

Damian Krawczykowski, Kazimierz Trybalski**

PRZYDATNOŚĆ LASEROWYCH ANALIZ UZIARNIENIA DO BILANSOWANIA PRODUKTÓW KLASYFIKACJI W HYDROCYKLONIE**

1. Wstęp

Istnieje wiele metod pomiaru wielkości ziaren. Generalnie można je podzielić na metody bezpośrednie — wykorzystujące np. wielkość sitową ziarna, średnicę Martina lub Fereta, oraz metody pośrednie wykorzystujące zjawiska fizyczne i pewne techniki przeliczeniowe — np. pomiar lepkości mętów, dyfrakcja światła w zawiesinie, fotoelektryczne przeszukiwanie przestrzeni, segregacja ziaren w polu odśrodkowym, itp. [2].

Wybór metody pomiarowej do określenia składu ziarnowego materiału uziarnionego zależy od różnych właściwości reprezentującej go próbki, głównie jednak od zakresu wielkości ziaren znajdujących się w badanej próbce [4].

Należy jednak zdawać sobie sprawę, że każda z metod pomiarowych generuje z założenia różną informację o rozkładzie wielkości cząstek. Na wyniki oznaczeń główny wpływ bowiem ma stosowana metoda pomiaru, wykorzystująca różne właściwości materiałów: np. właściwości geometryczne, gęstość, charakter powierzchni (porowatość) itp. [3].

Zastosowana, w prezentowanych badaniach, laserowa metoda pomiaru wielkości cząstek, wykorzystuje zjawisko dyfrakcji światła laserowego. Istotny więc wpływ na wyniki pomiarów ma kształt ziaren, ich porowatość, a także zakres wielkości ziaren znajdujących się w badanej próbce. Podczas pomiaru cząstek różniących się istotnie wielkością, dyfraktogramy wpływają na siebie i utrudniają analizę. Koincydencja powyższych czynników wpływa więc na błąd pomiarowy oraz precyzję.

Mając na względzie wpływ powyższych zjawisk oraz czynników na dokładność pomiarów, podjęto próbę zbilansowania produktów — określenia wychodów γ produktów klasyfikacji (przelewu i wylewy) — opierając się na wynikach laserowych analiz granulometrycznych próbek nadawy i produktów klasyfikacji w hydrocyklonie.

* Wydział Górnictwa i Geoinżynierii, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

** Publikację przygotowano w ramach pracy statutowej AGH 11.11.100.276

Dokładność analiz charakteryzowana była współczynnikiem zmienności w dla udziałów poszczególnych klas ziarnowych, natomiast powtarzalności wyników pomiarów nie badano z uwagi na określoną przez producenta urządzenia precyzję pomiaru na poziomie $< 1,5\%$.

2. Analizy granulometryczne

Badanym materiałem były odpady z flotacji krajowej rudy cynku i ołowiu. Odpady te przed skierowaniem na staw osadowy poddano serii klasyfikacji w hydrocyklonach.

Artykuł nie dotyczy warunków klasyfikacji odpadów w hydrocyklonie oraz celowości prowadzenia takich doświadczeń.

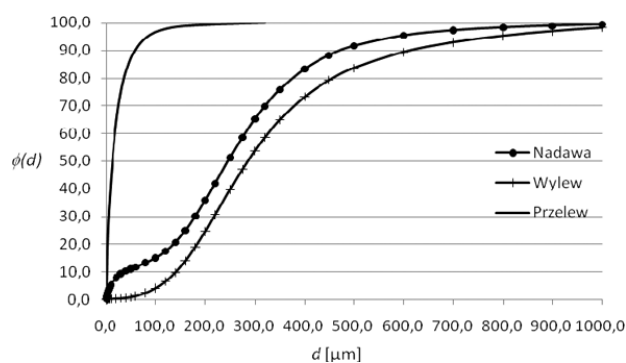
Analizy granulometryczne obejmowały nadawy odpadów oraz odpowiadające im produkty — przelewy i wylewy z 12 doświadczeń. Z każdego doświadczenia do analiz pobierano z nadaw oraz produktów klasyfikacji po 3 reprezentatywne próbki. Łącznie więc oznaczono skład ziarnowy w 108 próbkach odpadów flotacyjnych rudy Zn–Pb. W tabeli 1 oraz na rysunku 1 podano uśredniony skład ziarnowy badanych produktów.

TABELA 1
Uśrednione wyniki składu ziarnowego badanych produktów

$d, \mu\text{m}$	$\phi(d)_N$	$\phi(d)_W$	$d, \mu\text{m}$	$\phi(d)_P$
0,5	0,3	0,1	0,5	2,2
1,0	1,1	0,2	1,0	7,7
2,0	2,3	0,2	2,0	16,8
3,2	3,1	0,3	3,2	23,4
5,0	3,9	0,3	5,0	30,3
7,0	4,5	0,3	7,0	36,0
10,0	5,3	0,3	10,0	43,6
20,0	7,9	0,4	15,0	54,2
30,0	9,4	0,5	20,0	62,7
40,0	10,3	0,7	25,0	69,2
50,0	11,1	0,9	30,0	74,4
60,0	11,8	1,3	35,0	78,5
80,0	13,3	2,5	40,0	81,8
100,0	15,1	4,2	50,0	86,7
120,0	17,4	6,6	60,0	90,1
140,0	20,7	9,8	70,0	92,5
160,0	24,9	14,0	80,0	94,3

TABELA 1 cd.

$d, \mu\text{m}$	$\phi(d)_N$	$\phi(d)_W$	$d, \mu\text{m}$	$\phi(d)_P$
180,0	30,1	19,0	90,0	95,6
200,0	35,8	24,7	100,0	96,5
220,0	42,0	30,7	110,0	97,1
250,0	51,3	39,8	120,0	97,6
275,0	58,6	47,1	130,0	98,0
300,0	65,2	53,8	140,0	98,3
320,0	69,9	58,6	160,0	98,7
350,0	75,9	65,0	180,0	98,9
400,0	83,2	73,3	200,0	99,1
450,0	88,2	79,3	220,0	99,2
500,0	91,6	83,7	250,0	99,4
600,0	95,4	89,5	280,0	99,6
700,0	97,2	93,0	320,0	99,8
800,0	98,3	95,4		
900,0	98,9	97,0		
1000,0	99,4	98,3		
1150,0	99,9	99,7		



Rys. 1. Średnie uziarnienie badanych produktów

3. Metoda pomiarowa [1]

Analizy granulometryczne wykonano przy użyciu laserowego analizatora cząstek, wyposażonego w laser helowo-neonowy, system optyczny, przepływową celę pomiarową dla zawiesin oraz jednostkę dyspergującą.

Zasada pomiaru polegała na dyfrakcji strumienia światła laserowego na mierzonych cząstkach. Strumień światła laserowego prześwietlając celę pomiarową ulega dyfrakcji na cząstkach proporcjonalnie do ich wielkości. W momencie, gdy światło lasera napotyka na populację ziaren, rozkład objętościowy ich wielkości wyrażony jest intensywnością rozkładu rozproszonego na nich światła. Rozproszenie powstaje na krawędziach rozgraniczających dwa media o różnych współczynnikach załamania światła, które to krawędzie są nowym źródłem fali. Dzięki występującej przy tym zjawisku interferencji powstają dyfraktogramy — naprzemianległe jasne i ciemne, kuliste pierścienie. Zgodnie z zasadą dyfrakcji, małe cząstki załamują światło wiązki laserowej pod większymi kątami, a większe cząstki są źródłem mniejszych kątów odchylenia od osi strumienia światła, natomiast natężenie strumienia światła jest proporcjonalne do zawartości (ilości) poszczególnych cząstek. Powstały obraz dyfrakcyjny identyfikowany jest przez układ światłoczułych detektorów, a otrzymywane sygnały są wykorzystywane do obliczenia rozkładu wielkości ziaren. Stosowana jest do tego celu transformacja Fraunhofera, opisująca zjawisko dyfrakcji światła przechodzącego przez siatkę dyfrakcyjną (badaną próbkę), pozwalająca na ścisłe przeliczenie zależności między stałą siatki dyfrakcyjnej, parametrami geometrycznymi układu pomiarowego, długością fali światła a efektem dyfrakcji rejestrowanym w detektorze.

$$\text{Średnica cząstki} = \frac{1,84 \cdot f \cdot \text{długość fali}}{R_0} \quad (1)$$

gdzie:

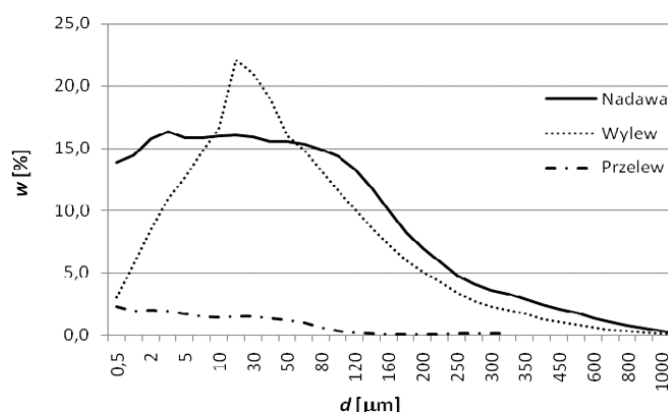
R_0 — promień pierścieni dyfrakcyjnych,
 f — długość ogniskowej obiektywu.

Równanie to można zastosować tylko wtedy, gdy analizowane cząstki mają podobną wielkość. W przypadku dwóch różnej wielkości cząstek, dyfraktogramy wpływają na siebie i utrudniają analizę. Potrzebne są dwa powyższe równania określające ich średnice, a dla określenia wzajemnych stosunków objętościowych obydwu klas ziarnowych mierzona jest intensywność światła załamanego w funkcji kąta załamania. Ilość równań i liczba przypadających na każde równanie elementów jest równa liczbie mierzonych klas ziarnowych. Dają one układ macierzy, których wyznaczenie pozwala określić wielkość cząstek i ich wzajemne stosunki objętościowe. Obliczenia powyższe realizowane są automatycznie przez system obliczeniowy urządzenia pomiarowego.

4. Analiza wyników badań

W celu określenia dokładności wykonanych analiz granulometrycznych obliczono podstawowe parametry statystyczne: odchylenia standardowe s oraz współczynniki zmienności w dla udziałów poszczególnych klas ziarnowych. Uśrednione z trzech pomiarów wartości

współczynników zmienności dla nadaw, wylewów i przelewów podano w tabeli 2–4, natomiast na rysunku 2 pokazano uśrednioną tendencję zmian współczynnika w klasach ziarnowych dla poszczególnych produktów.



Rys. 2. Rozkład uśrednionych wartości współczynników zmienności udziałów poszczególnych klas ziarnowych w badanych produktach

Analizując wartości tabelaryczne współczynników zmienności widać dużą różnicę w wartościach współczynników pomiędzy poszczególnymi doświadczeniami, szczególnie w próbkach nadawy (np. w próbkach N8 i N5), jak również w próbkach wylewów (np. W2 i W8). Dla próbek przelewów wartości współczynników zmienności są dużo bardziej stabilne. Ma to związek z reprezentatywnością analizowanych próbek. Dużo trudniejszym zadaniem jest reprezentatywne pobranie próbek charakteryzujących się szerokim zakresem wielkości ziaren (np. nadaw) lub próbek z przewagą ziaren grubych, które łatwo ulegają segregacji (np. wylewów), aniżeli próbek drobnouziarnionych o stosunkowo wąskim zakresie uziarnienia (np. przelewów).

Analiza wykresów (rys. 2) wskazuje ponadto, że dokładność analiz mierzona współczynnikiem zmienności różni się dla poszczególnych klas ziarnowych oraz produktów. Najwyższymi wartościami współczynników zmienności oraz najbardziej rozbieżnymi w klasach ziarnowych charakteryzowały się nadawy i wylewy. Tendencja ta wynika bezpośrednio z metody pomiarowej (dyfrakcja światła) wykorzystywanej w analizie laserowej. Powstające podczas analizy dyfraktogramy wzajemnie się zakłócają (nakładają się), utrudniając analizę. Najbardziej zakłócającymi pomiar dyfraktogramami są dyfraktogramy pochodzące od ziaren najgrubszych. Skrajnie grube ziarna bardzo silnie wpływają na dokładność pomiaru ziaren najdrobniejszych, natomiast odwrotnie, ziarna drobne nie powodują dużych błędów w pomiarze ziaren grubych. Taką interpretację natury pomiaru potwierdzają wyniki współczynników zmienności uzyskane dla próbek nadaw i wylewów. Dla nadaw, w klasach drobnych ($0 \div 120 \mu\text{m}$) współczynniki w osiągają dużo wyższą wartość niż w klasach grubych.

TABELA 2

Zestawienie współczynników zmienności udziałów klas ziarnowych dla nadaw (N)

d , μm	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %
0,5	27,1	11,2	17,3	19,4	28,9	12,2	2,2	0,0	5,2	12,9	16,6	13,7
1	25,9	10,6	18,3	20,7	32,4	13,7	3,4	2,4	4,0	13,3	18,7	10,4
2	24,0	10,1	20,6	20,8	35,5	15,2	4,6	2,7	3,8	18,5	20,9	12,3
3,15	31,7	10,3	22,1	21,1	37,0	15,8	5,4	2,2	2,0	15,0	21,3	12,4
5	23,4	10,5	24,4	21,3	37,7	15,7	5,6	0,9	4,0	13,4	21,9	11,5
7	23,3	10,5	26,4	21,5	38,0	15,4	5,0	0,0	3,3	12,8	21,9	11,8
10	23,2	10,1	28,5	21,5	38,6	15,1	4,8	0,7	2,4	12,2	22,4	12,4
20	22,6	9,4	27,8	21,6	38,7	15,4	6,1	1,4	2,0	11,5	23,9	12,4
30	22,5	9,0	26,5	21,5	37,4	15,2	6,2	3,6	2,4	11,2	23,6	12,2
40	20,1	8,7	26,1	21,2	37,0	14,9	5,7	4,9	2,3	11,0	22,8	12,2
50	22,1	8,4	25,8	21,0	36,9	14,7	5,3	5,0	2,4	10,8	22,2	11,8
60	21,9	7,9	25,4	20,8	36,9	14,5	5,4	5,1	2,7	10,6	21,8	11,1
80	21,8	6,7	24,4	20,4	36,7	14,1	5,8	6,0	2,7	10,3	20,7	9,6
100	21,6	5,2	23,5	19,7	35,8	13,4	5,9	8,7	2,4	9,9	18,8	7,5
120	21,1	3,7	22,2	18,7	33,5	12,4	5,4	10,4	2,0	9,3	16,4	5,2
140	20,0	2,3	19,8	17,4	29,5	11,4	4,6	10,4	1,4	8,6	13,1	3,1
160	18,3	1,2	17,0	16,0	24,6	10,3	3,8	9,4	0,9	7,8	9,6	1,4

TABELA 2 cd.

d , μm	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12
	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %
180	16,2	0,3	14,3	14,6	19,7	9,2	3,2	8,0	0,5	7,1	6,2	0,2
200	14,0	0,5	11,9	13,2	15,7	8,2	2,7	6,6	0,3	6,3	3,4	0,5
220	11,9	1,1	9,9	12,0	12,5	7,2	2,3	5,4	0,3	5,6	1,2	0,9
250	9,1	1,7	7,7	10,3	9,1	6,0	2,0	3,9	0,3	4,6	1,0	1,4
275	7,2	2,0	6,3	9,1	7,2	5,1	1,9	3,0	0,2	3,8	2,1	1,6
300	5,7	2,2	5,3	8,1	5,8	4,4	1,8	2,3	0,1	3,1	2,7	1,8
320	4,8	2,3	4,6	7,4	5,0	3,9	1,7	1,9	0,1	2,7	2,9	1,9
350	3,7	2,4	3,8	6,5	4,2	3,3	1,7	1,5	0,3	2,2	2,9	2,0
400	2,6	2,4	2,9	5,3	3,3	2,5	1,6	1,1	0,8	1,6	2,7	2,1
450	1,9	2,2	2,3	4,3	2,7	1,9	1,4	0,9	1,2	1,4	2,3	2,0
500	1,5	2,0	1,8	3,5	2,3	1,5	1,3	0,8	1,6	1,2	1,9	1,9
600	0,9	1,6	1,2	2,3	1,7	0,9	1,0	0,7	1,9	1,0	1,4	1,6
700	0,6	1,3	0,8	1,5	1,2	0,5	0,8	0,7	1,9	0,8	1,1	1,2
800	0,4	1,0	0,6	1,0	0,8	0,3	0,6	0,6	1,6	0,6	0,9	0,8
900	0,3	0,7	0,4	0,6	0,6	0,2	0,4	0,5	1,3	0,3	0,8	0,5
1000	0,2	0,4	0,3	0,3	0,3	0,1	0,3	0,3	0,9	0,2	0,5	0,2
1150	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,2	0,0	0,2	0,0

TABELA 3

Zestawienie współczynników zmienności udziałów klas ziarnowych dla wylewów (W)

d , μm	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %
0,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,43	9,43	0,00	9,43	8,32
1	3,45	0,00	0,00	0,00	4,88	4,56	5,24	16,64	8,84	4,88	12,86	7,44
2	8,84	0,00	7,44	0,00	3,63	9,43	7,07	20,20	15,04	6,43	13,86	9,75
3,15	7,64	0,00	7,07	3,14	10,35	11,31	12,30	31,43	18,00	5,44	14,14	10,55
5	10,35	0,00	10,35	3,01	13,47	13,34	11,31	37,22	18,86	4,88	14,78	15,29
7	11,12	2,24	10,35	2,89	16,44	12,86	13,34	44,05	24,69	4,56	19,64	14,14
10	11,09	4,04	9,87	8,32	19,28	16,78	11,98	51,43	25,71	4,29	23,27	12,86
20	5,81	4,37	16,32	14,14	36,05	22,93	16,11	68,09	32,89	9,64	24,01	14,63
30	4,71	2,36	10,55	11,47	38,16	21,06	16,38	67,88	30,86	9,08	23,93	15,26
40	5,51	0,00	4,47	6,49	33,67	22,58	15,99	60,92	27,87	9,72	21,96	17,97
50	5,24	0,73	0,00	5,24	24,54	15,52	15,71	51,28	24,49	8,42	20,20	20,36
60	5,73	2,77	3,55	4,75	17,28	14,59	16,05	42,10	20,71	8,84	18,92	22,03
80	5,54	5,31	8,49	3,06	10,27	13,17	15,14	30,17	17,25	9,18	15,90	23,98
100	5,10	6,16	11,34	1,61	7,72	11,47	12,54	21,55	15,10	9,71	12,40	24,28
120	4,58	6,53	12,03	1,00	6,49	9,66	10,63	15,37	13,38	9,67	9,39	22,85
140	4,08	6,25	11,51	0,66	5,45	7,91	8,93	10,75	11,50	8,85	7,00	20,46
160	3,67	5,82	10,60	0,41	4,52	6,51	7,70	7,56	9,59	7,73	5,37	17,63

TABELA 3 cd.

d , μm	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %	w , %
180	3,31	5,31	9,48	0,22	3,58	5,40	6,71	5,20	7,64	6,52	4,45	14,76
200	3,01	4,85	8,47	0,06	2,80	4,54	5,98	3,60	6,05	5,55	3,94	12,19
220	2,76	4,39	7,55	0,02	2,12	3,83	5,36	2,48	4,69	4,68	3,61	9,92
250	2,39	3,84	6,41	0,11	1,30	3,00	4,62	1,40	3,13	3,66	3,32	7,22
275	2,10	3,46	5,62	0,12	0,78	2,45	4,08	0,86	2,16	3,04	3,17	5,51
300	1,85	3,13	4,97	0,12	0,39	2,00	3,66	0,54	1,45	2,57	3,02	4,22
320	1,65	2,89	4,52	0,11	0,16	1,70	3,35	0,39	1,00	2,28	2,91	3,41
350	1,38	2,58	3,95	0,08	0,13	1,32	2,95	0,26	0,53	1,96	2,73	2,51
400	0,98	2,11	3,18	0,02	0,37	0,87	2,42	0,22	0,12	1,62	2,39	1,57
450	0,64	1,71	2,58	0,03	0,49	0,56	1,99	0,25	0,04	1,43	2,04	1,06
500	0,37	1,35	2,09	0,07	0,56	0,36	1,64	0,28	0,05	1,33	1,70	0,78
600	0,02	0,78	1,33	0,10	0,60	0,14	1,12	0,31	0,05	1,18	1,12	0,51
700	0,15	0,38	0,81	0,11	0,57	0,05	0,77	0,29	0,15	1,02	0,71	0,38
800	0,21	0,13	0,46	0,08	0,48	0,01	0,51	0,24	0,20	0,84	0,44	0,30
900	0,21	0,01	0,25	0,07	0,37	0,01	0,32	0,19	0,20	0,64	0,25	0,22
1000	0,17	0,09	0,10	0,05	0,24	0,00	0,17	0,12	0,17	0,44	0,12	0,17
1150	0,08	0,10	0,04	0,01	0,07	0,01	0,02	0,04	0,09	0,13	0,00	0,06

TABELA 4
Zestawienie współczynników zmienności udziałów klas ziarnowych dla przelewów (P)

$d, \mu\text{m}$	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %
0,5	5,84	2,79	0,34	2,75	0,69	3,42	4,00	1,67	0,37	1,42	2,60	1,88
1,0	3,61	2,54	0,56	1,12	1,86	2,58	3,21	0,71	2,53	1,48	2,22	0,91
2,0	1,63	4,65	0,66	0,54	1,95	2,16	3,15	2,07	3,07	2,33	2,07	0,41
3,2	0,93	4,85	0,68	1,03	1,62	1,94	3,07	2,09	2,49	2,53	2,12	0,38
5,0	0,69	4,45	0,49	1,13	1,03	1,81	2,92	1,52	1,32	2,36	2,50	0,51
7,0	0,70	4,08	0,36	1,04	0,72	1,80	2,93	0,89	0,43	1,82	3,03	0,56
10,0	0,72	3,82	0,36	0,93	0,66	1,78	2,90	0,32	0,39	1,11	3,74	0,49
15,0	0,66	3,83	0,63	0,92	0,93	1,66	2,74	0,05	1,17	0,54	4,45	0,28
20,0	0,52	3,89	0,84	0,93	1,18	1,49	2,52	0,17	1,68	0,49	4,72	0,09
25,0	0,36	3,89	0,93	0,88	1,32	1,35	2,26	0,27	2,00	0,58	4,71	0,05
30,0	0,23	3,84	0,93	0,83	1,38	1,21	2,02	0,32	2,18	0,70	4,55	0,16
35,0	0,12	3,73	0,87	0,74	1,38	1,10	1,78	0,35	2,25	0,79	4,32	0,25
40,0	0,04	3,58	0,78	0,66	1,33	1,00	1,55	0,36	2,22	0,83	4,03	0,34
50,0	0,07	3,18	0,56	0,53	1,19	0,83	1,10	0,34	2,01	0,80	3,41	0,45
60,0	0,12	2,74	0,38	0,42	1,04	0,67	0,71	0,28	1,68	0,66	2,79	0,53
70,0	0,15	2,31	0,23	0,34	0,88	0,54	0,38	0,22	1,35	0,51	2,24	0,56

TABELA 4 cd.

d , μm	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10	W11	W12
	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %	w, %
80,0	0,16	1,87	0,14	0,26	0,76	0,43	0,13	0,17	1,07	0,26	1,77	0,56
90,0	0,13	1,50	0,08	0,19	0,65	0,33	0,05	0,13	0,82	0,00	1,37	0,54
100,0	0,04	1,15	0,04	0,07	0,56	0,21	0,17	0,05	0,61	0,00	0,98	0,50
110,0	0,00	0,84	0,01	0,00	0,48	0,04	0,24	0,00	0,45	0,00	0,51	0,45
120,0	0,00	0,57	0,00	0,00	0,42	0,00	0,29	0,00	0,32	0,00	0,14	0,40
130,0	0,00	0,32	0,01	0,00	0,35	0,00	0,30	0,00	0,22	0,00	0,02	0,36
140,0	0,00	0,11	0,01	0,00	0,31	0,00	0,30	0,00	0,16	0,00	0,00	0,19
160,0	0,00	0,26	0,00	0,00	0,10	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
180,0	0,00	0,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
200,0	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
220,0	0,00	0,65	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
250,0	0,00	1,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
275,0	0,00	1,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
320,0	0,00	1,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Zjawisko to jest jeszcze bardziej widoczne dla wylewów, dla których współczynniki zmienności w klasach bardzo drobnych, z przedziału $5 \div 70 \mu\text{m}$, osiągają jeszcze wyższe wartości niż w analogicznych klasach dla nadawy. Większą niedokładność analiz powyższych klas ziarnowych ($5 \div 70 \mu\text{m}$) w wylewach, można tłumaczyć znacznie mniejszym ich udziałem, wynikającym z „przejścia” tych ziaren z nadaw do przelewów, co gwałtownie zwiększa podatność ziaren z tego zakresu wielkości na zakłócenia pomiaru pochodzące od ziaren skrajnie grubych, których udział w wylewie jest w oczywisty sposób podwyższony.

Odnosząc się do zaobserwowanych w wylewach niskich wartości współczynników zmienności dla klas skrajnie drobnych ($0 \div 5 \mu\text{m}$) należy stwierdzić, że z powodu bardzo małej populacji ziaren tej klasy w wylewach, analiza laserowa w takim zakresie uziarnienia charakteryzowała się ograniczoną czułością pomiaru.

Zdecydowanie najniższymi wartościami współczynników zmienności w klasach ziarnowych i najbardziej wyrównanymi charakteryzowały się przelewy. Zakres ich uziarnienia w stosunku do nadaw i wylewów był dużo węższy, dlatego też dokładność analiz granulometrycznych tych produktów okazała się najwyższa.

4.1. Obliczenia bilansujące

Mając na uwadze powyższe spostrzeżenia dotyczące dokładności laserowych analiz granulometrycznych badanych odpadów, wykonano obliczenia bilansujące produkty klasyfikacji.

Bilans produktów klasyfikacji w hydrocyklonach oparty został na powszechnie stosowanym w procesach klasyfikacji ziarnowej prawie zachowania masy, wyrażonym układem równań bilansowych:

$$\begin{cases} \gamma_P + \gamma_W = 1 \\ \gamma_P \cdot a_{Pi} + \gamma_W \cdot a_{Wi} = 100 \cdot a_{Ni} \end{cases} \Rightarrow \gamma_P = \frac{100 (a_{Ni} - a_{Wi})}{(a_{Pi} - a_{Wi})} \quad (2)$$

gdzie:

γ_P, γ_W — wychody procentowe odpowiednio: przelewu i wylewu;

a_{Pi}, a_{Wi}, a_{Ni} — procentowe udziały i -tych klas ziarnowych odpowiednio w: przelewie, wylewie, nadawie.

Poniżej w tabeli 5 podano wyniki obliczeń bilansujących.

Wyniki obliczeń bilansowych przedstawione w tabelach 5 i 6 potwierdzają możliwość względnie precyzyjnego określenia wychodów produktów klasyfikacji w hydrocyklonach. Bilans ten musi być jednak oparty o udziały procentowe najdrobniejszych klas ziarnowych, które metodą laserową określane są z dużą dokładnością. Jak wynika z analizy wychodów przelewów obliczonych dla poszczególnych klas ziarnowych (tab. 5), są to udziały ziaren od 1 do ok. $40 \mu\text{m}$. W tym zakresie uziarnienia wychody przelewów γ_P obliczone na podstawie powyższego wzoru bilansowego wykazują stabilne wartości.

Uśrednione wyniki wychodów przelewów dla poszczególnych doświadczeń z wybranych najdrobniejszych klas ziarnowych oraz ich odchylenia standardowe przedstawiono w tabeli 6.

TABELA 5

Wychody przelewów obliczone na podstawie wyników analiz granulometrycznych dla poszczególnych klasyfikacji

d , μm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %
0,5	16,3	17,2	3,0	24,4	6,6	24,1	14,1	1,4	10,6	17,7	4,9	4,2
1	16,9	17,9	3,0	23,3	6,3	22,5	13,3	1,4	11,4	17,7	5,4	4,3
2	17,9	18,2	3,3	22,6	6,8	21,7	13,4	1,5	11,7	16,9	5,8	4,7
3,15	14,7	17,5	3,2	22,3	6,5	20,6	12,7	1,5	10,6	18,9	5,7	4,6
5	18,1	16,1	2,4	22,1	5,4	18,4	11,9	1,4	10,7	16,9	5,1	4,3
7	14,9	15,2	2,5	21,7	4,7	16,1	11,0	1,0	8,0	13,5	4,8	3,8
10	16,1	16,5	2,6	23,0	5,3	18,0	12,1	1,2	8,1	13,9	4,7	4,2
20	19,6	20,3	3,5	24,8	7,4	23,4	14,9	2,0	11,0	17,9	5,9	5,5
30	17,0	19,0	3,5	22,5	7,4	21,2	15,0	1,8	10,8	16,6	5,7	5,2
40	17,2	18,7	3,0	23,2	6,4	19,9	15,0	1,4	9,6	15,7	5,4	3,4
50	15,7	20,1	2,3	28,5	6,2	24,2	16,4	-0,5	10,3	20,9	6,0	0,7
60	1,3	22,8	0,7	40,2	5,7	35,1	19,1	-6,0	11,2	32,4	5,5	-7,0
80	-359,3	28,9	-4,3	84,4	3,2	71,9	24,6	-36,3	11,8	81,3	-2,0	-39,6
100	66,5	52,3	-28,3	-133,6	-13,2	-304,1	46,6	109,3	13,4	-58,1	-455,6	864,1
120	45,0	146,9	214,8	-42,5	130,3	-58,0	222,5	34,4	69,7	-30,9	35,3	92,2
140	36,6	-640,0	32,0	-28,3	24,9	-36,8	-142,3	20,0	0,0	-23,0	21,6	53,4
160	26,6	-124,7	15,0	-17,9	10,9	-26,2	-69,7	9,7	3,5	-17,4	15,3	34,3

TABELA 5 cd.

d , μm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %
180	16,9	-64,1	8,7	-8,5	4,2	-16,6	-46,1	1,9	4,3	-11,0	9,7	22,4
200	9,8	-39,9	5,1	-1,8	-0,2	-9,6	-34,2	-2,8	4,8	-6,9	5,8	13,2
220	2,5	-22,7	2,4	5,2	-3,8	-2,4	-24,7	-6,5	5,2	-1,8	1,9	3,5
250	-2,5	-5,6	0,4	10,9	-6,1	3,9	-15,3	-8,7	5,3	2,5	-0,7	-5,7
275	-6,6	8,4	-1,6	17,2	-7,4	11,0	-4,3	-10,0	5,3	7,0	-3,2	-15,0
300	-7,5	16,3	-2,0	21,8	-7,1	16,5	3,9	-9,9	5,3	10,1	-4,4	-21,3
320	-7,7	27,1	-3,0	25,8	-6,2	21,0	11,4	-9,1	5,4	12,6	-4,8	-26,1
350	-5,3	30,3	-3,0	30,0	-4,6	26,3	18,8	-8,3	5,3	15,2	-4,7	-29,7
400	0,4	36,0	-2,8	36,9	0,6	34,9	30,1	-5,3	5,8	19,4	-3,2	-33,1
450	10,5	45,8	-2,0	45,6	7,2	45,6	42,5	-1,3	6,9	25,5	0,4	-32,4
500	22,3	50,8	-1,0	54,0	14,2	56,4	53,6	3,1	9,7	32,7	5,6	-26,9
600	39,6	60,5	0,8	65,1	22,9	69,4	66,0	8,3	15,4	44,2	14,3	-10,8
700	59,1	69,9	2,1	76,5	30,9	81,9	78,2	14,2	26,1	61,2	25,3	19,6
800	72,5	75,0	3,5	84,8	35,7	88,5	84,7	16,5	37,3	75,1	30,7	52,3
900	79,7	78,2	4,5	87,4	39,1	92,6	88,8	18,1	46,9	89,0	30,3	75,1
1000	84,7	80,5	4,9	88,5	40,4	95,1	91,1	18,7	54,6	93,5	26,3	81,3
1150	87,4	78,1	0,9	88,6	38,9	95,3	92,8	17,2	63,8	94,9	12,6	84,9

TABELA 6

Uśrednione wartości wychodów przelewów z wybranych klas ziarnowych dla poszczególnych klasyfikacji

Statystyki	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %	γ_p , %
Średnia	16,9	18,4	2,9	22,8	6,2	20,2	13,6	1,5	10,2	16,5	5,4	4,4
Odch.std.	1,7	2,3	0,5	1,0	0,9	2,5	1,7	0,3	1,3	1,9	0,5	0,7

5. Wnioski

Uzyskane na podstawie przeprowadzonych badań wyniki wskazują, że:

- laserowa analiza granulometryczna dostarcza dokładnych informacji o rozkładzie wielkości ziaren, które umożliwiają bilansowanie produktów klasyfikacji w hydrocyklonach materiałów drobnouziarnionych;
- bilans produktów powinien być oparty o udziały procentowe najdrobniejszych klas ziarnowych, które metodą laserową określane są z dużą dokładnością;
- dokładność laserowych analiz granulometrycznych poszczególnych strumieni materiałowych, wyrażona współczynnikiem zmienności udziałów klas ziarnowych, jest różna. Najdokładniej analizowane są przelewy, natomiast najmniejszą dokładnością pomiaru charakteryzują się nadawy. Różnice w dokładności pomiarów widoczne są również w poszczególnych klasach ziarnowych.
Jak dowodzą przeprowadzone badania, zaobserwowane różnice, wynikają głównie z zastosowanej metody pomiarowej określania składu ziarnowego opartej na zjawisku dyfrakcji światła laserowego, oraz z odmiennego rozkładu wielkości ziaren w klasyfikowanych strumieniach materiałowych;
- badania dotyczące dokładności i precyzji laserowych analiz granulometrycznych powinny być rozszerzone o materiały charakteryzujące się niejednorodnym składem densymetrycznym.

Metoda pomiaru uziarnienia wykorzystująca zjawisko dyfrakcji strumienia światła laserowego na cząstkach zlicza wszystkie wymiary nieregularnych cząstek i odpowiednio uwzględnia je w wyniku. Dlatego też dalsze prace powinny być ukierunkowane na badania dotyczące wpływu kształtu ziaren na dokładność granulometrycznych analiz laserowych.

LITERATURA

- [1] Instrukcja obsługi laserowego miernika cząstek „Analissette 22”, materiały firmy „Silesia Projekt”, Katowice, 1994
- [2] *Mączka W., Trybalski K.*: Kontrola procesów technologicznych cz. V, skrypt uczelniany AGH, nr 836, Kraków, 1981
- [3] *Peszko B., Szymańska-Czaja M., Foszcz D.*: The dependence of the size distribution on the granulometric method of analysis. 5th Conference on Environment and mineral processing, Ostrava 2000, s. 837–845
- [4] *Trybalski K., Kędzior A., Krawczykowski D.*: Urządzenia i metody pomiarowe uziarnienia w polskich zakładach przeróbki rud metali nieżelaznych. UWN-D AGH Górnictwo i Geoinżynieria 2004, z. 2/1 s. 125–146