

SYSTEMY AUTOMATYCZNEJ KONTROLI WYMIAROWEJ MIKROZIAREN ŚCIERNYCH

Adam BARYLSKI

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji
ul. G. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk, fax: 058 347 10 25, email: abarylsk@pg.gda.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono skomputeryzowaną analizę wielkości i kształtu mikroziaren ściernych przy użyciu specjalnego oprogramowania MultiScan v 6.08 oraz zautomatyzowane pomiary z wykorzystaniem analizatora laserowego Analysette 22. Analizator laserowy jest uniwersalnym urządzeniem do pomiarów wymiarów ziaren i mikroziaren. Światło lasera pada na ziarno i jest odbijane; w ten sposób powstaje siatka dyfrakcyjna. Rozmiar cząstek jest określany ze struktury powstających siatek. Specjalny czujnik mierzy rozkład kąta i związany z nim rozkład natężenia światła laserowego.

Słowa kluczowe: mikroziarna ścierna, wielkość, kształt, pomiary.

AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS OF ABRASIVE MICROGRAINS SIZE

Summary

The computer analysis of size and shape micrograins abrasive using special software MultiScan v 6.08 and laser particle sizer Analysette 22 for automated measurement is presented in the paper. Laser particle sizer is a universal instrument for determining the size of grains and micrograins. Particles or drops introduced into the path of a laser beam divert the light through diffraction. A special multielement detector measures the angle distribution and the related light intensity distribution which a computer program translates into a particle size distribution.

Keyword: abrasive micrograins, size, shape, measurement.

1. WSTĘP

W docieraniu, narzędziami aktywowanymi (zbrojonymi) w sposób swobodny lub wymuszony, zasadniczy wpływ na jakość obróbki mają właściwości mikroziaren ściernych (rodzaj, gatunek i numer mikroziarna, a więc jego twardość, stereometria, zdolność ścierna i wytrzymałość na ściskanie [13, 33, 34]), sposób dawkowania (okresowe lub ciągłe), a także rodzaj i udział wagowy nośników ścierniwa. Skład ziarnowy i stereometria mikroziaren ściernych ma podstawowe znaczenie w kształtowaniu struktury geometrycznej docieranej powierzchni [15, 32]. W praktyce technologicznej, dla uzyskania wymaganej chropowatości powierzchni obrabianego przedmiotu, dobierany jest normatywny numer mikroziarna. Pojawia się więc problem określenia wielkości mikroziaren ściernych, które jako bryły przestrzenne o złożonych kształtach są obiektami trudnymi do analizy [10, 11, 31, 35].

Znanych i rozpowszechnionych jest dotąd kilka sposobów oceny wielkości i kształtu mikroziaren. Są to metody sedymentacyjne [4], mikroskopowe [8] i laserowe [1, 7, 9, 14]. Segregacja wielkościowa jest możliwa przez strumień wirującego lub zmieniającego kierunek powietrza, rozdział

w wyniku wmywania wodą, czy przez sedymentację grawitacyjną lub odśrodkową. Możliwe jest wykorzystanie absorpcji światła w fotosedymentatorach lub pomiary oporności elektrolitu przez licznik Coultera [5]. W analizie stopnia zużycia mikroziaren zalecić można mikroskopię skaningową [2], mikroanalizę rentgenowską [3] lub wykorzystanie skomputeryzowanego analizatora obrazu [6, 12].

2. ANALIZATORY LASEROWE

W przypadku pomiarów wielkości mikroziaren ściernych bardzo dobre parametry użytkowe ma analizator laserowy. Spektrometryczna technika laserowo-dyfrakcyjna, stosowana w diagnostyce stereometrii ziaren i mikroziaren, rozwijana jest obecnie przez wiele specjalistycznych firm [16-30]. Przykładowo, firma LECO produkuje serię analizatorów wielkości cząstek LECOTRACTM, wykorzystujących zjawisko statycznego lub dynamicznego rozpraszania światła (tabl. 1). W zależności od zastosowanego układu optycznego (system potrójnych lub pojedynczych laserów) oraz rodzaju analizowanej próbki (proszek lub zawiesina) możliwy jest pomiar wielkości ziaren w zakresie od 0,003 do 2000 μm . W pomiarach cząstek większych

niż 0,7 μm wykorzystywane jest zjawisko statycznego rozpraszania światła (typ LTS-150 i LTL-200). W tym przypadku wiązka światła z pojedynczego lasera jest kierowana do obszaru pomiarowego, gdzie następuje jej ugięcie, a następnie rozproszenie przez badane ziarna. Kąt rozproszenia jest odwrotnie proporcjonalny do wielkości cząstek (np. mikroziaren ściernych). Rozproszone światło trafia poprzez układ optyczny na tablice fotodetektorów (o charakterystyce logarytmicznej), po czym, już jako sygnał elektryczny, przeliczane jest na wynik końcowy (za pomocą odpowiedniego algorytmu). Dla cząstek mniejszych (LT-100) układ pojedynczego lasera zastąpiono zespołem trzech laserów, w celu umożliwienia detekcji promieniowania świetlnego o bardzo dużym kącie rozproszenia. W przypadku bardzo małych ziaren, poniżej 0,02 μm , do pomiarów wykorzystano zjawisko dynamicznego rozproszenia światła (LTU-150 i LTU-251).

Tablica 1. Charakterystyka ogólna analizatorów laserowych firmy LECO [22]

Typ	LT-100	LTS-150	LTL-200 ¹⁾	LTU-150 LTU-251 ²⁾
Zakres pomiarowy [μm]	0,02-704	0,69-704	3,2-2000	0,003-6,54
Rodzaj próbki	proszek lub zawiesina	proszek lub zawiesina	proszek	proszek
Układ optyczny	trzy lasery	jeden laser	jeden laser	jeden laser
Układ detekcji	dwie tablice fotodetektorów	tablica fotodetektorów	tablica fotodetektorów	falowod z fotodetektorem
Wymiary [cm]	30x33x56	30x33x56	30x33x56	15x10x38

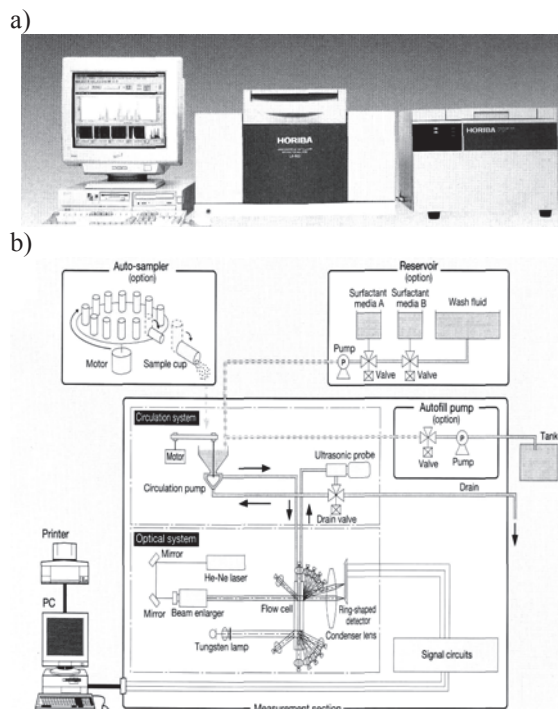
¹⁾ Można przystosować do analiz zawiesiny, w zakresie ziaren 3,2÷1000 μm .

²⁾ Możliwa współpraca z podajnikiem automatycznym.

Bardzo drobne cząsteczki zawieszane w cieczy poruszają się ruchami Browna z prędkościami odwrotnie proporcjonalnymi do ich rozmiarów. Ze względu na odbicie światła od ruchomych cząstek, odbity i powracający do detektora promień jest

opisany przez efekt Dopplera, (obowiązuje zasada proporcjonalności do prędkości cząstek). Ponadto część światła ulega odbiciu od granicy ośrodków: filtr optyczny – medium robocze, po czym powraca do detektora jako wiązka odniesienia (referencyjna). Tak otrzymany sygnał optyczny jest przetwarzany przez tablice fotodetektorów na sygnał elektryczny, który jest następnie wzmacniany, filtrowany i poddany końcowej obróbce. Analizatory LT-100 i LTS-150 współpracują z systemem recyrkulacji medium roboczego (automatycznym lub półautomatycznym). Niezależnie od typu użytego recyrkulatora, analizatory LT-100 i LTS-150 mogą współpracować dodatkowo z układem automatycznego podawania próbek [22].

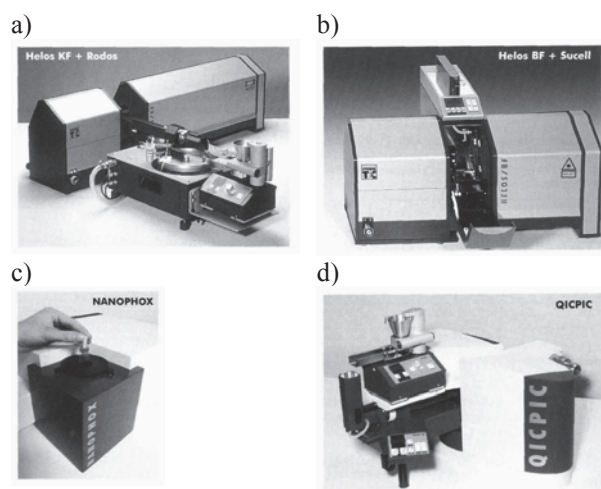
Widok ogólny i zasadę działania przykładowego analizatora laserowego (firmy Horiba Ltd) przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Analizator laserowy wielkości cząstek LA-920 firmy Horiba Ltd: a) widok ogólny aparatury, b) schemat działania [20]

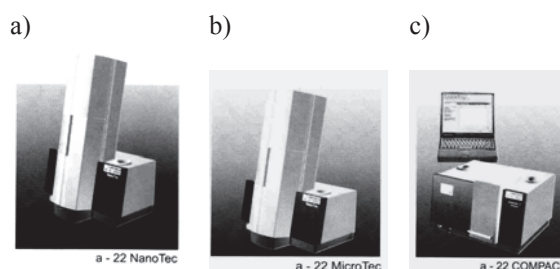
Modułową budowę podobnego urządzenia zastosowała firma Sympatec GmbH, wykorzystując czujnik dyfrakcji laserowej HELOS, który jest pierwszym systemem wykorzystania zjawiska Fraunhöfera w całym zakresie pomiarowym, od 0,1 do 8750 μm . Możliwa jest analiza wielkości cząstek na sucho i na mokro - zarówno pyłów, zawiesin, emulsji, czy areozoli. System zbudowany jest z części pomiarowej, dyspergującej i obliczeniowej. Modułowa konstrukcja zapewnia wymiennosc wszystkich układów (rys. 2). Dyfraktometr laserowy HELOS/F jest klasycznym przyrządem wykorzystującym spójne światło lasera. Dla materiałów suchych sposób podawania badanych

ziaren (dawka od kilku do 100 g) opiera się na ich rozpraszaniu w strumieniu powietrza (RODOS i RODOS M). Zestaw może być uzupełniony o przystawkę ASPIROS do analizy substancji toksycznych. Do pomiarów cząstek swobodnie opadających stosuje się system dyspersji grawitacyjnej GRADIS. Dla zawiesin lub emulsji proponowane są układy dyspersji w zakresie pomiarowym od 0,1 do 3500 μm (QUIXEL, SUCCELL i CUVETTE). Pomiar wielkości cząstek w arezolach jest możliwy dzięki systemowi SPRAYER (cząstki wprowadzane do przestrzeni pomiarowej przy pomocy urządzenia INHALER). Fotonowy miernik wielkości cząstek NANOPHOX umożliwia analizę w zakresie nanometrycznym (od 1nm do 10 μm), zarówno emulsji jak i zawiesin (pojemność komory 4 ml). Analizator QICPIC bada zarówno rozkład uziarnienia, jak i kształt cząstek (w zakresie pomiarowym od 1 μm do 10 mm) [28].



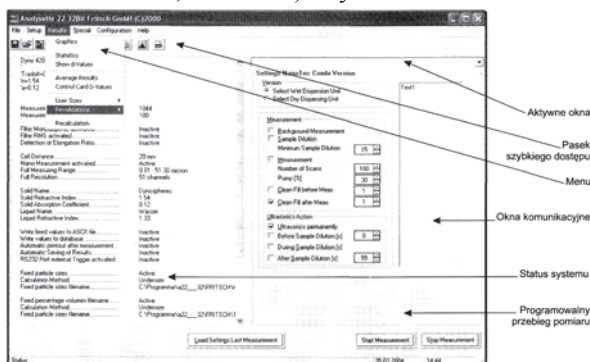
Rys. 2. Modułowa konstrukcja analizatorów firmy Sympatec GmbH do pomiarów: a) materiałów suchych, b) zawiesin lub emulsji, c) mikroziaren w zakresie nanometrycznym, d) wielkości i kształtu ziaren i mikroziaren [28]

Permanentnie, konstrukcje analizatorów laserowych rozwijane są przez firmę Fritsch GmbH, dzięki uprzejmości której wykonano badania mikroziaren ściernych, prezentowane w następnym rozdziale. Zakres pomiarowy produkowanego obecnie systemu Analysette 22 wynosi od 0,01 do 1000 μm (rys. 3).



Rys. 3. Laserowe mierniki wielkości cząstek Analysette 22 firmy Fritsch GmbH: a) Nano Tec (zakres pomiarowy: 0,01÷1000 μm – na mokro, 0,1÷1000 μm – na sucho), b) Micro Tec (0,1÷600 μm – na mokro i na sucho), c) COMPACT (0,3÷300 μm – na mokro i na sucho); objętość próbek: 0,1÷2 cm^3 – na mokro, 5÷50 cm^3 – na sucho (czas pomiaru 10 s) [18]

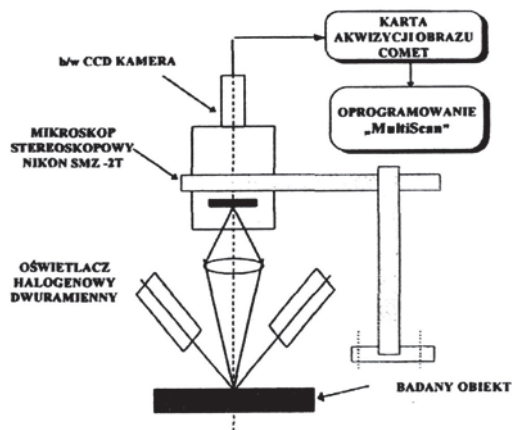
Do analizy wykorzystywane jest oprogramowanie opracowane na podstawie VISUAL DESIGN GUIDES (w środowisku WINDOWS™, Microsoft) – rys. 4.



Rys. 4. Menu główne programu ANALYSETTE 22, 32Bit Fritsch GmbH (C) 2000 [18]

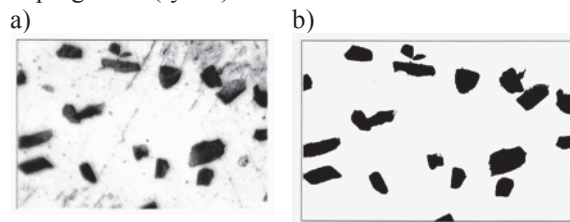
3. WYNIKI BADAŃ

Badania z wykorzystaniem analizatora laserowego poprzedziła analiza mikroskopowa mikroziaren ściernych (badania płaskiego obrazu mikroskopowego – rzutów mikroziaren na płaszczyznę obserwacji). Jako parametry diagnostyczne wielkości mikroziarna przyjęto wymiary jego obrazu (długość l i szerokość b), a także pole powierzchni A. Pomiar przeprowadzono na skomputeryzowanym stanowisku, wyposażonym w mikroskop stereoskopowy, kamerę CCD i oprogramowanie MultiScan v. 6.08 (rys. 5).

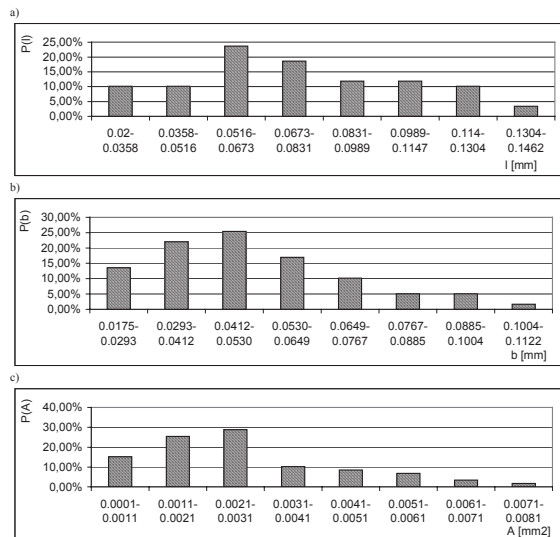


Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego do automatycznej analizy mikroskopowej rozmiarów mikroziaren ściernych

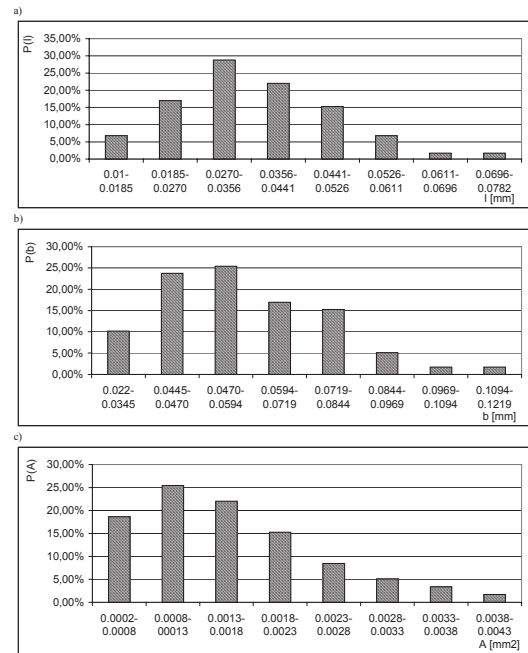
Na początku obserwacji obraz mikroskopowy nie może być bezpośrednio wykorzystany do automatycznej analizy, gdyż występują różne odcienie tła i stopnie szarości ziaren. Koniecznym jest zastosowanie filtrów binaryzujących, zawartych w programie (rys. 6).



Rys. 6. Obraz mikroskopowy mikroziaren 98C F320/29: a) przed binaryzacją, b) po binaryzacji



Rys. 7. Wyniki pomiarów mikroziaren 99A F320/29: a) rozkład długości l, b) rozkład szerokości b, c) rozkład pola powierzchni A



Rys. 8. Wyniki pomiarów mikroziaren 98C F320/29: a) rozkład długości l, b) rozkład szerokości b, c) rozkład pola powierzchni A

Tablica 2. Charakterystyki badanych rozkładów

Mikroziarno	99A F320/29	98C F320/29
Długość obrazu mikroziarna l [mm]		
X_{sr}	0,0760	0,0636
c	0,0831	0,0441
X_m	0,0781	0,0368
X_d	0,0631	0,0324
s^2	0,000898	0,000163
s	0,0300	0,0128
d	0,0245	0,0104
v	39 %	35 %
a	0,239	0,0496
e	-0,800	0,142
Szerokość obrazu mikroziarna b [mm]		
X_{sr}	0,0509	0,0574
c	0,0649	0,0720
X_m	0,0542	0,0599
X_d	0,0446	0,0491
s^2	0,000411	0,000383
s	0,0203	0,0196
d	0,0163	0,0160
v	40%	34%
a	0,708	0,0617
e	-0,00331	0,0779
Pole powierzchni obrazu mikroziarna A [mm ²]		
X_{sr}	0,00270	0,00160
c	0,00410	0,00225
X_m	0,00300	0,00140
X_d	0,00230	0,00110
s^2	0,00000290	0,00000700
s	0,00169	0,000864
d	0,00130	0,0007
v	62%	55%
a	0,879	0,787
e	0,207	0,126

Podano: charakterystyki położenia - średnia arytmetyczna x_{sr} , środek rozstępu c , mediana x_m , wartość modalna x_d ; charakterystyki rozproszenia - wariancja s^2 , średnie odchylenie kwadratowe s , odchylenie przeciętne d , współczynnik zmienności v ; charakterystykę asymetrii - współczynnik asymetrii a ; charakterystykę skupienia - eksces e .

Porównując otrzymane wyniki (rys. 7 i 8 oraz tabl. 2) można stwierdzić, że badane szeregi mają asymetrię dodatnią, przy czym dla mikroziaren 99A F320/29 jest ona większa. Charakteryzują się też zbliżonymi wartościami współczynnika zmienności; natomiast mają różną miarę koncentracji. Rozkład empiryczny długości l i szerokości b obrazu mikroziarna elektrokorundu szlachetnego ma eksces ujemny (czyli rozkład jest spłaszczony), zaś dla czarnego węgla krzemu (o tym samym numerze mikroziarna) – eksces jest dodatni (rozkład jest wysmukły, w stosunku do skupienia szeregu reprezentatywnego dla populacji o rozkładzie normalnym). Różnic tych nie wykazują rozkłady pola powierzchni obrazu mikroziarna (rozkład wysmukły). Średnie współczynniki kształtu ($K=l/b$) analizowanych ścierniw są zbliżone i wynoszą odpowiednio: $K=1,56$ dla 99A F320/29 i $K=1,64$ dla 98C F320/29.

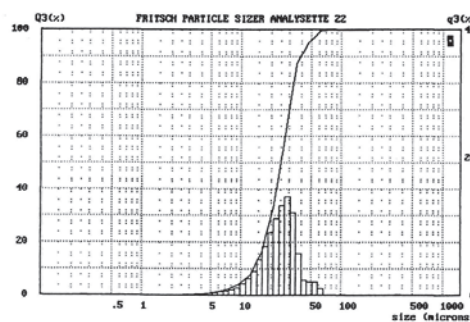
Porównując rozkład otrzymany na podstawie analizy laserowej (rys. 9) z wynikami z rys. 2b, łatwo zauważyć, iż średnia arytmetyczna określona metodą mikroskopową (tabl. 2) znacznie odbiega od wymiaru charakterystycznego (normatywnego) jaki przyporządkowany jest mikroziarnom 98C F320/29. Rozkład z rys. 9 ma następujące parametry: średnia arytmetyczna 26,14 μm , wartość modalna 28,68 μm , odchylenie standardowe 15,37 μm , współczynnik zmienności 58,82 %, mediana 25,05 μm ; co jest bliższe wymiarom normatywnym ustalonym na podstawie analizy sedymentacyjnej.

4. UWAGI OGÓLNE

W każdej metodzie pomiarowej wielkości i kształtu ścierniwa konieczne jest przestrzeganie zasady, aby sam proces analizy nie spowodował rozdrobnienia ziaren (pęknięcie) lub powiększenia (zrosty). W praktyce, wybrany sposób analizy zależy głównie od rodzaju i rozmiarów cząstek, zaś czasochłonność i dokładność poszczególnych pomiarów jest bardzo zróżnicowana.

Zastosowane w badaniach automatyczne sposoby pomiaru wielkości mikroziaren ściernych należy zaliczyć obecnie do metod wydajnych, o dużym stopniu informatywności. Zastąpienie tradycyjnej analizy sedymentacyjnej metodą spektrometrii laserowej można uznać za kierunek właściwy, pamiętając o modyfikacji obowiązujących norm. Stosowanie zaś skomputeryzowanego systemu analizy mikroskopowej ułatwi między innymi ocenę zmian kształtu mikroziaren przed podjęciem decyzji o ich wykorzystaniu w procesach ścierniej obróbki bardzo dokładnej.

Messnummer	164	Salun	Zeit	Residuun	0,8562 %	Overl	Iterations	56	Strahlhub	5,00 μm
Probe 2 F 320/29										
Fraunhofer										
n = fahl n Fraunhofer										
n = fahl n = 0,0000										
5,00% \leq 10,50 μm		15,00% \leq 15,59 μm		25,00% \leq 18,70 μm		40,00% \leq 22,61 μm		60,00% \leq 27,44 μm		75,00% \leq 31,20 μm
85,00% \leq 34,59 μm		95,00% \leq 46,10 μm		99,00% \leq 59,54 μm		99,90% \leq 230,17 μm				
10,00% \leq 13,53 μm		20,00% \leq 17,24 μm		30,00% \leq 20,06 μm		40,00% \leq 22,61 μm		50,00% \leq 25,05 μm		60,00% \leq 27,44 μm
70,00% \leq 29,87 μm		80,00% \leq 32,71 μm		90,00% \leq 37,32 μm		99,00% \leq 59,54 μm		Volunen Verteilung		
Mittel. arith. Durchn. : 26,14 μm Varianz : 236,32 μm^2 Schiefe : 10,36										
Mittel. geom. Durchn. : 23,52 μm Standard Abweichung : 15,37 μm Kurtosis : 200,52										
Mittel. quadr. Durchn. : 30,20 μm n (Moduln) : 0,00 μm Weite : 0,53										
Mittel. hara. Durchn. : 19,00 μm Variationskoeffizient : 58,82 % Gleichmäßigkeit : 0,61										
Modul : 28,68 μm Median : 25,05 μm Max/Median : 1,04										
Spez. Oberfläche : 0,3144 cm^2/g Form faktor : 1										



Rys. 9. Wyniki pomiarów na analizatorze laserowym mikroziaren 98C F320/29 (Analysette 22, Fritsch GmbH)

LITERATURA

- [1] An H., Mori Y., Kataoka T., Endo K., Inagaki K., Yamamura K., Yamauchi K., Fukuike T.: *A New Apparatus for Measuring Particle Size of the Order of Nanometr (2nd Report). Evaluation of Measuring System by using Standard Particles*. In: J. Japan Soc. Prec. Eng., vol.28, 1994, nr 4, str.356-361.
- [2] Barylski A.: *Analiza kształtów i rozmiarów mikroziaren ściernych za pomocą mikroskopu skaningowego*. Szkło i Ceramika, 1985, nr 1, str.34-36.
- [3] Barylski A.: *Ocena rozmiarów mikroziaren ściernych z wykorzystaniem mikroanalizatora rentgenowskiego*. Szkło i Ceramika, 1985, nr 3-4, str.108-110.
- [4] Barylski A.: *Pomiary wielkości mikroziaren ściernych*. [Materiały] Krajowy Kongres Metrologii, Pol. Warsz., Warszawa, 24-27.06.2001, t.1, str.217-222.
- [5] Barylski A.: *Systemy pomiarowe wielkości mikroziaren ściernych*. [Materiały] Konf. Nauk.-Tech. „Metrologia w technikach wytwarzania”, Pol. Krak., Kraków, 25-27.09.2003, str.41-52.
- [6] Barylski A.: *Wykorzystanie automatycznego analizatora obrazu do oceny wielkości mikroziaren ściernych*. Szkło i Ceramika, 1984, nr 5-6, str.185-188.
- [7] Bikker A., Konert M.: *Determining the particle size distribution of BCR samples with selected laser diffraction spectrometers*. Internal report of the Free Univ. of

- Amsterdam. Institute of Earth Science, Sediment Analysis Laboratory, 1992.
- [8] Borowik S., Wiśniewski D.: *Proszki testowe w badaniach efektywności filtrów oraz wrażliwości zanieczyszczeniowej elementów rozkładów hydraulicznych*. [Materiały] V Ogólnopolska Konf. Nauk.-Tech. POLTRIB'99. Tribologia dla eksploatacji. Polskie Towarzystwo Tribologiczne, Centrum Szkolenia „Explonaft”, Szczyrk, 16-18.06.1999, str.135-151.
- [9] Bumiller M.: *Particle Size Analysis of Powder Metal Using Laser Diffraction*. *Industrial Heating*, 1997, June, str.41-45.
- [10] Hager H.: *Rechnerische Ermittlung der Streuungswerte in den Korazahlen von Schleifkornmischungen*. Radex Rdsch., 1971, nr 2, str.435-441.
- [11] Hagiwara S., Obikawa T., Yanai H.: *Evaluation of lapping grains based on shape characteristics*. *J. of the Japan Soc. of Prec. Eng.*, vol. 61, 1995, str.1760-1764 (jap.).
- [12] Karpiński T.: *Badanie kształtu ziaren ściernych przy użyciu analizatora Quantimet-720*. Prace Inst. Bud. Maszyn WSI Koszalin. II Nauk. Szk. Obr. Ściernej, Koszalin-Cetuń, 1979, str.132-142.
- [13] Leavers V.F.: *An active angularity factor for the characterization of abrasive particles*. *Wear*, vol. 239, 2000, str.102-110.
- [14] Niebuhr D., Pülm S., Witt W.: *Analysis, conversion and visualization of particle size data combined with a data based control system for particulate processes*. [Materiały] 7. Europ. Symposium Particle Charact., 1998, str.1209-1213.
- [15] Nevljudov I. Š., Dudko P. D.: *Issledovanie razrušenija almazno-abrazivnych zeren v processe dovodki*. *Rez. i Instrument*, vyp. 19, 1978, str.11-17.
- [16] Materiały firmy BIA (Holtsville).
- [17] Materiały firmy CILAS (Marcoussis).
- [18] Materiały firmy Fritsch GmbH (Idar-Oberstein).
- [19] Materiały firmy Gilson Company, Inc. (Worthington).
- [20] Materiały firmy Horiba Ltd (Kyoto).
- [21] Materiały firmy Hosokawa Alpine AG (Augsburg).
- [22] Materiały firmy LECO Polska Sp. z o.o. (Katowice).
- [23] Materiały firmy Malvern Instruments Ltd (Malvern).
- [24] Materiały firmy Micromeritics (Norcross).
- [25] Materiały firmy Microvision Instruments (Evvy, Cadex).
- [26] Materiały firmy Particle Sizing Systems (Santa Barbara).
- [27] Materiały firmy Rotex Inc. (Cincinnati).
- [28] Materiały firmy Sympatec GmbH (Clausthal-Zellerfeld).
- [29] Materiały firmy TST (St. Paul).
- [30] Materiały firmy W.S. Tyler (Mentor).
- [31] Peng Z., Kirk T.B.: *Wear particle classification in a fuzzy grey system*. *Wear*, vol. 225-229, 1999, str.1238-1247.
- [32] Reznikov A. N., Gavrilov G. M.: *Approksimacija rasporedenija razmerov zeren v almaznych poroškach*. *Sin. Almazy*, vyp. 4, 1974, str.10-13.
- [33] Stachowiak G. W.: *Particle angularity and its relationship to abrasive and erosive wear*. *Wear*, vol. 241, 2000, str.214-219.
- [34] Stachowiak G. W., Podsiadło P.: *Surface characterization of wear particles*. *Wear*, vol. 225-229, 1999, str.1171-1185.
- [35] Yoshioka M., Hagiwara J.: *Simulation of Time-dependent Distribution of Abrasive Grain Size in Lapping (2nd Report). Discussion on Breakage Probability, Multiplication Rate and Transition Probability of Abrasive Grains*. *J. of the Japan Soc. of Prec. Eng.*, vol. 61, 1995, str.1270-1274 (jap.).



Dr hab. inż. **Adam BARYLSKI** jest profesorem Politechniki Gdańskiej, dziekanem Wydziału Mechanicznego. Od ponad 30 lat w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji prowadzi badania z zakresu precyzyjnej obróbki ścierniej. W swoich publikacjach zajmuje

się szczególnie podstawami i technologią docierania materiałów metalowych i ceramicznych oraz problemami kształtowania technologicznej warstwy wierzchniej.