



Zastosowanie dyfrakcyjnej analizy laserowej do kontroli uziarnienia produktów przeróbki rud metali

Damian KRAWCZYKOWSKI¹⁾

¹⁾ Dr inż.; AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, Mickiewicza 30, Poland; email: dkrawcz@agh.edu.pl

Streszczenie

Artykuł dotyczy problemu wyboru właściwej metody pomiaru uziarnienia paliw węglowych przeznaczonych do naziemnego zgazowania w różnych typach reaktorów. Dokonano przeglądu technik pomiarowych wraz z określeniem uwarunkowań do ich stosowania. Uziarnienie węgla przeznaczonych do zgazowania badano w klasach ziarnowych dostosowanych do odpowiednich technologii zgazowania. Wyniki analiz granulometrycznych poddano aproksymacji i ocenie statystycznej. Wykazano możliwości aplikacyjne dla dwóch standardowych metod: analizy sitowej – dla grubo uziarnionych węgla zgazowywanych w reaktorze ze złożem stałym, przesuwnym lub fluidalnym oraz dyfrakcji laserowej – dla drobno uziarnionych węgla zgazowywanych w technologiach z reaktorem strumieniowym.

Słowa kluczowe: analiza uziarnienia, dyfrakcja laserowa, analiza sitowa, zgazowanie węgla

Wstęp

Dyfrakcja laserowa jest obecnie standardem w przemysłowych pomiarach wielkości cząstek zawieszin i emulsji. Tam, gdzie sterowanie i optymalizacja procesu nastawiona jest na maksymalizację zysków, a informacja o składzie ziarnowym jest kluczową dla procesu produkcyjnego, powinny być stosowane nowoczesne laserowe analizatory uziarnienia, które dostarczają niezawodnych i precyzyjnych wyników w odpowiednio szybkim czasie.

Dyfrakcyjna analiza laserowa jest nieinwazyjną metodą pomiaru uziarnienia w szerokim zakresie cząstek mikrometrycznych (0,1–3000 μm), która może być w pełni automatyzowana dla zastosowań przemysłowych jak i laboratoryjnych. Stała się rutynową metodą pomiarową uziarnienia proszków w różnych dziedzinach nauki i przemysłu, a sposób pomiaru został maksymalnie uproszczony. Powyższe aspekty wymusiły wypracowanie solidnych i przejrzystych standardów oraz procedur w zakresie metodyki przygotowania i pomiaru materiałów analizowanych tą metodą, tak by wyniki były wiarygodne i powtarzalne. Potwierdzeniem tego faktu jest wprowadzenie w 2009 r. nowej normy ISO 13320 dla dyfrakcyjnej metody laserowej. Niemniej jednak istnieje wiele znanych czynników wpływających na wynik pomiaru, które należy konsekwentnie i dokładnie badać, aby rozwój tej metody dalej postępował, są to m.in. właściwości optyczne materiału, kształt ziaren, chropowatość, gęstość itp.

Charakterystyka metody pomiarowej

Zasada pomiaru

Dyfrakcja laserowa jest techniką pomiaru wielkości cząstek, która zapewnia bezpośrednie wyniki uziarnienia

dla całej populacji cząstek w próbce, a nie jak w przypadku innych metod np. pomiaru mechanicznego (PSI – 200), mikroskopowego czy wizyjnego, które budują dystrybuantę rozkładu uziarnienia na podstawie wybranej, statystycznej populacji cząstek, np. maksymalnych.

Cząstki podświetlane skolimowaną wiązką lasera rozpraszają światło pod różnymi kątami. Duże cząstki generujące większą intensywność rozpraszanego światła załamują je pod mniejszymi kątami niż cząstki mniejsze o niższej intensywności sygnału, dla których kąty rozpraszania światła są większe. Intensywność światła oraz kąty załamania rejestrowane są przez światłoczuły detektor. Sygnały te są poddawane dekonwolucji, a następnie przy pomocy modeli matematycznych opartych na teoriach rozpraszania światła na cząstkach sferycznych (Mie, Fraunhofer) obliczany jest rozkład wielkości cząstek w próbce. Szczegółowy opis modeli matematycznych podany jest w normie ISO 13320. Modele zakładają, że mierzone cząstki są kuliste, tak więc dla cząstek niesferycznych ich wielkość wyrażana jest objętością równoważnych im kul. Oba modele generują podobne wyniki w zakresie ziaren $>5 \mu\text{m}$, natomiast dla ziaren najdrobniejszych model oparty na teorii Mie daje dokładniejsze wyniki.

Pobieranie próbek

Najważniejszymi aspektami poprawnie wykonanej dyfrakcyjnej analizy laserowej są trzy zrealizowane warunki: pobrania próbki, odpowiedniej dyspersji i pomiaru. Próbka musi być reprezentatywna, o określonej koncentracji części stałych i rozpraszać się w odpowiedniej cieczy lub gazie.

Największe błędy w dyfrakcyjnej analizie laserowej związane są z kwestiami próbkowania, szczególnie

podczas pomiarów dużych cząstek w pobliżu maksymalnych rozkładów wielkości ziaren (D90–D100). Wynika to z faktu, iż technika dyfrakcji laserowej, podając rozkład objętościowy wielkości ziaren, jest bardzo wrażliwa na niewielkie zmiany w ilości gruboziarnistych cząstek w wybranej próbce. Z tego powodu, w celu zapewnienia powtarzalności wyników dla skrajnie dużych cząstek, wymagana jest odpowiednio większa ich populacja. Szczegółowe wymagania dotyczące pobierania próbek do badań uziarnienia podane są w normie [1].

Sposób dyspersji

Laserowa analiza dyfrakcyjna stosowana jest do różnego rodzaju materiałów ziarnistych, ale bardzo istotnym jest dostosowanie do każdego z nich odpowiedniej metodyki dyspersji (rozpraszania) próbek. Dyspersję ziaren można realizować na mokro lub na sucho. Czynniki decydującymi o wyborze metody dyspersji jest rozpuszczalność ziaren, łatwość rozpraszania się ziaren i objętość mierzonych próbek. W przypadku gdy próbka jest suchym proszkiem najprostszą metodą jest bezpośrednia dyspersja próbki i jej pomiar na sucho. Istnieje jednak wiele czynników, dla których mokra metoda dyspersji jest preferowana, np.: aglomeracyjność materiału, toksyczność, kruchość, skrajnie drobne uziarnienie (<20 μm). Jeśli więc materiał nie rozpuszcza się i ziarna nie zmieniają swoich właściwości geometrycznych w cieczy, to dokładniejszą metodą dyspersji i pomiaru ziaren jest metoda na mokro. Jest to najczęściej stosowana metoda laserowej analizy dyfrakcyjnej cząstek.

Ważnym problemem dla prawidłowego pomiaru materiałów sypkich jest odpowiednie dobranie dyspergatora, który zapewni maksymalne rozproszenie ziaren. Dla surowców i odpadów mineralnych z reguły najwłaściwszym dyspergatorem jest woda. Jeśli powierzchnia ziaren wykazuje właściwości hydrofobowe, to w celu właściwego zwilżenia ziaren dodaje się odczynniki modyfikujące napięcie powierzchniowe na granicy faz ciało stałe-ciecz [2]. Użytecznym źródłem wiedzy w zakresie dyspersji próbek w cieczy jest norma [1].

Dyspersja/przygotowanie próbki do pomiaru odbywa się w jednostce dyspergującej. Aby uzyskać optymalne warunki dla zachowania stabilnej dyspersji cząstek potrzebna jest odpowiednia energia pochodząca od miesadła, pompy transportującej cząstki do celi pomiarowej oraz ewentualnych ultradźwięków rozdzielających agregaty ziaren. Odpowiedni poziom nastaw tych parametrów dla różnych materiałów gwarantuje stabilną ich dyspersję/rozpraszanie oraz zapobiega rozpadowi jednorodnych ziaren. Ocena optymalnych warunków dyspersji dokonywana jest obecnie na podstawie komputerowej analizy obrazu cząstek

przeptywających w celi pomiarowej. Metody wizyjne pozwalają identyfikować aglomeraty, ziarna uszkodzone, zakres ich uziarnienia w próbce oraz ewentualne obce zanieczyszczenia.

Ustalenie koncentracji ziaren w zawieszynie

Aby osiągnąć stabilny sygnał rozpraszania światła laserowego należy ustalić optymalne zagęszczenie zawiesziny, w przeciwnym wypadku może wystąpić zjawisko wielokrotnego rozpraszania światła laserowego na cząstkach jeszcze nie wykrytych, co może doprowadzić do błędnego oszacowania wielkości cząstek. Optymalna koncentracja części stałych w zawieszynie określana jest automatycznie i wyrażona jest obskuracją – miarą procentowej emisji światła laserowego traconego przez rozpraszanie lub jego absorpcję na cząstkach. Obskuracja powinna zawierać się w przedziale 7–14%, przy czym dla małych cząstek jej wartość powinna być niższa (<10%), gdyż wpływ wielokrotnego rozpraszania na wynik pomiaru jest w tym przypadku znacznie bardziej odczuwalny niż dla dużych cząstek, które rozpraszają światło laserowe o wysokiej intensywności pod mniejszymi kątami.

Podczas dyspergowania próbki na sucho dyspergatorem jest sprężone powietrze. Celem, podobnie jak w przypadku mokrej dyspersji jest optymalne rozpraszanie cząstek dostosowane do danego materiału. Należy ustalić ciśnienie powietrza na takim poziomie, aby rozpad aglomeratów następował bez niszczenia cząstek jednorodnych pod wpływem zjawiska samomielenia. Sama ocena porównawcza wyników analiz dla różnych poziomów ciśnienia nie daje jednak pewności czy zmiany uziarnienia wywołane są dezintegracją aglomeratów czy rozpadem jednorodnych cząstek na skutek samomielenia. Dla poprawnego ustalenia właściwego ciśnienia powietrza dyspergującego dla metody suchej pomiaru niezbędne są testy porównawcze z metodą analizy na mokro. Zbieżne wyniki obu metod pozwalają ustalić optymalne warunki dyspersji na sucho, tak aby ziarna nie ulegały samomieleniu. Jeśli dyspersja na sucho powoduje rozpad aglomeratów i jednocześnie zachodzi efekt samomielenia ziaren, wówczas dla tego typu materiałów rekomendowany jest pomiar w zawieszynie.

Pomiar

Sam proces pomiaru wiąże się z rejestrowaniem obrazu rozpraszania (dyfraktogramu) światła laserowego na cząstkach. Aby obraz ten odnosił się tylko do mierzonych cząstek, automatycznie realizowany jest pomiar tła polegający na sprawdzeniu czystości dyspergatora (np. powietrza, wody) i odjęciu sygnałów zakłócających, pochodzących od obcych cząstek. Czas pomiaru jest z reguły ustalany automatycznie, natomiast rekomendowane jest jego wydłużenie w przypadku

kiedy materiał zawiera dużo ziaren grubych lub jego rozkład uziarnienia jest szeroki.

Walidacja metody

Przy ocenie prawidłowości wyników i ustaleniu czy procedury pomiarowe oraz układ pomiarowy generują wyniki adekwatne do wzorcowych, ważne są dwa kluczowe pojęcia: powtarzalność i odtwarzalność. Ocena powtarzalności obejmuje powtarzanie pomiarów tej samej próbki, na tym samym sprzęcie, w tych samych warunkach. Testuje się zatem precyzję analizatora i spójność strukturalną próbki. Odtwarzalność jest szerszym pojęciem, które obejmuje także pobieranie próbek, zmianę warunków pomiarowych.

Precyzja pomiaru metodą dyfrakcji laserowej jest zwykle oceniana przy pomocy współczynnika zmienności V , który jest określony zgodnie z poniższym równaniem:

$$V = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

s – odchylenie standardowe, %,

\bar{x} – średnia, %.

Ponieważ dyfrakcja laserowa generuje rozkład objętościowy ziaren, błędy analiz dużych cząstek powodują większą niepewność pomiaru w zakresie ziaren $Dv90$ niż w $Dv10$.

Według normy [3], precyzja powinna być mniejsza niż 3% dla ziarna $Dv50$ i poniżej 5% dla ziaren $Dv10$ i $Dv90$. Dla większości proszków mineralnych, można jednak uzyskać dużo lepsze wyniki powtarzalności: $V < 0,5\%$ w próbkach o uziarnieniu $> 10 \mu\text{m}$ i $V < 1\%$, w przypadku próbek o średnicy ziaren $< 10 \mu\text{m}$.

Kryteria akceptacji dla badania odtwarzalności próbek dopuszczają większą wartość współczynnika zmienności V . Dla próbek o uziarnieniu $> 10 \mu\text{m}$: $V < 10\%$ dla ziaren $Dv50$ i $V < 15\%$ dla ziaren $Dv10$ i $Dv90$. Dopuszcza się dwukrotny wzrost tych zakresów współczynnika zmienności, dla próbek o rozmiarach ziaren mniejszych niż $10 \mu\text{m}$.

Analizatory wielkości cząstek wykorzystujące metodę dyfrakcji laserowej

Dyfrakcja laserowa jest standardową techniką laboratoryjną pomiarów wielkości nano i mikro cząstek proszków, zawiesin, emulsji i aerozoli. Na rynku dostępnych jest wiele laboratoryjnych analizatorów renomowanych firm wykorzystujących tą metodę pomiaru (Beckman Coulter, Horiba, Shimadzu, Malvern, Fritsch, Sympatec). Dyfrakcja laserowa zyskuje również coraz większe znaczenie w zastosowaniach przemysłowych do monitorowania uziarnienia cząstek oraz kontroli i sterowania procesów technologicznych w czasie rzeczywistym w różnych gałęziach przemysłu, od farmaceutyki po przemysł inżynierii mineralnej [4, 5].



Rys. 1 Laboracyjne analizatory wielkości cząstek

Fig. 1 Laboratory particle size analyzers

Tab. 1 Techniczne parametry pracy analizatorów [6, 7, 8, 9, 10, 11]

Tab. 1 Technical parameters of analyzers work

Model	Zakres pomiarowy	Czas analizy	Źródło światła	Liczba światłoczułych elementów detektora	Sposób dyspersji
LS 13 320 (Beckman Coulter)	17nm – 2000µm	60–90s	halogenowe 750 lub 780nm	-	powietrze/ciecz
LA-300 (Horiba)	100nm – 600µm	20 s	dioda laserowa, 650nm	42	ciecz
SALD-7500nano (Shimadzu)	7nm – 800µm	10 s	dioda laserowa, 405nm	76	ciecz
Mastersizer 3000 (Malvern)	10nm – 3500µm	<10 s	laser He-Ne, 632.8nm, LED, 470nm	-	powietrze/ciecz
ANALYSETTE 22 NanoTec (Fritsch)	10nm – 2000µm	5–10 s	2X dioda laserowa, 532nm dioda IR, 940nm	75	powietrze/ciecz
Helos Quixel (Sympatec)	100nm – 8750µm	10 s	laser He-Ne 632,8nm	31	powietrze/ciecz

Na rysunku 1 pokazano najbardziej renomowane modele laboratoryjnych analizatorów wykorzystujących metodę dyfrakcji światła laserowego na cząstkach, a w tabeli 1 podano ich najważniejsze parametry techniczne.

Dla branży przeróbki surowców mineralnych dostępnych jest kilka dojrzałych rozwiązań technologicznych do ciągłego i automatycznego pomiaru uziarnienia cząstek metodą dyfrakcji laserowej.

Różnica skali pomiarów laboratoryjnych i przemysłowych związana z dużymi przepływami strumieni materiałowych oraz wysokimi w nich koncentracjami ziaren wymusiła na producentach opracowanie zautomatyzowanych instalacji pobierania i przygotowania próbek oraz wydajnych algorytmów rozpraszania światła w celu kompensacji niekorzystnych zjawisk związanych z ograniczeniami metody dyfrakcyjnej polegającymi na tym, że:

- pomiar jest możliwy jedynie, gdy światło może przenikać przez próbkę,
- rozpraszanie światła przez więcej niż jedną cząsteczkę znacznie zakłóca i komplikuje analizę danych.

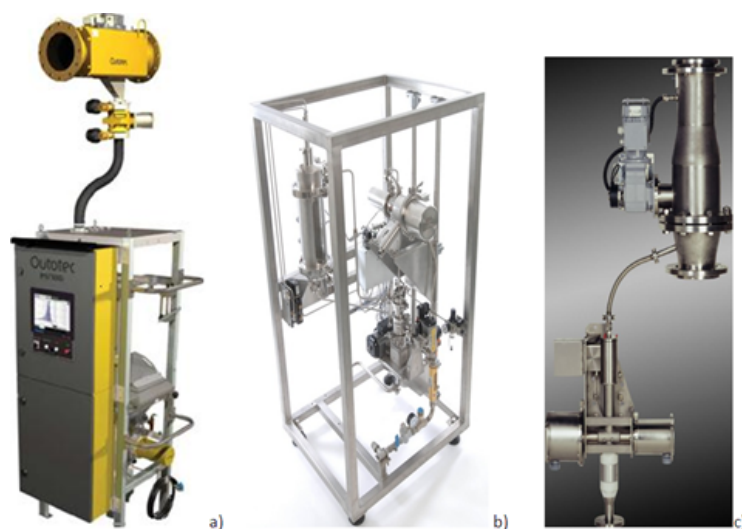
Na rysunku 2 pokazano najbardziej zaawansowane przemysłowe analizatory cząstek wykorzystujące

metodę dyfrakcji światła laserowego, a w tabeli 2 podano istotne parametry ich pracy.

Korzyści wynikające z zastosowania dyfrakcyjnej analizy laserowej do kontroli procesów przeróbki rud metali

Coraz wyższe wymagania w zakresie automatyzacji procesów przeróbki rud, szczególnie procesu mielenia i klasyfikacji oraz flotacji, powinny skłaniać do wykorzystywania nowoczesnych technologii pomiarowych w zakresie ciągłych analiz uziarnienia. Taką technologię zapewnia dyfrakcja laserowa, stosowana do niedawna jedynie w aparaturze laboratoryjnej. W porównaniu z innymi technikami pomiaru cząstek, metoda dyfrakcji laserowej charakteryzuje się krótkim czasem pomiaru (czas pomiaru od podania próbki do wyniku poniżej 2 min), wysoką niezawodnością i powtarzalnością wyników. Udokumentowane doświadczenia w stosowaniu tej metody pomiarowej wskazują zatem na istotne korzyści procesowe (szybkie wykrywanie awarii, mniejsza energochłonność procesów mielenia, skuteczniejsze sterowanie procesem) przekładające się na jakość i ekonomię produkcji.

W przeróbce rud metali ciągła i precyzyjna analiza uziarnienia ma szczególne znaczenie. Skład ziarnowy



Rys. 2 Przemysłowe analizatory wielkości cząstek: a) PSI-500 (Outotec), b) Insitec LPS (Malvern), c) MYTOS (Sympatec)

Fig. 2 Industrial analyzers of particle size: a) PSI-500 (Outotec), b) Insitec LPS (Malvern), c) MYTOS (Sympatec)

Tab. 2 Podstawowe techniczne parametry pracy analizatorów [10, 11, 12]

Tab. 2 Basic technical parameters of analyzers work

Model	Zakres pomiarowy, μm	Precyzja dla DV50, %	Sposób dyspersji
PSI-500	0,5 – 1000	$\pm 1-2$	woda
Insitec LPS	0,3 – 1000	± 2	woda
Mytos	0,25 – 3500	$\pm 2,5$	powietrze

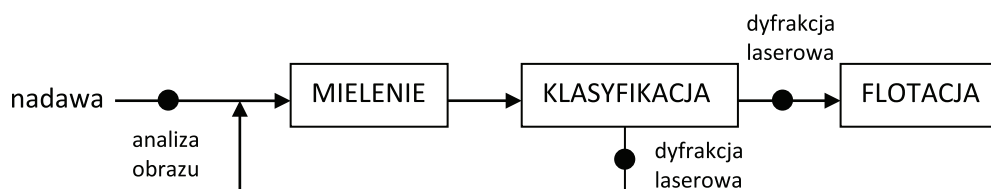
Tab. 3 Pomiar porównawczy próbek referencyjnych metodą dyfrakcji laserowej w urządzeniu laboratoryjnym i przemysłowym [14]

Tab. 3 Comparing of reference samples measurements by laser diffraction method in laboratory and industrial devices

Ziarna charakterystyczne	Mastersizer 2000 (lab.)	PSI 500
Dv(10)	35,6 μm	32,2 μm
Dv(50)	46,7 μm	47,2 μm
Dv(90)	61,2 μm	68,2 μm

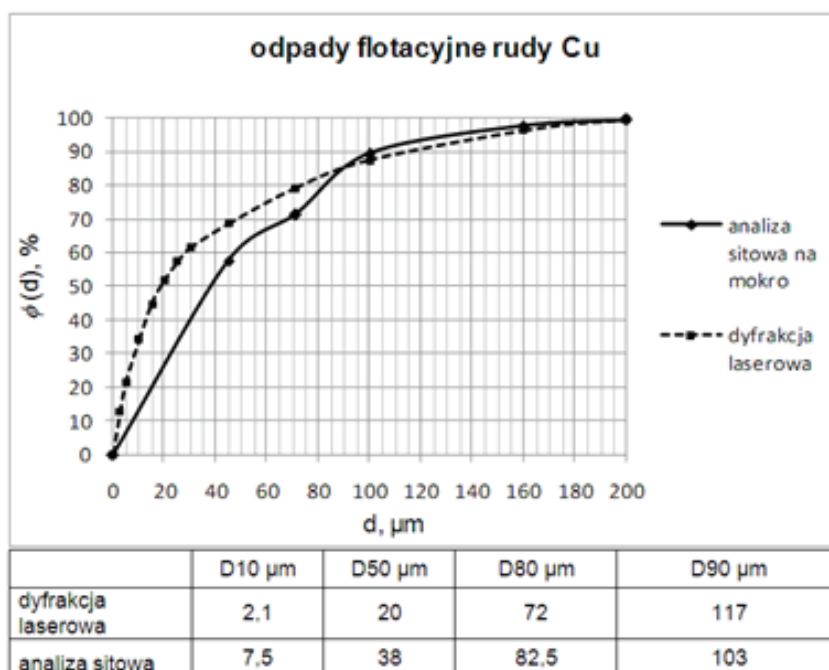
przerabianej rudy jest jednym z najistotniejszych parametrów warunkujących prawidłowy przebieg procesów przerobczych. Odpowiednie przygotowanie rudy pod względem rozkładu uziarnienia w procesach mielenia i klasyfikacji gwarantuje optymalne uwolnienie minerałów użytecznych przy możliwie najmniejszym zużyciu energii elektrycznej i mediów, co skutkuje poprawą skuteczności procesu flotacji [16]. Jest to szczególnie ważne dla rud zmiennych pod względem litologicznym, różniących się podatnością na rozdrabnianie i wzbogacanie. Taką charakterystykę wykazują polskie rudy miedzi, w których zidentyfikowano trzy różne pod względem mineralogicznym i technologicznym

typy: piaskowcową, dolomitową i łupkową. Wykazują one również istotną zmienność w obrębie typów litologicznych. Jak wynika z wielu dotychczas zrealizowanych prac badawczo rozwojowych każdy z tych typów rud, charakteryzuje się optymalnym uziarnieniem warunkującym właściwy przebieg procesu wzbogacania flotacyjnego. Ruda piaskowcowa powinna zawierać 90% ziaren o wielkości poniżej 150 μm ($P_{90} < 150\mu\text{m}$), przy czym udział klasy 45–100 μm powinien być największy. Ruda dolomitowa powinna charakteryzować się uziarnieniem $P_{90} < 100\text{ mm}$ i zawierać najwięcej ziaren 20–71 μm . Ruda łupkowa powinna być najdrobniej mielona ($P_{90} < 71\text{ mm}$)



Rys. 3 Miejsca zabudowy granulometrów w ciągu technologicznym przeróbki rud metali

Fig. 3 Locations of granulometers in technological circuit of metal ores processing



Rys. 4 Porównanie wyników uziarnienia mierzonych metodą dyfrakcji laserowej i analizy sitowej

Fig. 4 Comparison of the particle size results measured by laser diffraction and sieve analysis

i charakteryzować się największą populacją ziaren w zakresie 5–45 μm.

Tak szczegółowych informacji o rozkładzie uziarnienia w zakresie ziaren mikrometrycznych nie są w stanie wygenerować najczęściej stosowane obecnie w zakładach granulometry mechaniczne i ultradźwiękowe, których ciągłość pracy jest często zakłócana anomaliami procesowymi. Aktualnie jedynie laserowa analiza dyfrakcyjna jest w stanie sprostać tym wymaganiom [13]. Dodatkowo wskazania przemysłowych dyfraktometrów laserowych są niemal identyczne z wynikami generowanymi w analizatorach laboratoryjnych. Potwierdzeniem powtarzalności analiz są przedstawione w tabeli 3 wyniki badań porównawczych dla analizatora przemysłowego PSI-500 i laboratoryjnego Mastersizer 2000.

Wykorzystanie tej szczegółowej informacji o rozkładzie uziarnienia w układach sterowania i optymalizacji wprowadziłoby istotną zmienną jakościową do systemów kontroli i sterowania procesami mielenia i klasyfikacji. Stworzyłoby potencjał do poprawy ws-

kaźników zużycia energii elektrycznej, młyników, ostrości rozdziału w klasyfikatorach, a także wskaźników technologicznych procesu flotacji.

Propozycję zabudowy analizatorów uziarnienia w typowym schemacie technologicznym przeróbki rud metali pod potrzeby pełnej automatyzacji procesu mielenia i klasyfikacji przedstawiono na rysunku 3.

Takie rozmieszczenie analizatorów: wizyjnych – do kontroli uziarnienia gruboziarnistej nadawy kierowanej do procesu mielenia oraz dyfrakcyjnych – do kontroli drobno uziarnionych produktów klasyfikacji po procesie mielenia, umożliwi skuteczne, bezpośrednie sterowanie pracą młynów i klasyfikatorów. Wskazania granulometrów w powiązaniu z wynikami zawartości metalu w odpadach mogą być wykorzystane do optymalizacji pracy układów flotacji.

Wnioski

Pomimo technicznego zaawansowania analizatorów cząstek wykorzystujących dyfrakcję laserową,

pomiar polega na prostej, rutynowej procedurze skutkującej szybką i precyzyjną informacją o rozkładzie uziarnienia. W ciągu ostatniej dekady nastąpił znaczny postęp w zakresie definiowania i pełnego zrozumienia metody oraz wypracowania najwyższych standardów (ISO) jej aplikacji. Producenci urządzeń poprzez bezpośrednie wsparcie techniczne i szkoleniowe, a także inteligentne i przyjazne oprogramowanie zwiększające możliwości użytkowe oraz automatyzację pomiarów, maksymalizują korzyści ze stosowania tej ważnej techniki analitycznej.

Najnowsze rozwiązania analizatorów laserowych w znacznym stopniu kompensują występujące w starszych modelach problemy wynikające ze zjawiska wielokrotnego rozpraszania światła na cząstkach poprzez wprowadzanie zaawansowanej optyki, kilku źródeł światła, wydajnych modeli matematycznych. Efektem tych zmian jest dokładniejsze szacowanie

udziału ziaren drobnych w próbce.. Niemniej jednak korelacja wyników pomiędzy klasycznymi metodami pomiaru uziarnienia a techniką dyfrakcji laserowej często jest utrudniona lub wręcz niemożliwa. Rysunek 4 pokazuje np. rozbieżności pomiędzy metodą sitową a laserową, szczególnie w zakresie ziaren drobnych.

Opracowanie modeli przejścia pomiędzy wynikami obu metod wymaga szeregu badań eksperymentalnych realizowanych indywidualnie dla każdego surowca różniącego się np. gęstością, współczynnikiem kształtu lub innymi właściwościami optycznymi [15].

Konsekwentne wprowadzenie jednej precyzyjnej i zautomatyzowanej metody pomiarowej (dyfrakcji laserowej) do oceny uziarnienia rudy w ciągu technologicznym zakładu oraz w laboratorium zakładowym, stwarza warunki porównawcze w procesie kontroli uziarnienia oraz sprzyja poprawie procesu technologicznego na drodze jego automatyzacji.

Literatura – References

1. ISO 14887:2000 Sample Preparation—Dispersing procedures for powders in liquids
2. www.malvern.com/appnote_particle_size_determination: The Use of Zeta Potential Measurements for Improving Dispersion During Particle Size Determination, Application note MRK373, accessed Sept. 18, 2010.
3. ISO 13320:2009 Particle size analysis – Laser diffraction methods.
4. Wang-Li L., Cao Z., Buser M., Whitelock D., Parnell C.B., Zhang Y., 2013, Techniques for measuring particle size distribution of particulate matter emitted from animal feeding operations. *Atmospheric Environment* 66 s. 25-32.
5. Kumar V., Taylor M.K., Mehrotra A., William C. Stagner W.C., 2013, Real-Time Particle Size Analysis Using Focused Beam Reflectance Measurement as a Process Analytical Technology Tool for a Continuous Granulation–Drying–Milling Process. *AAPS PharmSciTech*, Vol. 14, No. 2, s. 523–530.
6. www.beckmancoulter.com
7. www.horiba.com
8. www.shimadzu.com
9. www.fritsch-milling.com
10. www.malvern.com
11. www.sympatec.com
12. www.outotec.com
13. Trybalski K., Kędzior A., Krawczykowski D., 2005, Przemysłowe metody pomiaru uziarnienia. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, R. 43 nr 1 s. 11–18.
14. Kongas M., Saloheimo M., 2009, Online slurry particle size analyzers. *Recent Advances in Mineral Processing Plant Design*, Published by Society for Mining, Metallurgy & Exploration.
15. Krawczykowski D., Krawczykowska A., Trybalski K., 2012, Laserowa analiza uziarnienia – wpływ gęstości i kształtu ziaren na wyniki pomiarów, *Gospodarka Surowcami* t. 28 z. 4, s. 101–112.
16. M. WOŁOSIEWICZ-GŁĄB, D. FOSZCZ, T. GAWENDA, 2016 – Analiza możliwości uzyskania drobnego uziarnienia w młynach o różnych konstrukcjach, *Inżynieria Mineralna* z. 1(37), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopaliny, Kraków, s. 223–232.

Application of Diffraction Laser Analysis to Monitor Granulation of Copper Ores Processing Products

The laser diffraction was characterized in the paper as standard method of fine < 2 mm particles size measurement. Author made the review of newest solutions of industrial analyzers working in online mode in ores processing plants and available laboratory devices supporting technological process monitoring which should be used by quality control units. The possibilities of applying analyzers in technological system of copper ores processing as well the benefits occurring from change of previous measuring technique based on mechanical methods of particle size analysis by precise laser diffraction method were indicated.

Keywords: particle size control, laser diffraction, particle size analyzers