania (*Micrograph Picture Publisher 9.0, IDRISI Andes*). Taki sposób postępowania pozwalał ograniczyć błędy, zwłaszcza przy pomiarach ziarn najmniejszych frakcji. Liczba uzyskanych wartości

kątów (po odrzuceniu najmniej regularnych ziaren) wahała się od 156 dla największej frakcji wapieni do 761 dla frakcji 16–31,5 mm kruszywa granitowego (tab. 3). Wyniki te przedstawiono na histogramach (rys. 5).

TABELA 3

Liczba pomiarów kątów w badaniach kształtu ziaren kruszyw

Skały Frakcje, [mm]	Granity	Bazalty	Piaskowce	Wapienie
31,5–63,0	268	342	345	156
16,0–31,5	761	610	587	680
8,0–16,0	573	627	585	490
4,0–8,0	746	613	642	542
2,0–4,0	513	512	501	520

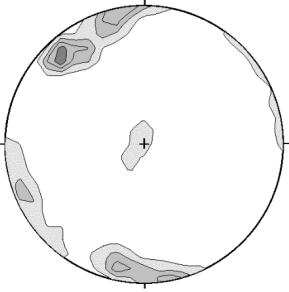
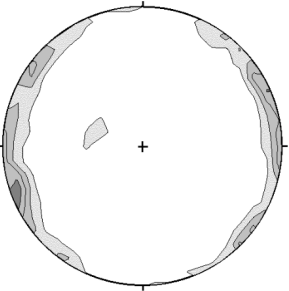
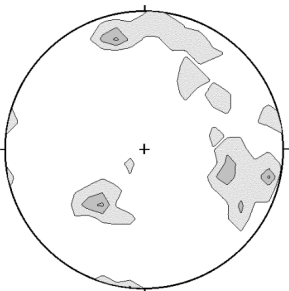
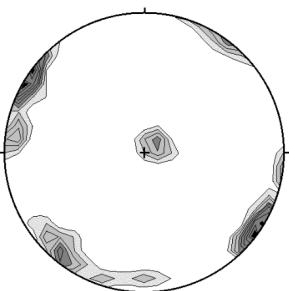
4. Wyniki badań i ich dyskusja

4.1. Zespoły spękań

Wykorzystując wyniki pomiarów orientacji płaszczyzn podzielnosci wykonano diagramy punktowe i konturowe (rys. 3). Ich analiza pozwoliła na wyróżnienie średnich orientacji głównych zespołów spękań pionowych (*A* i *B*) oraz pokładowych (*C*), przy czym dla piaskowców wyróżniono wśród spękań pionowych jeszcze dwa dodatkowe zespoły (*D* i *E*), a w bazaltach dodatkowy zespół (*D*). Ponadto stwierdzono istnienie pewnych podzespołów znajdujących się w obrębie poszczególnych zespołów.

Na podstawie wizualnej oceny tych diagramów można wnioskować, że najbardziej regularny system spękań występuje w wapieniach i granitach. W obu przypadkach kąt upadu zespołów *A* i *B* jest równy lub bliski 90°, zaś spękania zespołu *C* są prawie poziome. Różnica pomiędzy tymi układami wynika z kąta między zespołami *A* i *B*, który w przypadku wapieni jest w przybliżeniu prosty. W granitach zespół *A* stanowią 3 podzespoły spękań, które wraz ze spękaniami zespołu *B* tworzą kąty 67°, 78° i 124°, aczkolwiek średnia orientacja zespołu *A* jest prostopadła do zespołu *B*. W obu omawianych przypadkach bieguny płaszczyzn tworzą dość zwarte nagromadzenia, wobec czego rozróżnienie zespołów nie było trudne.

Spękania bazaltów w przewadze należą do zespołów pionowych, przy czym uzyskany diagram wskazuje na istnienie trzech takich zespołów: *A*, *B* i *D*. Wzajemne średnie wartości kątów między sąsiednimi zespołami wynoszą: 36°, 56° i 88°. Przecina je zespół płaszczyzn podzielnosci pokładowej, (*C*) o dość zróżnicowanych orientacjach, i upadzie od 0° do około 45° (średnio 18°/32°).

Granity	Bazalty	Piaskowce	Wapienie
			
A: 68/85 <i>A</i> ₁ : 46/80 <i>A</i> ₂ : 80/88 <i>A</i> ₃ : 282/80 B: 338/85	A: 35/87 B: 159/90 D: 127/90	A: 75/74 <i>A</i> ₁ : 96/80 B: 200/71 <i>B</i> ₁ : 193/83 D: 145/55 E: 122/52	A: 37/90 <i>A</i> ₁ : 29/89 <i>A</i> ₂ : 7/82 B: 311/83 <i>B</i> ₁ : 318/80 <i>B</i> ₂ : 288/84 <i>B</i> ₃ : 270/80
C: 0/5	C: 18/32	C: 309/46	C: 138/9

Rys. 3. Diagramy spekań oraz średnia orientacja zespołów i podzespołów płaszczyzn podzielnosci w analizowanych złożach

Orientacja spękań pomierzonych w piaskowcach jest najbardziej urozmaicona, ze względu na obecność załadowań widocznych w skali całego kamieniołomu. Spękania zespołów *A* i *B* charakteryzują upady około 70°. Na diagramie spękań stwierdzono ponadto obecność dwóch dodatkowych zespołów o orientacji pośredniej między zespołami *A* i *B*. Reprezentowane są one jednak przez mniej liczne płaszczyzny spękań. Wzajemne kąty dwuściennie pomiędzy płaszczyznami wymienionych czterech zespołów są zwykle kątami ostrymi. Zespół spękań pokładowych (*C*) jest nachylony skośnie do płaszczyzny poziomej (średnia orientacja 309°/46°), ale niemal prostopadły do pozostałych zespołów.

Orientacja płaszczyzn podzielnosci w złożach wpływa na kształt uzyskiwanych z niego bloków skalnych [1]. Znając zatem średnie orientacje funkcjonujących w masywie zespołów spękań możemy podjąć próbę przewidywania kątów dwuściennych powstających produktów. Przewaga pewnych określonych kątów może wynikać z istnienia lokalnych maksimów orientacji spękań wyrażonych istnieniem opisywanych wyżej zespołów i podzespołów. Obliczone na tej podstawie dwuściennie kąty pomiędzy średnimi orientacjami poszczególnych zespołów mierzone w płaszczyznach prostopadłych do nich oraz w płaszczyznach innych zespołów pozwalają na wskazanie pewnych par kątów (wzajemnie dopełniających się do 180°) (tab. 4), które z większym prawdopodobieństwem niż inne powinny pojawić się w produktach powstających z danego materiału.

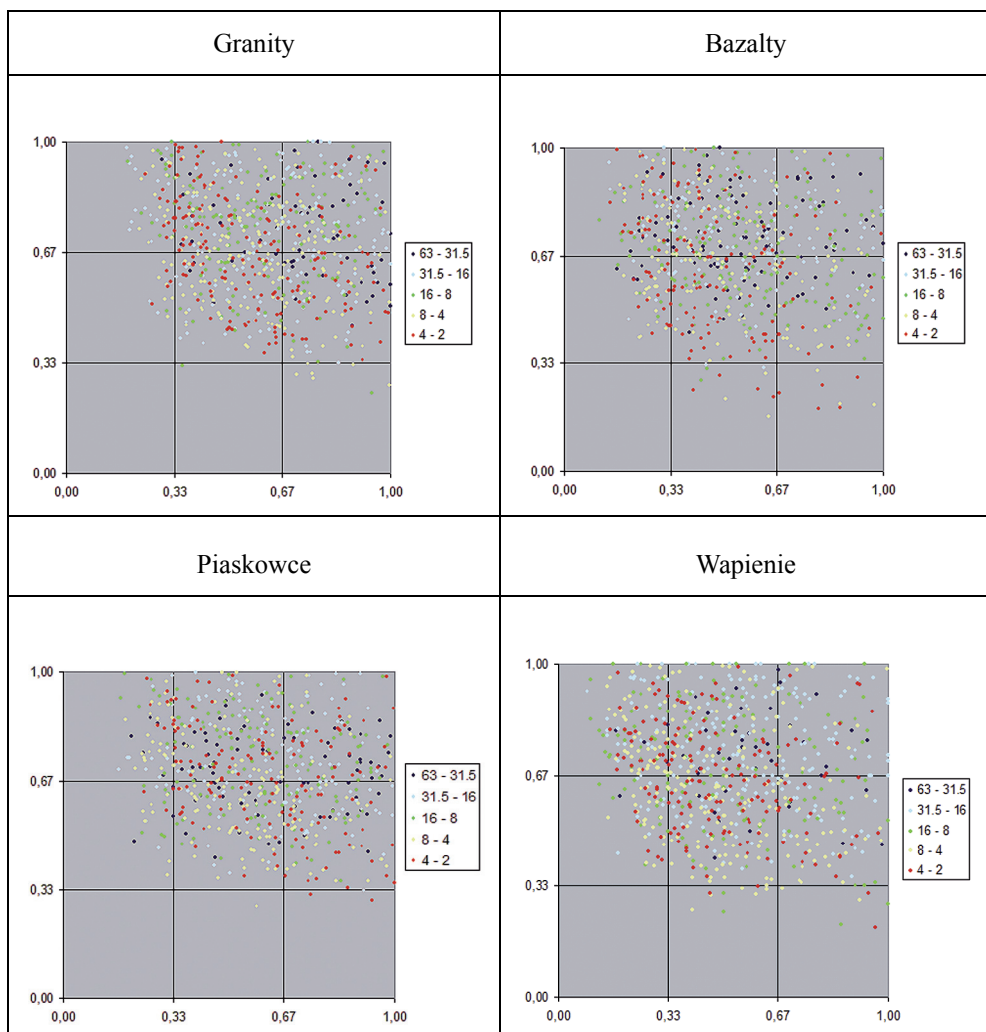
TABELA 4
**Spodziewane wartości kątów dwuściennych
na podstawie pomiarów orientacji płaszczyzn podzielnosci**

Granity		Bazalty		Piaskowce		Wapienie	
21–22	158–159	30–32	148–150	16	164	18	162
25	155	56	124	21	159	23	157
33–35	145–147	64–66*	114–116	47	133	30	150
37	143	79–81	99–101	50–53	127–130	31	149
55–56	124–125	86	94	59	121	40–41	139–140
59	121	88	92	61–62	118–119	47–48	132–133
67	113			64–66	114–116	53–56	124–127
69	111			69–72	108–111	61	119
77–80	100–103			76	104	71	109
83	97			78–80	100–102	78–79	101–102
85	95			84–85	95–96	84–89	91–96
87	93			90			
89–90–91							

* Pogrubioną czcionką zaznaczono bardziej prawdopodobne wartości kątów.

4.2. Kształty ziaren kruszywa

Uzyskane diagramy Zingga ziaren kruszyw rozpatrywanych skał zasadniczo się nie różnią (rys. 4). Prawie wszystkie ziarna mieszczą się sześciu górnych sektorach diagramu, wskazując na wyraźną przewagę kształtów izometrycznych oraz tabliczkowatych i płytkowatych. Ziarna o wyraźnym wydłużeniu pojawiają się w ilościach nieprzekraczających 4%.



Rys. 4. Diagramy Zingga dla ziaren badanych kruszyw (oś X — c/b , oś Y — b/a)

Dla ułatwienia porównań określono udziały procentowe ziaren w 9 sektorach diagramu Zingga dla każdej frakcji oraz łącznie w pełnym zakresie wielkości 2–63 mm (tab. 5).

TABELA 5
 Udziały procentowe ziaren różnych frakcji w poszczególnych sektorach diagramu Zingga

Frakcja, [mm]	Granity			Bazalty			Piaszkowce			Wapienie		
	C	B	A	C	B	A	C	B	A	C	B	A
2-63	6,9	29,7	21,0	13,1	30,5	11,9	8,5	28,1	18,3	16,0	27,4	10,1
31,5-63	1,6	23,4	34,4	10,4	39,6	16,7	6,0	28,6	25,0	6,7	46,7	15,6
16-32	9,2	24,5	28,8	11,4	38,3	18,1	7,6	27,8	25,0	11,8	34,5	17,0
8-16	8,5	35,5	25,5	11,5	27,9	14,5	6,4	32,9	21,4	17,4	28,2	10,7
4-8	7,4	28,1	16,7	14,6	28,5	5,7	14,8	22,8	6,2	19,9	18,6	4,9
2-4	4,9	34,6	9,7	16,8	22,1	6,0	5,6	29,4	18,2	17,9	23,5	5,6
2-63	1,9	21,5	17,8	7,1	21,9	12,8	3,1	22,3	19,2	6,5	25,0	13,2
31,5-63	0,0	9,4	31,3	4,2	20,8	8,3	1,2	21,4	17,9	2,2	13,3	15,6
16-32	1,6	20,1	15,2	2,7	17,4	10,7	2,8	15,3	20,8	4,4	19,2	13,1
8-16	0,7	14,9	13,5	3,6	23,6	17,6	5,0	20,0	14,3	6,7	22,1	12,1
4-8	3,4	26,1	15,3	14,6	17,1	15,8	4,3	32,1	19,1	9,3	29,6	14,6
2-4	2,2	27,0	21,6	9,4	30,2	9,4	1,4	21,0	23,1	6,8	32,1	11,7
2-63	0,0	0,1	1,0	0,0	1,5	1,1	0,0	0,1	0,4	0,0	1,1	0,7
31,5-63	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16-32	0,0	0,0	0,5	0,0	1,3	0,0	0,0	0,0	0,7	0,0	0,0	0,0
8-16	0,0	0,7	0,7	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3	1,3
4-8	0,0	0,0	3,0	0,0	1,9	1,9	0,0	0,6	0,0	0,0	2,2	0,9
2-4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,7	3,4	0,0	0,0	1,4	0,0	1,2	1,2

Najbardziej izometrycznym kształtem odznaczają się ziarna frakcji 2–63 mm kruszywa granitowego (21% w sektorze 1A). W pięciu skrajnych sektorach diagramu przeznaczonych dla ziaren o wyraźnym spłaszczeniu lub wydłużeniu znajduje się w tym przypadku tylko 10% ziaren.

Niewiele więcej ziaren skrajnie nieforemnych stwierdzono dla kruszywa piaskowcowego — 12,1%, podczas gdy dla bazaltowego i wapiennego wartość ta wynosi odpowiednio 22,8 i 24,3%. Jednocześnie te dwa ostatnie charakteryzuje o połowę mniejsza, w porównaniu z kruszywem granitowym, ilość ziaren izometrycznych (sektor 1A).

Ziarna izometryczne są najliczniej reprezentowaną grupą (34,4%) w przypadku najgrubszej frakcji (31,5–63 mm) kruszywa granitowego. Dla tej samej frakcji ilość ziaren piaskowcowych tego kształtu wynosi 25,0%, zaś wapiennego i bazaltowego jest na poziomie 15–17%.

Znaczny udział w najgrubszej frakcji kruszywa tych dwóch ostatnich skał mają ziarna spłaszczone, tabliczkowe z sektora 1B (39,6% dla bazaltów; 46,7% dla wapieni).

Tendencja zmiany kształtu w miarę zmniejszania frakcji jest dla wszystkich omawianych odmian litologicznych podobna i polega na stopniowym zmniejszaniu udziału ziaren izometrycznych na rzecz ziaren płaskich i w mniejszym stopniu również wydłużonych. Wiąże się to z ogólną zasadą, która sprawia że w drobniejszych frakcjach trudniej uzyskać ziarna foremne [2]. Różnice pomiędzy odmiennymi litologicznie kruszywami ujawnia dokładniejsza analiza wyników. Niektóre z nich stwierdzali też inni autorzy [6].

Wspomniana wyżej tendencja najslabiej wyraża się w zmianie kształtu ziaren kruszywa piaskowcowego. Udziały procentowe ziaren płaskich (sektor 1B), bardzo płaskich (sektor 1C) oraz płasko-wydłużonych (sektor 2B) dla różnych frakcji wahają się w tym wypadku wokół wartości średnich w różnym zakresie. Bardziej wyraźny wzrost (w sumie od kilkunastu do prawie 25%) odnotowano dla ziaren wydłużonych z sektorów 2A i 3A.

W kruszywie granitowym, którego średni kształt w największej frakcji znajdował się w polu ziaren izometrycznych, wraz z rozdrobnieniem zwiększył się znacznie udział ziaren płaskich (zwłaszcza w sektorach 1B, 2B i 2C). Nie wzrastała jednak ilość ziaren o kształtach cienkotabliczkowych w sektorze 1C. Jednoczesny spadek ilości ziaren izometrycznych (sektor 1A) był bardzo duży, bo od 34,4 do 9,7%. Nie stwierdzono tendencji do wydłużania ziaren.

Dla ziaren bazaltowych i wapiennych nastąpiło wraz ze zmniejszaniem frakcji zmniejszenie ilości ziaren izometrycznych (sektor 1A) z poziomu 15–17% do 5–6% oraz ziaren płaskich (sektor 1B) z poziomu 40–47% do 22–24%. Przeszły one w pola ziaren płasko-wydłużonych (sektor 2B), przekraczając tam 30%, a także skrajnie nieforemnych, w tym zwłaszcza skrajnie spłaszczonych (np. w sektorze 1C wzrost z poziomu 7÷10% do 17–18%).

W najdrobniejszej frakcji kruszywa bazaltowego pojawia się nawet 3,4% ziaren skrajnie wydłużonych (3A), choć w grubszych frakcjach zwykle brak jest tego typu ziaren. Widać zatem, że w przypadku tych dwóch skał nastąpiło silne spłaszczenie wraz ze zmniejszaniem wielkości ziarna.

4.3. Kąty dwuściennie w ziarnach kruszywa

Wartości kątów dwuściennych ziaren kruszywa przedstawiono na histogramach 5 podstawowych frakcji (2–4; 4–8; 8–16; 16–31,5; 31,5–63 mm) oraz dodatkowo na histogramie obejmującym wyniki dla trzech najgrubszych frakcji (8–63 mm), zakładając, że pomiary większych ziaren obarczone były mniejszymi błędami. Dzięki temu uzyskano dodatkowe rozkłady w 180 klasach dla około 1300÷1600 danych.

Wszystkie rozkłady charakteryzuje ujemna skośność: największa dla bazaltów, nieco mniejsza dla granitów i najmniejsza, na podobnym poziomie dla piaskowców i wapieni. Związane jest to zarówno z wartością średnią, która dla większości frakcji i skał jest większa od połowy pełnego zakresu i przekracza 90° (największa dla bazaltów — około 98°) (tab. 6), jak również z występowaniem niskich wartości kątów w zakresie $0\text{--}30^\circ$ w większej liczbie niż kątów rozwartych o wartościach $160\text{--}180^\circ$.

Obliczenia procentowego udziału kątów w przedziałach (tab. 6) wskazują, że w przypadku kruszywa bazaltowego 56,9–62,1% wyników należy do kątów rozwartych ($91\text{--}180^\circ$). Przewaga kątów rozwartych, chociaż już nie tak wyraźna odnotowana została również w kruszywach granitowych i piaskowcowych (odpowiednio 53,2–60,5% i 51,8–56,5%). W kruszywie wapiennym ilość kątów ostrych i rozwartych w ziarnach jest porównywalna, z lekką przewagą tych pierwszych. Udział kątów w przybliżeniu prostych ($88\text{--}92^\circ$) jest najwyższy w kruszywie wapiennym (maks. 11,5%) i granitowym (maks. 9,1%), chociaż w tym pierwszym udział kątów o wartości równej dokładnie 90° jest najniższy spośród wszystkich złóż.

We wszystkich przypadkach stwierdzono ujemny standaryzowany współczynnik kurtozy rozkładu. Największym spłaszczeniem charakteryzują się rozkłady dla kruszywa piaskowcowego (standaryzowany współczynnik kurtozy w zakresie od $-2,21$ do $-4,91$). Pomierzone wartości kątów dwuściennych ziaren z tego kruszywa mieszczą się w dość szerokich granicach $8\text{--}164^\circ$, a notowanym lokalnym wartościom modalnym odpowiadają na rozkładach, zwłaszcza dla największych frakcji, podobne udziały procentowe. Mniejsze spłaszczenie wykazują rozkłady sporządzone dla kruszyw bazaltowych i granitowych (standaryzowane współczynniki kurtozy mieszczą się w granicach od $-1,61$ do $-3,70$ dla pierwszych i od $-0,55$ do $-3,09$ dla drugich). Najmniej spłaszczone są rozkłady kruszyw wapiennych (od $-0,05$ do $-2,55$). Wyniki pomiarów wykazują dla nich najmniejszy zakres od 8 do 157° , natomiast bardzo duża ich część mieści się w pobliżu wartości średnich bliskich 90° .

Przeprowadzono porównanie wyników pomiarów kątów dwuściennych dla różnych frakcji kruszywa z omawianych skał, korzystając z wartości statystyki *t*-Studenta dla weryfikacji hipotezy o różnicy średnich, porównania median i testu Kołmogorowa-Smirnowa dla porównania rozkładów. Największe wzajemne podobieństwo wykazywały obserwacje poczynione dla różnych frakcji kruszywa granitowego. Istotne różnice pomiędzy rozkładami na poziomie ufności 95% występują tylko pomiędzy dwiema najgrubszymi frakcjami a najdrobniejszą frakcją. Dla piaskowców rozkłady sąsiednich frakcji wykazują wzajemne podobieństwo. Istotne różnice można stwierdzić pomiędzy frakcją najgrubszą a frakcjami $8\text{--}16$ mm i $2\text{--}4$ mm.

TABELA 6

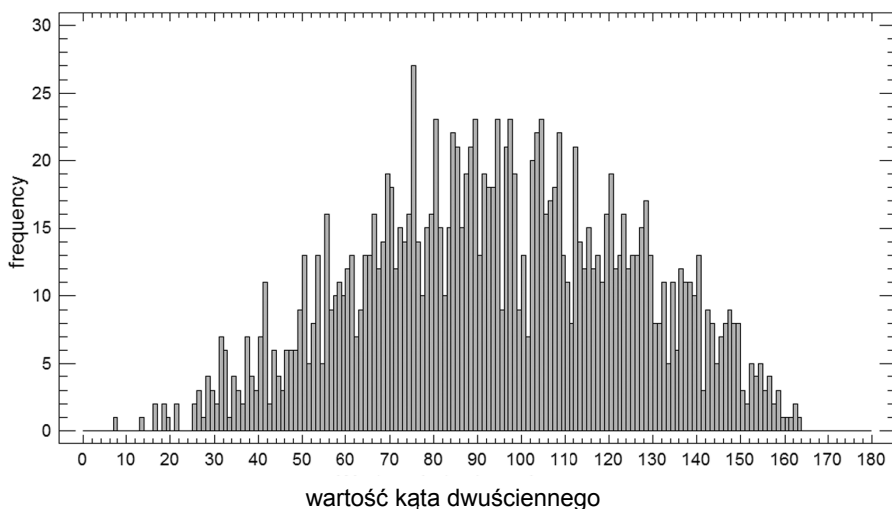
**Wybrane charakterystyki rozkładów wartości kątów dwuściennych
ziaren kruszywa różnych frakcji**

Frakcja, [mm]	Średnia, [°]	Zakres, [°]	Procentowy udział kątów w przedziale:					
			0–89	90	91–180	0–87	88–92	93–180
granity								
8–63	95,7	14-167	41,3	1,7	57,0	38,4	8,2	53,4
31,5–63	95,4	26–157	38,4	1,1	60,5	38,1	4,9	57,0
16–31,5	96,3	14–167	41,8	2,0	56,2	38,1	9,1	52,8
8–16	95,2	24–164	42,1	1,6	56,3	38,9	8,6	52,5
4–8	94,6	5–178	42,4	0,7	56,9	39,1	7,1	53,8
2–4	93,0	9–160	44,8	2,0	53,2	42,7	6,2	51,1
piaskowce								
8–63	94,8	8–164	44,0	1,5	54,5	41,3	6,3	52,4
31,5–63	96,5	19–158	43,5	0,9	55,6	40,3	5,2	54,5
16–31,5	93,5	8–163	46,2	2,0	51,8	44,6	5,8	49,6
8–16	95,1	17–164	42,1	1,4	56,5	38,6	7,4	54,0
4–8	93,1	18–164	46,0	1,9	52,1	42,5	8,7	48,8
2–4	91,6	21–158	46,7	0,8	52,5	43,7	7,2	49,1
bazalty								
8–63	98,4	7–169	39,1	1,4	59,5	36,5	6,0	57,5
31,5–63	99,0	18–169	39,5	2,6	57,9	35,7	9,1	55,2
16–31,5	96,8	7–167	40,5	1,5	58,0	38,4	5,9	55,7
8–16	99,6	23–165	37,6	0,6	61,8	35,1	4,5	60,4
4–8	96,0	28–165	41,6	1,5	56,9	37,9	7,7	54,4
2–4	98,4	13–162	36,9	1,0	62,1	34,6	5,3	60,1
wapienie								
8–63	89,3	8–151	49,7	1,4	48,9	45,5	10,3	44,2
31,5–63	90,0	35–143	51,9	0,6	47,5	46,2	11,5	42,3
16–31,5	90,0	19–151	49,3	1,0	49,7	44,6	10,9	44,5
8–16	88,2	8–151	49,6	2,0	48,4	46,5	9,2	44,3
4–8	85,7	13–154	52,2	0,9	46,9	49,5	7,0	43,5
2–4	89,1	18–157	50,1	1,0	48,9	46,4	7,3	46,3

Rozkłady kątów wykonane dla wapieni i bazaltów wykazują najwięcej różnic pomiędzy frakcjami, nawet sąsiednimi. Odmienność rozkładów wykazują już frakcje ziaren mniejszych od 16 mm.

Uzyskane histogramy rozkładu wartości kątów wykazują istnienie lokalnych wartości modalnych (lokalnych ekstremów), które świadczą o pewnych preferowanych kątach pomiędzy ścianami ziaren (rys. 5). Dla wielu z takich maksimum można wskazać drugie, z którym dopełnia się do kąta półpełnego ($180 \pm 2^\circ$). Sugeruje to wpływ spękań ciosowych, których orientacje pomierzono w kamieniołomach. Spękania w ścianach wyrobisk tworzą wzajemnie pary dwuściennych kątów przyległych. Ich spodziewane wartości podano wyżej (tab. 4). Niektóre dominanty powtarzają się na histogramach kolejnych frakcji kruszyw badanych skał. W celu znalezienia tych najistotniejszych wykorzystano histogramy frakcji 8–63 mm (tab. 7).

Analiza spodziewanych i pomierzonych wartości kątów dwuściennych ziaren wykazała, że większość wartości oczekiwanych pojawiła się dla wszystkich złóż z dokładnością $\pm 1^\circ$. Dotyczy to zwłaszcza kątów w zakresie $35\text{--}145^\circ$, szczególnie tych których wystąpienia oczekiwano z największym prawdopodobieństwem. Zwraca m.in. uwagę fakt pojawienia się maksimum dla 90° dla piaskowców i 91° dla granitów. Kąty zbliżone do prostego mogły powstawać tu przede wszystkim w wyniku nałożenia się spękań zespołów $B \times C$ w piaskowcach oraz $A \times B$ w granitach. Dla kruszywa bazaltowego i wapiennego istnieje kilka dominant dla wartości bliskich 90° , jednak brak lokalnej mody dokładnie w tym miejscu rozkładu. Zgadza się to z przewidywaniami, które wiązały możliwość wystąpienia wspomnianych ekstremów z zespołami spękań $A \times B'$, $C \times B'$ w złożu bazaltów oraz $A' \times B'$, $B \times C$ w złożu wapieni.



Rys. 5. Histogram wartości kątów dwuściennych pomierzonych w ziarnach kruszywa piaskowcowego frakcji 8–63 mm

TABELA 7

Wartości kątów dwuściennych dla ziaren frakcji 8-63 mm w kruszywach badanych skał

Granity		Bazalty		Piaskowce		Wapienie	
	156, 157		153	32	148	19	
29	148	33	145, 148, 149	42	141	36	142
38, 39	144* , 146, 148		143	51	129	40	140
	136	42	137	56		42, 43	
46	133	51	129	59	122		135
50	128	57	123	62	119	48	131
54		62	118, 120		116	52	128
60	120	64	115	67	113	57	122
66, 67	114	67, 69	109	70	109	60	119
70, 71	109	75	106	76	105	64	116
73	107	79	103	80	98	67	112
75	105	81	99	85	95	70	108
78	103		95	90		75	
80	100	87	93			80	101
83	97	89				82	98
87	94						96
91						87	
						89	91

* Pogrubioną czcionką zaznaczono najbardziej znaczące wartości modalne.

Istnieją również pewne nieoczekiwane lokalne maksima. Ich pojawienie się może wynikać z niejednokrotnie dość dużego rozrzutu punktów na diagramach spękań. Sytuacja taka ma miejsce głównie w przypadku kruszywa bazaltowego i granitowego.

5. Wnioski

W świetle wykonanych pomiarów orientacji płaszczyzn podzielności badanych skał, kształty uzyskanych z nich ziaren kruszywa mogą być bardzo różne. Próbę oceny istnienia wzajemnych związków oparto na masowych pomiarach formy ziaren kruszywa uzyskanego w jednakowych warunkach. Fakt powtarzania się z większym nasileniem w ziarnach kruszyw badanych skał kątów dwuściennych wynikających z diagramów orientacji płaszczyzn

podzielności pomierzonych w ścianach wyrobisk jest potwierdzeniem obecności założonych związków. Argumentami za ich istnieniem są też wyniki pomiarów kształtu i analiza rozkładów kątów dwuściennych ziaren kruszywa różnych frakcji, jak też i wyniki testowania podobieństwa wspomnianych rozkładów dla różnych frakcji kruszywa.

Izometryczne kształty ziaren kruszywa granitowego są związane z regularnością układu płaszczyzn podzielności pojawiających się z podobnym nasileniem w poszczególnych zespołach. Przy większej częstości pojawiania się płaszczyzn zespołu pokładowego w wapieniach zmniejsza się udział kształtów izometrycznych kruszywa mimo regularnego układu płaszczyzn podzielności. Generalny spadek zawartości ziaren izometrycznych w drobniejszych frakcjach wynika z nakładania się wpływu zarówno zróżnicowanej orientacji płaszczyzn podzielności, jak też i ich intensywności.

Ujemna skośność rozkładów kątów dwuściennych ziaren kruszywa wskazuje na przewagę kątów rozwartych, szczególnie w bazaltach, dla których licznie przebiegające pionowe płaszczyzny spękań widoczne na diagramie są odpowiedzialne za wieloboczne kształty kruszyw, zwłaszcza w dużych frakcjach. Równocześnie największe spłaszczenie rozkładów notowane dla piaskowców i bazaltów jest zgodne ze znacznym zróżnicowaniem orientacji płaszczyzn podzielności ukazanych na diagramach, przy mniejszym spłaszczeniu dla granitów i wapieni o bardziej regularnych układach.

Testowane podobieństwo rozkładów dla grubszych frakcji kruszywa badanych skał i pojawianie się różnic dla drobniejszych sugeruje zanik wpływu spękań na kształt kruszywa w drobniejszych frakcjach, gdzie większą rolę odgrywać mogą osłabienia skał wynikające z ich cech teksturalnych jak np. obecność prakryształów w bazaltach czy też intraklastów w wapieniach.

Opisane powyżej związki pomiędzy spękaniami i kształtem kruszywa zachodzą w skałach o bardzo zróżnicowanych właściwościach fizyczno-mechanicznych.

W badaniach porównujących różne metody kruszenia istotnym jest zatem uwzględnianie wyników pomiarów płaszczyzn podzielności rejestrowanych w złożu.

LITERATURA

- [1] *Bromowicz J., Karwacki A.*: Nowa metodyka oceny bloczności złóż materiałów kamiennych. Przegląd Geologiczny; 1981, 1: 18–19
- [2] *Gawenda T.*: Analiza zawartości ziaren nieforemnych w kruszywach pochodzących z odpadów przywęgłowych uzyskiwanych w kruszarkach szczękowych. Surowce i Maszyny Budowlane; 2009, 1: 22–27
- [3] *Gawenda T., Nazimec Z., Tumidajski T., Saramak D.*: Sposoby optymalizacji składu ziarnowego i kształtu ziaren kruszyw mineralnych w produktach kruszarek szczękowych. Górnictwo i Geoinżynieria; AGH, Kraków 2006, 30 z. 3/1: 109–124
- [4] *Lees G.*: The measurement of particle shape and its influence in engineering materials. Journal of the British Granite and Whinstone Federation; 1964, 4 (2)
- [5] *Smith M.R., Collis L. (red.)*: Aggregates. Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (2nd edition). Geol. Soc. Eng. Geol. Spec. Publ. 9, 1993
- [6] *Tumidajski T., Nazimec Z.*: Wpływ warunków procesu kruszenia na kształt ziaren kruszyw mineralnych. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej; nr 108; Konferencje nr 40: 163–175
- [7] *Zingg T.*: Beitrag zur Schotteranalyse. Schweiz. Min. Petr. Mitt.; 1935, 15: 39–140