

rozpraszanie światła, metoda różniczkowa,
przetwarzanie i analiza obrazu,
hybrydowy system pomiarowy, szlifowanie

Wojciech KAPŁONEK^{1*}
Paweł SUTOWSKI¹
Krzysztof NADOLNY¹

ZASTOSOWANIE HYBRYDOWEGO SYSTEMU POMIAROWEGO WYKORZYSTUJĄCEGO OBRAZOWANIE I ANALIZĘ ŚWIATŁA ROZPROSZONEGO DO OCENY STANU POWIERZCHNI SZLIFOWANYCH

Jednym z niezwykle ważnych zagadnień we współczesnym przemyśle wytwórczym jest zapewnienie odpowiedniej oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych. Ocena taka, z wielu względów, musi być realizowana w sposób bezstykowy, w stosunkowo krótkim czasie, nawet podczas ruchu badanej powierzchni względem czujnika pomiarowego. Takie wymagania skłaniają do stosowania tzw. systemów hybrydowych, łączących optyczne metody pomiarowe z technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego. W pracy przedstawiono jeden z takich systemów opracowany na Politechnice Koszalińskiej. Podano szczegółowy opis jego konstrukcji i konfiguracji oraz przedstawiono wybrane rezultaty uzyskane podczas prowadzonych badań eksperymentalnych, w których oceniano szlifowane powierzchnie próbek płaskich i walcowych o wysokościach nierówności w zakresie od 0,07 do 3,7 μm (parametr R_a) oraz od 0,8 do 25 μm (parametr R_z). Pozytywne rezultaty badań skłaniają do kontynuowania prac zarówno nad modyfikacją konstrukcji systemu, jak i nad określeniem zakresu jego dalszych zastosowań.

1. WPROWADZENIE

Jednym z najważniejszych współczesnych wysokowydajnych procesów technologicznych, wykorzystywanych w wielu branżach nowoczesnego przemysłu wytwórczego, jest szlifowanie [8],[11],[14]. Proces ten, realizowany w wielu odmianach, takich jak, m.in. CPCG (ang. *Continuous Path-Controlled Grinding*) [20], HSG (ang. *High-Speed Grinding*) [5], HSP (ang. *High-Speed Peelgrinding*) [12], HEDG (*High-Efficiency Deep Grinding*) [4], SFG (ang. *Speed Feed Grinding*) [1] i SSG (ang. *Speed Stroke Grinding*) [2], zapewnia uzyskanie powierzchni o określonych parametrach struktury geometrycznej, spełniających różnorodne wymagania stawiane przez szeroką grupę odbiorców.

Szlifowanie z racji wielu odmian realizowanych na zaawansowanych maszynach technologicznych jest wciąż dynamicznie rozwijającą się metodą obróbki ubytkowej.

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji, Koszalin

* E-mail: wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl

Tradycyjne zastosowania szlifowania w obróbce m.in.: metali i ich stopów, kompozytów, ceramiki i szkła, poszerzone zostały w ostatnich latach o grupę materiałów trudno skrawalnych – superstopów na bazie niklu, o handlowych nazwach: INCONEL[®] [9], INCOLOY[®] [19], NIMONIC[®] [3], MONEL[®] [15], stopów tytanu [17], magnezu oraz stali wysokostopowych.

Zapewnienie wysokiej jakości przedmiotów obrobionych ściernie jest ściśle związane z przeprowadzeniem dokładnej oceny stanu ich powierzchni. Jest to niezwykle istotne zagadnienie, szczególnie w odniesieniu do pomiarów przeprowadzanych w warunkach przemysłowych. Stąd też potrzeba opracowania lub adaptacji odpowiednich metod, a następnie konstruowania, bazujących na nich, systemów pomiarowych przeznaczonych do tego typu oceny.

Ważną rolę w pomiarach przemysłowych odgrywają optyczne metody pomiarowe wykorzystujące zjawisko rozpraszania światła [16]. Pozwalają one na przeprowadzenie stosunkowo szybkiej, bezstykowej oceny stanu powierzchni, która w wielu przypadkach musi odbywać się także podczas ruchu przedmiotu obrabianego [7]. Mówi się wtedy o tzw. kontroli czynnej lub kontroli aktywnej [21]. W wielu zastosowaniach wykorzystywana jest m.in. metoda różniczkowa, określana akronimem ARS (ang. *Angle-Resolved Scattering*) [6],[10],[13]. Jest ona często wspomagana technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego.

Pomimo, iż metody rozpraszania światła są w dalszym ciągu intensywnie rozwijane, poszukuje się nowych alternatywnych rozwiązań mogących je zastąpić lub wspomagać w procesie oceny stanu badanej powierzchni. Nowym trendem w tego typu ocenie jest wprowadzanie systemów hybrydowych [18], łączących w ramach jednej platformy sprzętowej możliwości np. bezstykowej oceny laserowej metodami rozpraszania światła, obrazowania i akwizycji strefy pomiaru metodami widzenia maszynowego oraz przetwarzania i analizy uzyskanych danych technikami komputerowymi. Integracja ww. metod i technik pozwala na prowadzenie oceny w sposób znacznie bardziej efektywny niż w dotychczas stosowanych rozwiązaniach, co podnosi standardy wytwarzania i zmniejsza liczbę elementów wadliwych.

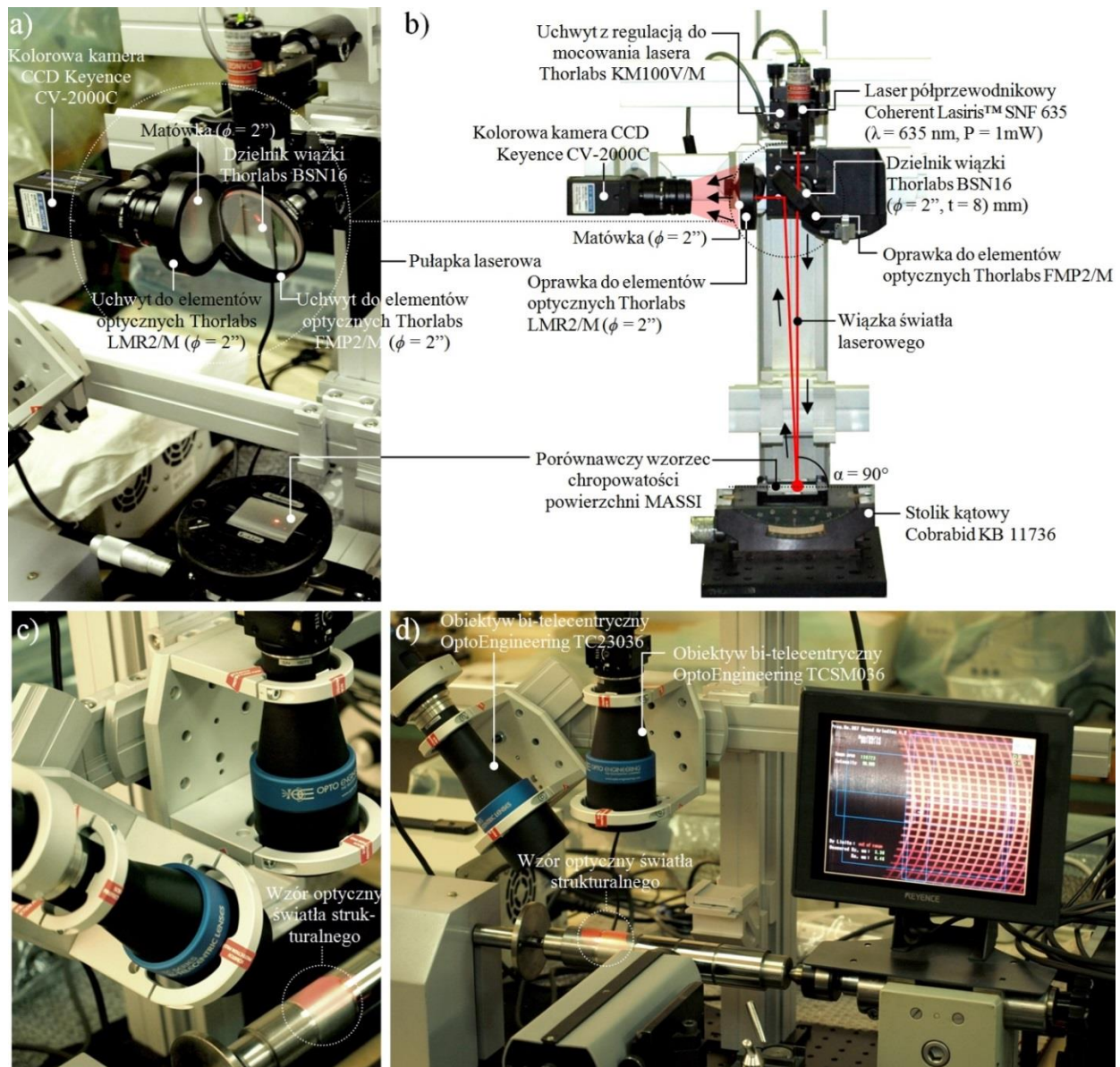
W niniejszej pracy przedstawiono eksperymentalny system hybrydowych opracowany w Politechnice Koszalińskiej. Jego szczegółowy opis podano w rozdziale 2, natomiast w dalszej części pracy przedstawiono wybrane rezultaty uzyskane podczas badań eksperymentalnych prowadzonych z jego zastosowaniem.

2. CHARAKTERYSTYKA HYBRYDOWEGO SYSTEMU POMIAROWEGO

Hybrydowy system pomiarowy został opracowany, jako platforma służąca do realizacji zadań pomiarowych o charakterze laboratoryjnym i przemysłowym, w tym do oceny:

- struktury geometrycznej powierzchni (SGP) – głównie chropowatości, metodą różniczkową, wykorzystującą pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego,
- kształtu powierzchni, metodą światła strukturalnego, wykorzystującą projekcję wzorów optycznych.

W obu przypadkach ocena powierzchni mogła odbywać się w stanie statycznym i w ruchu. Na rysunku 1 przedstawiono szczegóły konstrukcyjne toru optycznego do oceny chropowatości powierzchni oraz toru optycznego do oceny kształtu powierzchni.



Rys. 1. Eksperymentalny hybrydowy system pomiarowy do aktywnej kontroli SGP i kształtu powierzchni przedmiotów obrobionych w stanie statycznym i w ruchu: a) zbliżenie na elementy toru optycznego do oceny chropowatości powierzchni, b) główne elementy toru do oceny nierówności powierzchni, c) zbliżenie na elementy toru optycznego do oceny kształtu powierzchni, d) widok ogólny toru optycznego do oceny kształtu powierzchni

Fig. 1. Experimental hybrid measurement system for in-process inspection of the surface texture and surface shape of the objects in static conditions and in movement: a) close view of elements in the optical path for surface roughness measurements, b) main elements of the optical path for surface roughness measurements, c) close view of elements in the optical path for shape measurements, d) general view of the optical path for shape measurements

System wykorzystywał dwa zasadnicze moduły: moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych oraz moduł obrotu badanego przedmiotu. Pierwszy z tych modułów,

stanowiący kluczowy element systemu, umożliwiał przeprowadzanie szerokiego zakres prac badawczych w odniesieniu do pomiarów chropowatości i kształtu powierzchni. Planowaniu eksperymentów sprzyjała konstrukcja systemu pomiarowego umożliwiająca jego szybką rekonfigurację na potrzeby prowadzenia danych zadań pomiarowych.

Moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych posiadał dwa oddzielne toru optyczne. Pierwszy z nich przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni wyposażony został w laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 635 firmy Coherent (USA) ($\lambda = 635$ nm, 1 mW) oraz kamerę wysokiej rozdzielczości CCD CV-200C firmy Keyence (Japonia) (wielkość matrycy CCD: 1/1,8", rozdzielczość obrazu 1600×1200 pikseli) firmy Thorlabs (USA). Drugi tor optyczny do analizy kształtu powierzchni wyposażony został w LED-owy projektor światła strukturalnego z systemem adjustacji kątovej Scheimpfluga LTPRSM3W/R ze stałogniskowym obiektywem bi-telecentrycznym TC23036 firmy Opto Engineering (Włochy) oraz kamerę wysokiej rozdzielczości CV-200C firmy Keyence ze stałogniskowym obiektywem bi-telecentrycznym z systemem adjustacji Scheimpfluga TCSM036 firmy Opto Engineering. Oba toru pracowały na wspólnej platformie wykorzystującej zintegrowany system wizyjny serii CV-3000 firmy Keyence z automatycznym przetwarzaniem i analizą obrazów. System umożliwiał ocenę SGP elementów ukształtowanych typowymi technologiami obróbkowymi (np. szlifowanie, toczenie, frezowanie, struganie), charakteryzujących się wysokościami nierówności w zakresie od 0,8 do 25 μm (parametr R_z) oraz od 0,07 do 3,7 μm (parametr R_a). Ocena kształtu powierzchni odbywała się z wykorzystaniem wzorów optycznych światła strukturalnego w zakresie od ok. 0,5 do 2 mm.

3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

3.1. CELE BADAŃ EKSPRYMENTALNYCH

Głównym celem prowadzonych badań eksperymentalnych była analiza możliwości zastosowania opracowanego systemu hybrydowego do oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych ściernie. Dodatkowym celem było określenie podstawowych parametrów metrologicznych systemu oraz poprawności przeprowadzania oceny chropowatości powierzchni z wykorzystaniem oprogramowania pomiarowego. Badania prowadzono w dwóch fazach. W pierwszej fazie dokonano oceny płaskich próbek w stanie statycznym, natomiast w drugiej fazie oceny próbek walcowych podczas ruchu.

3.2. BADANIA EKSPERYMENTALNE POWIERZCHNI PŁASKICH W STANIE STATYCZNYM

Do pierwszej fazy badań przeznaczono zestaw sześciu próbek płaskich, w postaci porównawczych wzorców chropowatości powierzchni wyprodukowanych przez firmę Massi (Niemcy). Wzorce tego typu, nazywane także replikowymi, otrzymuje się przez pokrycie

galwaniczne repliki wzorca warstwą metalu. Po procesie wzorce mocowane są w oprawkach, a następnie kompletowane w zestawy. Każdy z zestawów posiadał od sześciu do ośmiu próbek, o wymiarach 60×50×8 mm, wykonanych ze stali C45. Wzorce ułożone były w odpowiedniej kolejności, tzn. od tych charakteryzujących się najniższą wartością parametrów chropowatości powierzchni do najwyższej. Parametry procesu szlifowania oraz uzyskane metodą profilometryczną wartości parametrów R_z i R_a podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów procesu szlifowania próbek płaskich wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych
Table 1. Values of grinding parameters for flat samples used in experimental investigations

Nr próbki	Materiał	Parametry obróbki ¹⁾				Parametry SGP ⁷⁾	
		Prędkość obwodowa		Posuw f , m/min	Głębokość szlifowania a_e , mm	R_z , μm	R_a , μm
		ściernicy v_s , m/s	przedmiotu v_p , m/min				
1.	Stal C45	21 ²⁾	13	0,7	0,0025	0,82	0,07
2.	Stal C45	32 ³⁾	17	1,2	0,005	1,33	0,18
3.	Stal C45	32 ⁴⁾	17	1,7	0,01	2,61	0,37
4.	Stal C45	32 ⁵⁾	17	2,5	0,01	4,87	0,65
5.	Stal C45	32 ⁶⁾	31	5,2	0,02	14,50	1,98
6.	Stal C45	32 ⁶⁾	31	6,5	0,02	24,80	3,71

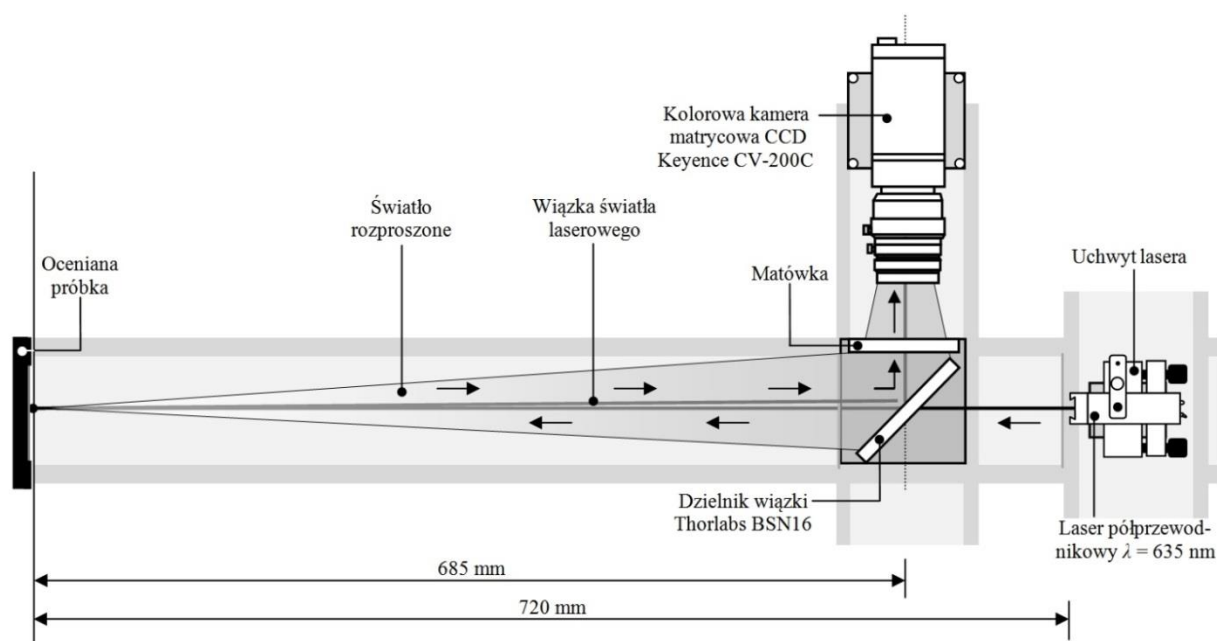
¹⁾ obróbkę prowadzono bez chłodzenia, obróbka prowadzona przy użyciu ściernicy: ²⁾ TGL8480500×80×203EK32K, ³⁾ TGL8480200×20×7EK20M, ⁴⁾ TGL8480200×20×76 EK32K, ⁵⁾ TGL8480200×20×76NK40K, ⁶⁾ TGL8480200×20×76 NK50K, ⁷⁾ pomiar profilometrem stykowym Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke

W celu rejestracji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystano tor optyczny przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni metodą różniczkową, przedstawiony schematycznie na rys. 2.

W skład toru wchodził laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 635 firmy Coherent (USA) zamocowany w uchwycie i emitujący w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali $\lambda = 635$ nm (barwa czerwona). Wiązka rzutowana na powierzchnię ocenianej próbki tworzyła na niej plamkę o średnicy 1 mm.

W zależności od charakterystyki powierzchni (m.in. wysokości nierówności) część światła odbijała się zwierciadlanie, natomiast pozostała część rozpraszała dyfuzyjnie. Obie składowe światła powracały do układu optycznego, gdzie kierowane dzielnikiem wiązki trafiały na matówkę tworząc obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Obraz ten rejestrowany był przez kamerę wysokiej rozdzielczości CV-200C firmy Keyence, a następnie przesyłany był do wielokamerowego systemu wizyjnego serii CV-3000 firmy Keyence. Obraz był tam automatycznie przetwarzany i analizowany z wykorzystaniem autorskiego programu pomiarowego, opracowanego w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1, dostarczonym przez producenta systemu wizyjnego. Na podstawie wielokryterialnej oceny cech rejestrowanego obrazu związanych z pomiarem natężenia światła I , opracowany program dokonywał ciągłej estymacji parametrów chropowatości w wyznaczonym obszarze zainteresowania. W wyniku przetwarzania wstępnego, polegającego na binaryzacji i filtracji, program pomiarowy wyznaczał wartości pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego A_n i korelował je

z wartościami parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz . Na rysunku 3 przedstawiono algorytm przetwarzania i analizy obrazu wykorzystywany w badaniach eksperymentalnych.



Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego w stanie statycznym (tor optyczny do pomiaru chropowatości powierzchni – komponent eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowego do aktywnej kontroli SGP)

Fig. 2. Scheme of measurement setup for acquisition of images of angular distribution of the scattered light intensity in static conditions (optical path for surface roughness measurements – a component of the experimental hybrid measuring system for in-process inspection of the surface texture)

Jak już wspomniano wcześniej, przetwarzanie i analiza przesłanych do systemu wizyjnego obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana była w sposób automatyczny z wykorzystaniem autorskiego programu pomiarowego o nazwie *Flat Grinding 1.0*. Kod programu podano w tabeli 2.

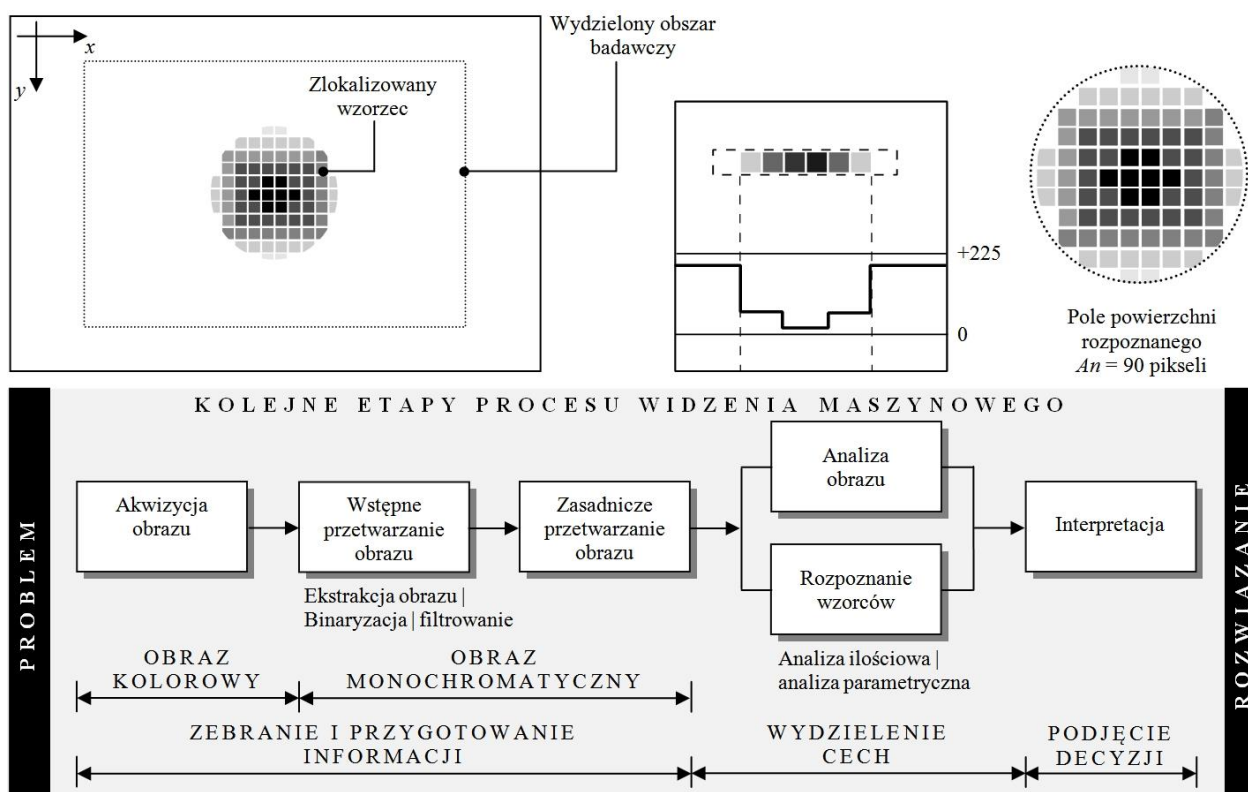
Tabela 2. Kod programu pomiarowego *Flat Grinding 1.0* służącego do oceny parametrów powierzchni szlifowanych próbek płaskich wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Table 2. Code of *Flat Grinding 1.0*. measurement program for assessing parameters of flat ground surfaces of samples used in experimental investigations

Próbki	Technika obróbkowa	Program pomiarowy	Kod programu pomiarowego
Zestaw sześciu próbek płaskich – wzorców porównawczych chropowatości powierzchni firmy Massi	Szlifowanie powierzchni płaskich	Flat Grinding 1.0	-0.57+79.58*Pow(C004.MS,((W000.AR.MS/(3.9*Pow(10,145)))-(W001.DA.MS/22.241)))1.58+31389.63*Pow(W000.AR.MS,-0.027)-0.807*Pow(W001.DA.MS,-59.793)-570.8*Pow(W000.AR.MS,-0.027)*Pow(W001.DA.MS,-59.793)

Uzyskane wyniki analizy obrazu, w postaci wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych wraz z ich korelacją z parametrami SGP, dla szlifowanych powierzchni próbek płaskich zestawiono w tabeli 3.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowe okna programu pomiarowego *Flat Grinding 1.0* opracowanego w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1, podczas analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dla próbek nr 2-5. Rezultaty uzyskane z analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego pozwalają na stwierdzenie, iż wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych mieszczą się w określonych limitach podanych w tabeli 3.



Rys. 3. Schemat algorytmu przetwarzania i analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego realizowany przez autorski program pomiarowy opracowany w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1 firmy Keyence

Fig. 3. Algorithm of processing and analysis of images of angular distribution of the scattered light intensity realized by the measuring program developed in programming environment CV-H3 N 2.1 by Keyence

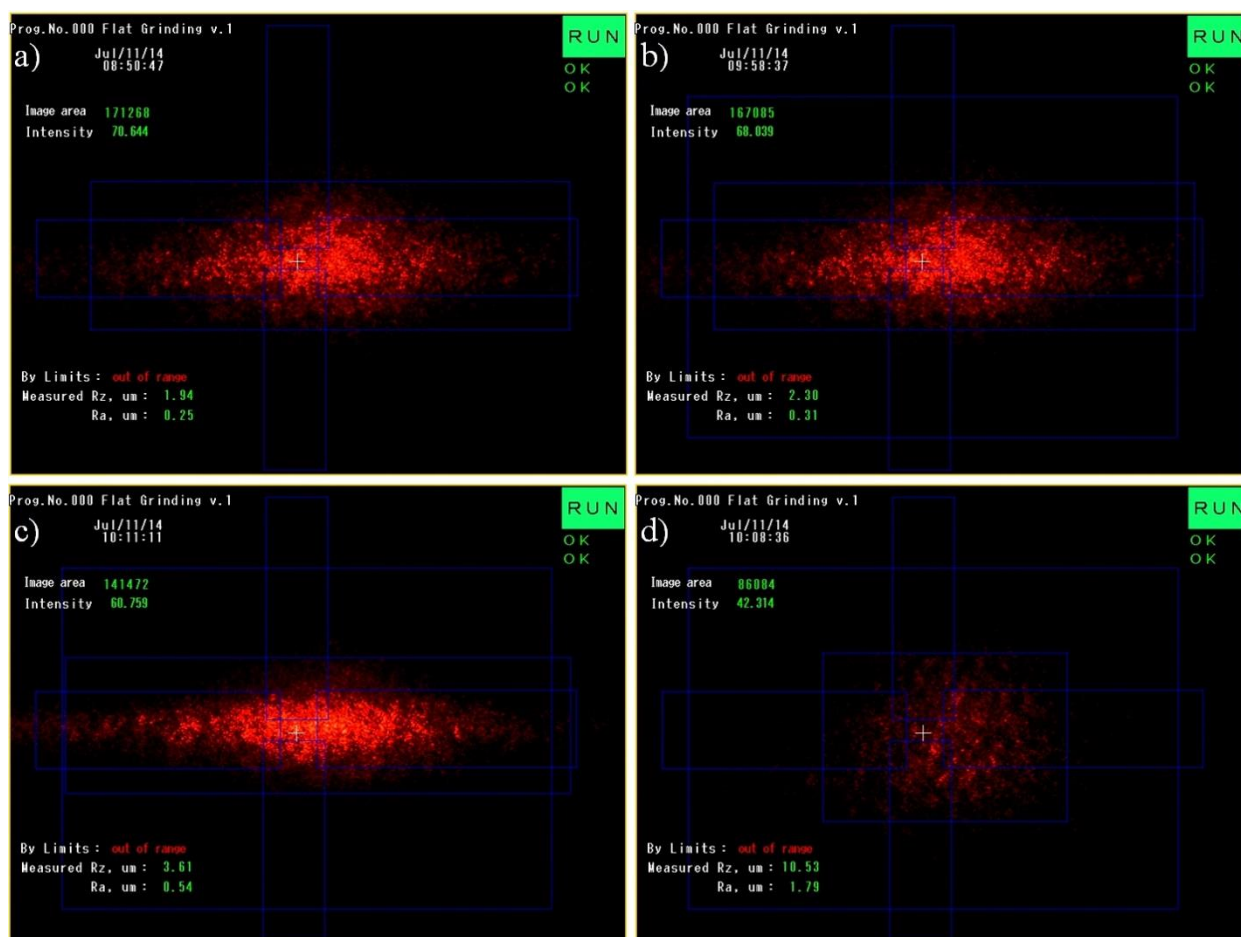
W odniesieniu do uzyskanych wartości parametrów SGP można ogólnie stwierdzić, iż były one niższe od nominalnych średnio o 5,37% (dla parametru R_z) i 9,31% (dla parametru R_a). Oznacza to, iż zastosowany algorytm, pomimo dopracowania, generował błędy. Ich przyczyną były m.in. problemy z pomiarem natężenia światła w widmie widzialnym. Zmiany natężenia światła, wynikające np. z lokalnych zmian warunków oświetlenia, wprowadzały silne zakłócenia w procesie pomiarowym. Na fluktuacje rejestrowanych wartości parametrów wpływały również drobne defekty i zabrudzenia występujące na powierzchniach ocenianych próbek.

Tabela 3. Wartości parametrów geo- i fotometrycznych uzyskane z analizy obrazu wraz z ich korelacją z parametrami chropowatości powierzchni dla szlifowanych próbek płaskich wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Table 3. Values of geo- and photometric parameters obtained from image analysis with their correlation with 2D surface roughness parameters for flat ground samples used in experimental investigations

Nr próbki	Pole powierzchni A_n , piksele		Natężenie światła I , j. u.		Parametry SGP ¹⁾			
	Max.	Min.	Max.	Min.	Rz , μm	σ^2	Ra , μm	σ^2
1.	271000	265000	113	109	0,75	0,0003	0,05	0,0007
2.	214000	205000	90	87	1,94	0,0001	0,25	0,001
3.	162000	158000	71	68	2,30	0,006	0,31	0,0003
4.	120000	110000	58	55	3,61	0,009	0,54	0,009
5.	44000	38000	29	26	10,53	0,003	1,79	0,0009
6.	28000	24000	24	21	23,71	0,01	2,84	0,0004

¹⁾ wartości podanych parametrów chropowatości powierzchni zostały uśrednione z dziesięciu pomiarów



Rys. 4. Obrazy kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm od szlifowanej powierzchni płaskiej wykonanej ze stali C45 (porównawczy wzorec chropowatości powierzchni firmy Massi): a) próbki nr 2 ($Rz = 1,94 \mu\text{m}$, $Ra = 0,25 \mu\text{m}$); b) próbki nr 3 ($Rz = 2,30 \mu\text{m}$, $Ra = 0,31 \mu\text{m}$); c) próbki nr 4 ($Rz = 3,61 \mu\text{m}$, $Ra = 0,54 \mu\text{m}$); d) próbki nr 5 ($Rz = 10,53 \mu\text{m}$, $Ra = 1,79 \mu\text{m}$)

Fig. 4. Images of angular distribution of the scattered light intensity obtained as a result of laser beam (wavelength of $\lambda = 635$ nm) reflection from the flat ground surface made of steel C45 (comparative roughness standards produced by Massi) for: a) sample No. 2 ($Rz = 1.94 \mu\text{m}$, $Ra = 0.25 \mu\text{m}$); b) sample No. 3 ($Rz = 2.30 \mu\text{m}$, $Ra = 0.31 \mu\text{m}$); c) sample No. 4 ($Rz = 3.61 \mu\text{m}$, $Ra = 0.54 \mu\text{m}$); d) sample No. 5 ($Rz = 10.53 \mu\text{m}$, $Ra = 1.79 \mu\text{m}$)

Tym niemniej uzyskane rezultaty należy uznać za poprawne, mieszczące się w zakresie błędów przyjętych dla przemysłowych systemów pomiarowych. Tolerancja błędu definiowana dla pomiarów wykonywanych z wykorzystaniem takich systemów jest w dużej mierze uzależniona od charakteru produkcji przemysłowej. Ogólnie można stwierdzić, iż wartości błędów powinny być jak najmniejsze (rzędu kilku procent), w rzeczywistości jednak wahają się one w granicach 10-20% wartości wielkości mierzonej.

3.3. BADANIA EKSPERYMENTALNE POWIERZCHNI WALCOWYCH W STANIE DYNAMICZNYM

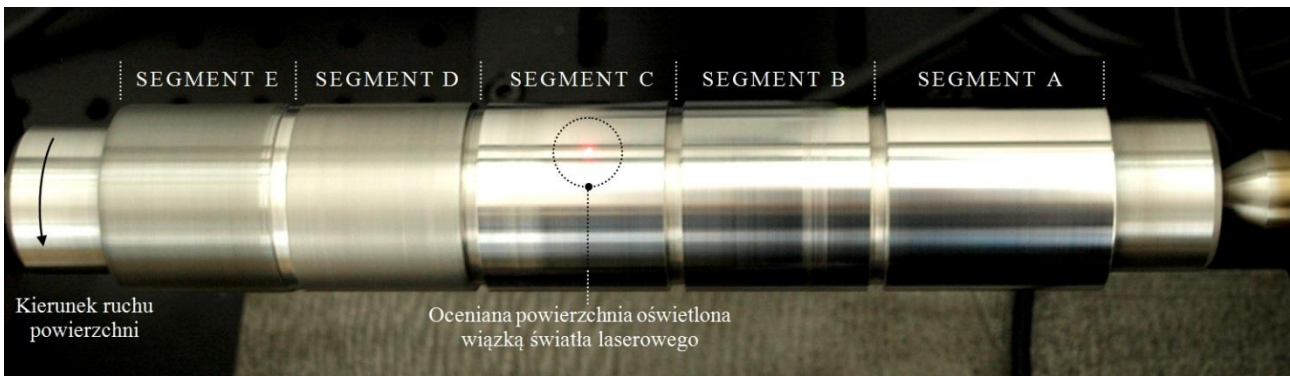
Pozytywne rezultaty badań eksperymentalnych uzyskanych podczas statycznej oceny parametrów SGP szlifowanych próbek płaskich, pozwoliły na przeprowadzenie prób oceny takich parametrów w stanie dynamicznym. W tym celu rozszerzono zakres prac o pomiary wykonywane podczas ruchu powierzchni ocenianych próbek. W badaniach wykorzystano dwie próbki walcowe o średnicy zewnętrznej $d_z = 40$ mm i długości $l = 165$ mm. Powierzchnia próbki nr 1 posiadała pięć segmentów o długości $l = 33$ mm, natomiast powierzchnia próbki nr 2 dwa segmenty o długości $l = 80$ mm. Wszystkie powierzchnie próbek poddano szlifowaniu ściernicą 1-350×50×12738A80KVBE na szlifierce uniwersalnej RUP 28P wyprodukowanej przez ZM Tarnów (Polska). Parametry procesu szlifowania próbek walcowych podano w tabeli 4, natomiast na rysunku 5 przedstawiono widok ogólny próbki nr 1. Podobnie, jak w przypadku szlifowanych próbek płaskich, do rejestracji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystano tor optyczny przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni metodą różniczkową, przedstawiony schematycznie na rysunku 6.

Tabela 4. Wartości parametrów procesu szlifowania próbek walcowych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

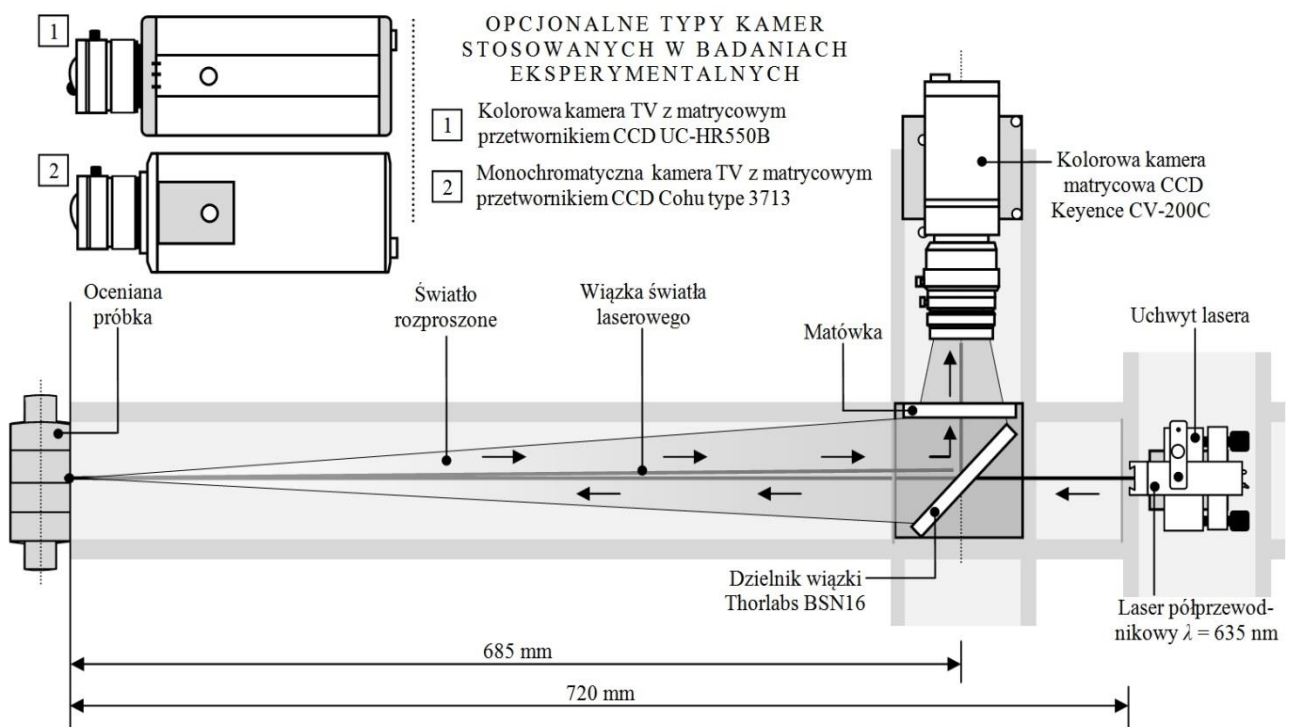
Table 4. Parameters of grinding cylindrical samples used in experimental investigations

Nr próbki	Ozn. pow.	Materiał ¹⁾	Parametry obróbki ²⁾			
			Prędkość obwodowa		Posuw f , mm/min	Głębokość szlifow. a_e , mm
			ściernicy v_s , m/s	przedmiotu v_p , m/min		
1.	A	Stal NC6	26,7	0,4	75	0,01
	B		26,7	0,4	75	0,01
	C		26,7	0,4	70	0,02
	D		37,4	0,6	75	0,01
	E		37,4	0,6	70	0,01
2.	A	Stal NC6	26,7	0,4	75	0,01
	B		26,7	0,4	70	0,01

¹⁾ twardość próbek 60 HRC, ²⁾ obróbkę prowadzono z intensywnym chłodzeniem emulsją olejową Syntilo RHS firmy Castrol (W. Brytania)



Rys. 5. Widok ogólny walcowej próbki nr 1 podczas oceny chropowatości powierzchni
 Fig. 5. General view of cylindrical sample no. 1 during the assessment of surface roughness



Rys. 6. Schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do akwizycji obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego w ruchu (tor optyczny do pomiaru chropowatości powierzchni – komponent eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowy do aktywnej kontroli SGP)

Fig. 6. Scheme of measurement setup used for acquisition of images of angular distribution of the scattered light intensity in movement (optical path for surface roughness measurements – a component of experimental hybrid measuring system for in-process inspection of surface texture)

W trakcie badań korzystano z kilku typów kamer TV, testując ich możliwości obrazowe oraz akwizycyjne. Stosowano zarówno kamery kolorowe, jak i monochromatyczne – zostały one wymienione na rysunku 6. Zasadniczą część badań przeprowadzono natomiast z wykorzystaniem kamery CV-200C firmy Keyence. Ruch powierzchni walcowych, z prędkością obrotową $n_p = 600$ obr./min, realizowany był za pomocą modułu obrotu przedmiotu mierzonego. Uzyskane wyniki analizy obrazu, w postaci

wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych wraz z ich korelacją z parametrami SGP, dla szlifowanych próbek walcowych zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry geo- i fotometryczne uzyskane z analizy obrazu wraz z ich korelacją z parametrami chropowatości powierzchni dla szlifowanych próbek walcowych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych
Table 5. Geo- and photometric parameters obtained from image analysis with their correlation with 2D surface roughness parameters for cylindrical ground samples used in experimental investigations

Nr próbki	Ozn. pow.	Rodzaj pomiaru	Parametry uzyskane z analizy obrazu		Parametry SGP			
			An, piksel	I, j. u.	Wartość			
					nominalna ¹⁾		zmierzona	
					Rz, μm	Ra, μm	Rz, μm	Ra, μm
1.	A	S	102352	63,14	4,14	0,74	6,40	0,80
		R ²⁾	104611	69,28			7,64	0,96
	B	S	62001	46,96	8,92	2,24	9,49	1,31
		R ²⁾	79105	54,52			9,09	1,23
	C	S	44632	32,06	14,72	3,4	13,58	1,91
		R ²⁾	49676	38,21			15,10	2,11
	D	S	29636	29,39	24,32	5,98	21,21	3,06
		R ²⁾	26861	30,39			29,52	4,28
	E	S	21358	20,75	43,81	11,4	30,32	4,46
		R ²⁾	21413	28,15			37,79	5,56
2.	A	S	83925	42,37	1,5	0,28	6,82	0,92
		R ²⁾	92968	44,42			7,63	1,02
	B	S	157270	71,92	1,30	0,17	2,56	0,35
		R ²⁾	117993	51,76			5,91	0,79

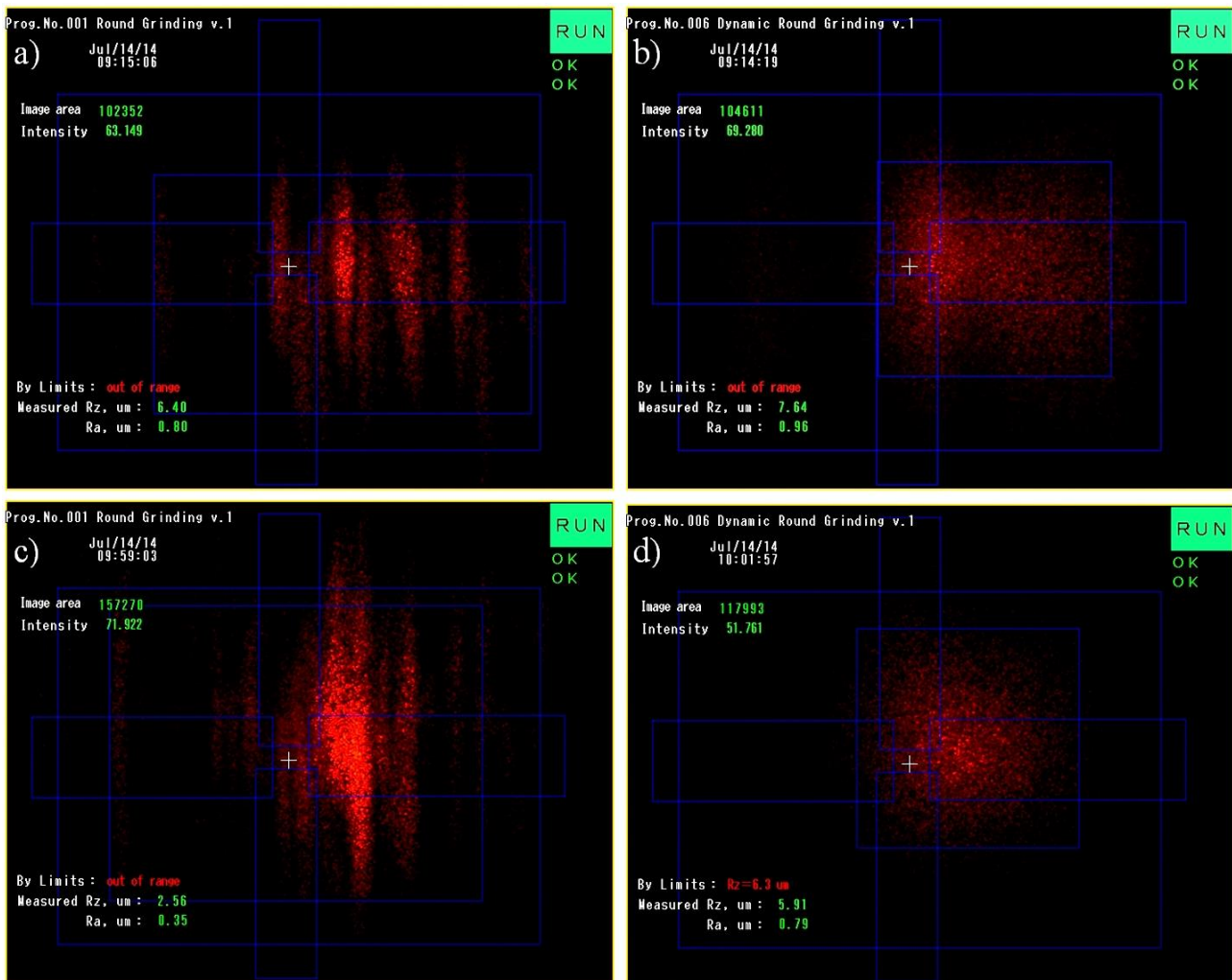
¹⁾ pomiar mikroskopem interferencyjnym światła białego Talysurf CCI6000 firmy Taylor-Hobson (W. Brytania),

²⁾ prędkość obrotowa przedmiotu $n_p = 600$ obr/min, S – pomiar w stanie statycznym, R – pomiar w ruchu

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe okna dwóch programów pomiarowych *Round Grinding 1.0* i *Dynamic Round Grinding 1.0*, przeznaczonych do oceny powierzchni szlifowanych próbek walcowych, stosowanych odpowiednio w stanie statycznym i w ruchu, podczas analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dla próbek nr 1 i 2. Oba programy, będące rozwinięciem procedury programowej zastosowanej podczas oceny próbek płaskich (*Flat Grinding 1.0*), opracowano w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1.

Rezultaty uzyskane na podstawie analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego pozwalają na stwierdzenie, iż wartości parametrów SGP jedynie częściowo odpowiadają wartościom nominalnym podanym w tabeli 5. Dla próbki nr 1 wartości parametru Rz, ocenianego w stanie statycznym, były średnio o 2% wyższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu wzrastały do ponad 19%. Dla tej samej próbki wartości parametru Ra, ocenianego w stanie statycznym, były o ponad 37% niższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu były niższe o ponad 26%. Dla próbki nr 2

rejestrowano dużo wyższe wartości parametrów. Były one dla parametru Rz , ocenianego w stanie statycznym, o ponad 200% wyższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu różnica wzrastała do ponad 350%. Dla parametru Ra były one na podobnym poziomie, odpowiednio ponad 160% wyższe od nominalnych (dla oceny statycznej) i ponad 300% (dla oceny w ruchu). Jak stwierdzono wcześniej, uzyskane wyniki tylko częściowo można uznać za poprawne, ale zostały one zamieszczone celowo, aby przedstawić realne problemy występujące podczas oceny wybranych parametrów analizowanych powierzchni metodami rozpraszania światła i widzenia maszynowego.



Rys. 7. Obrazy kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm, skierowanej pod kątem padania 90° , od walcowej powierzchni szlifowanej wykonanej ze stali NC6: a) próbka nr 1, powierzchnia A, pomiar statyczny ($Rz = 6,40 \mu\text{m}$, $Ra = 0,80 \mu\text{m}$); b) próbka nr 1, powierzchnia A, pomiar w ruchu ($Rz = 7,64 \mu\text{m}$, $Ra = 0,96 \mu\text{m}$); c) próbka nr 2, powierzchnia B, pomiar statyczny ($Rz = 2,56 \mu\text{m}$, $Ra = 0,35 \mu\text{m}$); d) próbka nr 2, powierzchnia B, pomiar w ruchu ($Rz = 5,91 \mu\text{m}$, $Ra = 0,79 \mu\text{m}$)

Fig. 7. Images of angular distribution of the scattered light intensity obtained as a result of laser beam (wavelength of $\lambda = 635$ nm) reflection from the cylindrical ground surface made of steel NC6 for: a) sample No. 1, surface A, measurement in static conditions ($Rz = 6.40 \mu\text{m}$, $Ra = 0.80 \mu\text{m}$); b) sample No. 1, surface A, measurement in movement ($Rz = 7.64 \mu\text{m}$, $Ra = 0.96 \mu\text{m}$); c) sample No. 2, surface B, measurement in static conditions ($Rz = 2.56 \mu\text{m}$, $Ra = 0.35 \mu\text{m}$); d) sample No. 2, surface B, measurement in movement ($Rz = 5.91 \mu\text{m}$, $Ra = 0.79 \mu\text{m}$)

Zasygnalizowane już, podczas analizy rezultatów uzyskanych dla szlifowanych próbek płaskich, źródła błędów można przedstawić znacznie szerzej i podzielić na następujące grupy związane m.in. z:

- ocenianym przedmiotem (tj. rodzajem powierzchni i sposobem jej obróbki, rodzajem materiału, parametrami procesu obróbki, parametrami SGP, kierunkowością ułożenia śladów obróbki, przygotowaniem powierzchni do oceny),
- aparaturą pomiarową (tj. właściwym jej doбором, odpowiednimi właściwościami metrologicznymi, przygotowaniem, konfiguracją),
- warunkami przeprowadzenia oceny (tj. odpowiednim oświetleniem, doбором źródła światła, długością fali światła, kierunkowością oświetlenia, odległością płaszczyzny padania od płaszczyzny obserwacji, możliwością przesłonięcia wiązki światła w przypadku pomiarów laserowych, oddziaływaniem zanieczyszczeń (pył, kurz) i płynów obróbkowych, drganiami i wibracjami przedmiotu oraz aparatury pomiarowej),
- procesem oceny (tj. metodyką i strategią pomiarów, ustawieniem aparatury pomiarowej, doбором ocenianych parametrów, ciągłością przesyłania danych pomiarowych oraz ich przetwarzaniem i analizą).

W rzeczywistych warunkach produkcyjnych można wskazać znacznie więcej źródeł błędów. Wynikają one głównie ze specyfiki procesu produkcyjnego. Wykrycie lub ograniczenie skutków ich działania jest w takich warunkach stosunkowo trudne. Tym niemniej zapewnienie wysokiej jakości wytwarzanych elementów wymusza redukcję błędów do takiego poziomu, który zapewnia utrzymanie wysokich standardów produkcji. Innego rodzaju błędy mogą wystąpić w trakcie oceny przeprowadzanej podczas ruchu powierzchni. Ruch w dużym stopniu komplikuje proces oceny i wymusza wprowadzanie pewnych ograniczeń dotyczących m.in. jej dokładności. W tym przypadku odpowiednia optymalizacja zarówno warunków, jak i sposobów przeprowadzenia oceny, może w znacznym stopniu usprawnić ten proces.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Pozytywne rezultaty przeprowadzonych badań eksperymentalnych, pozwalają na wysunięcie następujących wniosków:

- zaprezentowany w niniejszej pracy hybrydowy system pomiarowy opracowany w Politechnice Koszalińskiej, po dopracowaniu m.in. procedur programowych związanych z korelacją parametrów uzyskanych z analizy obrazów światła rozproszonego i parametrów chropowatości powierzchni oraz odpowiedniej miniaturyzacji konstrukcji, może stanowić ciekawą alternatywę dla stosowanych obecnie komercyjnych systemów optycznych w aplikacjach o charakterze laboratoryjnym i przemysłowym, związanych z szeroko pojętą oceną stanu powierzchni obrobionych,
- w zaprezentowanej konfiguracji system umożliwiał ocenę chropowatości powierzchni szlifowanych o wysokościach nierówności od 0,07 do 3,7 μm (parametr Ra) oraz od 0,8 do 25 μm (parametr Rz). W powyższych zakresach rejestrowano najniższe błędy pomiaru. Warto zaznaczyć również, iż podczas oceny wartości górnych zakresów obu

parametrów były wyższe, co świadczy o dużej czułości zastosowanej metody rozpraszania światła,

- wykorzystanie w hybrydowym systemie pomiarowym platformy firmy Keyence, umożliwiło realizację stosunkowo zaawansowanego przetwarzania i analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Zastosowane w tym celu dedykowane oprogramowanie CV-H3N 2.1 pozwalało na tworzenie autorskich programów pomiarowych pod dane zadania, związane z oceną stanu powierzchni obrobionych.

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych wykorzystano autorskie programy pomiarowe przeznaczone do oceny chropowatości powierzchni próbek płaskich i walcowych w stanie statycznym i podczas ruchu.

LITERATURA

- [1] CHAKRABORTY K., CHATTOPADHYAY A.B., CHAKRABARTI A.K., 2003, *A study on the grindability of niobium microalloyed forging quality HSLA steels*, J. Mater. Process. Tech., 141/3, 404-410.
- [2] DUSCHA M., KLOCKE F., WEGNER H., 2011, *Residual stress model for speed-stroke grinding of hardened steel with CBN grinding wheels*, International Journal of Automation Technology, 5/3, 439-444.
- [3] EZILARASAN C., SENTHIL KUMAR V.S., VELAYUDHAM A., 2014, *Theoretical predictions and experimental validations on machining the Nimonic C-263 super alloy*, Simul. Model. Pract. Th., 40, 192-207.
- [4] HOU Y., LI C., ZHOU Y., 2010, *Applications of high-efficiency abrasive process with CBN grinding wheel*, Engineering, 2/03, 184-189.
- [5] HUANG H., YIN L., ZHOU L., 2003, *High speed grinding of silicon nitride with resin bond diamond wheels*, J. Mater. Process. Tech., 141/3, 329-336.
- [6] KAPŁONEK W., NADOLNY K., 2013, *The diagnostics of abrasive tools after internal cylindrical grinding of hard-to-cut materials by means of a laser technique using imaging and analysis of scattered light*, Arab. J. Sci. Eng., 38/4, 953-970.
- [7] KAPŁONEK W., NADOLNY K., 2015, *Laser methods based on an analysis of scattered light for automated, in-process inspection of machined surfaces: A review*, Optik, 126/20, 2764-2770.
- [8] KLOCKE F., 2009, *Manufacturing processes 2: Grinding, honing, lapping*, Springer, Berlin and Heidelberg.
- [9] LIU F.C., LIN X., SONG M., ZHAO W., CHEN J., HUANG W.D., (2011), *Effect of intermediate heat treatment temperature on microstructure and notch sensitivity of laser solid formed Inconel 718 superalloy*, Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed., 26/5, 908-913.
- [10] ŁUKIANOWICZ CZ., KARPINSKI T., (2003), *Scatterometry of ground surfaces*, Meas. Sci. Rev., 3/3, 21-24.
- [11] MARINESCU I.D., HITCHINER M.P., UHLMANN E., ROWE W.B., INASAKI I., 2007, *Handbook of machining with grinding wheels*, CRC Press, Boca Raton.
- [12] NADOLNY K., KAPŁONEK W., 2015, *SEM-based morphological analysis of the new generation AION-based abrasive grains (Abral®) with reference to Al₂O₃/SiC/cBN abrasives*, Acta Microscopica, 24/1, 64-78.
- [13] RAO C.B., RAJ B., 2003, *Study of engineering surfaces using laser scattering techniques*, Sadhana, 28/3-4, 739-761.
- [14] ROWE W.B., 2014, *Principles of modern grinding technology (2nd Ed.)*, Elsevier, Waltham and Oxford.
- [15] SONG K.H., CHUNG Y.D., NAKATA K., 2013, *Investigation of microstructure and mechanical properties of friction stir lap jointed Monel 400 and Inconel 600*, Met. Mater. Int., 19/3, 571-576.
- [16] STOVER J.C., 2012, *Optical scattering, measurement and analysis (3rd Ed.)*, SPIE Press, Bellingham.
- [17] TEICHER U., GHOSH A., CHATTOPADHYAY A.B., KÜNANZ K., 2006, *On the grindability of titanium alloy by brazed type monolayered superabrasive grinding wheels*, Int. J. Mach. Tool. Manu., 46/6, 620-622.
- [18] TIAN G.Y., LU R.S., GLEDHILL D., 2007, *Surface measurement using active vision and light scattering*, Opt. Laser. Eng., 45/1, 131-139.
- [19] THAKUR D.G., RAMAMOORTHY B., VIJAYARAGHAVAN L., 2009, *Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning*, Int. J. Adv. Manuf. Tech., 45/5-6, 421-429.

- [20] TÖNSHOFF H.K., FRIEMUTH T., BECKER J.C., 2000, *Continuous path controlled grinding of crankshafts*, *Abrasives Magazine*, 1, 25-29.
- [21] VACHARANUKUL K., MEKID S., 2005, *In-process Dimensional Inspection Sensors*, *Measurement*, 38/3, 204-218.

APPLICATION OF A HYBRID MEASURING SYSTEM USING IMAGING AND ANALYSIS OF SCATTERED LIGHT FOR ASSESSMENT OF THE SURFACE STATE OF GROUND SURFACES

One of the very important issues in the modern manufacturing industry is to ensure adequate assessment of the workpieces surfaces. Such an assessment, for many reasons, must be carried out in a non-contact way in a relatively short time, even while the examined surface is in movement. These requirements can be fulfilled by application of hybrid systems that combine optical measurement methods with techniques of digital image processing and analysis. In the work, one of such a hybrid systems developed in the Koszalin University of Technology has been presented. A brief description of its construction and configuration were given in Section 2. The selected results obtained in a frame of experimental investigations carried out during assessment of ground surfaces of flat and cylindrical samples were presented and discussed in Section 3. They were characterized by a surface roughness in a range from 0.07 to 3.7 μm (R_a parameter) as well as from 0.8 to 25 μm (R_z parameter). Positive results of investigations give a chance to continue the work, which will be focused on modification of the system construction as well as on searching for the areas of its further applications.

Keywords: light scattering, angle-resolved scattering, image processing and analysis, hybrid measurement system, grinding