

Barbara PESZKO, Aldona KRAWCZYKOWSKA
Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

OCENA KSZTAŁTU DROBNYCH ZIAREN NA PODSTAWIE TECHNIKI ANALIZY OBRAZU

Streszczenie. Surowce mineralne występujące w przyrodzie w stanie stałym charakteryzują się strukturą ziarnistą. Każdy zbiór ziaren mineralnych charakteryzują właściwości geometryczne, do których zalicza się wielkość i kształt ziarna, jednak mimo wielu opracowań nie ma ogólnie przyjętej definicji określającej jednoznacznie te wielkości. W publikacji zaproponowano pomiary ilościowe kształtu, na podstawie techniki analizy obrazu.

THE EVALUATION OF FINE GRAINS SHAPE IN BASE OF IMAGE ANALYSIS TECHNIQUE

Summary. Raw materials being presented in nature in solid state are characterized by granular structure. Every set of mineral grains is described by geometrical properties as grains size and grains shape. However, despite of many publications, there is not unequivocally approved definitions of these features. The authors proposed to determine the grains shape by the quantitative measurements done in base of image analysis technique.

1. Wprowadzenie

W operacjach technologicznych na zachowanie się ziarnistej masy w dużej mierze ma wpływ kształt ziaren. Szczególnie dla celów kontroli procesów przemysłowych bardzo duże znaczenie ma szczegółowa i dokładna charakterystyka morfologiczna proszków. Realizowana jest ona poprzez liczbowe określenie współczynników kształtu ziaren, jednak jak dotychczas nie ma jednoznacznej metody określania i wyznaczania tej wielkości. Wyróżnia się metody

opisowe i ilościowe określania kształtu ziarna. Metody opisowe są nieprecyzyjne i zależą od subiektywnego wrażenia osoby opisującej, która może przyjmować ziarno za płaskie, kostkowe, słupkowe itp. Można też porównywać ziarno do kuli, prostopadłościanu czy innej bryły geometrycznej.

Kształtu ziarna w przeciwieństwie do wielkości nie można opisać za pomocą jednej liczby. Do jego opisu stosuje się tzw. współczynniki kształtu. Szczególnie jest to trudne dla ziaren drobnych.

Pomysły i przykłady opisu kształtu ziaren mineralnych przedstawione są w literaturze [2, 4, 5].

W pracy, na podstawie dwóch materiałów: balutiny i diabazu, korzystając z metody analizy obrazu, wyliczono i przeanalizowano niektóre współczynniki kształtu.

2. Współczynniki kształtu

W konkretnych zastosowaniach spotyka się wiele współczynników kształtu [1], nawet w przypadku badań prowadzonych na tej samej grupie materiałów.

Współczynniki te mają następujące cechy [7]:

- bezwymiarowy charakter (mają taką samą wartość w przypadku cząstek o tym samym kształcie, ale innych wymiarach),
- prostą geometryczną interpretację (pozwalającą określić, jak dany kształt odbiega od modelu lub teoretycznego kształtu odniesienia),
- wrażliwość na specyficzne zmiany kształtu występujące w rozważanym procesie.

Współczynniki kształtu powinny przede wszystkim dobrze różnicować figury o różnych kształtach. Powinny być wrażliwe na zmienność kształtu figury, natomiast niewrażliwe na zmianę sposobu przedstawienia figury oraz wykazywać dużą niezależność od obrotów [6].

Tabela 1 przedstawia wybrane współczynniki kształtu, obliczone na podstawie zdjęć mikroskopowych.

Tabela 1

Wybrane współczynniki kształtu

Lp.	Współczynnik kształtu	Opis	Formuła
1.	K_{Cl} Współczynnik kolistości (cyrkularności)	Krągłość obiektu, maksymalnie równy 1 dla obiektów okrągłych.	$K_{Cl} = \frac{4\pi A}{Cr^2}$
2.	K_w Współczynnik kolistości Wadella	Stosunek obwodu ziarna do obwodu koła o powierzchni równej powierzchni ziarna.	$K_w = \frac{L}{L'}$
3.	K_I Współczynnik wypełnienia	Liczba pikseli obszaru podzielona przez iloczyn wysokości i szerokości ziarna. Parametr jest równy 1 dla idealnego prostokąta i osiąga wartości bliskie 0 dla bardzo pustych struktur.	$K_I = \frac{n}{x \cdot y}$
4.	K_2 Współczynnik wypukłości	Parametr jest równy 1 dla wypukłych obszarów, a większy dla obszarów, które zawierają fragmenty wklęsłe.	$K_2 = \frac{L}{2y + 2x}$
5.	K_F Współczynnik Fereta	Stosunek średnicy Fereta ziarna w poziomie $d_{F,h}$ do średnicy Fereta ziarna w pionie $d_{F,v}$ (charakteryzuje wydłużenie ziarna).	$K_F = \frac{d_{F,h}}{d_{F,v}}$
6.	K_E Wydłużenie (w stosunku do elipsy)	Na ziarnie opisana jest elipsa o osiach a_1 (dłuższa) i b_1 (krótsza). Im wyższa jest wartość tego współczynnika, tym większe jest wydłużenie ziarna, współczynnik osiąga wartości mniejsze od 1.	$K_E = \frac{a_1 - b_1}{a_1 + b_1}$
7.	K_α Stożek wydłużenia (w stosunku do koła)	Stosunek szerokości do wysokości prostokąta opisanego na ziarnie ($b > a$). Współczynnik osiąga minimalną wartość równą 1 dla koła lub kwadratu i ma wyższe wartości dla kształtów wydłużonych.	$\alpha = \frac{b}{a}$
8.	K_β Współczynnik pofałdowania powierzchni cząstek	Współczynnik jest bardzo wrażliwy na nieregularności kształtu ziarna i jednocześnie bardzo mało wrażliwy na wydłużenie. Jego minimalna wartość równa się 1 dla koła i osiąga większe wartości dla wszystkich innych kształtów.	$\beta = \frac{L^2}{4\pi A}$
9.	K_S Symetryczna miara wydłużenia ziarna	Logarytm dziesiętny z ilorazu wysokości i szerokości ziarna.	$K_S = \log_{10} \left(\frac{y}{x} \right)$
10.	K_Z Współczynnik zwięzłości	Parametr jest równy 1 dla kwadratu, a mniejszy dla kształtów o mniej regularnych granicach.	$K_Z = \frac{16n}{L^2}$

Objaśnienia:

x – szerokość obszaru, różnica między największą i najmniejszą współrzędną X obszaru; lub średnica Fereta pozioma – $d_{F,h}$,

y – wysokość obszaru, różnica między największą i najmniejszą współrzędną Y obszaru; lub średnica Fereta pionowa – $d_{F,v}$

n – liczba pikseli,

L – obwód obiektu,

A – pole powierzchni obiektu,

Cr – obwód Croftona. Obwód Croftona – średnia długości przecięć obiektu w kierunku 0, 45, 90 i 135°. Długości przecięć w kierunkach 45 i 135° są korygowane (normalizowane) o współczynnik $\sqrt{2}/2$,

L' – obwód koła o powierzchni równej powierzchni ziarna,

a_1 – długość dłuższej osi elipsy opisanej na obiekcie,

b_1 – długość krótszej osi elipsy opisanej na obiekcie.

3. Część doświadczalna

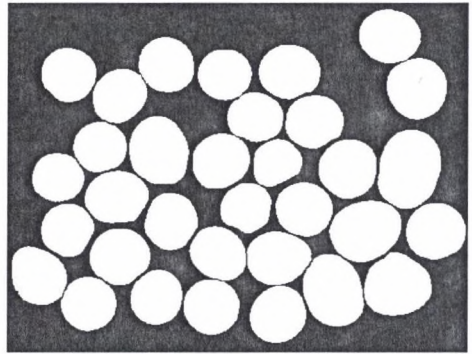
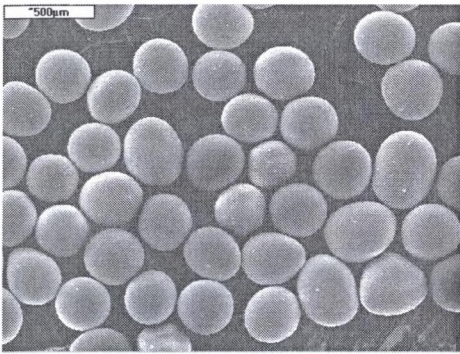
Do badań wybrano dwa materiały: balutinę i diabaz.

Balutina jest to szkło przygotowane w taki sposób, aby kształt jego ziaren był możliwie najbliższy kuli. Wybrano dwie klasy ziarnowe: $0,25 \div 0,315$ mm oraz $0,315 \div 0,4$ mm.

Diabaz natomiast pochodził z Kopalń Diabazu i Porfiru w Krzeszowicach ze złoża Niedźwiedzia Góra. Został rozdrobniony w kruszarce szczękowej, a następnie mielony był w laboratoryjnym młynku kulowym do uziarnienia poniżej 0,315 mm. Tak przygotowany materiał rozklasyfikowano na wąskie klasy ziarnowe na następującym zestawie sit: 0,032; 0,040; 0,063; 0,071; 0,080; 0,080; 0,1; 0,16 mm. Z uzyskanych klas do badań wybrano sześć: $0,032 \div 0,04$ mm; $0,04 \div 0,063$ mm; $0,063 \div 0,071$ mm; $0,071 \div 0,08$ mm; $0,08 \div 0,1$ mm i $0,1 \div 0,16$ mm.

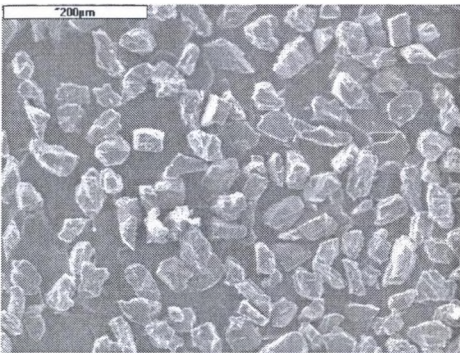
Poniżej przedstawiono wybrane zdjęcia skaningowe materiałów oraz ich obrazy binarne. Obrazy binarne są to obrazy otrzymane po przetworzeniu zdjęć skaningowych.

Celem binaryzacji jest zamiana obrazu mającego wiele poziomów szarości na obraz, którego piksele mają wyłącznie wartość 0 i 1 (obraz czarno-biały). BINARYZACJA jest jedną z ważniejszych czynności przetwarzania obrazu i w zasadzie tylko na obrazach binarnych można dokonywać pomiarów.



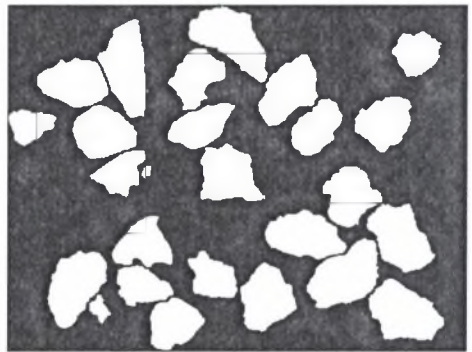
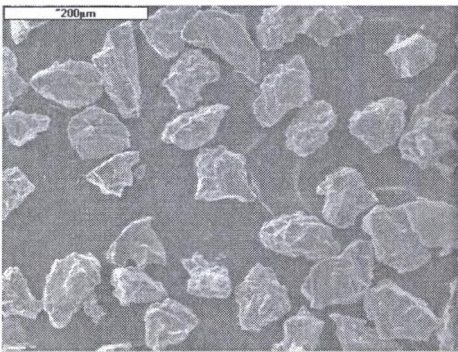
Rys. 1. Balutina – $0,25 \div 0,315$ mm: a) zdjęcie z mikroskopu skaningowego, powiększenie 50x;
b) obraz binarny

Fig. 1. Balutina – $0,25 \div 0,315$ mm: a) SEM image, magnification 50x; b) binary image



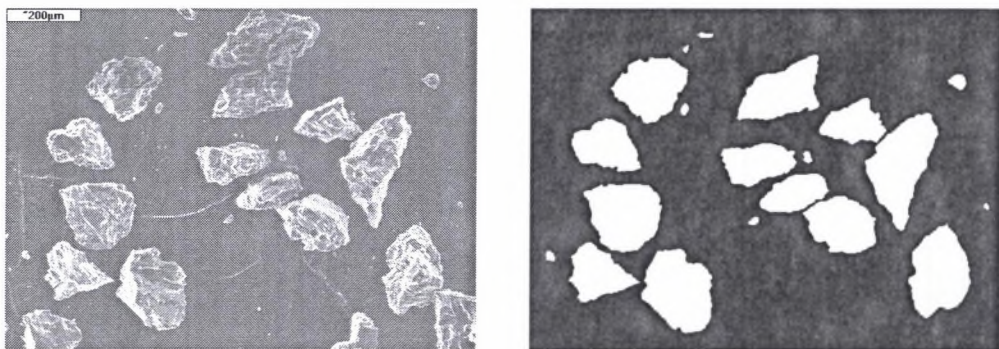
Rys. 2. Diabaz – $0,032 \div 0,04$ mm: a) zdjęcie z mikroskopu skaningowego, powiększenie 200x;
b) obraz binarny

Fig. 2. Diabase – $0,032 \div 0,04$ mm: a) SEM image, magnification 200x; b) binary image



Rys. 3. Diabaz – $0,063 \div 0,071$ mm: a) zdjęcie z mikroskopu skaningowego, powiększenie 200x;
b) obraz binarny

Fig. 3. Diabase – $0,063 \div 0,071$ mm: a) SEM image, magnification 200x; b) binary image



Rys. 4. Diabaz – $0,1 \div 0,16$ mm: a) zdjęcie z mikroskopu skaningowego, powiększenie 100x; b) obraz binarny

Fig. 4. Diabase – $0,1 \div 0,16$ mm: a) SEM image, magnification 100x; b) binary image

3.1. Analiza obrazu

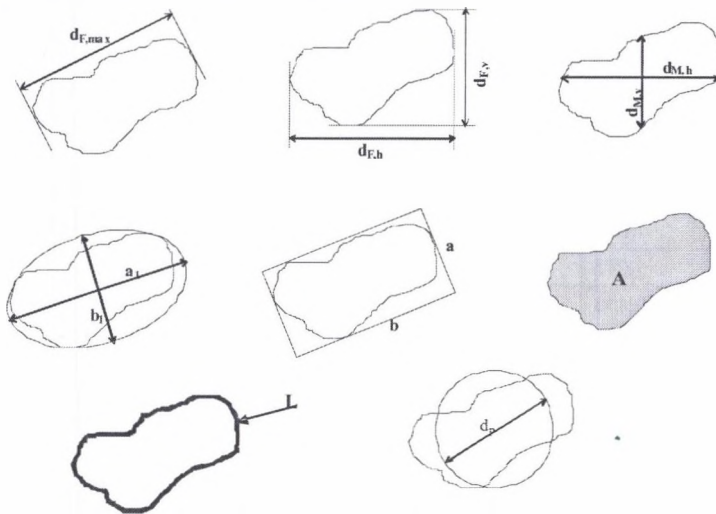
Aby wyznaczyć współczynniki kształtu, należy wcześniej pomierzyć charakterystyczne wymiary ziaren. W przypadku ziaren bardzo drobnych nie ma możliwości bezpośredniego pomiaru tych wielkości. W tym celu wykonano zdjęcia próbek wykorzystując możliwości mikroskopu skaningowego. Otrzymano obrazy o różnym stopniu szarości i powiększeniach 50-, 100- i 200-krotnych. Obrazy te zapisane w formacie JPEG są źródłem informacji dla programów do analizy obrazów.

Wyznaczenie podstawowych wielkości wykonano przy pomocy programu Aphelion. Aphelion jest uniwersalnym i elastycznym narzędziem do obróbki i analizy obrazu, mogącym znaleźć zastosowanie w różnych dziedzinach nauki. Oprócz standardowego zestawu operacji arytmetycznych, logicznych i operacji morfologicznych, Aphelion dysponuje możliwością stosowania transformaty Fouriera, analizy obrazów kolorowych oraz analizy obrazów 3-D. Analiza obrazu jest procesem polegającym na wyodrębnieniu z całkowitej ilości informacji tej części, która jest istotna z punktu widzenia procesu. Wynikiem analizy są dane jakościowe i ilościowe, opisujące określone cechy obrazu lub całej grupy obrazów.

Analiza obrazu obejmuje szereg operacji:

- proces segmentacji obrazu – segmentacja polega najczęściej na oddzieleniu poszczególnych obiektów wchodzących w skład obrazu i na wyodrębnieniu ich od tła, na którym występują. Segmentację wykorzystuje się m.in. jako etap przygotowawczy do rozpoznawania obiektów;
- technikę indeksacji obrazu – dzięki indeksacji możliwe są pomiary na indywidualnych obiektach, gdyż są wyznaczone „granice” dla każdego analizowanego obiektu;

- dokonanie pomiarów poszukiwanych cech analizowanego obrazu – wynikiem pomiarów są pewne wielkości ilościowe, opisujące wybrane cechy badanego obrazu. Pomiarom podlegać mogą dwie kategorie wielkości:
 - parametry lokalne, które opisują uśredniony element obrazu, np. średnia powierzchnia lub średnica obiektu;
 - parametry globalne, opisujące cechy grup obiektów. Są one zawsze wielkościami względnymi, np. ilość obiektów na jednostkę powierzchni długości;
- interpretacja otrzymanych wyników ilościowych i podjęcie na ich podstawie odpowiednich decyzji – interpretacja zależy od konkretnej dziedziny nauki lub techniki, w której stosowana jest analiza obrazu [7].



Rys. 5. Podstawowe geometryczne parametry dostępne w ilościowej analizie obrazu
 Fig. 5. The main geometrical parameters available in image analysis technique

Objaśnienia:

$d_{F,max}$ – maksymalna średnica Fereta,

$d_{F,h}$ – średnica Fereta pozioma,

$d_{F,v}$ – średnica Fereta pionowa,

$d_{M,h}$ – średnica Martina pozioma,

$d_{M,v}$ – średnica Martina pionowa,

a_1 – długość dłuższej osi elipsy opisanej na obiekcie,

b_1 – długość krótszej osi elipsy opisanej na obiekcie,

a – wysokość prostokąta opisanego na obiekcie,

b – szerokość prostokąta opisanego na obiekcie,

A – pole powierzchni obiektu, μm^2 ,

L – długość obwodu; liczba pikseli w obiekcie, które sąsiadują z pikselami nienależącymi do obiektu, piksel,

d_p – średnica projekcyjna – średnica koła o takiej samej powierzchni jak ziarno,

$$d_p = \sqrt{4A/\pi}$$

3.2. Wyniki

Wyniki pomiarów można zapisać w pliku tekstowym lub przesłać do arkusza kalkulacyjnego Excel.

Na podstawie tych zmierzonych wielkości geometrycznych obliczono średnie wartości współczynników kształtu.

Tabela 2

Średnie wartości wybranych współczynników kształtu dla poszczególnych klas ziarnowych

Lp.	Współczynnik	Balutina		Diabaz					
		0,25-0,315	0,315-0,4	0,032-0,04	0,04-0,063	0,063-0,071	0,071-0,08	0,08-0,1	0,1-0,16
1.	K_{Cl}	0,982	0,963	0,717	0,746	0,752	0,802	0,766	0,795
2.	K_W	1,28	1,296	1,521	1,497	1,482	1,427	1,475	1,448
3.	K_I	0,781	0,773	0,626	0,631	0,637	0,682	0,657	0,673
4.	K_2	1,002	1,006	1,043	1,04	1,038	1,027	1,045	1,034
5.	K_F	1,043	1,052	1,062	1,128	1,075	1,163	1,131	1,116
6.	K_E	0,111	0,168	0,462	0,383	0,366	0,363	0,355	0,391
7.	K_α	1,096	1,169	1,627	1,484	1,372	1,398	1,371	1,411
8.	K_β	1,639	1,68	2,326	2,246	2,2	2,041	2,183	2,104
9.	K_S	-0,017	-0,016	0,003	-0,036	-0,019	-0,045	-0,036	-0,021
10.	K_Z	0,777	0,759	0,559	0,573	0,583	0,631	0,591	0,613

Tabela 3

Balutina (0,25÷0,315mm)

Lp.	Współczynnik	n ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Rozstęp	Odchylenie stand..	Wskaźnik zmienności, %
1.	K_{Cl}	33	0,982	0,98	0,95	1,000	0,050	0,0132	1,344
2.	K_W	33	1,280	1,28	1,26	1,302	0,042	0,0098	0,766
3.	K_I	33	0,781	0,78	0,77	0,803	0,033	0,0097	1,242
4.	K_2	33	1,002	1,00	1,00	1,009	0,009	0,0032	0,319
5.	K_F	33	1,043	1,04	0,82	1,237	0,417	0,0944	9,051
6.	K_E	33	0,111	0,09	0,01	0,247	0,237	0,0652	58,739
7.	K_α	33	1,096	1,07	1,00	1,283	0,283	0,0834	7,609
8.	K_β	33	1,639	1,64	1,59	1,694	0,104	0,0251	1,531
9.	K_S	33	-0,017	-0,02	-0,09	0,088	0,178	0,0400	235,294
10.	K_Z	33	0,777	0,78	0,75	0,803	0,053	0,0120	1,544

W celu statystycznego scharakteryzowania współczynników kształtu w badanych próbkach podano ich podstawowe statystyki opisowe. Tabele 3 i 4 przedstawiają przykładowe wyniki tych statystyk dla diabazu i balutiny w wybranych klasach ziarnowych. Podobne obliczenia przeprowadzono dla pozostałych klas ziarnowych.

Tabela 4

Diabaz (0,032÷0,04mm)

Lp.	Współczynnik	n ważnych	Średnia	Mediana	Minimum	Maksimum	Rozstęp	Odchylenie stand.	Wskaźnik zmienności, %
1.	K_{CI}	77	0,717	0,729	0,433	0,881	0,448	0,0979	13,654
2.	K_W	77	1,521	1,501	1,311	1,889	0,578	0,1123	7,383
3.	K_I	77	0,626	0,633	0,387	0,862	0,475	0,0832	13,291
4.	K_2	77	1,043	1,037	1,000	1,153	0,153	0,0287	2,752
5.	K_F	77	1,062	0,979	0,455	2,478	2,023	0,4126	38,851
6.	K_E	77	0,462	0,478	0,014	0,898	0,884	0,1932	41,818
7.	K_σ	77	1,627	1,575	1,009	3,697	2,688	0,4790	29,441
8.	K_R	77	2,326	2,252	1,718	3,568	1,850	0,3547	15,249
9.	K_S	77	0,003	0,009	-0,394	0,342	0,736	0,1586	5286,667
10.	K_Z	77	0,559	0,565	0,357	0,741	0,384	0,0762	13,631

4. Podsumowanie

Na podstawie analizy uzyskanych współczynników kształtu można wytypować te współczynniki, które najlepiej charakteryzują strukturę uziarnienia określonych materiałów. Aby współczynniki precyzyjnie opisywały materiał, powinny wykazywać najmniejszą zmienność ich wartości wyrażoną poprzez wskaźnik zmienności.

W celu pełniejszego opisu zróżnicowania materiałów pod względem kształtu ich ziaren prowadzone będą dalsze badania z wykorzystaniem innych surowców.

Analizując wartości współczynników podanych w tabeli 2 oraz ich statystyk, dokonano interpretacji i oceny możliwości zastosowania niektórych z nich:

- K_{CI} – współczynnik kulistości – dla balutiny jego wartość wynosi ok. 1, co potwierdza kulisty kształt ziaren, a dla diabazu waha się w granicach od 0,717 do 0,802;
- K_W – współczynnik Wadella – wzrasta on wraz ze wzrostem pofałdowań obwodu ziarna. Ze względu na dużą czułość, wartość K_W dla balutiny jest znacznie większa od 1 i wynosi 1,28÷1,296 (pomimo kulistego kształtu ziaren), natomiast jeszcze wyższe wartości dla diabazu (1,427÷1,521) wskazują na nieregularności obwodu jego ziaren;
- K_2 – współczynnik wypukłości – w przypadku balutiny i diabazu charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem zmienności spośród obliczonych współczynników.

Wartość współczynnika K_2 bliska 1 świadczy o wypukłej strukturze powierzchni badanego materiału; dla balutiny waha się on w granicach $1,002 \div 1,006$, natomiast dla diabazu: $1,027 \div 1,045$. Na tym etapie badań trudno wnioskować, czy różnice między tymi wartościami dla balutiny i diabazu są istotne, by wnioskować o przydatności tego współczynnika do oceny kształtów ich ziaren;

- K_F – współczynnik Fereta – dla balutiny i dla diabazu różni się nieznacznie, dlatego nie nadaje się do różnicowania kształtów tego typu ziaren;
- K_E – wydłużenie w stosunku do elipsy – dla balutiny wartość tego współczynnika jest bliska 0 ($0,111 \div 0,168$) i jest co najmniej dwukrotnie mniejsza niż dla diabazu;
- K_α – wydłużenie w stosunku do koła lub kwadratu – dla balutiny ma wartość zbliżoną do 1, co jest charakterystyczne dla ziaren okrągłych, a w przypadku diabazu rośnie;
- K_β – pofałdowania powierzchni – dla balutiny wynosi ok. 1,6, natomiast dla diabazu przekracza wartość 2. Świadczy to o zróżnicowanej powierzchni ziaren obu tych materiałów

Analizując współczynniki kształtu w wąskich klasach ziarnowych diabazu stwierdzono, że w klasie $0,032 \div 0,04$ mm (czyli dla ziaren najdrobniejszych) występują znaczne różnice w stosunku do pozostałych klas. Szczególnie daje się to zauważyć przy współczynnikach: K_E – wydłużenie w stosunku do elipsy, K_α – wydłużenie w stosunku do koła, K_β – współczynnik pofałdowania, K_S – symetryczna miara wydłużenia ziarna – w tym przypadku jedynie dla tej klasy diabazu jego średnia wartość jest dodatnia. Współczynnik K_S wykazuje bardzo dużą czułość na zmiany kształtu. Zmienność tę przedstawia rysunek 2, gdzie wyraźnie widać ziarna zarówno zbliżone kształtem do koła, jak również ziarna skrajnie wydłużone. W pozostałych klasach diabazu wartości współczynników kształtu są do siebie bardzo zbliżone.

Artykuł [3], w którym porównuje się wyniki analiz składu ziarnowego wąskich klas ziarnowych diabazu wykonywanych różnymi metodami za pomocą rozkładów złożonych i funkcji rozmycia jednoznacznie stwierdza, że klasa $0,032 \div 0,04$ mm różni się charakterem od pozostałych. Taki stan rzeczy wymaga dalszych badań dotyczących kształtu ziaren tej klasy, zmian gęstości ziaren w klasach oraz zmian wielkości powierzchni właściwej. Prace nad tymi zagadnieniami są w toku.

LITERATURA

1. Allen T.: *Particle Size Measurement*. Chapman & Hall, 1992.
2. Feda J.: *Mechanics of Particulate Materials: the Principles*. Development in Geotechnical Engineering No. 30. Czechoslovak Academy of Sciences, Elsevier, Amsterdam 1982.
3. Gniadek M., Gawenda T., Krawczykowski D., Tumidajski T.: *Porównanie wyników analiz składu ziarnowego produktów rozdrabniania wykonywanych różnymi metodami za pomocą rozkładów złożonych i funkcji rozmycia*. Artykuł przygotowany do druku, 2005.
4. Russ J.C.: *Practical Stereology*. Plenum, New York 1986.
5. Serra J.: *Image Analysis and Mathematical Morphology*. Academic Press, 1982.
6. Tadeusiewicz R., Korohoda P.: *Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazów*. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków 1997.
7. Wojnar L., Kurzydłowski K.J., Szala J.: *Praktyka analizy obrazu*. Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002.

Recenzent: Dr hab. inż. Andrzej Ślącza
Profesor Politechniki Śląskiej

Abstract

Raw materials being presented in nature in solid state are characterized by granular structure. Every set of mineral grains is described by geometrical properties as grains size and grains shape. However, despite of many publications, there is not unequivocally approved definitions of these features.

In presented paper the 10 shape coefficients were selected and calculated for two different materials, which were ballutina (which grains are spherical) and diabase, which grains shapes are similar to the majority of mineral powders of isomorphic resistance properties. Both materials were treated as model ones for proposed calculations. To measure characteristic grain sizes, the photos of samples were taken, using the scanning microscope possibilities and then the basic parameters were calculated by means the Aphelion program (which is universal and elastic tool to image analysis). The quoted shape coefficients were calculated in base of flat views for narrow grain classes, treated as sieve classes. The first conclusion after the analysis of every shape coefficients is that they are different for both materials. In base of analysis of calculated shape coefficients the group of them, which describe the best the granulation structure of certain materials, may be selected.