



POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA  
WYDZIAŁ MECHANICZNY

---

mgr inż. Wojciech Kapłonek

ZASTOSOWANIE METOD OPTYCZNYCH DO AKTYWNEJ  
KONTROLI STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI  
I WYMIARU PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

Rozprawa doktorska

Promotor:  
Dr hab. inż. Czesław Łukianowicz  
profesor nadzwyczajny  
Politechniki Koszalińskiej

Koszalin 2009



## SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI.....	5
WYKAZ WAŻNIEJSZYCH AKRONIMÓW I SKRÓTÓW.....	7
1. WPROWADZENIE.....	9
2. ANALIZA LITERATURY.....	13
2.1. Struktura geometryczna powierzchni i metody jej kontroli.....	15
2.1.1. Pojęcia podstawowe .....	15
2.1.2. Aktywna kontrola struktury geometrycznej powierzchni.....	16
2.1.3. Metody aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni.....	17
2.1.3.1. Metody mechaniczne.....	18
2.1.3.2. Metody elektryczne.....	19
2.1.3.3. Metody pneumatyczne.....	20
2.1.3.4. Metody ultradźwiękowe.....	21
2.2. Optyczne metody aktywnej kontroli wymiaru i struktury geometrycznej powierzchni.....	22
2.2.1. Optyczne metody aktywnej kontroli wymiaru.....	23
2.2.1.1. Metody triangulacji laserowej.....	23
2.2.1.2. Metody światła strukturalnego wykorzystujące projekcję wzorów optycznych....	26
2.2.2. Optyczne metody aktywnej kontroli nierówności powierzchni.....	31
2.2.2.1. Metody reflektometryczne.....	32
2.2.2.2. Metody różniczkowe (goniometriczne).....	35
2.3. Techniki przetwarzania i analizy obrazu stosowane w aktywnej kontroli wymiaru i struktury geometrycznej powierzchni.....	42
2.3.1. Metoda śledzenia obiektów.....	43
2.3.2. Metoda nakładania obrazów.....	46
2.4. Wnioski z analizy literatury.....	50
3. CELE, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY.....	51
3.1. Cele pracy .....	53
3.2. Hipoteza badawcza .....	53
3.3. Zakres pracy.....	53
4. ANALIZA TEORETYCZNA.....	55
4.1. Podstawy teoretyczne metod triangulacyjnych.....	57
4.1.1. Analiza podstawowych właściwości metrologicznych.....	59
4.1.2. Analiza czynników powodujących błędy pomiaru.....	61
4.2. Podstawy teoretyczne metod światła strukturalnego .....	61
4.2.1. Ogólna idea metod światła strukturalnego.....	62
4.2.2. Ocena kształtu powierzchni metodą światła strukturalnego .....	64
4.3. Podstawy teoretyczne metod skaterometrycznych.....	66
4.3.1. Model powierzchni zwierciadlanej.....	67
4.3.2. Kryterium Rayleigha.....	68
4.3.3. Rozkład światła rozproszonego.....	69
5. BADANIA DOŚWIADCZALNE .....	71
5.1. Badania rozpoznawcze.....	73
5.1.1. Badania wymiaru przedmiotu.....	73
5.1.2. Badania struktury geometrycznej powierzchni.....	78
5.1.3. Wnioski z badań rozpoznawczych.....	90
5.2. Badania właściwe.....	91
5.2.1. Cele i zakres badań.....	91

5.2.2. Stanowisko badawcze.....	92
5.2.2.1. Analiza koncepcji układów optycznych.....	92
5.2.2.2. Konstrukcja stanowiska badawczego.....	96
5.2.3. Próbkę wykorzystywane w badaniach.....	106
5.2.4. Metodyka badań.....	127
5.2.5. Wyniki badań i ich analiza.....	136
6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE.....	157
6.1. Wnioski poznawcze.....	159
6.2. Wnioski użytkowe (praktyczne).....	160
6.3. Wnioski dotyczące dalszych badań.....	160
7. BIBLIOGRAFIA.....	161
STRESZCZENIE.....	180
SUMMARY.....	181
INFORMACJE O AUTORZE.....	182
WYKAZ PUBLIKACJI NAUKOWYCH.....	183
8. ZAŁĄCZNIK.....	185

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH SYMBOLI<sup>1</sup>

$d$	– okres elementu dyfrakcyjnego,
$d_i$	– grubość warstwy izolatora,
$dP$	– moc promienista rozproszona wewnątrz elementarnego kąta bryłowego,
$dy/dx$	– pochodna profilu chropowatości,
$d\Omega$	– elementarny kąt bryłowy,
$f$	– długość ogniskowej obiektywu,
$f_x, f_y, f_{xy}$	– częstotliwości przestrzenne nierówności powierzchni,
$i$	– numer kolejnego elementu światłoczułego,
$\bar{i}$	– wartość oczekiwana kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego,
$k$	– liczba falowa,
$k$	– współczynnik zawartości obrazu $L_n(x,y)$ w obrazie wynikowym $L(x,y)$ ,
$l$	– długość odcinka elementarnego profilu powierzchni,
$n$	– liczba elementów światłoczułych detektora fotoelektrycznego,
$n$	– liczba łączonych obrazów,
$p_i$	– unormowana wartość natężenia światła rozproszonego zmierzonego $i$ -tym elementem światłoczułym,
$t$	– czas,
$x$	– numer wiersza,
$y$	– numer kolumny,
$z_1, z_2$	– wysokości nierówności,
$A_k$	– pole powierzchni czynnej elektrody,
$C_k$	– pojemność kondensatora,
$C_N$	– współczynnik normujący,
$H_w$	– szerokość połówkowa,
$I$	– natężenie światła,
$I_c$	– suma natężeń światła zmierzonych poszczególnymi elementami światłoczułymi detektora fotoelektrycznego,
$I_{max}$	– maksymalne natężenie światła zmierzone detektorem fotoelektrycznym,
$I_\Sigma$	– sumaryczne natężenie światła w obrazie światła rozproszonego przez powierzchnię,
$L_e$	– luminancja energetyczna powierzchni w określonym kierunku rozproszenia,
$m$	– rząd dyfrakcji,
$P_i$	– moc promienista padająca na powierzchnię,
$P_o$	– moc źródła światła laserowego,
$Q$	– bezwymiarowy czynnik, zależny od azymutalnego kąta rozproszenia $\phi$ ,
$R_0$	– reflektancja całkowita,
$Ra$	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu,
$Rc$	– średnia wysokość elementów profilu,
$Rd$	– reflektancja dyfuzyjna,
$Rq$	– średnia kwadratowa rzędnych profilu,
$Rp$	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu,
$Rv$	– głębokość najniższego wgłębienia profilu,
$Rt$	– całkowita wysokość profilu,
$Rz$	– wysokość profilu chropowatości według 10 punktów,
$Rtm$	– średnia arytmetyczna największej wysokości profilu wyznaczonej na kolejnych pięciu odcinkach elementarnych,

<sup>1</sup> Dla lepszej przejrzystości i jednoznaczności cytowanych praw, zależności i wzorów występujące w nich symbole pisane będą czcionką Times New Roman.

$S$	– pole powierzchni obrazu,
$S(f_x, f_y)$	– dwuwymiarowa funkcja gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni,
$S_0$	– pole powierzchni oświetlonej,
$S_N$	– unormowana wariancja kątów rozproszenia,
$S_a$	– średnie arytmetyczne odchylenie rzędnych powierzchni,
$S_q$	– średnie kwadratowe odchylenie rzędnych powierzchni,
$S_p$	– wysokość najwyższego wzniesienia powierzchni,
$S_v$	– głębokość najniższego wgłębienia powierzchni,
$S_t$	– wysokość nierówności (maksymalna wysokość powierzchni),
$S_z$	– wysokość chropowatości według 10 punktów,
$S_{ds}$	– gęstość wierzchołków nierówności powierzchni,
$S_{td}$	– kierunek tekstury powierzchni,
$S_{tr}$	– wskaźnik tekstury powierzchni,
$\varepsilon_i$	– przenikalność elektryczna izolatora,
$\varepsilon_d$	– przenikalność elektryczna powietrza,
$\theta_d$	– kąt rozproszenia, biegunowy kąt rozproszenia,
$\theta_g$	– graniczny kąt rozproszenia światła,
$\theta_i$	– główny kąt padania światła na powierzchnię,
$\theta_m$	– kąt dyfrakcji,
$\theta_s$	– kąt odbicia światła od powierzchni,
$\lambda$	– długość fali światła,
$\lambda_c$	– graniczna długość fali światła,
$\xi$	– połysk,
$\sigma$	– średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności,
$\phi$	– azymutalny kąt rozproszenia,
$\Delta q$	– średnie kwadratowe pochylenie profilu powierzchni,
$\Delta\varphi$	– różnica faz fal odbitych od dwóch punktów powierzchni nierównej,
$\Delta C$	– przesunięcie plamki światła wzdłuż aktywnego obszaru detektora.

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH AKRONIMÓW I SKRÓTÓW

- ANSI – (ang. *American National Standards Institute*) – Amerykański Krajowy Instytut Normalizacji,
- ARS – (ang. *Angle-Resolved Scattering*) – optyczne metody różniczkowe wykorzystujące pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozpraszanego do oceny nierówności powierzchni,
- ASTM – (ang. *American Society for Testing and Materials*) – Amerykańskie Stowarzyszenie do spraw Badań i Materiałów,
- BNC – (ang. *Bayonet Neill-Concelman*) – złącze stosowane do łączenia sieci zbudowanych z kabli koncentrycznych oraz w aparaturze pomiarowej i systemach telewizji przemysłowej,
- BRDF – (ang. *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) – funkcja opisująca przestrzenny rozkład natężenia światła rozproszonego,
- BS – (ang. *British Standards*) – Norma Brytyjska,
- CCD – (ang. *Charge Coupled Devices*) – detektor fotoelektryczny o sprzężeniu ładunkowym,
- CCI – (ang. *Coherence Correlation Interferometry*) – interferometria korelacji koherencji,
- CMOS – (ang. *Complementary Metal Oxide Semiconductor*) – komplementarny półprzewodnik tlenkowy,
- CNC – (ang. *Computer Numerical Control*) – sterowanie numeryczne za pomocą komputera,
- CTFM – (ang. *Continuous Transmission Frequency Modulated*) – metoda ultradźwiękowa wykorzystująca ciągłą transmisję zmodulowanej częstotliwości,
- DMD – (ang. *Digital Micromirror Devices*) – urządzenie cyfrowe zbudowane z mikrozwierciadeł,
- DOE – (ang. *Diffractive Optical Element*) – dyfrakcyjny element optyczny,
- DS – (ang. *Differential Scattering*) – optyczne metody różniczkowe wykorzystujące pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozpraszanego do oceny nierówności powierzchni,
- FFC – (ang. *Fringe Field Capacitive Method*) – metodą pojemnościową z elektrodą prostopadłą do powierzchni
- HSS – (ang. *High Speed Steel*) – stal szybko tnąca,
- IOD – (ang. *Integrated Optical Density*) – sumaryczne natężenie światła,
- ISO – (ang. *International Organization for Standardization*) – Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna,
- JIS – (ang. *Japanese Industrial Standard*) – Japońska Norma Przemysłowa,
- JSA – (ang. *Japanese Standards Association*) – Japońskie Stowarzyszenie Normalizacyjne,
- LED – (ang. *Light Emitting Diode*) – dioda elektroluminescencyjna,
- MEMS – (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*) – miniaturowe urządzenia elektro-mechaniczne,
- MFM – (ang. *Mirror Facet Model*) – model, w którym, nierówna powierzchnia przedmiotu traktowana jest jako zbiór odpowiednio zorientowanych, płaskich miniaturowych zwierciadeł,
- MOEMS – (ang. *Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*) – miniaturowe urządzenia opto-elektro-mechaniczne,
- MTPT – (ang. *Moving Three Probe Technique*) – metoda pojemnościową z trzema ruchomymi czujnikami,
- MVS – (ang. *Machine Vision Systems*) – systemy widzenia maszynowego,
- OFT – (ang. *Optical Fourier Transform*) – optyczne przekształcenie Fouriera,
- ONP – układ obrabiarka-narzędzie-przedmiot obrabiany
- OUNP – układ obrabiarka-uchwyt-narzędzie-przedmiot obrabiany
- PSD – (ang. *Position Sensitive Device/Detector*) – optyczny czujnik położenia,
- PJC – (ang. *Pulse-Jet Capacitance Method*) – metoda pojemnościowa wykorzystująca dyszę impulsową,
- PN – Polska Norma,
- SBI – (ang. *SBI – Scanning Broadband Interferometry*) – szerokopasmowa interferometria skaningowa,
- SNR – (ang. *Signal-to-Noise-Ratio SNR*) – stosunek sygnału do szumu,
- SGP – struktura geometryczna powierzchni,
- TDI – (ang. *Time Delay and Integration*) – sposób rejestracji sekwencji video z opóźnieniem czasowym,

## Wykaz ważniejszych akronimów i skrótów

---

- TIS – (*ang. Total Integrated Scattering*) – optyczne metody integracyjne wykorzystujące sumaryczny pomiar natężenia światła rozpraszanego we wszystkich kierunkach do oceny nierówności powierzchni,
- TSLT – (*ang. Time-of-Scan Laser Triangulation*) – triangulacja laserowa ze skanowaniem czasowym,
- WLI – (*ang. White Light Interferometry*) – interferometria światła białego,
- WW – warstwa wierzchnia.





# WPROWADZENIE





We współczesnym przemyśle produkującym elementy maszyn i urządzeń duży nacisk kładzie się na zapewnienie wysokiej jakości wytwarzanych elementów. Z jednej strony podyktowane jest to wysokimi wymaganiami dotyczącymi zapewnienia przez wyroby korzystnych parametrów eksploatacyjnych w czasie całego okresu ich użytkowania, z drugiej dużą konkurencją na rynku. Aby uzyskać produkty o najwyższej jakości, potrzebna jest ich ciągła kontrola w czasie trwania całego procesu wytwarzania – od półwyrobu do gotowego elementu.

W przypadku wytwarzania elementów wykonanych z różnego rodzaju materiałów, poddawanych jakiegokolwiek obróbce maszynowej najważniejszym czynnikiem podlegającym kontroli jest stan warstwy wierzchniej (WW) [OCZ2003], której budowę określa struktura geometryczna powierzchni (SGP) [NOW1991]. Charakterystyka warstwy wierzchniej ma istotny wpływ na proces zużycia, a przez to na trwałość i niezawodność wyrobów. Zapewnienie odpowiedniego stanu WW jest, więc kluczowym czynnikiem wpływającym na uzyskanie wysokiej jakości produkowanych wyrobów.

W praktyce często kontrola stanu WW sprowadza się do kontroli parametrów SGP [WIE2003], [PAW2005]. Jednym z najważniejszych i najczęściej ocenianych parametrów jest chropowatość powierzchni. Jak wykazały liczne przykłady, podawane w literaturze [OCZ2003] zwiększenie lub zmniejszenie wartości chropowatości, może wpływać w dużym stopniu na charakterystykę eksploatacyjną wytwarzanych elementów części maszyn i urządzeń. Innymi ocenianymi cechami są również wymiar i kształt. Są one ważne, ze względu na zachowanie przez wyrób wymiarów i kształtów w odpowiedniej tolerancji.

Specyfika pomiarów parametrów SGP w warunkach przemysłowych wymaga rozwiązania dwóch istotnych problemów. Po pierwsze, kontrola musi często odbywać się bez przerywania procesu produkcyjnego, także podczas ruchu badanej powierzchni. Po drugie, ruch badanej powierzchni i prowadzona obróbka powodują szereg zakłóceń w procesie pomiarowym wynikających m.in. z wibracji spowodowanych pracą maszyny, użycia płynów obróbkowych, powstawania produktów obróbki skrawaniem (wióry), gromadzenia się zanieczyszczeń w strefie obróbki (pył). Czynniki te w dużym stopniu ograniczają zakres stosowania klasycznych metod kontroli SGP i wymiaru.

W celu rozwiązania ww. problemów stosuje się tzw. aktywną kontrolę [VAC2005]. Jest to proces polegający na ocenie wybranych parametrów podczas całego procesu wytwarzania elementu, bez przerywania prowadzonej obróbki. Aktywna kontrola pozwala m.in. na zmniejszenie liczby braków i skrócenie czasu wytwarzania pojedynczego elementu. Aktywna kontrola SGP i wymiaru realizowana jest za pomocą skomputeryzowanych systemów kontrolno-pomiarowych o dużej wydajności dokonujących oceny w trybie automatycznym. W systemach tych wykorzystuje się głównie optyczne metody pomiarowe [ŁUK2001] łącząc je często z różnego rodzaju technikami przetwarzania i analizy obrazu [REE2005].

Spośród wielu grup optycznych metod pomiarowych duże nadzieje w aktywnej kontroli SGP i wymiaru wiąże się z metodami triangulacyjnymi [SIH1990] oraz metodami skaterometrycznymi [PAW2005], wykorzystującymi zjawisko rozpraszania światła [ŁUK2001]. Wymienione grupy metod pozwalają na ocenę badanych powierzchni pod względem parametrów SGP i wymiaru, przy czym kontrola taka może odbywać się na powierzchniach wykonanych za pomocą różnych technik obróbkowych (m.in. szlifowania [FUR2003], gładzenia [SAD2009], mikrowygładzania [DAV2002], docierania [CHI2007], polerowania [PES2009]). Wysokości nierówności oceniane tymi metodami wynoszą od kilkudziesięciu mikrometrów do kilku milimetrów (metody triangulacyjne) oraz od setnych części mikrometra do kilku mikrometrów (metody skaterometryczne). We wszystkich z wymienionych metod proces pomiarowy może być realizowany przy wykorzystaniu promieniowania laserowego (z zakresu widzialnego lub podczerwieni).

Opracowano dotychczas wiele systemów i pojedynczych egzemplarzy urządzeń do aktywnej kontroli SGP i wymiaru. Są to systemy i urządzenia w dużej mierze eksperymentalne, w niewielkim tylko stopniu wdrożone do przemysłu. Pewną ich wadą jest to, iż dokonują one osobno pomiaru SGP i wymiaru. Jak dotychczas w literaturze nie opisano urządzenia pozwalającego na jednoczesny pomiar wymienionych wyżej cech przedmiotu obrabianego w czasie rzeczywistym.

Podstawowym celem niniejszej rozprawy doktorskiej jest sprawdzenie, czy możliwe jest połączenie optycznych metod pomiarowych z technikami przetwarzania i analizy obrazu, w celu opracowania zintegrowanej metody optycznej pozwalającej na jednoczesną ocenę struktury geometrycznej powierzchni i wymiaru przedmiotu obrabianego znajdującego się w ruchu.

Rozprawa doktorska podzielona została na 8 rozdziałów. W rozdziale 2 scharakteryzowano w sposób ogólny zagadnienia związane ze strukturą geometryczną powierzchni i metodami jej kontroli. Omówiono podstawowe definicje dotyczące warstwy wierzchniej, powierzchni rzeczywistej oraz elementów SGP. Scharakteryzowano proces kontroli aktywnej oraz przedstawiono różne jego warianty. Dodatkowo przeanalizowano cechy systemów kontrolno-pomiarowych realizujących kontrolę aktywną. Następnie dokonano krótkiego przeglądu wybranych metod pomiaru SGP takich jak: stykowe, elektryczne, pneumatyczne, ultradźwiękowe. W nieco szerszym zakresie przedstawiono metody optyczne, szczególnie te z grupy metod triangulacyjnych (triangulacja laserowa, światło strukturalne) oraz grupy metod skaterometrycznych (skaterometria i reflektometria laserowa). Opiszano także wybrane techniki przetwarzania i analizy obrazu z uwzględnieniem metody śledzenia obiektów oraz metody nakładania obrazów. Analiza przedstawionych zagadnień w ujęciu literaturowym pozwoliła na sprecyzowanie szeregu problemów, dotychczas nierozwiązanych w sposób zadowalający, które są ważne dla rozwoju metod pomiaru SGP i wymiaru, szczególnie podczas ruchu badanej powierzchni. Jednym z takich problemów był problem jednoczesnej aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni i wymiaru przedmiotu w czasie jego ruchu.

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury i zasygnalizowanego problemu, w rozdziale 3 wysunięto hipotezę badawczą oraz określono cele i zakres realizowanej rozprawy doktorskiej.

W rozdziale 4 przedstawiono podstawy teoretyczne pomiarów parametrów SGP i wymiaru podczas ruchu badanej powierzchni. Dokonano szczegółowego opisu teoretycznego metod triangulacyjnych, metod światła strukturalnego oraz metod skaterometrycznych. Opis obejmował m.in. analizę podstawowych właściwości metrologicznych metod triangulacyjnych, analizę czynników powodujących błędy pomiaru, ogólną ideę metod światła strukturalnego, charakterystykę modelu powierzchni zwierciadlanej, kryterium Rayleigha oraz rozkładu światła rozproszonego.

Badania doświadczalne przedstawiono w rozdziale 5. Zostały one podzielone na dwie części obejmujące badania rozpoznawcze i właściwe. Badania rozpoznawcze dotyczyły eksperymentalnej weryfikacji hipotezy badawczej, polegającej na takiej integracji metod optycznych z technikami przetwarzania i analizy obrazu, aby możliwa była jednoczesna aktywna kontrola SGP oraz wymiaru przedmiotu obrabianego. Wiązało się to ze sprawdzeniem możliwości integracji ww. metod i technik. Opiszano pomiary wykonywane za pomocą klasycznych metod optycznych oraz w różnych wariantach stanowiących ich połączenie z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Wnioski z badań rozpoznawczych pozwoliły na opracowanie założeń do dalszej części prowadzonych prac. Badania właściwe obejmowały eksperymentalne zweryfikowanie zaproponowanej zintegrowanej metody optycznej na podstawie pomiarów prowadzonych na skonstruowanym w tym celu stanowisku badawczym. Dużą część rozdziału 5 poświęcono zagadnieniom związanym z konstrukcją stanowiska badawczego i z przygotowaniem odpowiednich próbek do pomiarów. Dokonano w niej m.in. wnikliwej analizy koncepcji układów optycznych do realizacji jednoczesnej oceny SGP i wymiaru, opisu stanowiska badawczego z podziałem na różne jego moduły oraz opisu wykorzystywanych w badaniach próbek. Rozdział 5 został zakończony omówieniem metodyki badań oraz przedstawieniem wybranych wyników badań właściwych wraz z ich analizą.

Podsumowanie przeprowadzonych badań doświadczalnych przedstawiono w rozdziale 6. Sformuowano w nim kilka wniosków o charakterze ogólnym i szczegółowym. Omówiono także kierunki dalszych badań z tego zakresu, przewidzianych do realizacji w przyszłości.

W końcowej części pracy, w rozdziale 7, zawarto bibliografię obejmującą ponad 300 pozycji literaturowych z zakresu tematyki realizowanej rozprawy doktorskiej. Dodatkowo zamieszczono także krótkie streszczenie pracy w języku polski i angielskim oraz notkę biograficzną dotyczącą autora wraz z charakterystyką jego dorobku naukowego.

Pracę zamyka rozdział 8 – załącznik. Stanowi on zbiór dodatkowych materiałów, będących uzupełnieniem prezentowanych wyników badań doświadczalnych.

2  
ANALIZA LITERATURY

---



## 2.1. Struktura geometryczna powierzchni i metody jej kontroli

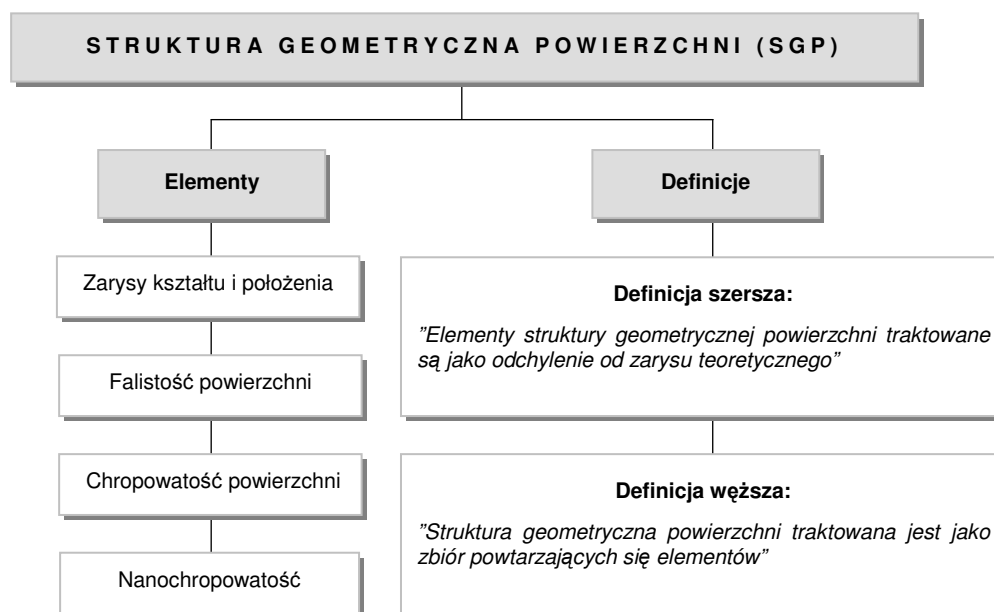
We współczesnym przemyśle maszynowym dąży się do wytwarzania coraz doskonalszych elementów maszyn i urządzeń takich, które zapewniłyby utrzymanie korzystnych parametrów eksploatacyjnych podczas całego procesu ich użytkowania. Jednym z najbardziej istotnych czynników mających wpływ na jakość, trwałość i niezawodność elementów maszyn i urządzeń jest stan warstwy wierzchniej, której budowę określa struktura geometryczna powierzchni [OCZ2003], [ADA2008].

### 2.1.1. Pojęcia podstawowe

Poniżej przedstawiono wybrane pojęcia podstawowe dotyczące zagadnień związanych ze strukturą geometryczną powierzchni oraz jej elementami.

- Warstwa wierzchnia (WW) – to warstwa materiału ograniczona zewnętrzną (rzeczywistą) powierzchnią przedmiotu zawierająca tę powierzchnię oraz część materiału w głąb tej powierzchni [N87/04250].
- Powierzchnia rzeczywista – to granica między ciałem stałym a otaczającym go środowiskiem. Powierzchnia ta charakteryzuje się bardzo złożoną budową – występują w niej nierówności o różnych kształtach, wymiarach i położeniu. Wymiary najmniejszych spośród nich są porównywalne z wymiarami atomów, a największych z wymiarami powierzchni.
- Struktura geometryczna powierzchni (SGP) – to układ elementów geometrycznych powierzchni rzeczywistej. Pojęcie to obejmuje cztery rodzaje nieregularności powierzchni – zarysy kształtu i położenia (nieregularność I klasy), falistość powierzchni (nieregularność II klasy), chropowatość powierzchni (nieregularność III klasy), nanochropowatość (nieregularność IV klasy) oraz wzajemne ich relacje. SGP może być kształtowana wskutek oddziaływań zdeterminowanych, losowych lub obu rodzajów tych oddziaływań jednocześnie [N99/4287].

Na rysunku 1 (□15) przedstawiono podział elementów SGP oraz przytoczono dwie definicje SGP – szerszą, stosowaną w Polsce, opisaną normą [N99/4287] i węższą, stosowaną w krajach anglosaskich, opisaną odpowiednio normami [N85/46/1], [N88/1134/1].



Rys. 1. Podział elementów struktury geometrycznej powierzchni i jej definicje  
Fig. 1. The characteristics of elements of geometrical structure of surface and definitions

Jak już zaznaczono wcześniej SGP obejmuje nieregularności zarysu kształtu i położenia, falistość, chropowatość i nanochropowatość. Nieregularności te są opisane przedstawionymi poniżej definicjami.

- Zarys kształtu – jest to zbiór okresowo powtarzających się nierówności, charakteryzujących się tym, że stosunek średniej szerokości (długości) elementów profilu do średniej wysokości jest równy co najmniej 1000. Powtarzające się nierówności powstają głównie w wyniku bezpośredniego

wpływu układu obrabiarka-uchwyt-narzędzie-przedmiot obrabiany (OUNP), a niekiedy także wpływu drgań (m.in. obrabiarki), których częstotliwość występowania jest najmniejsza.

- Falistość powierzchni – to zbiór okresowo powtarzających się elementów profilu o takim przebiegu, że stosunek szerokości (długości) tych elementów profilu do ich średniej wysokości, ocenianych na całej powierzchni lub jej części, jest równy co najmniej 40 i jest nie większy niż 1000. Te okresowo powtarzające się elementy zarysu (profilu) powstają głównie na skutek oddziaływania drgań układu obrabiarka-narzędzie-przedmiot obrabiany (ONP) o większych częstotliwościach.
- Chropowatość powierzchni – jest to zbiór okresowo lub nieokresowo powtarzających się nierówności charakteryzujących się tym, że stosunek średniej szerokości (długości) elementów do ich średniej wysokości, ocenianych na określonej powierzchni, jest mniejszy od 40. Nierówności te powstają głównie jako wynik oddziaływania parametrów obróbki, kształtu narzędzia obróbkowego i drgań układu ONP o możliwie największych częstotliwościach.

Badaniom SGP poświęcono wiele artykułów, rozpraw naukowych oraz liczne książki. Najbardziej fundamentalnymi opracowaniami w tej dziedzinie są prace D. J. Whitehousea [WHI1994-1] oraz T. R. Thomasa [THO1999]. Z prac wydanych w kraju należy wymienić prace B. Nowickiego [NOW1991], K. E. Oczosia i W. Liubimova [OCZ2003], M. Wieczorowskiego, A. Cellarego, J. Chajdy [WIE2003], P. Pawlusa [PAW2005-1] oraz S. Adamczaka [ADA2008].

### 2.1.2. Aktywna kontrola struktury geometrycznej powierzchni

Aktywna kontrola wymiarów, nazywana także kontrolą czynną [KON1955], od wielu lat stosowana jest w operacjach obróbki części maszyn [WER1978]. Najczęściej jest ona realizowana za pomocą czujników mechanicznych, pneumatycznych i elektrycznych [JAK2004]. Natomiast aktywna kontrola SGP jest stosowana znacznie rzadziej. Niezwykle rzadko spotykane są także układy do jednoczesnej aktywnej kontroli SGP i wymiaru.

We współczesnym przemyśle stosuje się trzy zasadnicze typy aktywnej kontroli procesu wytwarzania [VAC2005]:

- kontrolę operacyjną (*ang. In-Process Control*) – realizowaną podczas trwania procesu obróbkowego bez jego przerywania,
- kontrolę międzyoperacyjną (*ang. In-Situ Control*) – realizowaną np. po zakończeniu kolejnej operacji, w chwili, gdy proces obróbki jest wstrzymany i będzie kontynuowany dalej po dokonaniu pomiaru,
- kontrolę pooperacyjną (*ang. Post-Process Control*) – realizowaną po zakończeniu procesu obróbkowego.

Aktywna kontrola SGP stosowana jest głównie w przemyśle wytwarzającym precyzyjne elementy maszyn, urządzeń, elementy optyczne i elektroniczne. Celem jej stosowania jest porównanie stanu powierzchni badanego elementu w kolejnych fazach procesu wytwarzania bez potrzeby jego przerywania. Stosowanie aktywnej kontroli pozwala na:

- uzyskanie wysokiej jakości i powtarzalności wytwarzanych elementów,
- zmniejszenie liczby braków,
- skrócenie czasu potrzebnego na wytwarzanie elementu,
- optymalizację czasu pracy narzędzi obróbkowych.

Aktywna kontrola prowadzona jest często podczas ruchu badanej powierzchni [WAN1998], [WON1999]. Ruch powierzchni zwłaszcza podczas obróbki może być przyczyną powstawania szeregu zakłóceń w procesie pomiarowym wynikających m.in. z wibracji spowodowanych pracą maszyny, użycia płynów obróbkowych, powstawania produktów obróbki skrawaniem (wióry), gromadzenia się zanieczyszczeń w strefie obróbki (pył). W niektórych przypadkach można odpowiednio zabezpieczyć system pomiarowy przed zakłóceniami i zminimalizować w ten sposób ich wpływ na otrzymane wyniki.

Na ogół proces aktywnej kontroli realizowany jest za pomocą zautomatyzowanych systemów kontrolno-pomiarowych sterowanych komputerowo. Pozwalają one na dokonywanie pomiarów powierzchni elementów o określonych wymiarach i kształcie, wykonanych z konkretnego materiału, obrabianych tymi samymi narzędziami na tych samych maszynach i z tymi samymi parametrami obróbki. Kontrola najczęściej przeprowadzana jest we wszelkich operacjach obróbki wykańczającej, tam gdzie



wymagane jest uzyskanie wysokiej jakości powierzchni. Takimi operacjami są m.in.: szlifowanie [WON1999], polerowanie [SAT2009], docieranie [CHI2007], gładzenie [SAD2009], mikrowygładzanie [DAV2002]. Podstawowymi cechami, które decydują o efektywności danego systemu pomiarowego realizującego kontrolę aktywną są:

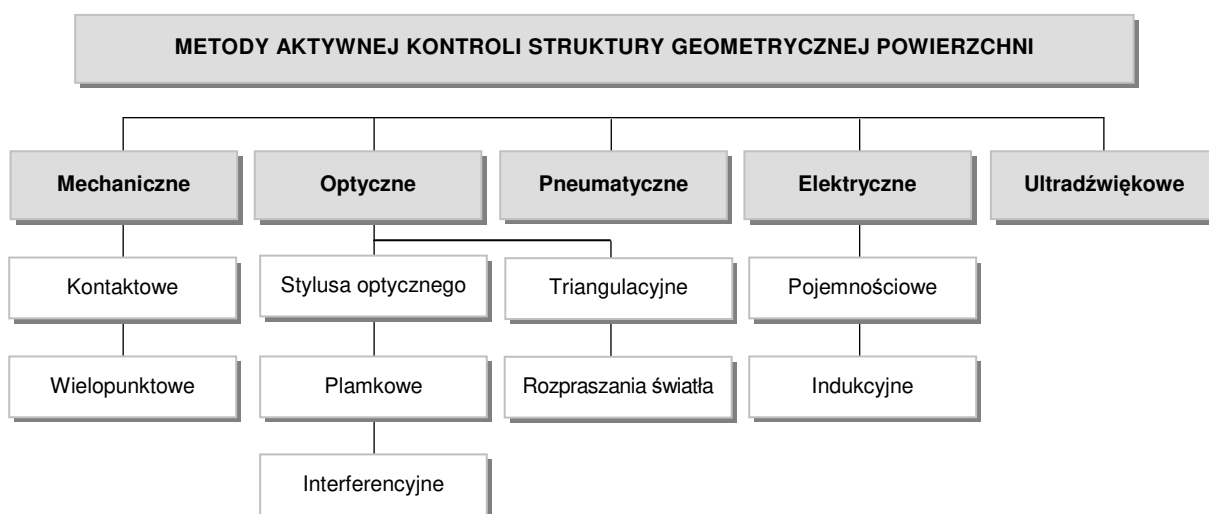
- zakres pomiarowy – przeważnie nieduży, obejmujący przedział parametrów SGP, który może być uzyskany podczas obróbki przedmiotu na danej obrabiarce – w przypadku obróbki wykańczającej wynosi on na ogół od kilku setnych części mikrometra do kilku mikrometrów,
- czułość systemu – powinna być wysoka i dostosowana do rodzaju obróbki tak, aby wszelkie istotne zmiany mikrogeometrii obrabianej powierzchni mogły być ocenione za pomocą tego systemu,
- niepewność pomiarów – powinna być jak najmniejsza – w rzeczywistości waha się w granicach od 10 do 20% wartości wielkości mierzonej,
- czas pomiaru – podobnie jak niepewność pomiarów powinien być jak najmniejszy - umożliwiając tym samym dokonanie większej liczby pomiarów w zadanym czasie.

Zależnie od budowy systemu i jego przeznaczenia czasy pomiarów potrafią wahać się od setnych części sekundy do kilkunastu sekund. Jednakże w przypadku niektórych metod nadmierne skrócenie czasów pomiarów może zwiększyć ich niedokładność.

Większa część z pośród istniejących systemów przeznaczonych do aktywnej kontroli SGP ma charakter eksperymentalny. Tylko nieliczne z nich produkowane są seryjnie. Zazwyczaj pozwalają one na pomiar jednej wielkości. Nie ma jak na razie uniwersalnego systemu pomiarowego łączącego w sobie możliwość jednoczesnego pomiaru kilku wielkości w sposób aktywny. Niezbyt szerokie zastosowanie systemów aktywnej kontroli SGP wynika z faktu braku odpowiednich metod pomiaru spełniających wszystkie wymagania stawiane tego typu pomiarom oraz ujednoliconych norm określających kryteria wykonywania pomiarów za pomocą takich systemów.

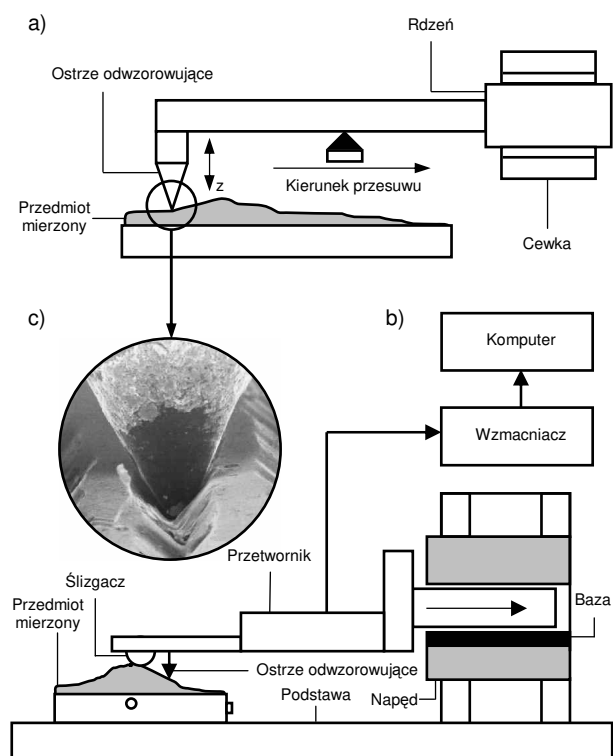
### 2.1.3. Metody aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni

W aktywnej kontroli SGP stosowanych jest wiele metod, które można podzielić na 5 grup [VAC2005]. Na rysunku 2 (□17) przedstawiono podział metod przeznaczonych do aktywnej kontroli SGP. Są to metody mechaniczne, optyczne, elektryczne, pneumatyczne i ultradźwiękowe. Największe nadzieje na praktyczne rozwiązanie problemu aktywnej kontroli wiąże się z dwiema pierwszymi grupami metod, przy czym większość zastosowań dotyczy metod optycznych. W pracy [THO1997] przedstawiono metody, które można zastosować w aktywnej kontroli SGP. Głównym kryterium wyboru metody była prędkość liniowa, z jaką przemieszczała się mierzona powierzchnia. Wybrane grupy metod możliwe do zastosowania (wraz ze wzrostem prędkości) to: pojemnościowe, kontaktowe, optyczne, ultradźwiękowe i pneumatyczne. Z kolei w pracy [NOW1990] przedstawiono pomiary SGP wykonywane w czasie prowadzenia obróbki wykańczającej (szlifowanie, gładzenie). Stwierdzono, że metody mechaniczne i optyczne mogą być stosowane w aktywnej kontroli, pod warunkiem niewielkiej prędkości powierzchni.

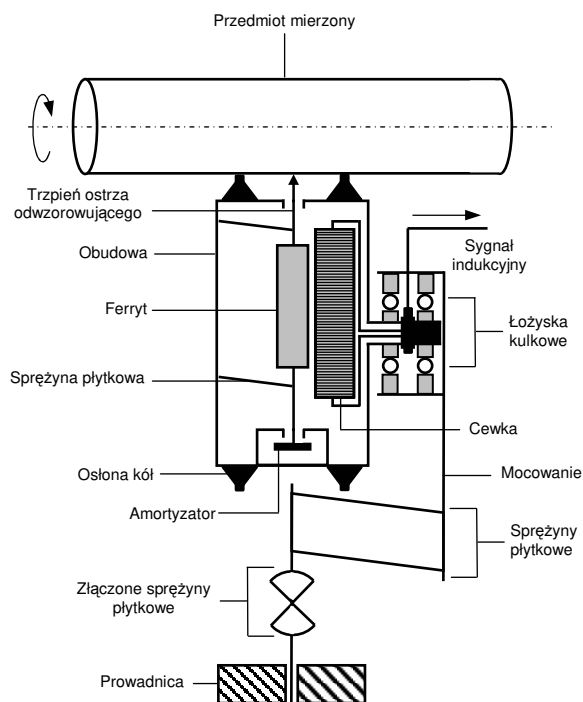


Rys. 2. Podział metod przeznaczonych do aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni  
Fig. 2. The review of in-process methods for assessment of geometrical structure of surface

## 2.1.3.1. Metody mechaniczne



Rys. 3. Stykowa metoda pomiaru nierówności powierzchni: a) zasada pomiaru, b) schemat profilometru stykowego, c) styk ostrza odwzorowującego z powierzchnią  
Fig. 3. Contact method of measuring of surface roughness: a) principle of the contact method, b) configuration of the contact stylus instrument, c) contact of the stylus with surface



Rys. 4. Schemat urządzenia stykowego do aktywnych pomiarów rzędności chropowatości powierzchni metodą kontaktową [DEU1978]  
Fig. 4. Sectional schematic of rotating stylus device for in-process roughness measurement [DEU1978]

Najważniejszymi metodami mechanicznymi odgrywającymi od wielu lat dominującą rolę w kontroli struktury geometrycznej powierzchni są stykowe metody profilometryczne [WIE2003], [PAW2006]. Zasada pomiaru tymi metodami, pokazana na rysunku 3 (□18) polega na odwzorowaniu profilu badanej powierzchni za pomocą ostrza odwzorowującego przesuwającego się wzdłuż powierzchni. Zmiany jego położenia, w kierunku prostopadłym do kierunku przesuwu zależą od kształtu i wymiarów nierówności powierzchni. Sygnał pomiarowy po odpowiednim wzmacnieniu może być przetworzony na sygnał elektryczny analogowy lub cyfrowy.

Współcześnie stosowane stykowe metody pomiarowe charakteryzują się dużą dokładnością, znacznym zakresem pomiarowym i wysoką rozdzielczością. Są jak na razie najbardziej precyzyjnym narzędziem odwzorowującym badaną powierzchnię. Szczegółowy opis tych metod można znaleźć m.in. w pracach [THO1999], [WIE2003], [WHI2004], [PAW2005-1].

Innymi metodami mechanicznymi są: metoda kontaktowa [WHI1994-1], metoda wielopunktowa [NOW1993], metoda przenikania warstw chropowatości [NOW1991] oraz różne odmiany metody tarcowej [NOW1986], [THO1999]. Są to głównie metody eksperymentalne lub metody o niewielkim zakresie zastosowań, przy czym dwie pierwsze mogły być wykorzystane w aktywnej kontroli.

Metoda kontaktowa została opracowana w latach 70-tych XX wieku przez W. Deutschego [DEU1973], [DEU1978]. Schemat urządzenia do aktywnych pomiarów chropowatości powierzchni pokazano na rysunku 4 (□18). Rozwinięcie tej metody zaproponował zespół H. Kaliszera z University of Birmingham [KAL1985]. Pomiarom podlegały rzędne profilu mierzone za pomocą ostrza diamentowego umieszczonego w bębnie toczącym się po badanej powierzchni. Indukcyjny czujnik przemieszczeń, obracający się wraz z głowicą, dokonywał pomiaru położenia ostrza w momencie jej kontaktu z powierzchnią, a system komputerowy połączony z czujnikiem wyznaczał wartości maksymalne sygnału pomiarowego. Układ taki pozwalał na wyznaczenie parametrów nierówności powierzchni  $R_p$  lub  $R_a$  na podstawie od 30 do 60 rzędnych profilu przy czasie pomiarowym wynoszącym od 12 do 15 s, przy rozdzielczości pionowej wynoszącej  $0,1 \mu\text{m}$ . Inne rozwiązanie zaproponowane przez Y. W. Zhao i J. Webstera w pracy [ZHO1989] umożliwiło pomiar nierówności powierzchni przy prędkościach do  $1,1 \text{ m/s}$ . Modyfikacją opisaną metody punktowej była opracowana przez zespół B. Nowickiego z Instytutu Technologii

Mechanicznej Politechniki Warszawskiej, metoda wielopunktowa [NOW1991], [NOW1993]. System pomiarowy składał się z kilku (najczęściej czterech) ostrzy odwzorowujących rozmieszczone na obwodzie tarczy oraz nieruchomego czujnika indukcyjnego. Sygnał z czujnika przetwarzany był w systemie zawierającym przetwornik analogowo-cyfrowy, bufor danych, generator podstawy czasu, inicjatory drogowe, zespół interfejsów, magistralę IEC-625 oraz komputer. Parametr  $R_p$  wyznaczany był jako wartość średnia z 16 lub 32 wartości maksymalnych sygnału. Mógł być on skorelowany z innymi parametrami chropowatości powierzchni. Zastosowanie takiego rozwiązania spowodowało zmniejszenie czasu pomiaru do 2 s, a zakres pomiarowy wzrósł do  $0,5 \mu\text{m}$ .

### 2.1.3.2. Metody elektryczne

Metody elektryczne to bezstykowe techniki pomiarowe, w których wykorzystuje się właściwości pola elektrycznego do oceny parametrów struktury geometrycznej powierzchni. Pomiaru opierają się najczęściej na wykorzystaniu: zmian reluktancji (oporu magnetycznego), pojemności lub prądów wirowych. Ocena SGP metodami elektrycznymi dokonywana jest przy założeniu, iż tworzony jest obwód elektryczny, którego jednym z elementów jest badana powierzchnia. Do grupy metod elektrycznych możemy zaliczyć m.in. metody: pojemnościową, indukcyjną i konduktometryczną. Metody te są stosowane sporadycznie w kontroli powierzchni elementów wykonanych z materiałów przewodzących [SHE1988].

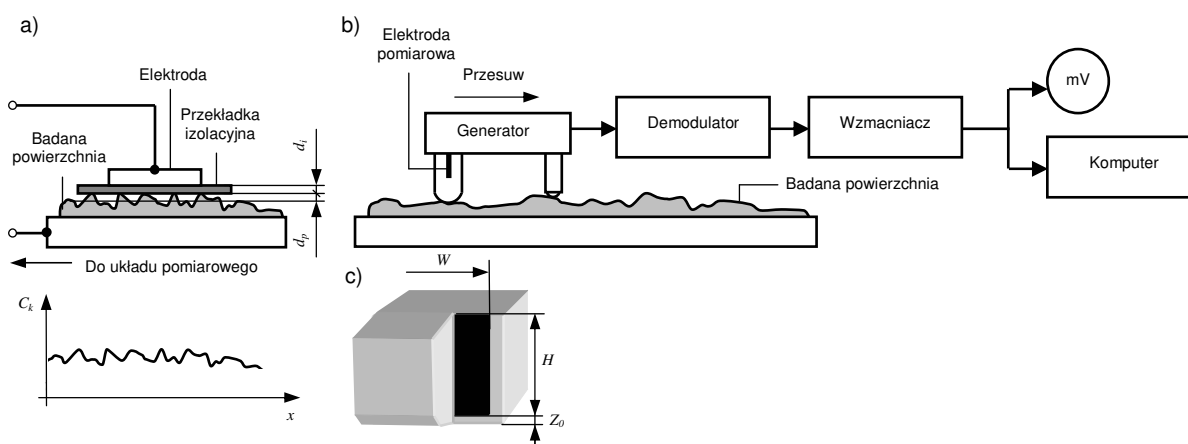
Najważniejszą z tych metod jest metoda pojemnościowa [RIS1981]. Klasyczna zasada pomiaru tą metodą polega na utworzeniu kondensatora, którego jedną elektrodą jest badana powierzchnia, a druga umieszczona jest w niewielkiej odległości od pierwszej, co pokazano na rysunku 5a (□19). Odległość elektrod zależy od wysokości nierówności powierzchni. Pojemność kondensatora określa równanie (1):

$$C_k = \frac{A_k}{\frac{d_i}{\varepsilon_i} + \frac{d_p}{\varepsilon_p}}, \quad (1)$$

gdzie:  $C_k$  – pojemność kondensatora,  $A_k$  – pole powierzchni czynnej elektrody,  $d_i$  – grubość warstwy izolatora,  $d_p$  – równoważna grubość warstwy powietrza,  $\varepsilon_i$  – przenikalność elektryczna izolatora,  $\varepsilon_p$  – przenikalność elektryczna powietrza.

Na podstawie pomiaru pojemności kondensatora  $C_k$  oceniana jest równoważna grubość warstwy powietrza  $d_p$  zależna od chropowatości powierzchni próbki.

Inną z metod pojemnościowych zaproponowali J. L. Gabrini i J. Albrecht w pracy [GAB1988-1]. Stosuje się w niej ciekłą, płaską elektrodę ustawioną prostopadle do powierzchni mierzonej i równoległą do śladów obróbki. Metoda ta znana jest jako FFC (*ang. Fringe Field Capacitive Method*) – jest to metoda profilometryczna [GAB1988-2]. Na rysunku 5b-5c (□19) pokazano schemat układu pomiarowego oraz konstrukcję elektrody pomiarowej stosowanej w metodzie FFC.



Rys. 5. Metoda pojemnościowa: a) klasyczna zasada pomiaru chropowatości powierzchni, b) schemat układu pomiarowego stosowany w metodzie FFC, c) konstrukcja elektrody pomiarowej w metodzie FFC [PAW2005-1]

Fig. 5. Capacitive method: a) classic principle of measuring of surface roughness, b) schematic diagram of the measuring setup used in FFC method, c) construction of the measuring electrode used in FFC method [PAW2005-1]

Utworzony przez elektrodę i powierzchnię mierzoną kondensator ma bardzo niewielką powierzchnię czynną, co skutkuje niewielką pojemnością (około 1 pF). Podczas pomiaru elektroda przesuwa się wzdłuż powierzchni, a zmiany pojemności przetwarzane są w generatorze wysokiej częstotliwości, na zmiany napięcia zależne od wysokości nierówności. Wyniki badań z wykorzystaniem tej metody podczas procesu toczenia z prędkościami liniowymi do 0,025 m/s omówiono w [GAB1992].

Zmodyfikowany wariant tej metody przedstawili B. Nowicki i A. Jarkiewicz z Instytutu Technologii Mechanicznej Politechniki Warszawskiej w pracach [NOW1988], [NOW1994], [JAR1997], [JAR2000]. Modyfikacja polegała na ustawieniu płaskiej elektrody (o grubości mniejszej niż 1  $\mu\text{m}$  wykonanej ze złota) prostopadle do śladów obróbki. Takie ustawienie pozwalało na uśrednienie sygnału pomiarowego będącego funkcją wysokości nierówności oraz udziału nośnego powierzchni. W wyniku prowadzonych badań stwierdzono, iż zmodyfikowana metoda charakteryzuje się niewielką podatnością na zakłócenia i może być zastosowana do aktywnej kontroli powierzchni, o chropowatości  $Ra$  większej niż 0,2  $\mu\text{m}$ .

Inną odmianę metody pojemnościowej o nazwie PJC (ang. *Pulse-Jet Capacitance Method*) opisano w pracy [RAD1995]. Znalazła ona zastosowanie w systemie pomiarowym służącym do aktywnej kontroli nierówności powierzchni. Prototyp tego systemu z powodzeniem testowano zarówno w warunkach produkcyjnych jak i laboratoryjnych.

Przedstawione powyżej prace dotyczyły głównie pomiaru parametrów nierówności powierzchni, natomiast K. C. Fan i Y. H. Chao, zaproponowali w pracy [FAN1991] wykorzystanie jednej z metod elektrycznych tzw. MTPT (ang. *Moving Three Probe Technique*) do oceny wymiaru podczas toczenia. Niepewność pomiarów wynosiła  $\pm 15 \mu\text{m}$  w zakresie pomiarowym od 32 do 54 mm. Metoda wykorzystywana była jedynie w procesie obróbki wykańczającej. Niestety jej zastosowanie w warunkach produkcyjnych, tak jak i innych metod elektrycznych było mocno ograniczone. W tym przypadku ograniczenie dotyczyło głównie ilości miejsca wokół obrabiarki (system pomiarowy posiadał duże gabaryty) i odpowiedniej, precyzyjnej kalibracji 3 ruchomych czujników pomiarowych.

### 2.1.3.3. Metody pneumatyczne

Pierwsze próby wykorzystania metod pneumatycznych do pomiarów nierówności powierzchni przeprowadzono w latach 50-tych i 60-tych XX wieku [GRA1952], [WAG1967]. W metodach tych wykorzystuje się efekt spadku ciśnienia powietrza pomiędzy dyszą pomiarową, a badaną powierzchnią. Powstająca w ten sposób szczelina powietrzna tworzona jest przez powierzchnię czołową dyszy pomiarowej oraz powierzchnię mierzoną. Pole powierzchni szczeliny związane z najwyższym wierzchołkiem profilu chropowatości powierzchni opisuje zależność (2) [NOW1991]:

$$F = \int_0^L z(x) dx \quad (2)$$

gdzie:  $F$  – pole powierzchni szczeliny powietrznej,  $L$  – odcinek pomiarowy profilu chropowatości powierzchni,  $z$  – rzędna chropowatości powierzchni.

Przyrządy pozwalają mierzyć wybrane parametry nierówności powierzchni przy założeniu, iż wypływ powietrza ze szczeliny prostokątnej jest równy wypływowi ze szczeliny pomiędzy powierzchnią płaską i chropowatą o tym samym przekroju. Niestety, obarcza to wynik pomiarów dużym błędem. Do innych wad tej metody można zaliczyć trudności w pomiarze powierzchni o dużej gładkości [THO1999]. Obecnie daleko posunięta modyfikacja urządzeń pomiarowych polegająca na miniaturyzacji rozmiarów dyszy i przetworników ciśnienia umożliwiła badanie również takich powierzchni (także przy dużych prędkościach liniowych) [WOO1991]. Do zalet tych metod można natomiast zaliczyć niską wrażliwość na zakłócenia, drgania i zanieczyszczenia powierzchni, co umożliwia zastosowanie ich w aktywnej kontroli SPG. Czas pomiaru metodami pneumatycznymi wynosi około 3 s dla parametru  $Rz$  w zakresie od 20 do 80  $\mu\text{m}$  i 180 s dla parametru  $Rz$  w zakresie od 1,6 do 10  $\mu\text{m}$ .

W pracy [GRA2009] przedstawiono czujnik pneumatyczny przeznaczony do oceny nierówności powierzchni w czasie ruchu przedmiotu mierzonego. Urządzenie, którego schemat przedstawiono na rysunku 6 (□21) działało na podobnej zasadzie jak opisane powyżej przyrządy. Badania prowadzone były na dwóch typach powierzchni wykonanych z niklu i stali dla prędkości liniowych powyżej 200 m/min. Rezultaty badań potwierdziły możliwość zastosowania tego typu urządzenia w szybkich, bezstykowych pomiarach powierzchni obrobionych w zakresie parametru  $Ra$  od 0,8 do 12,5  $\mu\text{m}$ .

Ten sam czujnik został później wykorzystany do pomiarów porowatości powierzchni elementów odlewanych i został opisany w pracy [MEN2009]. Stosowano prędkości z zakresu od 50 do 200 m/min, dla porowatości od 0,6 do 1,6 mm. Odległość dyszy czujnika od badanej powierzchni była regulowana w zakresie od 50 do 150  $\mu\text{m}$ .

Pomiarów chropowatości powierzchni metodami pneumatycznymi dotyczą także prace [HAM1979], [WAN1987].

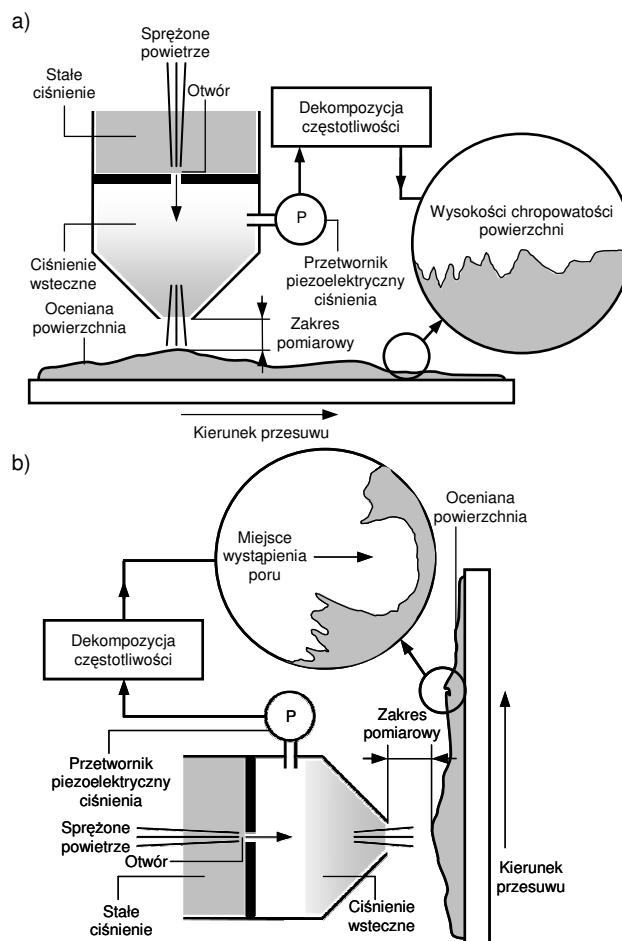
Metody pneumatyczne wykorzystywane są również do kontroli wymiarów podczas prowadzenia procesu obróbkowego [SHI2002]. M. Shiraishi i A. Yasui zaproponowali w pracy [SHI1998] wykorzystanie zbliżeniowego czujnika pneumatycznego zbudowanego z trzech dysz do oceny wymiaru. Wielkość błędu obrabianej powierzchni była oceniana na podstawie zmiany odległości pomiędzy powierzchnią obrabianą, a czujnikiem. Otrzymany wynik pomiaru będący sumą ciśnienia wstecznego z trzech dysz był proporcjonalny do odległości między powierzchnią obrabianą a czujnikiem w zakresie 0,25 do 0,38 mm. Niepewność pomiaru czujnika pneumatycznego wynosiła 5  $\mu\text{m}$  w zakresie pomiarowym od 30 do 100  $\mu\text{m}$ . Niestety wadą zaprezentowanego rozwiązania okazała się duża wrażliwość na temperaturę, która miała wpływ na wynik pomiaru.

#### 2.1.3.4. Metody ultradźwiękowe

W aktywnej kontroli SGP mogą być stosowane również metody ultradźwiękowe. Polegają one najczęściej na analizie fali odbitej od badanej powierzchni. Szeroki ich opis zawarto m.in. w pracach [BLE1988], [SCO1994], [COK1996], [MIT1997], [DJO1997], [BRA2000]. W pracy S. A. Cokera i Y. C. Shina [COK1995] przedstawiono system pomiarowy zamontowany na centrum obróbkowym CNC przeznaczony do aktywnej kontroli nierówności powierzchni podczas procesu obróbkowego. Zasada działania tego systemu polegała na pomiarze natężenia fali dźwiękowej odbitej od badanej powierzchni. Prowadzone badania wykazały, iż system może być wykorzystany również do monitorowania procesu zużycia narzędzia, przy czym najlepsze rezultaty uzyskano dla zużycia powyżej 0,3 mm.

Oryginalną klasyfikację chropowatości powierzchni wykorzystującą inną metodę ultradźwiękową – CTFM (ang. *Continuous Transmission Frequency Modulated*) przedstawili autorzy pracy [MCK2006]. Opracowali oni model matematyczny określany jako SAFM (ang. *Spatial-Angle-Filter Model*) opisujący zjawisko rozchodzenia się fali dźwiękowej odbitej od analizowanej powierzchni. Na podstawie założeń tego modelu zbudowano urządzenie pomiarowe służące do pomiarów nierówności powierzchni. Czujnik testowano na 12 różnych powierzchniach uzyskując pozytywne wyniki.

Autorzy pracy [SUK2006] zaproponowali wykorzystanie do oceny chropowatości powierzchni tych komponentów fali dźwiękowej, które zostają rozproszone przez badaną powierzchnię. Pomiar ultradźwiękowy prowadzono z wykorzystaniem szerokopasmowego przetwornika o częstotliwości 0,5 MHz. Badano powierzchnie o różnych wartościach parametru  $Rq$  i o różnej długości korelacji powierzchni  $\lambda_0$  odpowiednio od 0,04 do 244,1  $\mu\text{m}$  oraz od 29 do 445  $\mu\text{m}$ . Rozproszone na nierównościach powierzchni fale dźwiękowe mierzono dla różnych kątów rozproszenia.



Rys. 6. Bezstykowy czujnik pneumatyczny przeznaczony do pomiarów SGP przedmiotów znajdujących się w ruchu: a) pomiar chropowatości powierzchni [GRA2009], b) wykrywanie wad powierzchni w postaci porów [MEN2009]  
 Fig. 6. Non-contact pneumatic sensor for measurements of GSS objects being in movement: a) measurement of surface roughness [GRA2009], b) detection of surface porosity [MEN2009]

## 2.2. Optyczne metody aktywnej kontroli wymiaru i struktury geometrycznej powierzchni

Opisane wcześniej metody mechaniczne, pomimo pozytywnych prób wykorzystania ich w aktywnej kontroli SGP, nigdy nie wyszły poza fazę badań laboratoryjnych. Specyficzne warunki przemysłowe ograniczają zakres stosowania tych metod ze względu m.in. na:

- styk ostrza odwzorowującego z badaną powierzchnią, co może doprowadzić do jej zarysowania lub uszkodzenia,
- możliwość uszkodzenia ostrza odwzorowującego (w przypadku ruchu przedmiotu mierzonego),
- dużą wrażliwość ostrza odwzorowującego na drgania i inne czynniki zakłócające (pył, kurz, płyny obróbkowe),
- zużywanie się ostrza odwzorowującego oraz układów napędu przesuwu głowicy pomiarowej,
- stosunkowo długi czas pomiaru.

Takich ograniczeń nie posiadają optyczne metody pomiarowe, dlatego reprezentują one najliczniejszą grupę metod stosowanych w aktywnej kontroli SGP prowadzonej w warunkach przemysłowych i laboratoryjnych. Do zalet tych metod należą:

- krótki czas i wysoka dokładność pomiaru,
- bezstykowy (bezinwazyjny) sposób pomiaru, pozwalający na badania powierzchni gładkich i supergładkich (elementy optyczne, krzemowe podłoża układów elektronicznych) oraz mało odpornych na zanieczyszczenia, podatnych na odkształcenia i wrażliwych na oddziaływania o charakterze fizycznym lub chemicznym,
- możliwość oceny powierzchni przedmiotu znajdującego się w ruchu,
- niewielkie gabaryty urządzeń pomiarowych i stosunkowo niewielki ich koszt.

Pomimo wielu zalet metody te posiadają także pewne wady i ograniczenia, takie jak:

- bardzo skomplikowane modele matematyczne opisujące zjawisko rozpraszania światła,
- trudności w zaadaptowaniu powyższych modeli do zastosowań praktycznych (duże uproszczenia),
- ograniczona liczba mierzonych parametrów,
- niewielki zakres pomiarowy,
- wrażliwość urządzeń na przesłonięcie wiązki laserowej,
- brak ujednoczonych norm określających kryteria wykonywania pomiarów tymi metodami.

Wśród optycznych metod pomiarowych są grupy metod, z którymi wiąże się największe nadzieje na zastosowanie ich do jednoczesnej aktywnej kontroli SGO i wymiaru, podczas prowadzenia procesu obróbkowego. Są to metody triangulacyjne i metody rozpraszania światła. Charakterystykę wybranych metod przedstawiono w tabeli 1 (□22).

Tab. 1. Charakterystyka wybranych metod optycznych służących do oceny SGP i wymiaru  
Tab. 1. The characteristics of selected optical methods for assessment of GSS and dimension

Grupa metod optycznych	Nazwa metody	Oceniane parametry	Zakres pomiarowy [μm]	Zastosowanie
Metody triangulacyjne	Triangulacja laserowa	$l, h$	10–10000	Kontrola wymiarów, odległości, przemieszczeń
	Projekcja wzorów optycznych	$l, h, z^*$	1–10000**	Ocena wymiaru, a także kształtu powierzchni w skali mikro i makro
Metody rozpraszania światła	Metoda reflektometryczna	$\sigma, Rq$	0,005–0,035**** 0,01–0,3*****	Kontrola jakości powierzchni zwierciadlanych (elementy optyczne)
	Metoda różniczkowa (goniofotometryczna)	$\sigma, Rq, Ra$	0,01–1	Kontrola jakości, ocena bardzo małych nierówności powierzchni (elementy optyczne, krzemowe podłoża układów elektronicznych)

*l* – długość lub odległość,  
*h* – wysokość,  
*z* – wysokość w układzie 3-wymiarowym  
 $\sigma$  – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności,  
*Ra* – średnia arytmetyczna rzędnych profilu,  
*Rq* – średnia kwadratowa rzędnych profilu.

\* Parametry w układzie 2 i 3-wymiarowym w zależności od zastosowanej metody.  
\*\* W zależności od rozdzielczości układu optycznego.  
\*\*\* Zakres pomiaru parametru  $\sigma$  dla promieniowania o długości fali  $\lambda = 0,632 \mu\text{m}$ .  
\*\*\*\* Zakres pomiaru parametru  $\sigma$  dla promieniowania podczerwonego o długości fali  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ .

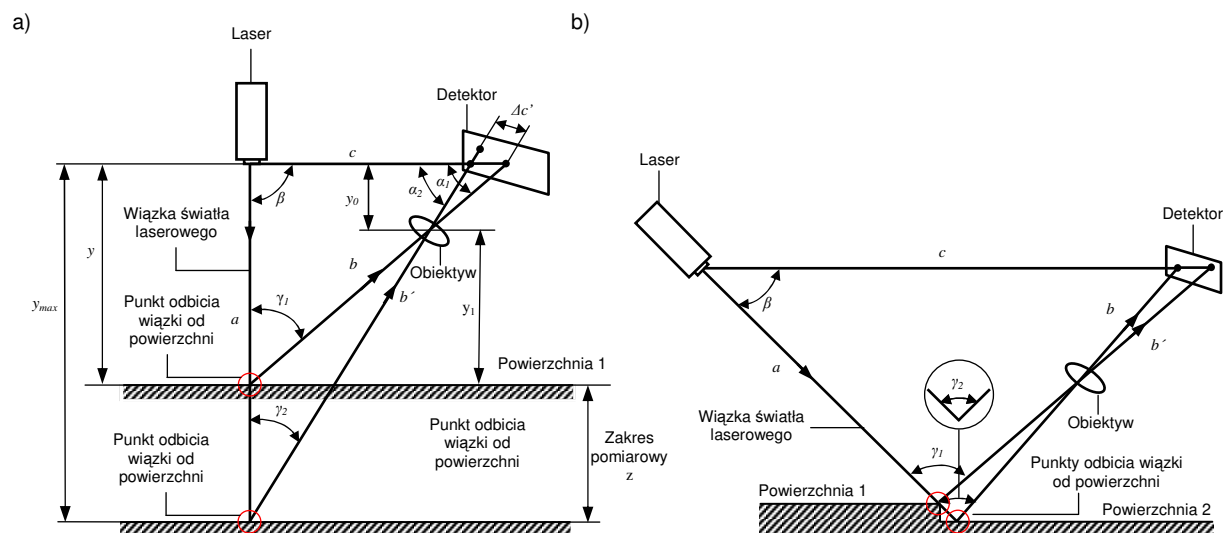
## 2.2.1. Optyczne metody aktywnej kontroli wymiaru

Optyczne metody pomiaru SGP stanowią obszerny zbiór metod. Można go podzielić na dwie podstawowe grupy: metody profilometryczne [ŁUK2001] i metody analizy powierzchniowej [RAT1983]. Obie z wymienionych grup zawierają metody optyczne, które mogą mieć zastosowanie w aktywnej kontroli SGP i wymiaru. Często metody te noszą nazwę metod światła strukturalnego (*ang. Structured Light Techniques*) [CLO1999]. Ich zasada działania wykorzystuje rzutowanie na powierzchnię struktur optycznych oraz analizę triangulacyjną. W tej grupie możemy wyróżnić metody służące do kontroli nierówności powierzchni – metody przekroju świetlnego (*ang. Light Sectioning Method*) [UCH1979], metody mory (*ang. Moiré Techniques*) [WHI1996] oraz metody służące do analizy wymiaru i kształtu powierzchni – metody triangulacji laserowej [SIH1990], metody wykorzystujące projekcję wzorów optycznych [PAW2005-1]. Obecnie największe zastosowanie mają ostatnie z wymienionych metod. Występują one w wielu różnych wariantach w zależności od specyfiki wykonywanych pomiarów. Ich wspólną cechą jest to, że ocenę wymiaru i kształtu można dokonać na podstawie przemieszczenia plamki światła laserowego lub analizy zniekształcenia rzutowanego wzoru optycznego.

### 2.2.1.1. Metody triangulacji laserowej

Klasyycznym podejściem do kontroli odległości i wymiaru jest wykorzystanie metod triangulacyjnych [HOL1981], [JAB1983]. Metody te realizowane początkowo w radiolokacji i radionawigacji znalazły z czasem zastosowanie także w innych dziedzinach takich, jak geodezja, kartografia, budownictwo lądowe i wodne, elektronika, motoryzacja, komunikacja, górnictwo, astronomia, astronautyka. Także w badaniach SGP metody te są z powodzeniem wykorzystywane w różnych wariantach i odmianach [KUL2004] zależnych od specyfiki prowadzonych pomiarów. Ocena wymiarów (a także odległości) metodami triangulacyjnymi opierają się na właściwości prostoliniowego rozchodzenia się fal elektromagnetycznych ze stałą prędkością. Często w tym celu wykorzystywane są fale optyczne z zakresu promieniowania widzialnego i bliskiej podczerwieni. Generatorem takich fal jest laser [KUJ1999], [ZIE2008].

Metody triangulacyjne, w których wykorzystuje się promieniowanie laserowe nazywane są metodami triangulacji laserowej (*ang. Laser Triangulation*) [SIH1990]. Pozwalają one na pozyskanie informacji o zewnętrznych wymiarach przedmiotów, a także kontrolę odległości pomiędzy głowicą optyczną, a badaną powierzchnią. Zasada pomiaru tymi metodami, pokazana na rysunku 7 (□23), polega na oświetleniu badanej powierzchni wiązką światła laserowego wraz z jej detekcją pod pewnym kątem.



Rys. 7. Zasada pomiaru odległości i wymiaru metodą triangulacji laserowej za pomocą: a) zmiennej wartości kąta  $\gamma$ , b) zmiennej wartości długości ramienia  $b$

Fig. 7. Principle of laser triangulation when used: a) variable value of  $\gamma$  angle, b) variable value of  $b$  arm length

Dzięki temu pomiędzy źródłem światła, mierzoną powierzchnią i elementem detekcyjnym tworzony jest trójkąt, którego geometryczna analiza jest podstawą triangulacyjnych metod pomiarowych. Do obliczania poszczególnych wartości kątów lub boków trójkąta służą tu zależności trygonometryczne m.in. twierdzenie sinusów oraz twierdzenie Pitagorasa. Pomiar triangulacyjny mogą być wykonywane

w różnej konfiguracji, tzn. na podstawie zmian wartości kąta  $\gamma$  (triangulacja) lub na podstawie zmian długości ramienia  $b$  (trilateracja), co pokazano na rysunku 7 (□23).

W pierwszym przypadku boki trójkąta, stanowią długości  $a$  i  $b$ , przebyte przez wiązkę lasera, natomiast podstawę trójkąta  $c$  – odległość między źródłem światła a elementem detekcyjnym. Wierzchołek trójkąta jest jednocześnie punktem odbicia światła od badanej powierzchni, co wiąże jego pozycję z położeniem powierzchni lub wymiarem przedmiotu. Przy założeniu, że długość podstawy trójkąta  $c$  oraz wartość kąta padania  $\alpha$  wiązki laserowej będą stałe, wówczas na podstawie zmiany kąta  $\gamma$ , możliwe jest dokonanie oceny zmiany położenia powierzchni odbijającej. Taka analiza opiera się na stałej wartości kąta padania światła na powierzchnię.

W drugi przypadku przy niezmienniej wartości kąta  $\beta$  zachodzi zmiana położenia wierzchołka trójkąta położonego na powierzchni odbijającej, w wyniku zmiany długości ramienia  $b$  trójkąta. Gdy wiązka pada pod kątem innym niż  $\pi/2$  rad, zmiana wymiaru elementu mierzzonego, powoduje przesunięcie miejsca odbicia. Przesunięcie to stanowić może pewną wadę utrudniając pomiar powierzchni o małych wymiarach.

Zasada działania układu triangulacyjnego polega na emisji wiązki światła, którego źródłem jest laser półprzewodnikowy [HAN2007] lub dioda elektroluminescencyjna LED (*ang. Light-Emitting Diode*) [ZIE2004]. Wiązka po przejściu przez układ optyczny jest kierowana na badaną powierzchnię. Tam tworzy plamkę o średnicy od jednego do kilku milimetrów. Odbita od badanej powierzchni wiązka trafia ponownie do układu optycznego, a następnie na aktywny obszar układu detekcyjnego. W konstrukcji urządzeń do pomiarów triangulacyjnych stosowane są różnego typu detektory fotoelektryczne czułe na położenie plamki świetlnej. W najprostszej postaci są to detektory oznaczane symbolem PSD (*ang. Position Sensing Detector*) [KEN1998]. Nieco nowszymi rozwiązaniami mogą być detektory fotoelektryczne CCD (*ang. Charge Coupled Devices*) [BIE2001] lub CMOS (*ang. Complementary Metal Oxide Semiconductor*) [BIE2001], wykonane jako matryce lub układy liniowe (tzw. fotolinijki) [HAN2003]. Miejsce detekcji światła jest ściśle związane z punktem odbicia wiązki od powierzchni. Zmiana odległości  $y$ , w zakresie pomiarowym  $z$ , powoduje przesunięcie się plamki wzdłuż detektora, generując sygnał elektryczny. Detektor spełnia tutaj rolę wzorca długości. Znając położenie plamki w określonym obszarze detektora, odpowiadające zmianie odległości  $c$ , można wyliczyć aktualną odległość głowicy od badanej powierzchni  $y$  z poniższej zależności (3):

$$y \cong y_{\max} - \frac{z}{2} - \frac{y_0 \Delta c'}{\Delta c \cos \gamma + y_1 \sin \gamma}, \quad (3)$$

gdzie:  $\Delta c'$  – przesunięcie plamki wzdłuż aktywnego obszaru detektora,  $y_1, y_0$  – odległości od obiektywu do mierzonej powierzchni ( $y_1$ ) i do detektora ( $y_0$ ),  $z$  – zakres pomiarowy,  $\gamma$  – kąt odpowiadający środkowej wartości zakresu pomiarowego.

Wygenerowany sygnał elektryczny po konwersji na wartość binarną zostaje przesłany do mikroprocesora. Tutaj dane są analizowane i usuwane są ewentualne zakłócenia sygnału pomiarowego [CUR1995]. Po usunięciu zakłóceń wyświetlana jest wartość wyjściowa wyrażona w jednostkach długości lub w postaci sygnału informującego o przekroczeniu wcześniej ustalonych zakresów odnoszących się do wymiaru mierzzonego elementu.

Zakres i dokładność pomiarów triangulacyjnych zależy od konkretnych wymagań występujących w danej dziedzinie, stąd też produkowane obecnie urządzenia charakteryzują się dużą różnorodnością i specyfiką [FIG2003]. Można je ogólnie podzielić na trzy grupy:

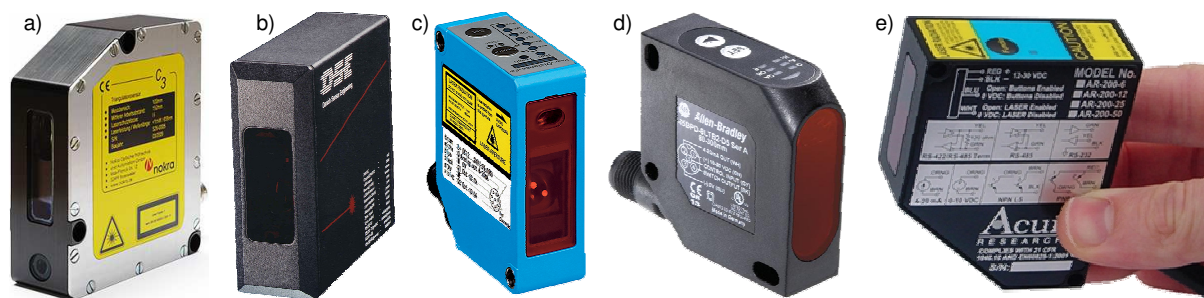
- czujniki triangulacyjne przenośne, ogólnego stosowania (odległościomierze, dalmierze, niwelatory). Przeznaczone do pomiarów odległości, wymiarów, a także powierzchni i kubatur (budownictwo),
- czujniki triangulacyjne przenośne lub zintegrowane, do zastosowań przemysłowych. Przeznaczone do kontroli odległości i wymiarów (przemysł precyzyjny, elektroniczny, optyczny, maszynowy, samochodowy, lotniczy),
- czujniki triangulacyjne zintegrowane, do zastosowań badawczych (głowice pomiarowe montowane w maszynach współrzędnościowych, głowice pomiarowe montowane w systemach do analiz topografii powierzchni). Przeznaczone do precyzyjnej kontroli wymiarów elementów maszynowych oraz do prowadzenia wielokryterialnych analiz topografii powierzchni.



Przeglądu i charakterystyki różnego rodzaju czujników laserowych do pomiaru odległości dokonał F. Blais w pracy [BLA2004], natomiast najnowsze rozwiązania w dziedzinie triangulacyjnych głowic pomiarowych stosowanych we współczesnej technice współrzędnościowej przedstawił E. Ratajczyk w pracy [RAT2005]. W tablicy 2 (□25) zestawiono parametry niektórych laserowych czujników odległości stosowanych w przemysłowych pomiarach triangulacyjnych, a na rysunku 8 (□25) pokazano ich wybrane modele.

Tab. 2. Charakterystyka laserowych czujników odległości stosowanych w przemysłowych pomiarach triangulacyjnych  
Tab. 2. The characteristics of laser distance sensors used in industrial triangulation measurements

Producent	Model	Źródło światła	Typ detektora	Zakres pomiarowy [mm]	Rozdzielczość pomiarowa [ $\mu\text{m}$ ]
Riftek <sup>2</sup> (Białoruś)	RF-603-X/2	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 660 \text{ nm}$ , 3 mW)	Detektor liniowy	2	0,3
OGP (Optical Gaging Products, Inc.) <sup>3</sup> (USA)	DRS-2000	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ , 2 mW)	CCD	2	1
MTI Instruments Inc. <sup>4</sup> (USA)	LTC-025	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 670 \text{ nm}$ , 2 – 5 mW)	CCD	16–25	0,1–0,2
Moduloc Control Systems <sup>5</sup> (USA)	ODS20.5	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 670 \text{ nm}$ , 2 mW)	CCD/CMOS	16–25	8
LuxScan Technologies <sup>6</sup> (Luksemburg)	Shape Scan L	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 670 \text{ nm}$ , 0,25 mW)	Różne	40–100	20
Micro-Epsilon <sup>7</sup> (USA)	Seria ILD-1800	Laser półprzewodnikowy ( $\lambda = 670 \text{ nm}$ , 1 mW)	Różne	2–200	0,2–20



Rys. 8. Wybrane produkowane obecnie laserowe czujniki odległości wykorzystujące metodę triangulacji: a) Nokra C3, b) DSE (Danish Sensor Engineering) ODS Black-line, c) SICK IP67, d) Allen-Bradley 45BPD, e) Acuity Laser Measurement AR200  
Fig. 8. Some of now available laser distance sensors using triangulation technique: a) Nokra C3, b) DSE (Danish Sensor Engineering) ODS Black-line, c) SICK IP67, d) Allen-Bradley 45BPD, e) Acuity Laser Measurement AR200

Zastosowanie metod triangulacyjnych we współczesnym przemyśle maszynowym jest bardzo szerokie. Autor pracy [GIE2006] przedstawił zastosowanie metody do wykrywania wycieków cieczy w maszynach (tłoczyska, wały maszynowe) i systemach przemysłowych. Testy eksperymentalne przeprowadzono dla oleju maszynowego. Uzyskane wyniki potwierdziły dużą czułość systemu triangulacyjnego wynoszącą kilka mikrometrów.

Dużym obszarem zastosowań tych metod jest przemysł motoryzacyjny, a szczególnie ten zajmujący się produkcją opon samochodowych. W pracy [ONE2000] opisano zastosowanie automatycznego systemu firmy Bytewise Measurement Systems<sup>8</sup> wykorzystującego triangulację laserową do precyzyjnej, bezstykowej kontroli wad opon samochodowych (wybrzuszenia, wgniecenia). W Europie produkcją podobnych systemów zajmują się następujące firmy: MicroStep-MIS<sup>9</sup> (system TGS (ang. *Tire Geometry Inspection System*)), Micro-Epsilon<sup>10</sup> (system TSI (ang. *Tire Surface Inspection*)), Dr Noll GmbH<sup>11</sup> (system TriScan). Wykorzystaniem triangulacyjnych czujników laserowych w kontroli powierzchni opon poświęcone są także prace W. Pastoriusa i M. Snowa [PAS2006-1], [PAS2006-2].

<sup>2</sup> Riftek, Logovskiy St. 22, 220090, Minsk, Republic of Belarus. <http://www.riftek.com>

<sup>3</sup> Optical Gaging Products, Inc., 850 Hudson Avenue, Rochester, NY 14621, USA. <http://www.ogpnet.com/>

<sup>4</sup> MTI Instruments Inc., 325 Washington Ave. Ext., Albany, NY 12205, USA. <http://www.mtiinstruments.com/>

<sup>5</sup> Moduloc Control Systems, Inc., 134 Painter St., Pittsburgh, PA 15085, USA. <http://www.moduloc-intl.com>

<sup>6</sup> LuxScan Technologies, Zare Ouest Ehlerange, L-4384 Luxembourg. <http://www.luxscan.lu>

<sup>7</sup> Micro-Epsilon, 3200 Glen Royal Road, Suite 110, Raleigh, NC 27617-7419, USA. <http://www.micro-epsilon.com>

<sup>8</sup> Bytewise Measurement Systems, 1150 Brookstone Center Parkway, Columbus, Georgia 31904, USA. <http://www.bytewise.com>

<sup>9</sup> MicroStep-MIS, Čavojského St. 1, 841 04 Bratislava 4, Republic of Slovakia. <http://www.microstep-mis.sk>

<sup>10</sup> Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & CO. KG, Königbacher Strasse 15, 94496 Ortenburg, Germany. <http://www.micro-epsilon.de>

<sup>11</sup> Dr Noll GmbH, Industriestraße 29, D-55543 Bad Kreuznach, Germany. <http://members.aol.com/DrNollGmbH/start.htm>

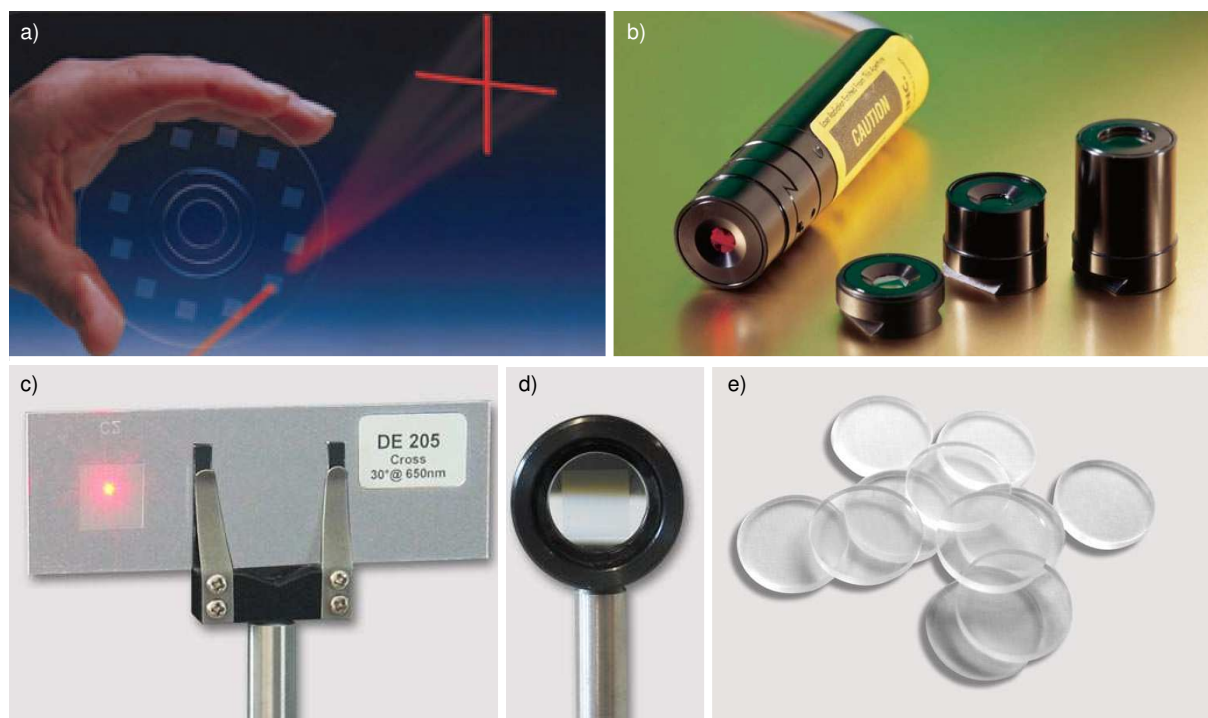
Autorzy pracy [LOM2003] przedstawili urządzenie elektrooptyczne przeznaczone do pomiarów odległości, wykorzystujące triangulację laserową ze skanowaniem czasowym TSLT (*ang. Time-of-Scan Laser Triangulation*) [CIE1988], [ISA1993]. W urządzeniu zastosowano wirujące lustro, które odbijało wiązkę światła laserowego generowanego przez laser półprzewodnikowy o długości fali  $\lambda = 670$  nm raz na badaną aluminiową próbkę, a raz na fotodiode 1 - referencyjną. Wiązka światła odbita od powierzchni próbki padała na fotodiode 2, służącą do pomiaru odległości pomiędzy płaszczyzną odbicia wiązki, a płaszczyzną badanej próbki. Uzyskano rozdzielczość rzędu 100  $\mu\text{m}$ , przy zakresie pomiarowym 10 mm.

Wiele systemów triangulacyjnych stosowanych jest w robotyce [LAM1998]. W pracy [ZEN1999] zaproponowano wykorzystanie dwóch wiązek do pomiarów położenia obiektu w ruchu. Metoda wykorzystuje dwie równoległe wiązki światła laserowego do wyznaczenia kierunku ruchu obiektu, a następnie śledzenia i pomiaru jego położenia. Uzyskano niepewność pomiaru rzędu 0,2 mm dla zakresu pomiarowego 50 mm. Metoda może być wykorzystana np. do kalibracji położenia ruchomego ramienia robota.

W przemyśle wytwarzającym precyzyjne elementy elektroniczne niezmiernie ważne jest odpowiednie przygotowanie powierzchni wykonanych z krzemu. Tego rodzaju powierzchnie powinny charakteryzować się dużą płaskością, którą uzyskuje się dzięki polerowaniu. Kontrola płaskości polerowanych podłoży krzemowych układów scalonych może być przeprowadzana za pomocą triangulacji laserowej i precyzyjnego skanowania, co opisano w pracy [MUL2001].

### 2.2.1.2. Metody światła strukturalnego wykorzystujące projekcję wzorów optycznych

Odmianą metod triangulacyjnych służących do oceny wymiaru, a także kształtu powierzchni są metody wykorzystujące projekcję wzorów optycznych. W metodach tych najczęściej stosowany jest dyfrakcyjny element optyczny DOE (*ang. Diffractive Optical Element*) [BOH2001], zwany również generatorem światła strukturalnego. Przykłady różnych rodzajów generatorów światła strukturalnego pokazano na rysunku 9 (□26).



Rys. 9. Generatory światła strukturalnego: a) w formie krążka wykonanego z poliwęglanu (Thorlabs<sup>12</sup>), b) w formie nasadek wymiennych ze szklanym elementem DOE (StockerYale<sup>13</sup>), c) w formie prostokątnej płytki wykonanej ze szkła (Holoeye<sup>14</sup>), d) w postaci aluminiowej oprawki ze szklanym elementem DOE (Holoeye), e) w formie okrągłej płytki wykonanej z polimetakrylanu metylu lub poliwęglanu (Holoeye)

Fig. 9. The generators of structured light: a) in a form of disc made form polycarbonate (Thorlabs<sup>12</sup>), b) in a form of exchangeable thimble with glass DOE (StockerYale<sup>13</sup>), c) in a form of rectangular plate made from glass (Holoeye<sup>14</sup>), d) in a form of rectangular plate made from glass in aluminum mount with M4 thread (Holoeye), e) in a form of plate made from Polymethyl Methacrylate or Polycarbonate (Holoeye)

<sup>12</sup> Thorlabs Inc., New Jersey 435, Route 206 North Newton, NJ 07860, USA. <http://www.thorlabs.com>

<sup>13</sup> StockerYale Inc., 32 Hampshire Road, Salem, NH 03079, USA. <http://www.stockeryale.com>

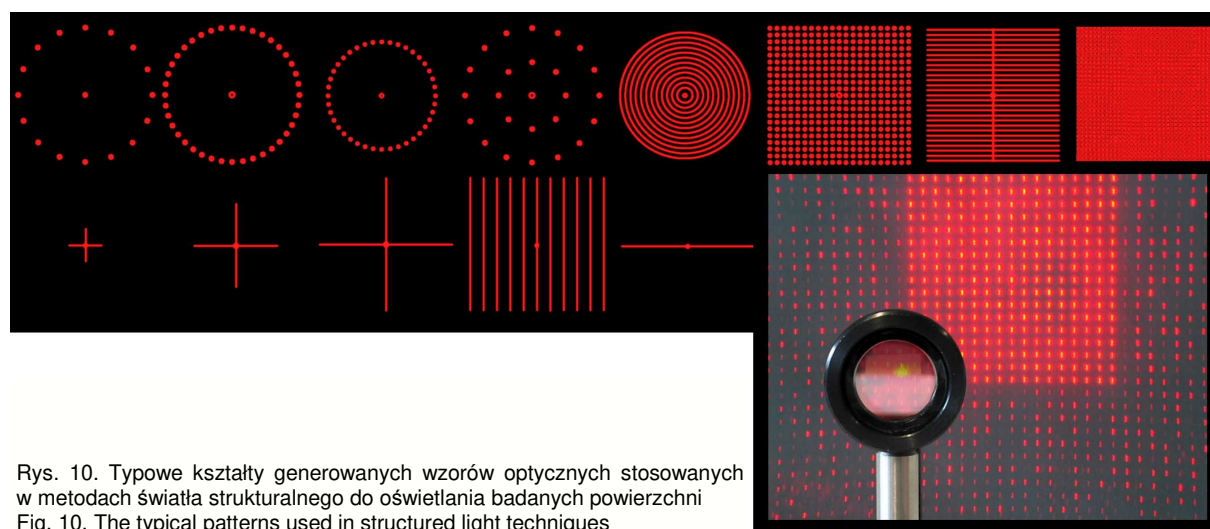
<sup>14</sup> Holoeye Photonics AG, Albert-Einstein-St. 14, 2489 Berlin-Adlershof, Germany. <http://www.holoeye.com>

Dyfrakcyjny element optyczny jest pasywnym komponentem optycznym [NOW1997] pokrytym mikroskopijną, skomplikowaną strukturą o wielkości submikrometrowej lub submilimetrowej. Uzyskanie precyzyjnej struktury geometrycznej powierzchni DOE wymaga stosowania zaawansowanych metod projektowania [OSH2004], wytwarzania [SOI2002] i kontroli [TAM2006]. Projektowanie opiera się głównie na wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania komputerowego (np. aplikacja o nazwie DECAD<sup>15</sup> opracowana przez O. Magnina). Wytwarzanie obejmuje szereg technik [SOI2002], [MIR2005], [HER2007], [SAA2007] opartych na fotolitografii wysokiej rozdzielczości (fotolitografia z naświetlaniem maski światłem ultrafioletowym). Stosuje się również inne techniki takie jak m.in. replikację (utwardzanie światłem ultrafioletowym, tłoczenie na gorąco, formowanie wtryskowe). Kontrola elementów dyfrakcyjnych realizowana jest natomiast przez systemy pomiarowe wykorzystujące różnego rodzaju metody optyczne o dużej dokładności (interferometria, mikroskopia).

Zasada działania elementu dyfrakcyjnego polega na wykorzystaniu jednego z podstawowych zjawisk optycznych – dyfrakcji światła [SAL2007]. Wiązka światła przechodząca przez element ulega ugięciu (dyfrakcji), w wyniku czego tworzony jest wzór optyczny (ang. *pattern*) [HER2007] np. w kształcie punktu [KLA2007], linii [SAJ1998], krzyża, siatki [BER1995], okręgu (lub dowolnej kombinacji tych kształtów) widoczny w płaszczyźnie obserwacji. Wzór ten może być prosty lub skomplikowany, zależy to od złożoności struktury geometrycznej powierzchni elementu generującego. Na ogół we wzorze złożonym z punktów, każda z wiązek ma tę samą energię, a we wzorze złożonym z linii, każda z linii jest jednakowej intensywności. W tabelicy 3 (□27) przedstawiono charakterystykę wybranych elementów dyfrakcyjnych, a na rysunku 10 (□27) pokazano typowe kształty generowanych wzorów optycznych.

Tab. 3. Charakterystyka elementów dyfrakcyjnych stosowanych w metodach światła strukturalnego  
Tab. 3. The characteristics of diffractive optical elements used in structured light techniques

Producent	Kształt generatora	Materiał	Dostępne wzory	Przewidywany dla światła o długości fali $\lambda$ [nm]
StockerYale	Nasadka wymienna	Tworzywo sztuczne	Kwadrat, zbiór linii pionowych, pojedynczy okrąg	250–1550
Thorlabs	Dysk	Poliwęglan	Krzyż, zbiór linii pionowych, zbiór linii poziomych, linia	635
Holoeye	Kwadratowa lub okrągła płytka	Różne	Różne, możliwość wykonania na zamówienie	Różna
Silios Technologies <sup>16</sup>	Okrągła lub prostokątna płytka	Różne	Różne, możliwość wykonania na zamówienie	Światło widzialne, bliska podczerwień
Z-Laser <sup>17</sup>	Nasadka niewymienna	Tworzywo sztuczne, szkło	Okrąg, zbiór linii pionowych, krzyż, okrąg i inne	635
Edmund Optics <sup>18</sup>	Kwadratowa płytka	Szkło	Linia pionowa, krzyż, zbiór linii poziomych, siatka punktów	600–700



Rys. 10. Typowe kształty generowanych wzorów optycznych stosowanych w metodach światła strukturalnego do oświetlania badanych powierzchni  
Fig. 10. The typical patterns used in structured light techniques

<sup>15</sup> DECAD (Diffractive Element Computer Assisted Design), Oliver Magnin, <http://diffractive.optics.free.fr>

<sup>16</sup> Silios Technologies, Z.I Peynier-Rousset Rue Gaston Imbert prolongée, 13 790 Peynier, France. <http://www.silios.com/>

<sup>17</sup> Z-Laser Optoelektronik GmbH, Merzhauserstr. 134, 9100 Freiburg, Germany. <http://www.z-laser.com/>

<sup>18</sup> Edmund Optics Inc., 101 East Gloucester Pike, Barrington, NJ, USA. <http://www.edmundoptics.com/>

Teoria dyfrakcji [ERS2007], która stanowi podstawę teoretycznego opisu zjawiska wykorzystawanego w omawianych elementach optycznych. Służy ona do ustalenia tego, jak dowolna wiązka światła o określonej długości fali, będzie zmieniona podczas propagacji. Do obliczania kąta dyfrakcji dla najprostszej postaci wzoru optycznego stosuje się poniższe zależności (4), (5):

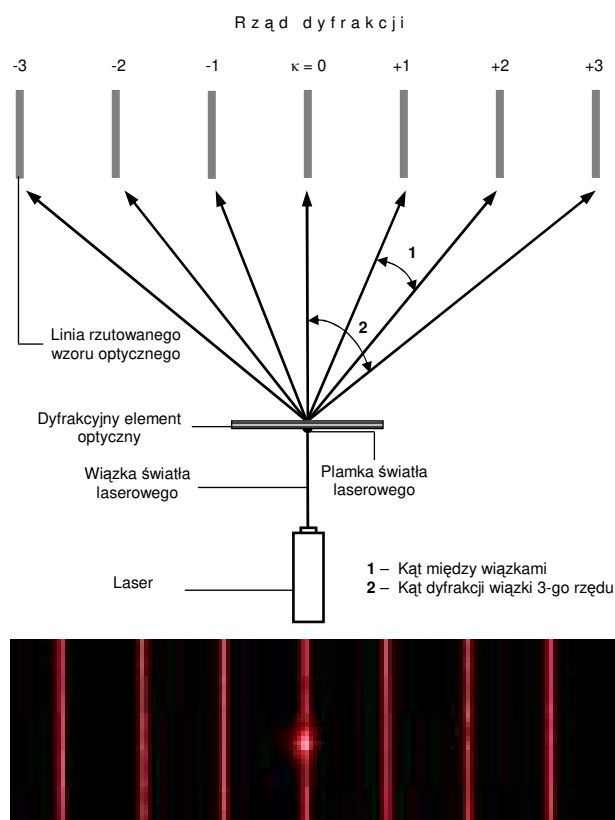
$$m\lambda = d \sin \theta_m, \quad (4)$$

lub

$$\theta_m = \arcsin \frac{m\lambda}{d}, \quad (5)$$

gdzie:  $d$  – okres elementu dyfrakcyjnego,  $\theta_m$  – kąt dyfrakcji,  $m$  – rząd dyfrakcji,  $\lambda$  – długość fali światła.

$\theta_m$  jest kątem dyfrakcji mierzonym od położonej centralnie wiązki do  $m$ -tej wiązki. Rząd dyfrakcji  $m$  jest liczbą całkowitą. Kąt rozwarcia, to kąt zawarty pomiędzy dwiema najbardziej skrajnymi wiązkami. Jest on podwojonym kątem wiązki najwyższego rzędu. Na rysunku 11 (□28) pokazano schematycznie sposób generowania 7-liniowego wzoru optycznego światła strukturalnego przez dyfrakcyjny element optyczny oraz charakterystyczne kąty opisujące zjawisko dyfrakcji.



Rys. 11. Generator 7-liniowego wzoru optycznego (światła strukturalnego) wykorzystujący dyfrakcyjny element optyczny: a) schemat układu, b) generowany wzór. Każda linia składa się z 301 plamek (2107 plamek), obszar definiowany przez linie posiada wymiary  $44 \times 61$  mm, odległość od elementu dyfrakcyjnego wynosi 500 mm

Fig. 11. The generator of structured light pattern with 7-lines by diffractive optical element: a) schematic diagram, b) real view of pattern. Each line consists of 301 spots and the area defined by the lines is  $44 \times 61$  mm at a distance of 500 mm from the DOE

Dyfrakcja optyczna znalazła szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki [ICH1999]. Obszary, w których jest wykorzystywana obejmują m.in. biologię [NIS1995], medycynę [SIL2008], biotechnologię, farmaceutykę [JUU2005], systemy widzenia maszynowego [SIL2004], spektrometrię (spektrometry siatkowe), telekomunikację, optyczne procesy informatyczne [KOD1999], systemy optycznego zabezpieczania (bezystykowe czujniki pomiarowe), metrologię wielkości geometrycznych. Optyka dyfrakcyjna wprowadziła również wiele udoskonaleń do systemów wykorzystujących wiązkę światła laserowego. Dużą zaletą DOE w porównaniu z innymi typami elementów mikrooptycznych [JOZ2006] (refleksyjnymi i refrakcyjnymi) jest łatwość, z jaką w ich przypadku można wytworzyć pożądane przekształcenie frontu falowego. Ponadto elementy te mogą spełniać te same funkcje, jak soczewki lub pryzmaty, przy dużo mniejszych wymiarach i niewielkiej masie, co umożliwia ich integrację ze strukturami mikro-elektromechanicznymi MEMS (ang. *Micro-Electro-Mechanical Systems*) oraz mikro-opto-elektro-mechanicznymi MOEMS (ang. *Micro-Opto-Electromechanical Systems*) [MOT2005].

W zawiązku z dynamicznie rozwijającym się przemysłem mikrooptycznym próbuje się wprowadzać odpowiednie normy dotyczące produkowanych elementów. W 2005 roku wprowadzono m.in. normę [N05/15902] określającą podstawowe terminy dotyczące dyfrakcyjnych elementów optycznych w przypadku propagacji światła w wolnej przestrzeni.

Po przejściu wiązki światła przez dyfrakcyjny element optyczny na badanej powierzchni tworzony jest obraz. Nierówności powierzchni powodują jego zniekształcenie. Stopień tych zniekształceń może dać wiele informacji o stanie badanej powierzchni. Obraz rejestrowany jest za pomocą kamer TV lub cyfrowych aparatów fotograficznych, a następnie poddawany ocenie w systemach przetwarzania i analizy obrazu. Odpowiednie oprogramowanie komputerowe pozwala na wyznaczenie szeregu parametrów charakteryzujących badaną powierzchnię oraz przeprowadzenie różnorodnych analiz.

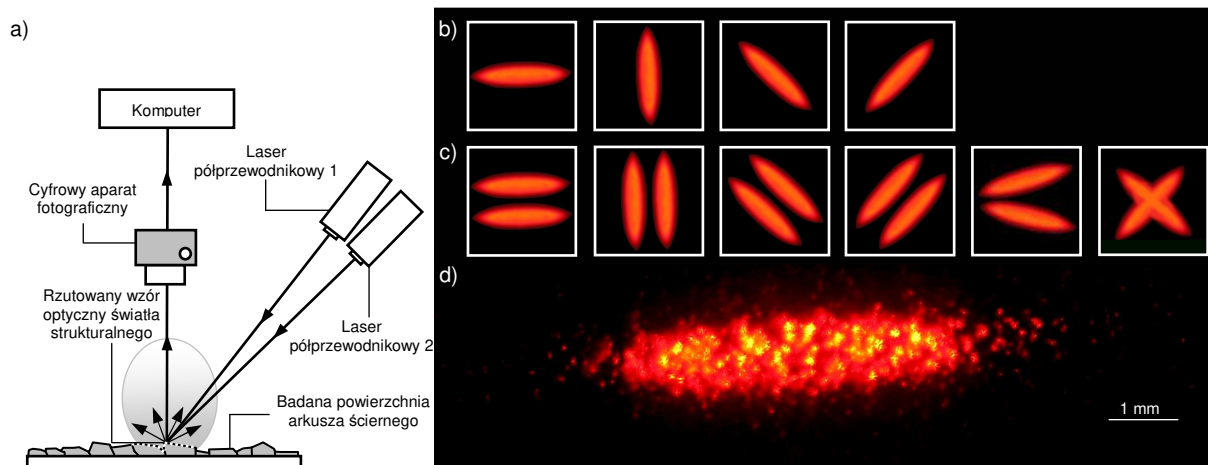
W metodach światła strukturalnego korzysta się nie tylko z dyfrakcyjnych elementów optycznych. Innym alternatywnym generatorem światła strukturalnego jest wideo-projektor. O ile generowane przez DOE wzory optyczne stosowane są najczęściej do oceny obiektów w skali mikro, to wzory generowane przez wideo-projektory służą raczej do oceny większych obiektów. Zaletą takiego rozwiązania jest praktycznie nieograniczona różnorodność rzutowanych wzorów optycznych w postaci odpowiednio przygotowanej grafiki komputerowej [KIR1997] oraz możliwość oświetlania badanych powierzchni światłem o różnej barwie [SKY2002-2], [SKY2005]. Pozwala to na bardziej efektywne wykrywanie różnego rodzaju wad i defektów oraz precyzyjną detekcję kształtu elementów powierzchni, w ujęciu 2 [SUK2004] i 3-wymiarowym (szczególnie przy jej przestrzennej rekonstrukcji [KOW2000], [CHE2000]), [SKY2002-1]. W tym przypadku, metody światła strukturalnego bywają określane jako aktywna triangulacja. Przestrzenne pomiary kształtu dokonywane są za pomocą odpowiednich urządzeń pomiarowych [WEI2005-1], [SUN2006], a wykorzystuje się je m.in. w systemach szybkiego prototypowania [ZHA2002].

Aktywna triangulacja wykorzystywana jest także do innych celów. Stosuje się ją w takich operacjach jak m.in.: wykrywanie krawędzi, odwzorowywanie konturu, precyzyjne lokalizowanie obiektów w otoczeniu. Ostatnie z wymienionych zastosowań wykorzystali m.in. S. Klančnik, J. Balič i P. Planinšič – autorzy pracy [KLA2007] poświęconej poprawie bezpieczeństwa osób niepełnosprawnych. Zainstalowany na wózku inwalidzkim prototyp systemu wizyjnego wyposażony był w projektor światła strukturalnego oraz kamerę video DCR-HC23 firmy Sony. Za pomocą projektora generowano proste wzory optyczne w kształcie plamki lub linii. Do analizowania położenia rzutowanego wzoru optycznego służyła opracowana przez autorów w języku C aplikacja służąca do przetwarzania obrazu.

Stosując cyfrową projekcję światła (ang. *Digital Stripe/Fringe Projection*) [ZHA2004], oprócz wideo-projektorów wykorzystujących modulatory ciekłokrystaliczne, korzysta się niekiedy z układów zbudowanych z dużej liczby mikrozwierciadeł w postaci tablicy DMD (ang. *Digital Micromirror Devices*) [MON1995], [FRA2000], [HUA2003], [LIE2005]. Przedstawiona w pracy [KAS1992] tablica DMD zbudowana była z mikrozwierciadeł ( $800 \times 600$  i  $1024 \times 768$ ) o niewielkich wymiarach, mogących kierować światło na aperturę układu optycznego. Do rejestracji powstającego na badanej powierzchni obrazu służyła kamera TV wyposażona w matrycowy detektor CCD. Metodę tę wykorzystano do analizy powierzchni elementów maszyn, także w układzie przestrzennym. Autorzy pracy [TSA2005] zastosowali tablicę DMD jako generator oświetlenia strukturalnego w systemie do precyzyjnych pomiarów kształtu powierzchni z rozdzielczością pionową  $3 \mu\text{m}$  i poziomą  $10 \mu\text{m}$ . Badano m.in. fragment monety o wysokości nierówności  $50 \mu\text{m}$  i powierzchni  $3,5 \times 3,5 \text{ mm}^2$ . Pomiary porównywano z wynikami otrzymanymi za pomocą profilometru stykowego.

W przemysłowych systemach widzenia maszynowego techniki światła strukturalnego wykorzystuje się do określenia topografii powierzchni [BER1995], [WIN2001], [JIN2001], kształtu przedmiotu [LIE2005], zniekształcenia powierzchni [MAS2001], [QUI2003].

W pracy [KAP2006-1] wykorzystano metodę projekcji wzorów optycznych do oceny topografii powierzchni arkuszy ściernych. Wzory generowane były z wykorzystaniem jednego lub dwóch źródeł światła laserowego. W ten sposób można było tworzyć różne wzory optyczne (proste lub złożone). Akwizycja powstających na badanej powierzchni obrazów odbywała się za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Zarejestrowane obrazy przesyłano do komputera, gdzie poddawano je przetwarzaniu i analizie za pomocą oprogramowania komputerowego Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 oraz ImageJ 1.34. Wymienione programy pozwalały na ocenę zarejestrowanych obrazów na podstawie wyznaczonych parametrów geometrycznych (np. pole powierzchni jasnych obszarów obrazu itp.) oraz na przeprowadzenie analizy densytometrycznej. Na rysunku 12 (□30) pokazano schemat stanowiska pomiarowego, kształty rzutowanych wzorów oraz fragment powierzchni arkusza ściernego oświetlonego jednym ze wzorów generowanych za pomocą pojedynczego źródła światła laserowego.



Rys. 12. Zastosowanie metody światła strukturalnego do oceny topografii powierzchni arkuszy ściernych: a) schemat stanowiska pomiarowego, b) wzory optyczne generowane za pomocą jednego źródła światła laserowego, c) wzory optyczne generowane za pomocą dwóch źródeł światła laserowego, d) powierzchnia arkusza ściernego o granulacji ziarna 120 oświetlona wzorem pokazanym na rysunku 12b

Fig. 12. Structured light technique used for assessment of surface topography of abrasive sheets: a) schematic diagram of setup, b) projected patterns generated by one laser light source, c) projected patterns generated by two laser light sources, d) surface of 120 grain granulation abrasive sheet illuminated by pattern from figure 12b

W pracy [SAJ1998] przedstawiono zastosowanie metody światła strukturalnego do oceny kształtu powierzchni walcowych znajdujących się w ruchu. Do generowania wzorów optycznych zastosowano laser półprzewodnikowy. Rzutowane na badaną powierzchnię wzory rejestrowano za pomocą kamery z opóźnieniem czasowym TDI (*ang. Time Delay and Integration*). Uzyskane obrazy zniekształcenia powierzchni analizowano m.in. za pomocą transformacji Fouriera. Bardziej skomplikowane przedmioty walcowe w postaci stalowych rur w kształcie litery T badali autorzy pracy [WEI2005]. Pomiar z wykorzystaniem technik światła strukturalnego prowadzono w celu oceny pionowości tego typu elementów. Skonstruowano specjalne stanowisko badawcze złożone z układu dwunastu generatorów oświetlenia strukturalnego (lasery półprzewodnikowe) i dwunastu detektorów (miniaturowe kamery CCD). Rzutowane na badaną powierzchnię rury wzory optyczne w kształcie okręgu rejestrowano detektorami, a sygnał przekazywano do karty akwizycji zainstalowanej w komputerze. Korzystając z oprogramowania do przetwarzania obrazu ustalano pionowość całego przedmiotu. Uzyskane wyniki porównywano m.in. z wynikami otrzymanymi z maszyny współrzędnościowej. Na podstawie pomiarów referencyjnych stwierdzono, iż metoda pomiarowa cechuje się niewielkim błędem rzędu kilku-kilkunastu procent. Zakres pomiarowy sytemu (przy pomiarze pionowości) wynosił od 0,384 do 0,562 mm, natomiast powtarzalności pomiarów wynosiła 0,089 mm.

Oryginalne urządzenie wykorzystujące metody światła strukturalnego – projekcję wzorów optycznych w postaci linii – do pomiarów kształtu (głównie płaskości) powierzchni skonstruowali L. G. Hassebrook i R. C. Daley z University of Kentucky [HAS1995-1]. Urządzenie [HAS1995-2] pozwalało na uzyskanie niepewności pomiaru rzędu 1,56  $\mu\text{m}$ . Badaniu poddawano próbkę wykonaną z gumy odpowiednio wykończoną w celu uzyskania dużej płaskości powierzchni. Oświetlenie strukturalne generowano za pomocą diod elektroluminescencyjnych. Obrazy powierzchni poddawano filtrowaniu za pomocą technik przetwarzania obrazu. Inne urządzenie o nazwie 4DI Three Dimensional Imager wyprodukowane przez amerykańską firmę Intelligent Automation Systems (IAS)<sup>19</sup> opisano w [BEN1996] oraz [WOL1997]. Wykorzystywało ono projekcję światła strukturalnego (w postaci zbioru linii) generowanego przez laser o długości fali  $\lambda = 690 \text{ nm}$  i technikę stereowizji do automatycznej kontroli wad powierzchni w ujęciu przestrzennym. Do rejestracji obrazu zastosowano trzy kamery TV z detektorami CCD o rozdzielczości  $768 \times 492$  pikseli. Kamery były zsynchronizowane i rejestrowały obraz jednocześnie z prędkością 30 klatek na sekundę. Dwie z kamer tworzyły obraz przestrzenny, natomiast trzecia zwiększała głębię ostrości. Czas przeprowadzenia pomiaru był krótki i wynosił 3 s.

Inne urządzenia i systemy pomiarowe wykorzystujące metody światła strukturalnego oraz techniki przetwarzania i analizy obrazu do oceny kształtu powierzchni zostały opisane m.in. w pracach: [MAS2005], [WIL2005], [WIL2007], [WIL2008], [ZHA2005-2].

<sup>19</sup> Intelligent Automation Systems Inc., (IAS), 149 Sidney St., Cambridge, MA 02139, USA.

## 2.2.2. Optyczne metody aktywnej kontroli nierówności powierzchni

Omówione w poprzednich rozdziałach metody triangulacji laserowej i metody wykorzystujące projekcję wzorów optycznych należą do optycznych metod profilometrycznych [ŁUK2001]. Natomiast metody rozpraszania światła [DOB1984], które zostaną przedstawione w punktach 2.2.2.1 – 2.2.2.2, należą do metod optycznej analizy powierzchniowej [RAT1983]. Do grupy metod rozpraszania światła (metod skaterometrycznych) możemy zaliczyć m.in. metody: reflektometryczne<sup>20</sup> (ang. *Reflectometric Methods*) [NOW1991], [STO2006], [BEN1998] integracyjne TIS (ang. *Total Integrated Scattering*) [BEN1989], [STO1990], różniczkowe ARS (ang. *Angle-Resolved Scattering*) [ŁUK2001], [PAW2005-1] [BEN1998] oraz metody wykorzystujące optyczne przekształcenie Fouriera OFT (ang. *Optical Fourier Transform*) [WHI2003], [PAW2005-1]. Jednym z powodów, dla których zainteresowano się metodami rozpraszania światła jest ich wysoka czułość, pozwalająca dokonywać pomiaru bardzo małych nierówności powierzchni, których wysokość wynosi od dziesiątych części nanometra do kilkuset nanometrów. Stosuje się je w procesach kontroli powierzchni gładkich i supergładkich (m.in. precyzyjnych elementów optycznych, krzemowych podłoży układów elektronicznych [TAY2003], układów cienkowarstwowych [HEI1993] itp.). Inną ważną zaletą jest możliwość wykorzystania tych metod do aktywnej kontroli nierówności powierzchni elementów obrabianych mechanicznie (szlifowanych [WON1999], precyzyjnie toczonych [BAU1997], polerowanych [AND1995], docieranych [CHI2007], gładzonych [SAD2009] itp.), wykonywanych w wydajnych, zautomatyzowanych procesach wytwórczych. W tym przypadku mierzone nierówności mogą być nieco większe.

### 2.2.2.1. Metody reflektometryczne

Metody rozpraszania światła, w których wykorzystuje się pomiar natężenia światła odbitego<sup>21</sup> nazywane są metodami reflektometrycznymi lub odbiciowymi. Współczynnik odbicia zwierciadlanego, czyli reflektancja zwierciadlana [ŁUK2001], definiowany jest jako stosunek natężenia światła odbitego zwierciadlanie do natężenia światła padającego na powierzchnię. Natomiast reflektancja całkowita [ŁUK2001] jest stosunkiem natężenia światła odbitego od powierzchni zwierciadlanie i dyfuzyjnie, do natężenia światła padającego. Jest ona równa sumie reflektancji zwierciadlanej i dyfuzyjnej, lub też reflektancji zwierciadlanej powierzchni idealnie gładkiej. Zależność między odchyleniem standardowym wysokości nierówności a stosunkiem reflektancji zwierciadlanej i całkowitej określa teoria opracowana w latach 60-tych XX wieku powstała w wyniku prac prowadzonych m.in. przez H. Daviesa [DAV1954], H. F. Bennetta i J. O. Porteusa [BEN1961] oraz P. Beckmanna [BEC1963], [BEC1967]. Zależność tę wyraża równanie (6):

$$\frac{R_d}{R_0} = 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{4\pi\sigma \cos \theta_i}{\lambda} \right]^2 \right], \quad (6)$$

gdzie:  $R_d$  – reflektancja dyfuzyjna,  $R_0$  – reflektancja całkowita,  $\sigma$  – odchylenie standardowe wysokości nierówności,  $\theta_i$  – kąt padania,  $\lambda$  – długość fali światła.

Aby możliwe było stosowanie tego równania wymagane jest spełnienie poniższych warunków:

- odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni jest znacznie mniejsze od długości fali światła ( $\sigma \ll \lambda$ ),
- odstęp nierówności  $S_i$  są znacznie większe od długości fali światła ( $S_i \gg \lambda$ ), jednak na tyle małe, że kierunki propagacji światła rozproszonego nie są zbyt bliskie kierunkowi odbicia zwierciadlanego,
- nierówności powierzchni opisuje stacjonarna i ergodyczna funkcja losowa, zaś rozkład wysokości nierówności powierzchni jest rozkładem normalnym.

Rozpatrując badania nierówności powierzchni na podstawie natężenia światła odbitego, należy zaznaczyć, że pierwsze udane próby prowadzono już w latach 30 XX wieku. Wiązały się one z pracami G. Schmaltza, który badał rozkład światła odbitego od powierzchni porównując z nim krzywą Gaussa [SCH1936], natomiast pierwsze próby pomiaru połysku opisał w tym samym okresie B. Lange [LAN1936].

<sup>20</sup> Niektórzy autorzy określają tą nazwą metody oceny nierówności powierzchni oparte na pomiarze światła odbitego zwierciadlanie. W innych pracach nazwa ta jest stosowana do wszystkich metod oceny nierówności, w których następuje odbicie światła od badanej powierzchni.

<sup>21</sup> Nazwa ta obejmuje także te przypadki, w których obok pomiaru natężenia światła odbitego zwierciadlanie mierzone jest, również natężenie światła rozproszonego w jednym lub kilku kierunkach.

Po II Wojnie Światowej opracowano różne metody oceny połysku powierzchni elementów wykonanych ze stopów metali, papieru [KOU1994], [MOR1995], drewna, szkła, tworzyw sztucznych [WES1974], a także powierzchni obrabianych mechanicznie [VAS1974] (w tym także w ramach aktywnej kontroli) [VAS1975] i powierzchni lakierowanych. Metody te opisano m.in. w pracach J. Westberga [WES1967], W. Königa [KON1969], S. Lohmeyera [LOH1976], [LOH1977] oraz D. J. Whitehouse'a, D. K. Bowena, V. C. Venkatesha, P. M. Lonardo i C. A. Browna [WHI1994-2]. Opierając się na wcześniejszych pracach H. Schlötterera, W. König w pracy [KON1969] wyróżnił dwie podstawowe grupy definicji połysku – grupę A oraz grupę B. Do grupy A należą te definicje połysku powierzchni, które określają go jako zdolność powierzchni do dawania wyraźnego, ostrego obrazu lustrzanego. Grupa B obejmuje te definicje, które wyrażają połysk powierzchni za pomocą natężenia światła odbitego zwierciadlanie i dyfuzyjnie. Większość przyrządów, służących do oceny nierówności na podstawie pomiarów połysku powierzchni, opiera swoje działanie na definicjach połysku należących do grupy B, rzadziej do grupy A [WHI1994-1]. Przyrządy te oceniają nierówności powierzchni metodą reflektometryczną.

Pierwsze przyrządy przeznaczone do oceny nierówności powierzchni i działające na zasadzie pomiaru połysku zaczęły pojawiać się już w latach 40 XX wieku [HUN1946], natomiast przyrządy produkowane seryjnie wytwarza się od lat 60-tych XX wieku. Stosuje się w nich różną geometrię oświetlenia o kątach padania wynoszących: 20°, 45°, 60°, 75° i 85°. Zasada pomiaru polega na oświetleniu badanej powierzchni wiązką światła i pomiarze natężenia światła odbitego od powierzchni pod określonym kątem. Im mniejsza jest różnica między natężeniem światła emitowanego, a odbitego (przy tej samej geometrii oświetlenia), tym większa jest wartość połysku. Stosuje się tu następującą zasadę: dla powierzchni o wysokim połysku wybiera się mniejsze kąty padania (np. kąt 20°), natomiast dla powierzchni o niskim połysku, większe kąty padania (np. kąt 85°). Przykładem urządzenia do pomiaru połysku może być przyrząd o symbolu SG4ME firmy MTI Instruments Inc.<sup>22</sup> Do oświetlenia powierzchni mierzonej i analizy światła odbitego zastosowano w nim wiązkę włókien optycznych. Za jego pomocą można było wykonywać pomiary nierówności powierzchni w zakresie wysokości od 0,02 μm do 0,4 μm. Podobny zakres pomiarowy parametru *Ra* wynoszący od 0,01 μm do około 0,3 μm posiadał dwuprzysłonowy połyskomierz Glanzmesser 8510-1 produkowany przez firmę ABCE Johansson<sup>23</sup> [EDE1972-1], [EDE1972-2]. Cechował się on małymi gabarytami, zasilaniem bateryjnym oraz krótkim czasem przeprowadzania pomiaru i stosunkowo prostą obsługą. Połyskomierz zastosował J. Westberg [WES1974] do oceny jakości wykładzin wykonanych z tworzyw sztucznych, którymi pokryte były podłogi sklepowe. Obecnie produkowane połyskomierze muszą spełniać odpowiednie standardy dotyczące pomiaru połysku [N94/2813], [N97/8741], [N97/2457-97], [N08/523-89]. W tabelicy 4 (□32) zestawiono charakterystyki niektórych obecnie produkowanych połyskomierzy.

Tab. 4. Charakterystyka niektórych obecnie produkowanych połyskomierzy  
Tab. 4. The characteristics of selected available glossometers

Producent	Model	Kąt padania [°]	Obszar pomiaru [mm]	Zakres pomiarowy [GU]
Meter-Supply <sup>24</sup>	ETCGT60	60	9 × 13	0–199,9
Sheen Instruments <sup>25</sup>	Microgloss 155/SO	60	2 × 2	0,1–1000
BYK-Gardner <sup>26</sup>	micro-TRI-gloss μ	20 / 60 / 85	9 × 9 / 9 × 8 / 7 × 42	0–2000 / 0–1000 / 0–160
Konica-Minolta <sup>27</sup>	Multi-Gloss 268	20 / 60 / 85	10 × 10 / 9 × 15 / 5 × 38	0–2000 / 0–1000 / 0–160
Zehntner <sup>28</sup>	ZGM1120	20 / 60 / 85	10 × 10 / 9 × 15 / 6 × 40	0–2000 / 0–1000 / 0–160

GU (ang. *Gloss Unit*) – jednostka połysku

W Polsce prototypowe egzemplarze połyskomierzy, przeznaczonych do oceny nierówności powierzchni szlifowanych, docieranych, polerowanych itp., opracowano w latach 1970-1980 w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie, w zespole S. Markowskiego, i w Wyższej Szkole Inżynierskiej w Koszalinie, w zespole T. Karpińskiego [KAR1977], [BIL1980]. W WSInż. w Koszalinie badania metodami reflektometrycznymi zainicjowano w 1974 roku. W ich wyniku powstały dwa typy połyskomierzy – PŁK-1 i PŁK-2. Pierwszy przyrząd był m.in. stosowany w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w badaniach kontaktu powierzchni chropowatych. Zasada działania połyskomierza PŁK-1 polegała na wyznaczeniu stosunku natężenia światła odbitego zwierciadlanie do sumy natężeń światła odbitego zwierciadlanie i rozproszonego w niewielkim kącie bryłowym. Tak określony połysk skorelowany był ze

<sup>22</sup> MTI Instruments Inc., 325 Washington Avenue Extension, Albany, New York 12205-5505, USA. <http://www.mtiinstruments.com/>

<sup>23</sup> ABCE Johansson, 365 Västeråsvägen, 1A 631 05 Eskilstuna, Sweden.

<sup>24</sup> Meter-Supply, Unit N, 6/F, International Industrial Centre, 2 - 8 Kwei Tei Str., Fo Tan, Sha Tin, Hong Kong, China. <http://www.meter-supply.com>

<sup>25</sup> Sheen Instruments Ltd., Unit 4, St. Georges Ind. Est., Richmond Road, Kingston, KT2 5BQ, UK. <http://www.sheeninstruments.com>

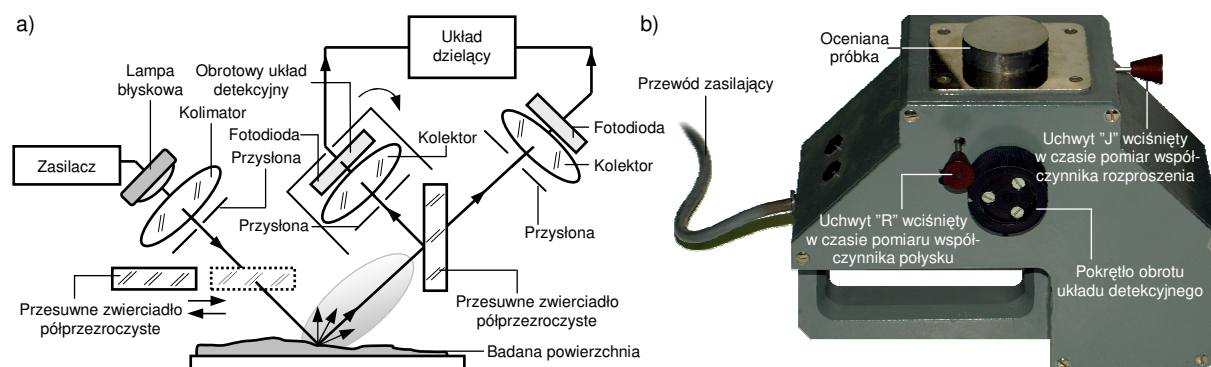
<sup>26</sup> BYK-Gardner Ltd., Rivers Park II, 9104 Guilford Road Columbia, MD 21046-2729, USA. <http://www.byk.com>

<sup>27</sup> Konica Minolta Business Solutions (Canada) Ltd., 369 Britannia Road, East Mississauga, Ontario L4Z 2H5, Canada. <http://www.konicaminolta.ca>

<sup>28</sup> Zehntner GmbH Testing Instruments, Gewerbestrasse 4, CH-4450 Sissach, Schweiz. <http://www.zehntner.com>



średnim kwadratowym pochyleniem profilu  $\Delta q$ . Dla wybranych sposobów obróbki powierzchni istniała też korelacja połysku z parametrem  $Ra$ , w zakresie od  $0,01 \mu\text{m}$  do  $1,5 \mu\text{m}$ . Połyskomierz pozwalał również mierzyć reflektancję zwierciadlaną badanej powierzchni. Schemat oraz widok ogólny urządzenia PŁK-1 pokazano na rysunku 13 [33].



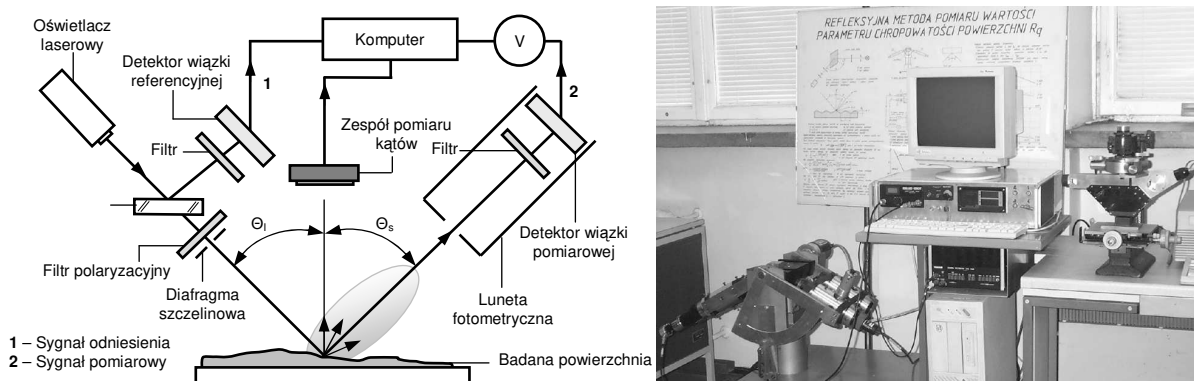
Rys. 13. Polyskomierz PŁK-1: a) schemat polyskomierza, b) wygląd ogólny urządzenia  
Fig. 13. Glossmeter PŁK-1: a) schematic diagram, b) general view of glossmeter

Wiele współczesnych urządzeń służących do pomiarów reflektometrycznych wykorzystuje promieniowanie laserowe. Najczęściej jest to światło widzialne [ANG2001], [DIN2002] lub podczerwień [PER1996], [BJU1997] z zakresu od  $0,75 \mu\text{m}$  do  $15 \mu\text{m}$ . W niektórych szczególnych przypadkach stosuje się inne zakresy promieniowania np. ultrafiolet [ZUR1995] lub promieniowanie X [CHK1998], [LOD2001]. Źródłem światła są zazwyczaj różnego rodzaju oświetlacze wykorzystujące lasery: półprzewodnikowe [HER2002], [FON2001], He-Ne [GON1995], [LIS1996] oraz  $\text{CO}_2$  [PER1996]. Zestawienie metod i uzyskiwanych parametrów SGP w zależności od zastosowanej długości fali światła przedstawili A. Tyka i A. Góralczyk w pracy [TYK2008].

Pomiary reflektometryczne przeprowadza się za pomocą różnych urządzeń i systemów pomiarowych. W pracy [SHI1987] M. Shiraishi przedstawił system pomiarowy, w którym zastosowano dwa detektory – jeden mierzył natężenie światła odbitego zwierciadlanie, drugi – światła rozproszonego. Ocena nierówności powierzchni dokonywana była na podstawie stosunku różnicy do sumy sygnałów otrzymanych przez oba detektory. Natomiast J. laquinta i A. Fouilloux w pracy [IAQ2004] przedstawili goniorefleksometr przeznaczony do oceny nierówności nawierzchni dróg. Szczegółowy opis podobnego urządzenia zawarto w pracy [COU1996]. Wiele różnych urządzeń stosuje się do kontroli elementów optycznych. W pracy [LOD2001] opisano zastosowanie skomplikowanego systemu pomiarowego do kontroli nakładania ultracienkich warstw Mo/C na elementy optyczne w warunkach wysokiej próżni ( $2 \times 10^{-10}$  mbar). W pomiarowej części systemu wykorzystano generator promieniowania X (długość fali  $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$ ) oraz reflektometr z fotodiodami GaAs. Urządzenie posiadało dwa obrotowe stoliki napędzane silnikiem krokowym w celu precyzyjnego ustawienia badanych próbek. Podobny system zastosowano w badaniach zwierciadeł i wielowarstwowych siatek dyfrakcyjnych opisanych w pracy [CHK1998]. Badane próbki mogły być precyzyjnie pozycjonowane na obrotowym stole sterowanym silnikiem krokowym. Analizowano zwierciadła Ni/C z nałożonymi techniką odparowania 40 warstwami o współczynniku odbicia wynoszącym 31,5% oraz zwierciadła Co/C z 80 warstwami. Pomiary dokonano przy długościach fali  $\lambda = 44,7 \text{ \AA}$  i  $82,1 \text{ \AA}$ . Natomiast charakterystykę nierówności powierzchni wielowarstwowych pokryć polimerowych do zastosowań graficznych przedstawiono w pracy [LAR2001]. Badania porównawcze dotyczyły wyznaczenia korelacji w pomiarach nierówności powierzchni wykonanych metodą optyczną i stykową na próbkach przygotowanych z substratu politereftalanu etylenu (PET), na które dodatkowo nałożono warstwę ochronną (kulki polimerowe o średnicy od 1 do  $3 \mu\text{m}$  zatopione w emulsji żelatynowej). Pomiary natężenia światła odbitego realizowano za pomocą reflektometru RB-3 firmy Dr Bruno Lange GmbH Berlin Industriemeßtechnik<sup>29</sup>. Źródłem światła była lampa halogenowa, emitująca światło o długości fali  $\lambda = 589 \text{ nm}$ , rzutowane pod kątem padania  $20^\circ$ ,  $60^\circ$  i  $85^\circ$ . Reflektometr do porównań wcznych pomiarów nierówności powierzchni skonstruowano i zbudowano również w Katedrze Wytrzymałości i Technologii Maszyn, Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie przez zespół A. Tyki. Urządzenie opisane w pracach [TYK1997], [TYK2004] pozwalało na wyznaczenie refleksyjnych charakterystyk badanej powierzchni w różnych konfiguracjach pomiarowych (również jako skaterometr). Zbudowane było ze źródła światła w postaci lasera emitującego w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali  $\lambda = 715 \text{ nm}$

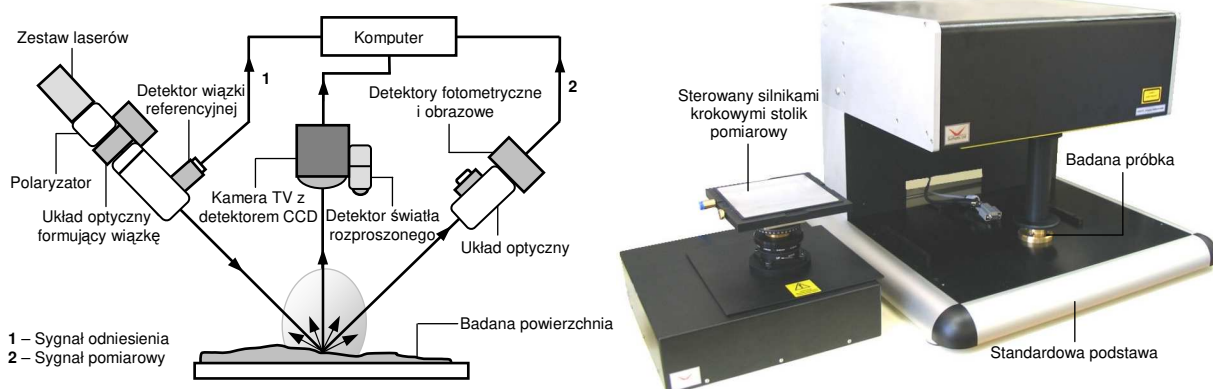
<sup>29</sup> Dr Bruno Lange GmbH Berlin Industriemeßtechnik, Willstätterstraße 11, 40549 Düsseldorf, Germany. <http://www.drlange.de>

i lunety fotometrycznej zawierającej fotodiodeę pomiarową. Układ pozwalał na równoczesną zmianę kątów padania oraz odbicia, przy zachowaniu ich jednakowych wartości. Dane pomiarowe przesyłane były z urządzenia do komputera, w którym za pomocą odpowiedniego oprogramowania możliwe było wyznaczenie wartości parametru powierzchni  $\sigma$ , skorelowanego z parametrem chropowatości  $Rq$  mierzonym metoda profilometryczną. Na rysunku 14 (□34) pokazano schemat reflektometru oraz wygląd ogólny urządzenia.



Rys. 14. Reflektometr do oceny struktury geometrycznej powierzchni: a) schemat reflektometru, b) wygląd ogólny urządzenia  
Fig. 14. Reflectometer for assessment of geometrical structure of surface: a) schematic diagram, b) general view of reflectometer

Jednym z niewielu urządzeń produkowanych seryjnie, przeznaczonych do kontroli nierówności powierzchni za pomocą metody reflektometrycznej, jest reflektometr obrazujący SIRS 75 brytyjskiej firmy Surfoptic Ltd<sup>30</sup>. Jest to nowoczesne, skomputeryzowane urządzenie z możliwością obrazowania wyników prowadzonych pomiarów. Głównym zastosowaniem reflektometru są pomiary połysku oraz złożone analizy mikro- i makrogeometrii elementów wykonanych z takich materiałów jak ceramika, tworzywa sztuczne oraz elementy lakierowane i pokrywane różnymi warstwami. W pomiarach stosowane jest światło laserowe o dwóch długościach fali –  $\lambda = 635$  nm i  $\lambda = 670$  nm, rzutowane na badaną powierzchnię pod kątem padania  $75^\circ$ . Oceniane powierzchnie mogą być mierzone w różnych miejscach. W tym celu wykorzystywany jest przesuwany stolik pomiarowy o zakresie przesuwu 100 mm. Rozdzielczość pozycjonowania w tym trybie wynosi 0,25 mm, natomiast czas jednego pomiaru 0,7 s. Schemat reflektometru oraz wygląd ogólny urządzenia przedstawiono na rysunku 15 (□34).



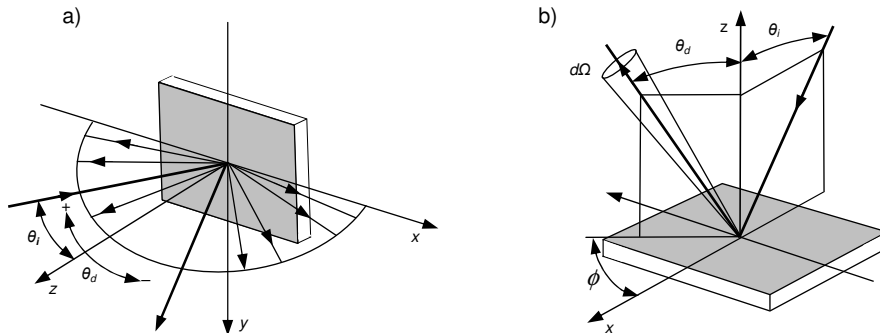
Rys. 15. Reflektometr obrazujący SIRS 75 firmy Surfoptic Ltd.: a) schemat reflektometru, b) wygląd ogólny urządzenia  
Fig. 15. Imaging reflectometer SIRS 75 produced by Surfoptic Ltd.: a) schematic diagram, b) general view of reflectometer

Pomimo tego, iż pomiary natężenia światła odbitego zwierciadlanie pozwalają ocenić odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni w zakresie od około 5 nm do 300 nm, a także inne, dodatkowe parametry nierówności, metoda ta jest raczej rzadko stosowana. Powodem tego jest konieczność użycia podczas pomiarów powierzchni wzorcowych. Powierzchnie wzorcowe wymagają bardzo starannej obróbki i powinny charakteryzować się takimi samymi właściwościami fizycznymi jak powierzchnie badane. W wielu przypadkach uzyskanie takich powierzchni jest trudne.

<sup>30</sup> Surfoptic Ltd., Pentre House, Brilley, Whitney-on-Wye, Herefordshire HR3 6JF, UK. <http://www.surfoptic.com>

### 2.2.2.2. Metody różniczkowe (goniofotometryczne)

Metody różniczkowe zwane także goniofotometrycznymi, oznaczane symbolem ARS (ang. *Angle-Resolved Scattering*) [JAC1992] lub DS (ang. *Differential Scattering*) pozwalają na ocenę nierówności powierzchni na podstawie pomiarów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego [ŁUK1991-2]. Rozkład ten, przy odpowiednim oświetleniu niektórych powierzchni, można mierzyć w wybranej płaszczyźnie, np. w płaszczyźnie padania, co pokazano na rysunku 16a (□35). W tym przypadku natężenie

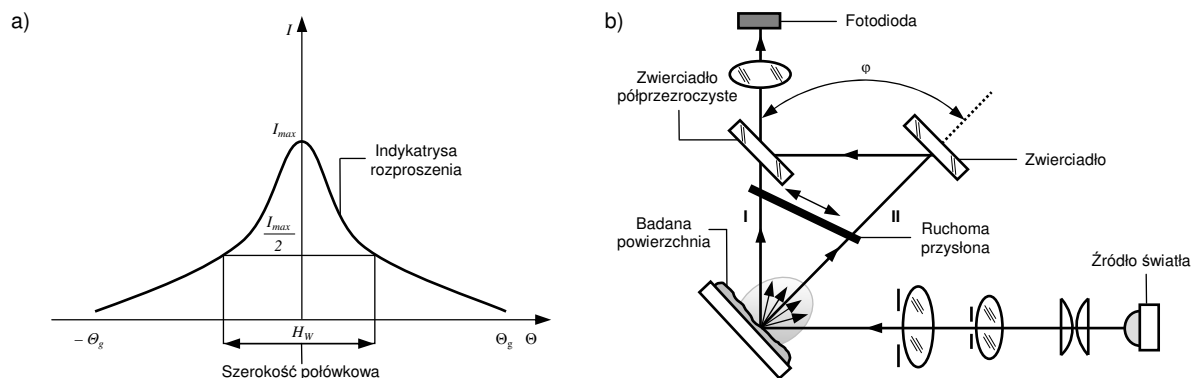


Rys. 16. Geometria określająca kątowny rozkład natężenia światła rozproszonego: a) w płaszczyźnie padania, b) w przestrzeni  
 Fig. 16. Geometry for determine of the angular distribution of scattered light: a) in incident plane, b) in three dimensional space

światła rozproszonego będzie funkcją jednej zmiennej, której rolę spełnia na ogół kąt rozproszenia  $\theta_d$ . Graficzny obraz tej funkcji nazywa się krzywą kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego lub indyktryśą rozproszenia [KAR1995]. Na podstawie tej krzywej można określić jeden z parametrów fotometrycznych wykorzystywanych do oceny nierówności powierzchni – szerokość połówkową (ang. *Half-Width*) [THW1982]. Jest to kąt, dla którego natężenie światła rozproszonego wynosi połowę wartości maksymalnej. Parametr ten zaproponował P. M. Leonardo [LON1975]. Zestawienie stanowiska pomiarowego, pozwoliło na obserwacje na ekranie oscyloskopu dwóch jednakowych indyktryś rozproszenia przesuniętych między sobą o kąt  $\varphi$ . Mierzony tą metodą połysk  $\xi$ , będący stosunkiem natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie do całkowitego natężenia światła padającego na tę powierzchnię, powiązany został z szerokością połówkową  $H_w$ . Stosunek ten można wyliczyć z poniższej zależności (7):

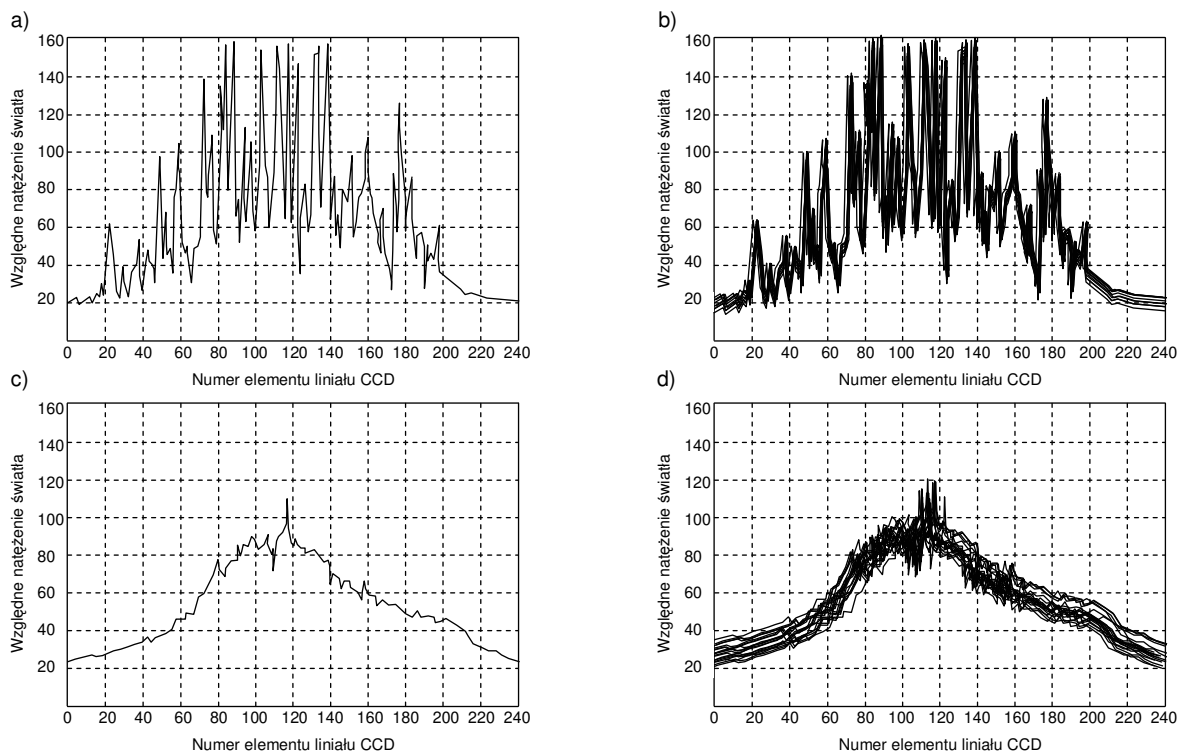
$$\xi = \frac{\varphi}{H_w}, \quad (7)$$

Na rysunku 17 (□35) pokazano sposób pomiaru nierówności zaproponowany przez P. M. Leonardo.



Rys. 17. Metoda pomiaru nierówności powierzchni wg P. M. Leonardo [LON1975]: a) określenie szerokości połówkowej  $H_w$  indyktryś rozproszenia, b) schemat stanowiska pomiarowego  
 Fig. 17. Measurements of surface roughness by P. M. Leonardo method [LON1975]: a) half-width  $H_w$  of angular distribution of the scattered light, b) schematic diagram of experimental setup

Postać indyktryś rozproszenia zależy od stopnia spójności światła oświetlającego powierzchnię. W przypadku światła o niskim stopniu spójności indyktryś rozproszenia jest gładka. Światło wysoce spójne, jak wynika to z pracy [KOC2001], powoduje znaczne lokalne zmiany natężenia światła rozproszonego, co pokazano na rysunku 18a i 18b (□36). Powodem tego są tzw. szumy koherentne. Jeśli powierzchnia porusza się podczas pomiaru, szumy te ulegają znacznemu zmniejszeniu w wyniku uśredniania, co pokazano na rysunku 18c i 18d (□36).



Rys. 18. Indykatrysy rozproszenia uzyskane dla szlifowanej powierzchni obwodowej wałka ( $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ ), wykonanego ze stali 40H: a) indykatrysa rozproszenia otrzymana z pojedynczego pomiaru w warunkach statycznych, b) indykatrysy rozproszenia otrzymane w wybranym przekroju z dziesięciu różnych miejsc w warunkach statycznych, c) indykatrysa rozproszenia otrzymana z pojedynczego pomiaru podczas obrotu wałka (prędkość liniowa powierzchni 300 mm/s), d) indykatrysy otrzymane z dziesięciu pomiarów podczas obrotu wałka (prędkość liniowa powierzchni 300 mm/s)

Fig. 18. Angular distributions of the scattered light obtained from ground ( $Ra = 0,4 \mu\text{m}$ ) shaft made from steel 40H: a) angular distribution of the scattered light obtained from single place for stationary conditions, b) angular distributions of the scattered light obtained from ten different places in one cross-section for stationary conditions, c) angular distribution of the scattered light obtained from single place for revolution of shaft (circumference speed 300 mm/s), d) angular distributions of the scattered light obtained from ten different places in one cross-section for revolution of shaft (circumference speed 300 mm/s)

Rozkład natężenia światła rozproszonego można wyznaczać także w przestrzeni. W tym przypadku, dla danego kąta padania  $\theta_i$  będzie on funkcją dwóch zmiennych: biegunowego kąta rozproszenia  $\theta_d$  i azymutalnego kąta rozproszenia  $\phi$  – co pokazano na rysunku 16b (35). Funkcja, opisująca przestrzenny rozkład natężenia światła rozproszonego, oznaczana jest symbolem BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) [DIG2003] lub BSDF<sup>31</sup> (*Bidirectional Scatter Distribution Function*) [STO1990]. F. E. Nicodemus w pracy [NIC1970] zdefiniował ją jako stosunek luminancji energetycznej, w określonym kierunku rozproszenia, do mocy promienistej padającej na jednostkę powierzchni. Luminancję energetyczną  $L_e$ , w określonym kierunku rozproszenia, wyznacza się wewnątrz elementarnego kąta bryłowego  $d\Omega$ . Funkcję BRDF wyraża zależność (8):

$$BRDF = \frac{L_e}{P_i / S_0} = \frac{dP / d\Omega}{P_i \cos \theta_d} = \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \cos(\theta_i) \cos(\theta_d) QS(f_x, f_y), \quad (8)$$

przy czym

$$L_e = \frac{dP}{S_0 d\Omega \cos \theta_d}, \quad (9)$$

gdzie;  $L_e$  – luminancja energetyczna powierzchni oświetlonej, w określonym kierunku rozproszenia,  $S_0$  – pole powierzchni oświetlonej,  $dP$  – moc promienista rozproszona wewnątrz elementarnego kąta bryłowego,  $d\Omega$  – elementarny kąt bryłowy,  $P_i$  – moc promienista padająca na powierzchnię,  $\lambda$  – długość fali światła,  $\theta_i$  – kąt padania,  $\theta_d$  – kąt rozproszenia,  $Q$  – bezwymiarowy czynnik, zależny od azymutalnego kąta rozproszenia  $\phi$ , uwzględniający także stan polaryzacji światła padającego i optyczne właściwości powierzchni odbijającej,  $S(f_x, f_y)$  – dwuwymiarowa funkcja gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni odbijającej,  $f_x, f_y$  – częstości przestrzenne nierówności powierzchni.

<sup>31</sup> Funkcja BSDF stanowi punkt wyjścia do tworzenia całej rodziny funkcji oznaczonych jako BxDF, takich jak m.in. BSSRDF (*Bidirectional Surface Scattering Reflectance Distribution Function*) [RAU2004], [JEN2002], BTDF (*Bidirectional Transmittance Distribution Function*) [AND2006], [JON2007], BTF (*Bidirectional Texture Function*) [DAN2001]), opisujących w szczególny sposób poszczególne składowe światła rozproszonego i wzajemne ich relacje.

Zależność (8) wynika z wektorowej teorii rozpraszania fal na powierzchniach nierównych, nazywanej także wektorową teorią zaburzeń Rayleigha-Rice'a (ang. *Rayleigh-Rice Perturbation Theory*) [STO1990], [STO2007]. Do wyznaczania rozkładu przestrzennego opisanego funkcją BRDF stosowane są często różne układy pomiarowe [KAA2000], [KER2002]. Pomimo tego, iż BRDF jest funkcją dwóch zmiennych, najczęściej przedstawia się ją w postaci funkcji zależnej tylko od biegunowego kąta rozproszenia  $\theta_s$ , dla ustalonych wartości azymutalnego kąta rozproszenia  $\phi$ . Do wyznaczania tej i innych funkcji wykorzystuje się skaterometrię. Urządzenia te można podzielić na dwie grupy w zależności od sposobu pomiaru. Pierwsza grupa urządzeń wykorzystuje skanowanie przestrzeni, w którą zostało skierowane światło odbite. Proces realizowany jest za pomocą obrotu lub przesuwu detektora fotoelektrycznego [KIM1990], [KNO1994]. Podczas skanowania mierzone są kąty w kolejnych położeniach detektora oraz natężenie światła rozproszonego w danym kierunku. Taki sposób pomiaru wykorzystywany jest m.in. w skomputeryzowanym skaterometrze produkowanym przez firmę Schmitt Measurement System, Inc.<sup>32</sup>, oznaczonym symbolem CASI (ang. *Complete Angle Scatter Instrument*). Jest to nowoczesny, wielofunkcyjny system przeznaczony do pomiaru odchylenia standardowego i gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni [RON1998]. Pomiar może być realizowany dla szerokiego spektrum długości fal światła  $\lambda$  z zakresu od 0,325  $\mu\text{m}$  do 10,6  $\mu\text{m}$ , przy czym wiązka światła może być skierowana na badaną powierzchnię pod kątem od 0° do 85°. W skład systemu pomiarowego wchodzi – oprócz skaterometru – stolik pozwalający na zamocowanie badanej próbki w osiach  $x$  i  $y$  oraz komputer z oprogramowaniem. Niestety wadą takiego rozwiązania jest długi czas pomiaru oraz ograniczony zakres mierzonych kątów rozproszenia. W drugiej grupie urządzeń, stosuje się bardziej zaawansowane układy oparte na zwierciadłach [MAI1991], [MAT1998], [RIN2002]. Zaletą takiego rozwiązania jest zwiększenie zakresu pomiaru kątów rozproszenia oraz znacznie krótszy czas pomiaru. Autorzy pracy [ROS2003] przedstawili projekt skaterometru z elipsoidalnym zwierciadłem do kumulowania światła rozproszonego z powierzchni chropowatej i ze wspomagającym systemem optycznym do skupiania światła w płaszczyźnie obrazowania detektora CCD.

Opisane dotychczas metody różniczkowe przeznaczone są do oceny bardzo małych nierówności powierzchni. Stosuje się je m.in. w procesach kontroli powierzchni elementów optycznych [WAN1997], [HER2005], [DUP2007] i krzemowych podłożu układów scalonych [TAY2003] itp. Zaletami tych metod są przede wszystkim bezstykowość, wysoka czułość oraz krótki czas pomiaru. Zakres wysokości nierówności mierzonych tymi metodami, z wykorzystaniem promieniowania widzialnego, zawiera się – dla średniego kwadratowego odchylenia wysokości nierówności powierzchni  $\sigma$  – od 0,1 nm do 10 nm. Jeżeli stosowane jest promieniowanie podczerwone o długość fali  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ , to zakres ten wynosi od 2 nm do około 200 nm i może być zwiększony [THW1982], [BJU1997]. W Stanach Zjednoczonych opracowano normę, określającą procedurę i warunki pomiarów nierówności powierzchni metodami różniczkowymi wprowadzoną przez ASTM (ang. *American Society for Testing and Materials*) [N05/2387-05], [JAN1989].

Idea metod różniczkowych – polegająca na ocenie nierówności powierzchni na podstawie pomiaru i analizy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego – wykorzystana została także do pomiarów powierzchni o większych nierównościach. Ten szczególny rodzaj metod różniczkowych nie jest oparty na falowym modelu światła. Opiera się on na przybliżeniu promieniowym oraz na zasadach optyki geometrycznej. W tym przypadku nierówna powierzchnia przedmiotu traktowana jest jako zbiór odpowiednio zorientowanych, płaskich miniaturowych zwierciadeł. Taki model powierzchni określany jest akronimem MFM (ang. *Mirror Facet Model*) [BRO1986-2]. Indykatrysa rozproszenia może być interpretowana, w tym modelu, jako wykres proporcjonalny do gęstości prawdopodobieństwa kątów nachylenia mikrozwierciadeł tworzących powierzchnię [KAR1977], [ŁUK1989-1]. Nierówności powierzchni ocenia się na podstawie wybranych parametrów rozkładu natężenia światła rozproszonego, takich jak szerokość połówkowa indykatrysy rozproszenia, wariancja kątów rozproszenia itp. [KOC1991]. Rozkład natężenia światła rozproszonego wyznaczany jest na ogół za pomocą różnego rodzaju detektorów fotoelektrycznych typu CCD lub CMOS wykonanych w postaci matryc lub układów liniowych (tzw. fotolinijek). Detektory te stanowią element kamer TV połączonych z komputerem [ŁUK1989-2], [ŁUK1997], [WAN2000]. Zwiększa to szybkość pomiaru i nie wymaga ruchu detektora względem powierzchni mierzonej. Takie metody znajdują zastosowanie w pomiarach aktywnych nierówności powierzchni części maszyn, np. w procesach szlifowania, polerowania, precyzyjnego toczenia [WAN2003] itp. Głównym zadaniem tych metod jest szybkie stwierdzenie, czy powierzchnia została prawidłowo obrobiona. Często kontrola dokonywana jest podczas ruchu przedmiotu, w czasie obróbki lub tuż po jej zakończeniu. Zakres wysokości nierówności mierzonych tymi metodami wynosi od 10 nm do około 1000 nm [BJU1997], [BAU1998].

<sup>32</sup> Schmitt Measurement System, Inc. (A Division of Schmitt Industries, Inc.), 2765 NW Nicolai St. Portland, Oregon 97210, USA. <http://www.schmitt-ind.com/>

Ostatnie z wymienionych metod różniczkowych szerzej przedstawiono m.in. w pracach R. Brodmanna, O. Gerstorfera, G. Thurna, G. Heubnera, N. Raua, W. Staigera, G. Gasta i H. Paisdziora [BRO1983], [BRO1984-1], [BRO1984-3], [BRO1985], [BRO1986-1], [BRO1986-2], [BRO1986-3]. Na podstawie badań prowadzonych przez wymienionych autorów, niemiecka firma Rodenstock<sup>33</sup> opracowała dwa systemy pomiarowe, oznaczone symbolami RM 400 i RM 500, przeznaczone do kontroli nierówności powierzchni. System RM 400 pozwalał na pomiar parametru  $Ra$  w zakresie od 0,005  $\mu\text{m}$  do 2  $\mu\text{m}$ . System RM 500 spełniał podobne funkcje, dodatkowo jednak pozwalał wyznaczać błędy kształtu i falistości powierzchni. Głowica optyczna obu systemów wykorzystywała diodę elektroluminescencyjną, liniowy detektor CCD, kolimator, dzielnik wiązki i obiektyw. Na podstawie rozkładu światła rozproszonego, system RM 400 wyznaczał parametr  $S_N$ , będący unormowaną wariancją kątów rozproszenia<sup>34</sup>. Jest on proporcjonalny do kwadratu średniego kwadratowego pochylenia profilu powierzchni  $\Delta q$  [BRO1986-2], określonego zależnością (10):

$$\Delta q = \sqrt{\frac{l}{l} \int_0^l \left[ \frac{dy}{dx} \right]^2 dx}, \quad (10)$$

gdzie:  $l$  – długość odcinka elementarnego profilu powierzchni,  $dy/dx$  – pochodna profilu.

Dla znanego sposobu obróbki powierzchni, wartości  $\Delta q$  mogą być skorelowane z wartościami parametru  $Ra$  [BRO1984-2]. Parametr  $S_N$  wyznaczany jest zgodnie z równaniem (11):

$$S_N = C_N \sum_{i=1}^n (i - \bar{i})^2 p_i, \quad (11)$$

przy czym

$$\bar{i} = \sum_{i=1}^n i p_i, \quad (12)$$

oraz

$$p_i = \frac{I_i}{I_c}, \quad (13)$$

zaś

$$I_c = \sum_{i=1}^n I_i, \quad (14)$$

gdzie:  $C_N$  – współczynnik normujący,  $n$  – liczba wszystkich elementów światłoczułych liniału CCD,  $i$  – numer kolejnego elementu światłoczułego,  $\bar{i}$  – wartość oczekiwana kątowego rozkładu natężenia światła rozproszonego, odpowiadająca wartości średniej arytmetycznej kątów rozproszenia,  $p_i$  – unormowana wartość natężenia światła rozproszonego zmierzonego  $i$ -tym elementem liniału CCD,  $I_i$  – natężenie światła rozproszonego zmierzone  $i$ -tym elementem liniału,  $I_c$  – suma natężeń zmierzonych poszczególnymi elementami liniału CCD,  $I_{\max}$  – maksymalne natężenie światła zmierzone liniałem.

Badania natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie prowadzi się za pomocą różnych przyrządów i systemów pomiarowych wytwarzanych seryjnie lub stanowiących pojedyncze egzemplarze służące do badań. Amerykańska firma Optical Dimensions, L.L.C.<sup>35</sup>, produkuje przyrząd o nazwie Lasercheck, przeznaczony do szybkiego, bezstykowego pomiaru nierówności powierzchni. Urządzenie opisane w pracy [VAL2000] może być zastosowane w przemyśle do aktywnej, zautomatyzowanej kontroli np. przesuwających się arkuszy blach. System wykonano w dwóch wersjach: przenośnej i stacjonarnej. Wersja stacjonarna umożliwia stały, aktywny pomiar nierówności z częstotliwością dziesięciu razy na sekundę za pomocą wiązki światła laserowego o długości fali  $\lambda = 660 \text{ nm}$  rzutowanej na badaną powierzchnię pod kątem padania  $75^\circ$ . Światło rozproszone mierzone jest dwójako – liniałem detektorów oraz dwoma oddzielnymi detektorami. Wynik pomiaru podawany jest w  $\mu\text{m}$  (dla parametru  $Ra$ ). Zakres pomiarowy urządzenia wynosi od 12 nm do 2000 nm. Natomiast w pracy [FON2001] wykorzystano metodę skaterometryczną do oceny powierzchni wałów korbowych. Zastosowano urządzenie, będące zmodyfikowaną wersją systemu przedstawionego wcześniej w pracy [FON2000]. Do rejestracji światła rozproszonego zastosowano układ 16 fotodiod. Wyniki pomiarów otrzymano porównując światło rozproszone dyfuzyjnie i zwierciadlanie przez powierzchnie. Urządzenie testowane w fabryce Renault może być wykorzystywane jedynie w pomiarach powierzchni o parametrze  $Ra$  mniejszym od 4  $\mu\text{m}$ .

<sup>33</sup> Optische Werke G. Rodenstock, Postf. 140440, 8000 München 5, Germany.

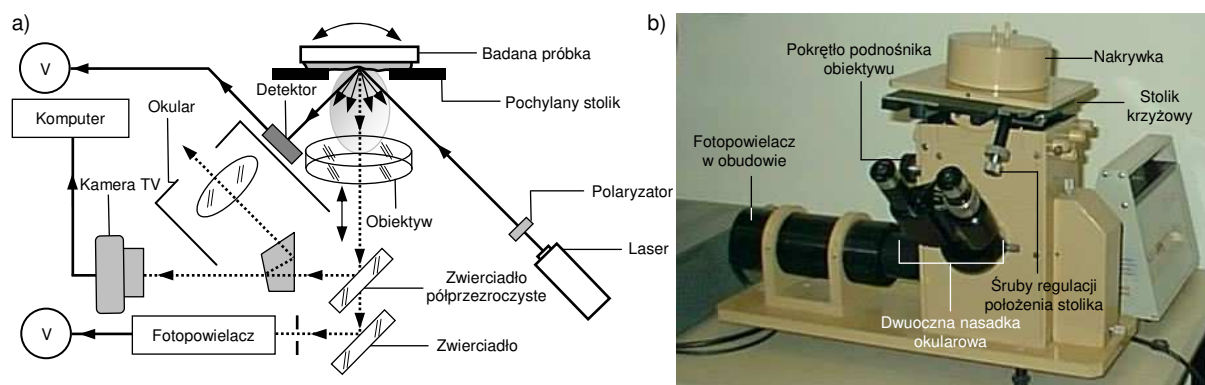
<sup>34</sup> Parametr  $S_N$  określany jest czasami jako tzw. "optyczny wskaźnik chropowatości" [YAN1986].

<sup>35</sup> Optical Dimensions, L.L.C., 25422 Trabuco Road, #105-435, Lake Forest, California 92639-2797, USA. <http://www.opticaldimensions.com>

W Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej z inicjatywy T. Karpińskiego prace badawcze związane z oceną nierówności powierzchni na podstawie kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego prowadzone były od połowy lat 70-tych XX wieku. W początkowym okresie prowadzono badania korzystając m.in. ze spektrofotometru SPEKOL z układem  $R_{\alpha/45-\alpha}$ , a także skaterometru-skateroskopu. Ostatnie z wymienionych urządzeń służyło do pomiaru i obserwacji przestrzennego rozkładu światła rozproszonego [CHA1993-1], [CHA1993-2]. Urządzenie<sup>36</sup> to zostało opracowane w Instytucie Optyki Stosowanej w Warszawie pod kierunkiem M. Pluty. Głównym jego przeznaczeniem była ocena powierzchni optycznych o dużej gładkości. Badania zmodyfikowanej wersji tego przyrządu [CHA1996] opracowanej przez W. Chabrosa z Instytutu Obróbki Skrawaniem dla potrzeb Katedry Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej wykazały, iż przyrząd ten może także służyć do oceny powierzchni części maszyn [KAR1998]. Oba przyrządy pokazano na rysunkach 19 (□39) i 20 (□39).



Rys. 19. Spektrofotometr SPEKOL z układem  $R_{\alpha/45-\alpha}$  przeznaczony do badań kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego  
Fig. 19. Spectrophotometer SPEKOL with  $R_{\alpha/45-\alpha}$  system applied for assessment of angular distribution of scattered light intensity



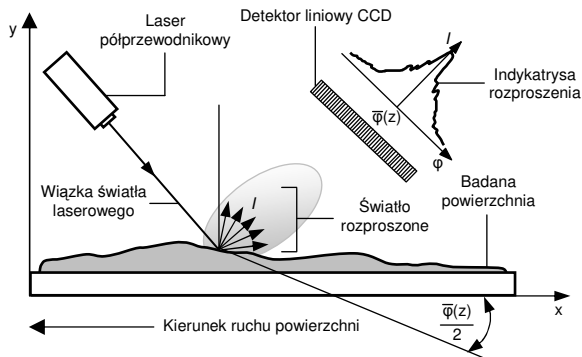
Rys. 20. Skaterometr-skateroskop: a) schemat urządzenia, b) urządzenie z zamocowaną dwuoczną nasadką okularową  
Fig. 20. Scatteometer-scatteroscope: a) schematic diagram, b) scatterometer-scatteroscope with double eyepiece

W latach 90-tych XX wieku w Politechnice Koszalińskiej podjęto badania związane m.in. z oceną nierówności powierzchni znajdujących się w ruchu. W wyniku prowadzonych prac zrealizowanych przez T. Kochaniewicza, P. Kochaniewicza, Cz. Łukianowicza i T. Łukianowicz powstał optoelektroniczny system do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu [KOC1991], [ŁUK1994], [KOC2001]. Głównym elementem systemu była optyczna głowica pomiarowa połączona z komputerem, spełniająca podobne funkcje, jak urządzenia RM 400 i RM 500 firmy Rodenstock. System przeznaczony był do oceny nierówności powierzchni oraz pomiaru kształtu i falistości powierzchni.

Zasada działania systemu, pokazana na rysunku 21 (□40), polega na skierowaniu na powierzchnię badanego przedmiotu wiązki światła z lasera półprzewodnikowego umieszczonego w optycznej głowicy pomiarowej. Wiązka światła padająca na powierzchnię, tworzy plamkę o średnicy 1 mm. Część wiązki zostaje odbita, a część uległa rozproszeniu. Oceniając powierzchnię wykorzystano fakt, iż zakres kątów rozproszenia światła zależny był od wielkości nierówności badanej powierzchni. Ocena powierzchni rozpraszającej dokonywana była na podstawie zmierzonych wartości kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. W metodzie tej powierzchnię chropowatą rozpatruje się

<sup>36</sup> Obecnie Instytut Optyki Stosowanej w Warszawie produkuje ten skaterometr w nieco innej zmodyfikowanej wersji pod oznaczeniem SCAT-1.

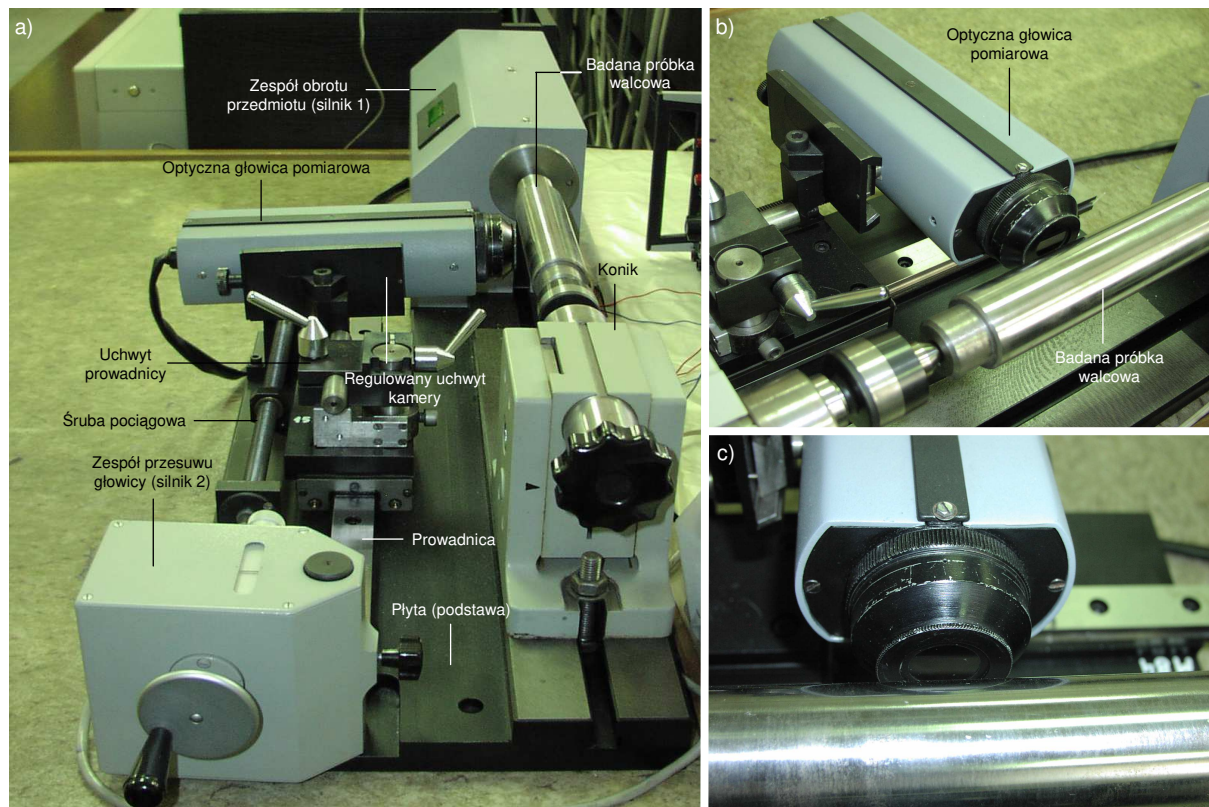
jako zbiór odpowiednio zorientowanych mikrozwierciadeł. Przyjmując takie uproszczenie można wykazać, że kątowy rozkład natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię odpowiada rozkładowi prawdopodobieństwa kątów nachylenia zboczy nierówności. Indykatrysa rozproszenia może być interpretowana, w tym modelu, jako wykres proporcjonalny do gęstości prawdopodobieństwa kątów nachylenia mikrozwierciadeł tworzących powierzchnię [ŁUK1989-1].



Rys. 21. Schemat pokazujący sposób bezstykowej oceny mikronierówności przedmiotów będących w ruchu  
Fig. 21. Schematic diagram showing a principle of non-contact measurement of surface microroughness object in movement

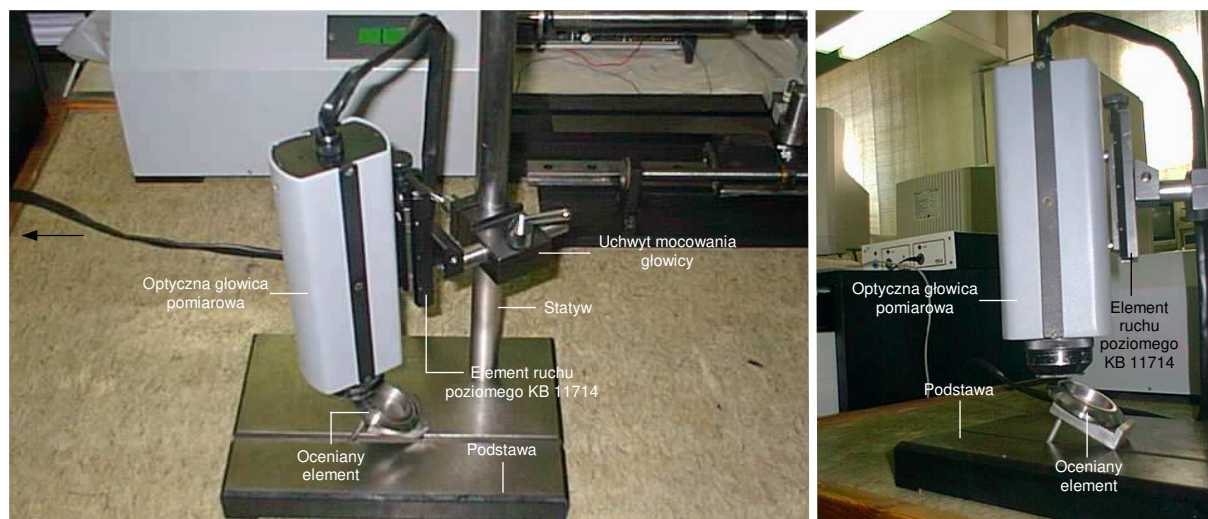
W systemie pomiarowym skonstruowanym i wykonanym w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, podobnie jak w systemie RM 400 niemieckiej firmy Rodenstock, ocena nierówności powierzchni dokonywana była na podstawie parametru  $S_N$ , określonego równaniem (11). Parametr ten dla konkretnego sposobu obróbki powierzchni mógł być skorelowany z parametrem  $Ra$  [ŁUK1991-2], [KAR1995]. Urządzenie pozwalało na ocenę nierówności powierzchni części maszyn, w zakresie parametru  $Ra$  od  $0,01 \mu\text{m}$  do  $1 \mu\text{m}$ . Na rysunku 22 (□40) przedstawiono ogólny widok systemu do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni szlifowanych wałków stalowych będących w ruchu. Natomiast na rysunku 23 (□41) pokazano widok optycznej głowicy pomiarowej podczas

pomiarów nierówności powierzchni zaworów silnika spalinowego prowadzonych w stanie statycznym.



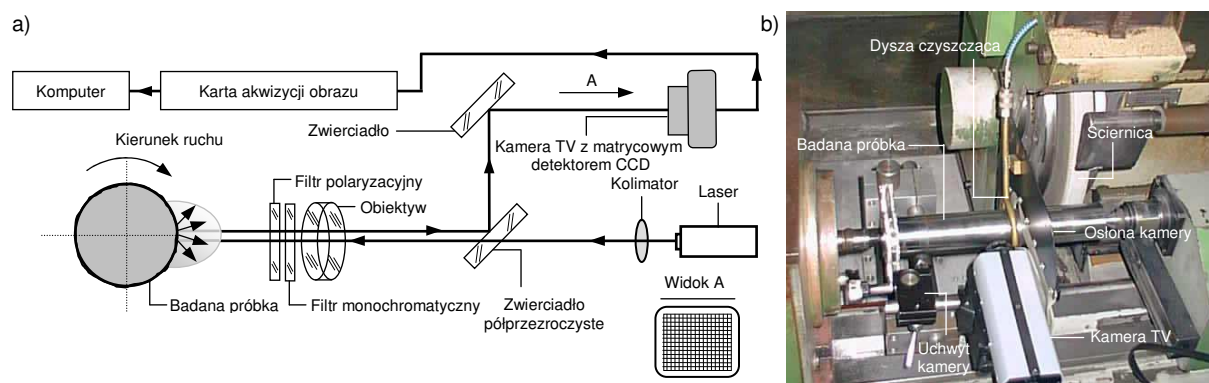
Rys. 22. Optoelektroniczny system pomiarowy do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu: a) widok ogólny, b) optyczna głowica pomiarowa podczas wykonywania pomiarów, c) zbliżenie optycznej głowicy pomiarowej  
Fig. 22. Optoelectronic measurement system for non-contact assessment of surface microroughness in movement: a) general view, b) optical head during measurements, c) near view of optical head





Rys. 23. Optyczna głowica pomiarowa podczas pomiarów nierówności powierzchni w stanie statycznym  
 Fig. 23. Optical head during measurements of surface roughness in static conditions

System poddawano z czasem licznym modyfikacjom. W celu zbadania możliwości zastosowania kamery TV z detektorem matrycowym CCD do oceny światła rozproszonego odpowiednio zmodyfikowano system, zastępując liniowy detektor CCD, kamerą TV sprzężoną za pomocą karty TV z komputerem. Za pomocą tak zestawionego systemu pomiarowego [ŁUK2001] badano przestrzenne rozkłady natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie płaskie i walcowe [ŁUK2000], w warunkach statycznych i podczas ruchu tych powierzchni. Na rysunku 24 (41) pokazano niektóre modyfikacje omawianego systemu pomiarowego.



Rys. 24. Modyfikacje optoelektronicznego systemu pomiarowego do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu: a) modyfikacja systemu polegająca na zainstalowaniu kamery TV zawierającej matrycowy detektor CCD, b) system zmodyfikowany w celu aktywnej kontroli nierówności powierzchni podczas trwania procesu obróbkowego (szlifowania)  
 Fig. 24. The modifications of optoelectronic measurement system for non-contact assessment of surface microroughness in movement: a) modification using TV camera with CCD matrix detector, b) modification for in-process control of surface roughness during machining (grinding)

Kolejną modyfikacją było przystosowanie systemu do aktywnych pomiarów SGP w trakcie procesu szlifowania [KOC2001], [KAR2002]. Wykonano odpowiednie stanowisko pomiarowe, pozwalające na pomiar, bez zakłóceń spowodowanych płynem chłodzącym i produktami szlifowania. W tym celu wyposażono układ w specjalną dyszę czyszczącą i osłonę głowicy optycznej. Badaniom poddano powierzchnie walcowe wykonane ze stali. Po zakończeniu obróbki powierzchnie poddano dodatkowo pomiarom stykowym za pomocą profilometru stykowego. Inne badania prowadzone za pomocą opisanego systemu przedstawiono w m.in. w pracach: [KOC2001], [ŁUK2004]. W pracy [ŁUK2004] opisano badania porównawcze prowadzone na próbkach walcowych o powierzchniach mikrowygładzanych taśmami mikrościernymi IMFF30A/O i ILF50A/O firmy 3M<sup>37</sup>. Obróbka prowadzona była za pomocą tokarki uniwersalnej typu CU-500 z zamontowaną laboratoryjną głowicą do mikrowygładzania GM-1, zaprojektowaną i wykonaną w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej. Uzyskane wyniki badań odniesiono do wyników uzyskanych metoda stykową.

<sup>37</sup> 3M (Minnesota, Mining & Manufacturing Company), St. Paul, MN 55144-1000, USA. <http://www.3m.com>

### 2.3. Techniki przetwarzania i analizy obrazu stosowane w aktywnej kontroli wymiaru i struktury geometrycznej powierzchni

W poszukiwaniu szybszych, dokładniejszych i bardziej efektywnych metod pomiaru parametrów SGP zwrócono uwagę na obrazowanie cyfrowe oraz techniki przetwarzania i analizy obrazu. Postęp w obu tych dziedzinach był możliwy dzięki nowoczesnym technologiom półprzewodnikowych detektorów fotoelektrycznych oraz rozwojowi techniki komputerowej.

Rewolucja w dziedzinie detektorów fotoelektrycznych rozpoczęła się w 1969 roku, gdy inżynierowie z Bell Telephone Laboratories – W. S. Boyle i G. E. Smith – opracowali pierwszy liniowy półprzewodnikowy detektor fotoelektryczny ze sprzężeniem ładunkowym – CCD (*ang. Charge Coupled Devices*) [BOY1970]. Później powstały bardziej nowoczesne odmiany tego typu przyrządów takiej jak: matrycowe fotoelektryczne układy CCD oraz CMOS (*ang. Complementary Metal Oxide Semiconductor*) itp. Techniki obrazowe rozwijano już w latach 70-tych i 80-tych XX wieku, przy czym większość zastosowań dotyczyła głównie obronności i wojska. W latach 90-tych XX wieku, techniki te upowszechniono, za sprawą wprowadzenia na rynek pierwszych, ogólnie dostępnych urządzeń obrazujących wyposażonych w detektory CCD [BIE2001].

Niemale znaczenie w rozwoju technik obrazowych miały komputery. Postęp w tej dziedzinie nastąpił w latach 70-tych i 80-tych XX wieku, w dwóch kierunkach – sprzętowym i programowym. Kierunek sprzętowy wiązał się z wprowadzeniem na rynek powszechnie dostępnych maszyn obliczeniowych w postaci komputerów osobistych o wzrastającej mocy obliczeniowej procesorów oraz zwiększających się możliwościach użytkowych. Kierunek programowy wiązał się natomiast z wyposażeniem komputerów w nowoczesne systemy operacyjne, takie jak m.in. MS Windows, MacOS, Linux. W oparciu o te platformy zaczęto rozwijać oprogramowanie do przetwarzania i analizy obrazu w postaci różnego rodzaju aplikacji o charakterze uniwersalnym i specjalistycznym.

Podstawy technik obrazowych szeroko opisano w licznych artykułach naukowych i pracach badawczych, poświęcono im także liczne opracowania książkowe. Ogólne podstawy przetwarzania i analizy obrazu przedstawiono m.in. w pracach J. C. Russa [RUS2002], [RUS2005], I. T. Younga, J. J. Gerbrandsa i L. J van Vlieta [YOU1998], R. C. Gonzalesa i R. E. Woodsa [GON2002], W. Kropatscha i H. Bischofa [KRO2001], oraz S. E. Umbaugh [UMB2005]. Z książek wydanych w Polsce należy wymienić prace R. Tadeusiewicza [TAD1991], [TAD1997], L. Wojnara [WOJ1994], [WOJ2002], J. Woźnickiego [WOZ1996] oraz Z. Wróbla i L. Koprowskiego [WRO2001], [WRO2004].

W badaniach SGP techniki obrazowe odgrywają znaczącą rolę. Wspomagają one istniejące metody pomiarowe zwiększając ich możliwości i efektywność oceny. Zintegrowane z systemami pomiarowymi układy obrazowania umożliwiają akwizycję statycznego lub ruchomego [REE2005], [SEZ1993] obrazu cyfrowego. Obraz ten może przedstawiać zarówno powierzchnię rzeczywistą badanego elementu lub, jak ma to np. miejsce w przypadku metod skaterometrycznych, obraz światła rozproszonego przez taką powierzchnię. Pozwala to na lepsze przedstawienie natury procesów obróbkowych, jak i na analizowanie cech SGP. Ocena zarejestrowanego obrazu dokonywana jest za pomocą odpowiedniego oprogramowania komputerowego. Pozwala ono na przetworzenie, a następnie analizę uzyskanych obrazów. Interpretacja otrzymanych wyników może posłużyć do wnioskowania o parametrach SGP. W niektórych przypadkach możliwa jest także korelacja parametrów obrazu z wybranymi parametrami SGP.

Ocena parametrów badanej powierzchni prowadzona jest z wykorzystaniem różnych technik przetwarzania i analizy obrazu. Do najbardziej popularnych i ogólnie stosowanych należą:

- przekształcenia obrazów (geometryczne, punktowe, operacje logiczne i arytmetyczne, korekcje obrazów),
- filtracja obrazów (filtry liniowe, nieliniowe, transformata Fouriera, transformata falkowa),
- pomiary i kontrola wielkości geometrycznych (pomiary długości i kątów),
- analiza statystyczna (wyznaczanie parametrów geometrycznych i fotometrycznych na podstawie oceny zbioru obiektów występujących w obrazie, zliczanie i sortowanie obiektów).

Techniki przetwarzania i analizy obrazu mogą być wykorzystane również do wspomaganie aktywnej kontroli parametrów SGP i wymiaru. Tego typu kontrola wymaga na ogół specjalnych metod, za pomocą których należy analizować zbiory wielu obrazów rejestrowanych podczas ruchu badanej powierzchni lub śledzić zmiany zachodzące na poruszającej się powierzchni. Do tych technik możemy zaliczyć m.in. metodę śledzenia obiektów oraz metodę nakładanie obrazów. Zostaną one nieco szerzej przedstawione w punktach 2.3.1 i 2.3.2.

### 2.3.1. Metoda śledzenia obiektów

Kontrola wymiaru lub odległości może odbywać się z wykorzystaniem jednej z metod przetwarzania obrazów ruchomych [BOV2000], [REE2005] – metody śledzenia obiektów<sup>38</sup> (ang. *Object Tracking*) [YIL2006]. Ogólnie polega ona na wyodrębnieniu w obrazie interesujących nas obiektów i śledzeniu ich ruchu. W przypadku kontroli wymiarów śledzonym obiektem może być plamka światła laserowego lub wzór optyczny rzutowany na ruchomą powierzchnię. Analiza ruchu obiektów opiera się na trzech podstawowych krokach, jakimi są:

- wykrycie interesujących nas obiektów ruchomych znajdujących się w obrazie,
- śledzenie obiektów i określanie wielkości charakteryzujących ich ruch (położenie, długość przebytej drogi, prędkość, przyspieszenie, itp.),
- analiza obiektów w celu rozpoznania ich zachowania.

Ogólnie proces śledzenia definiowany jest jako rekurencyjna procedura obliczania stopnia wiarygodności tego, że obiekt jest w stanie  $x_t$  w czasie  $t$ , na podstawie pomiarów dokonanych na zbiorze obrazów wejściowych  $Q = \{q_1, \dots, q_t\}$ . Celem śledzenia jest rekurencyjne szacowanie funkcji gęstości prawdopodobieństwa (15):

$$p(x_t | Q_t). \quad (15)$$

Jest ono realizowane w dwóch etapach, z których pierwszym jest predykcja (16)

$$p(x_t | Q_{t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | Q_{t-1}) dx_{t-1}, \quad (16)$$

a drugim aktualizacja (17)

$$p(x_t | Q_t) = \frac{p(q_t | x_t) p(x_t | Q_{t-1})}{p(q_t | Q_{t-1})}, \quad (17)$$

gdzie:  $p(q_t | x_t)$  jest prawdopodobieństwem obserwacji.

Przyjmując model Markowa pierwszego rzędu zakłada się, że (18)

$$p(x_t | X_{t-1}) = p(x_t | x_{t-1}), \quad (18)$$

gdzie:  $X_{t-1}$  jest zbiorem stanów aż do czasu  $t-1$ .

Z matematycznego punktu widzenia, śledzenie obiektów może być realizowane za pomocą różnych algorytmów śledzących nazywanych w języku angielskim trackerami. Typowym trackerem jest m.in. filtr Kalmana [VAI2001], [BLA2006]. Proces śledzenia może być realizowany za pomocą:

- śledzenia punktu (ang. *Point Tracking*) [YIL2006] - wtedy, gdy obiekty widoczne na kolejnych klatkach, opisywane są za pomocą punktów. Związek między tymi punktami oparty jest na wcześniejszym stanie obiektu, określającym jego położenie oraz informację o jego ruchu,
- śledzenia jądra (ang. *Kernel Tracking*) [MAR2008] - które określa kształt i wygląd obiektu (jądro może być np. prostokątnym szablonem lub mieć eliptyczny kształt). Algorytm oblicza ruch jądra na kolejnych klatkach, przy czym przyjmuje ono zazwyczaj formę rotacji lub translacji.
- kształtu śledzonych obiektów (ang. *Silhouette Tracking*) [VIG2003] - proces wykonywany jest w celu określenia kształtu obiektu na każdej analizowanej klatce.

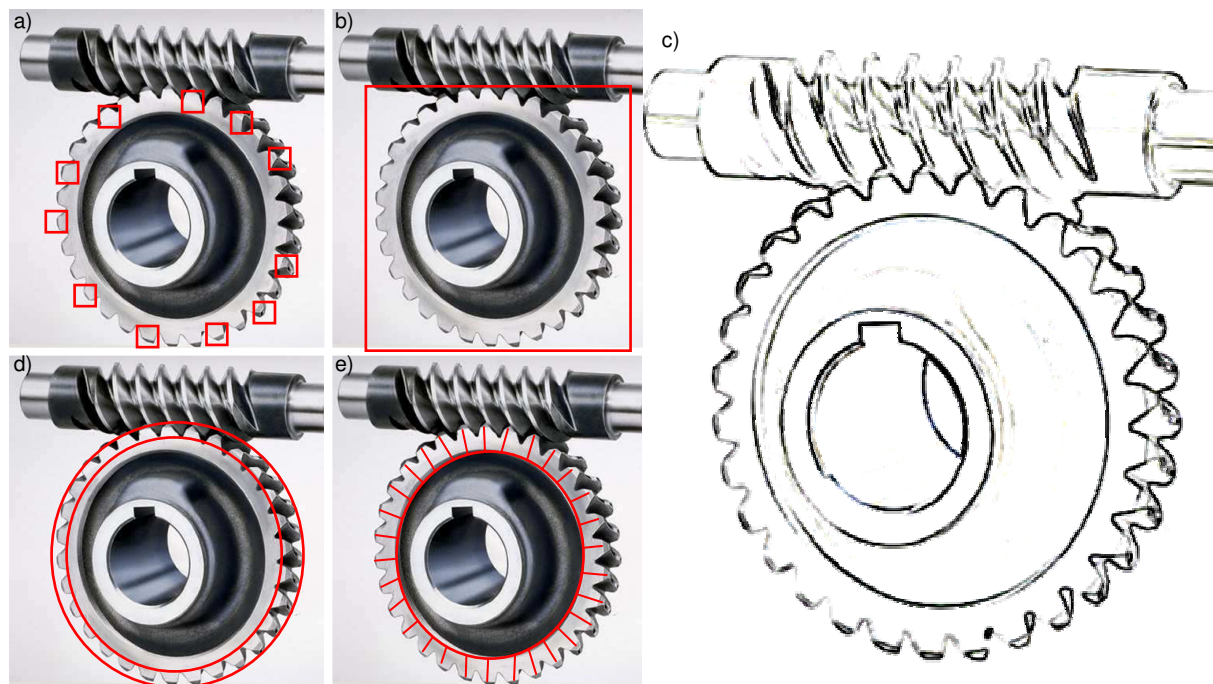
W metodzie śledzenia obiekty reprezentowane są za pomocą kształtów lub pewnych ich charakterystycznych cech. Do tego mogą służyć:

- punkty (mogą one wyznaczać środek analizowanego obiektu lub mogą być rozmieszczone w różnych jego miejscach),
- proste kształty geometryczne (prostokąt, elipsa itp.),

<sup>38</sup> Angielski termin *object tracking* odpowiada polskiemu terminowi śledzenie obiektów. Jest on stosowany powszechnie w krajowych publikacjach naukowych z zakresu przetwarzania i analizy obrazu [GAL2000], [RUT2008], [BIE2009].

- dowolny kształt i kontur (kontur określa granicę obiektu). Kontur i kształt pozwalają śledzić bardziej złożone obiekty zmieniające swoją postać),
- obiekty o zdefiniowanym kształcie,
- modele szkieletowe (szkielet obiektu może zostać wydzielony przez zastosowanie osi środkowej, w ten sposób uzyskuje się sylwetkę obiektu).

Sposoby reprezentacji kształtów obiektów na przetwarzanym obrazie zostały przedstawione na rysunku 25 (□44).



Rys. 25. Sposoby reprezentacji kształtów w metodzie śledzenia obiektów: a) punkty, b) proste kształty geometryczne, c) zarys i kontur, d) zdefiniowany kształt obiektu, e) model szkieletowy  
 Fig. 25. The procedure of shapes representation in object tracking technique: a) points, b) simple geometrical shapes, c) outline and contour, d) articulated shapes of object, e) skeletal model

Celem procesu śledzenia jest uzyskanie informacji o trajektoriach ruchu obiektów w danym czasie. Informacje te mogą określać pewien obszar w obrazie, w którym znajdują się obiekty w danej chwili czasu. Zadania wykrywania obiektów i ustalania relacji między nimi mogą być wykonywane oddzielnie lub wspólnie. W pierwszym przypadku położenie obiektów w kolejnych klatkach jest otrzymywane dzięki algorytmowi wykrywania obiektów. W drugim lokalizacja obiektów dokonywana jest podobnie, zaś ustalenie relacji między obiektami dokonywane jest na podstawie informacji otrzymanych z poprzednich klatek.

Metoda śledzenia obiektów z racji uniwersalnego charakteru posiada wiele odmian wykorzystywanych w szeregu dziedzin współczesnej nauki i techniki. najpopularniejsze grupy zastosowań śledzenia obiektów:

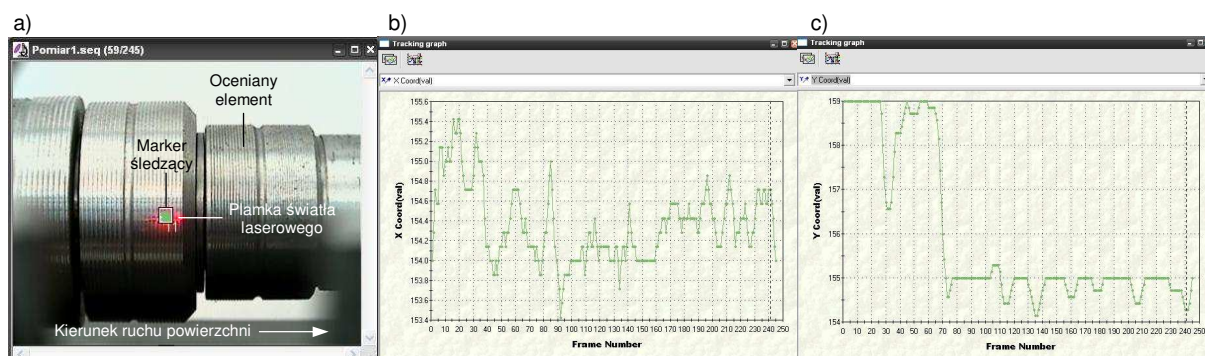
- monitorowanie osób i obiektów [BLA2002], [RIB2006], [YUE2007],
- rozpoznawanie gestów i zachowań [LEE2007], [NAR2007], [SHE2008], [BHA2009],
- monitorowanie scen i wykrywanie zdarzeń [RIB2006], [HUA2008],
- monitorowanie ruchu pojazdów [TAI2004], [JUZ2006],
- kontrola procesów [KUO2002], [KAP2009-1].

W wielu z tych zastosowań proces śledzenia obiektów realizowany jest przez różnego rodzaju oprogramowanie komputerowe. Stosowane są uniwersalne programy do przetwarzania i analizy obrazu o charakterze komercyjnym wyposażone w odpowiednie moduły dodatkowe (pluginy) służące do śledzenia ruchu obiektów, oraz specjalistyczne aplikacje dostosowane do konkretnych rozwiązań. Niektóre z nich posiadają bardzo zaawansowane funkcje przetwarzania obrazów. W tabelicy 5 (□45) przedstawiono wybrane oprogramowanie przeznaczone do śledzenia obiektów wraz z krótką charakterystyką.

Tab. 5. Przegląd oprogramowania przeznaczonego do przetwarzania obrazów metodą śledzenia obiektów  
 Tab. 5. The review of software for image processing by object tracking technique

Lp.	Nazwa oprogramowania	Producent	Charakterystyka
1.	TEMA Viewer	Image Systems AB <a href="http://www.imagesystems.se/">http://www.imagesystems.se/</a>	Specjalistyczne oprogramowanie, którego podstawową funkcją jest śledzenie obiektów w trybie 2D. W zależności od zastosowań program może wykorzystywać różne algorytmy śledzenia obiektów. Proces śledzenia może odbywać się w trybie automatycznym, półautomatycznym i manualnym.
2.	PatchMaker	Pixmart LLC <a href="http://www.patchmaker.net">http://www.patchmaker.net</a>	Oprogramowanie przeznaczone do śledzenia obiektów, głównie 2D. Jest zintegrowane z Adobe® After Effects® (AE), co pozwala na wymianę (importowanie i eksportowanie) sekwencji video pomiędzy aplikacjami.
3.	ImageJ+Plugin MTrackJ	Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA <a href="http://rsb.info.nih.gov/ij/">http://rsb.info.nih.gov/ij/</a>	Plugin MTrackJ zaimplementowany w oprogramowaniu ImageJ pozwala na śledzenie jednego lub dwóch obiektów w analizowanym obszarze obrazu z podaniem takich informacji jak: współrzędne obiektów i odległości między nimi. Plugin może być dowolnie modyfikowany (m.in. możliwe jest zwiększenie liczby śledzonych obiektów).
4.	SWISTrack	Swarm-Intelligent Systems Group, Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Szwajcariad <a href="http://swistrack.sourceforge.net">http://swistrack.sourceforge.net</a>	Oprogramowanie o otwartej architekturze napisane w języku C++, rozprowadzane wraz ze szkieletem dla Matlaba, C oraz Javy. Program może przeprowadzać proces śledzenia obiektów w sposób zdalny wykorzystując łącza internetowe.
5.	Image-Pro® Plus	MediaCybernetics, Inc. <a href="http://www.mediacy.com">http://www.mediacy.com</a>	Uniwersalne oprogramowanie wyposażone w moduł śledzenia obiektów zaimportowanych w formie pliku video o rozszerzeniu *.seq. Program posiada wiele dostępnych funkcji śledzenia. Pozwala na prowadzenie złożonych analiz ruchu obiektów.

Autorzy pracy [KAP2009-1] przeanalizowali możliwość wykorzystania metody śledzenia obiektów do kontroli wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrobionych przez polerowanie, szlifowanie i toczenie. Do badań przeznaczono zestaw 8 pierścieni, które oświetlano światłem laserowym o długości fali  $\lambda = 635$  nm. Przemieszczenie plamki laserowej na powierzchniach próbek rejestrowano w postaci sekwencji video analizowanych następnie w oprogramowaniu Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics<sup>39</sup>. Algorytm zaimplementowany w opracowanej makroinstrukcji o nazwie *SpotTracking* śledził ruch plamki, wyznaczając na jego podstawie zmianę wymiaru zewnętrznego kolejnego pierścienia. Błąd metody był niewielki rzędu 1-1,3%, przy czym korzystano jedynie z domyślnych ustawień oprogramowania. Na rysunku 26 (45), pokazano okno makroinstrukcji *SpotTracking* zaimplementowanej w oprogramowaniu Image-Pro® Plus 5.1 podczas prowadzenia procesu śledzenia przemieszczenia plamki laserowej oraz wykresy zależności współrzędnych  $x$  i  $y$  od numeru klatki będące wynikiem procesu śledzenia.



Rys. 26. Zastosowanie metody śledzenia obiektów do kontroli wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrobionych z wykorzystaniem makroinstrukcji *SpotTracking* zaimplementowanej w oprogramowaniu Image-Pro® Plus 5.1: a) okno sekwencji video z markerem śledzącym, b), c) wykresy zależności współrzędnych  $x$  i  $y$  od numeru klatki

Fig. 26. Object tracking technique used for inspection of external dimensions of machined parts by *SpotTracking* macro implemented in Image-Pro® Plus 5.1 software: a) window of video sequence with tracker, b), c) dependences of coordinates  $x$  and  $y$  on the frame number

<sup>39</sup> Media Cybernetics, Inc., 8484 Georgia Avenue, Suite 200 Silver Spring, MD 20910, USA. <http://www.mediacy.com>

### 2.3.2. Metoda nakładania obrazów

Metoda nakładania obrazów (ang. *Image Stacking*) [WIL2005], [PRI2007] jest jedną z metod przetwarzania obrazów ruchomych [BOV2000], [REE2005], z którą wiąże się obecnie pewne nadzieje na zastosowanie jej w optycznej ocenie parametrów SGP. Powodem zastosowania tej metody jest brak możliwości uzyskania pełnej informacji o obiekcie (np. powierzchni) z pojedynczej klatki. Metoda ta wykorzystuje znany w teorii obrazowania proces nakładania obrazów. Polega on na sprowadzeniu do wspólnego układu współrzędnych pewnej liczby łączonych obrazów. Podczas nakładania obrazów konieczne jest odpowiednie pozycjonowanie jednego obrazu (obrazu nakładanego) względem innego (obraz odniesienia), czyli wyznaczeniu odpowiednich cech wspólnych dla obu nakładanych obrazów w postaci tzw. punktów korespondencyjnych. Łączenie obrazów może odbywać się za pomocą metod interpolujących lub aproksymujących w zależności od tego czy dążymy do uzyskania dokładnego nałożenia wybranych cech  $n$  łączonych obrazów, czy też do minimalizacji błędu w całym zbiorze analizowanych cech. Oznacza to, iż zastosowana metoda ma dokonać wyboru tylko tych cech, które korespondują ze sobą i dokładnie je nałożyć, natomiast cechy niekorespondujące pozostawić nienałożone.

Proces nakładania obrazów realizowany jest w wielu odmianach i wariantach w takich w obszarach zastosowań jak m.in.: geodezja [OZI2004] i kartografia [CHI2001], geofizyka [RAB2007], medycyna [GUT2003], biologia, inżynieria materiałowa [PLA1998], astronomia i astrofizyka [HAT2008], elektronika, grafika komputerowa [SHI2006], grafika reklamowa i fotografia cyfrowa. Idea łączenia obrazów, a dokładniej mówiąc odpowiedniego ich pozycjonowania i nakładania wykorzystana została również w stabilizatorach obrazu współcześnie produkowanych cyfrowych aparatów fotograficznych i kamer video. W tabelicy 6 (□46), zestawiono niektóre obszary zastosowań, w których wykorzystuje się nakładanie obrazów.

Tab. 6. Obszary zastosowań nakładania obrazów  
Tab. 6. The fields of applications of image combining

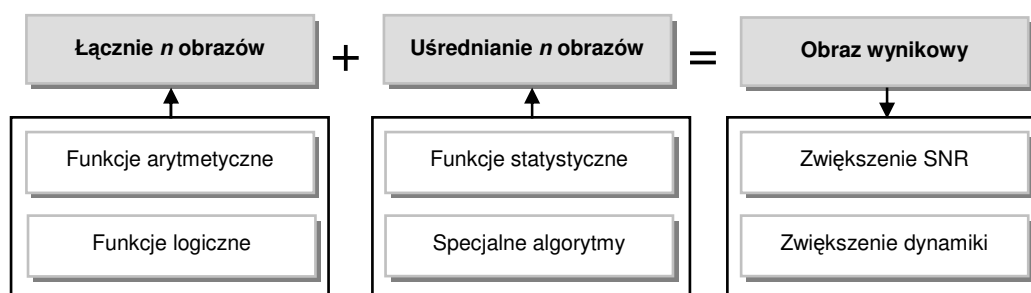
Lp.	Nazwa metody		Cel stosowania	Obszar zastosowań
	w j. angielskim	w j. polskim		
1.	Image Merging	Łączenie obrazów	Łączenie obrazów teledetekcyjnych o różnej rozdzielczości terenowej. Obraz wynikowy zachowuje informację ze wszystkich nakładanych obrazów.	Teledetekcja, fotogrametria, zwiad lotniczy i satelitalny
2.	Image Mosaicing	Mozaikowanie	Łączenie obrazów teledetekcyjnych o jednakowej rozdzielczości terenowej. Mozaikowanie realizowane jest w dwóch wariantach. W pierwszym obraz wynikowy zawiera tylko interesujące piksele (pozostałe są usuwane). W drugim ukrywane są krawędzie nakładanych obrazów. Łączenie obrazów uzyskanych z sekwencji video do tworzenie obrazów panoramicznych.	
3.	Image Matching	Pasowanie / Dopasowywanie obrazów	Łączenie obrazów pochodzących z różnych techniki obrazowania w celu minimalizacji błędów w analizowanym zbiorze danych.	Medycyna, biologia, fotogrametria, widzenie maszynowe
4.	Image Registration / Coregistration	Rejestracja obrazów		
5.	Image Alignment	Wyrównywanie obrazów	Łączenie obrazów w celu minimalizowania zakłóceń pochodzących z aparatury badawczej i pomiarowej (stabilizacja obrazu).	Inżynieria materiałowa, przemysł elektroniczny i precyzyjny
6.	Image Stacking	Nakładanie obrazów	Łączenie obrazów z uśrednianiem ich wartości w celu zwiększenia współczynnika sygnału do szumu i zakresu dynamicznego obrazu wynikowego.	Astronomia, astrofizyka, geofizyka, medycyna
7.	Tone Mapping	Mapowanie tonalne	Łączenie obrazów w celu uzyskania obrazu wynikowego o znacznie szerszym zakresie dynamicznym.	Fotografia i grafika, reklamowa, fotografia produktu

Na rysunku 27 (□47) pokazano jedno z przykładowych zastosowań łączenia obrazów. W fotografii i grafice reklamowej stosuje się ten proces m.in. w celu zwiększenia zakresu dynamicznego obrazu, co pozwala na jego odpowiednią korekcję.



Rys. 27. Przykład zastosowania łączenia obrazów w grafice reklamowej: a) obraz otrzymany z pojedynczej ekspozycji z nieostрым dolnym fragmentem, b) obraz otrzymany z pojedynczej ekspozycji z nieostрым górnym fragmentem, c) obraz stanowiący nałożenie obrazów a i b, d) gotowy obraz wynikowy poddany filtrowaniu  
 Fig. 27. The example of used image combining in advertising graphics: a) image from single exposure with out of focus bottom area, b) image from single exposure with out of focus upper area, c) staked image obtained from images a and b, d) output image processed by filtering

Podstawowa idea metody nakładania obrazów polega na nałożeniu na siebie wielu pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video w celu uzyskania obrazu wynikowego o uśrednionej wartości luminacji. Strukturę procesu przetwarzania obrazów realizowaną za pomocą omawianej metody pokazano na rysunku 28 [47].



Rys. 28. Struktura przetwarzania obrazów za pomocą metody nakładania obrazów  
 Fig. 28. The structure of image processing realized by image stacking technique

Obraz wynikowy stanowiący złożenie  $n$  obrazów źródłowych uzyskuje się przez liniową kombinację obrazów (tzw. mieszanie obrazów). Jest to specjalny sposób dodawania  $n$  obrazów, w którym poziom szarości lub nasycenia barwy każdego punktu obrazu wynikowego tworzy się jako sumę wagową poziomów szarości lub nasycenia barw nakładanych  $n$  obrazów. Liniową kombinację  $n$  obrazów można zapisać w postaci (19):

$$L(x, y) = k L_n(x, y) + (1-k) L_{n+1}(x, y), \quad (19)$$

gdzie:  $k$  – współczynnik zawartości obrazu  $L_n(x, y)$  w obrazie wynikowym  $L(x, y)$ ,  $x, y$  – współrzędne odpowiadających sobie elementów obrazów: ( $x$  – numer wiersza,  $y$  – numer kolumny).

Do uśredniania wartości poszczególnych łączonych obrazów stosowane są funkcje statystyczne lub specjalne algorytmy. Tradycyjnym podejściem jest stosowanie funkcji statystycznych [KRY2006] takich jak: średnia arytmetyczna lub mediana. Uśrednianie takimi metodami realizowane jest przez większość dostępnego na rynku oprogramowania komputerowego realizującego proces nakładania obrazów. W innych bardziej złożonych przypadkach, stosuje się zaawansowane sposoby uśredniania oparte na specjalnych algorytmach. Do tej grupy należą m.in. takie metody jak: obcinanie obrazu Kappa-Sigma (ang. *Kappa-Sigma Clipping*) [LEH2006], auto-adaptacyjna średnia ważona (ang. *Auto Adaptive Weighted Average*) [STE1989], entropijna średnia ważona (ang. *Entropy Weighted Average*) [GER2005].

Rezultatem procesu nakładania  $n$  obrazów jest uzyskany obraz wynikowy. Charakteryzuje się on zwiększoną wartością stosunku sygnału do szumu SNR (ang. *Signal-to-Noise-Ratio*) [SMI2003] oraz zwiększonym zakresem dynamicznym sygnału zawartego w obrazie. Oznacza to, iż wzmocnieniu ulega ta

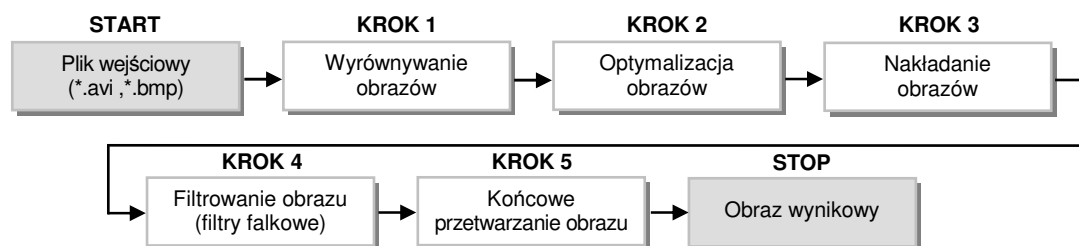
część sygnału (obrazu), która przenosi użyteczną informację, przy jednoczesnym stłumieniu wszelkiego rodzaju niepożądanych zakłóceń w postaci szumów. Wzrost wartości SNR pociąga za sobą również wzrost zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazie (wzrost rozpiętości tonalnej). Jest to korzystne, gdyż pozwala z jednej strony na poprawne odwzorowanie szerokiego zakresu intensywności oświetlenia, od głębokich cieni do jasnego światła, a z drugiej strony pozwala na większą niż w przypadku pojedynczego obrazu możliwość regulacji wartości tonalnych.

Podobnie jak we wcześniej omawianej metodzie śledzenia ruchu obiektów, także proces nakładania obrazów realizowany jest za pomocą odpowiedniego oprogramowania komputerowego, którego charakterystykę przedstawiono w tabelicy 7 (□48).

Tab. 7. Przegląd oprogramowania komputerowego przeznaczonego do przetwarzania obrazów metodą nakładania  
Tab. 7. The review of software for image processing by image stacking technique

Lp.	Nazwa oprogramowania	Producent	Charakterystyka
1.	Astrostack	InnoStack <a href="http://www.astrostack.com">http://www.astrostack.com</a>	Oprogramowanie służące do nakładania obrazów wraz z ich wstępnym przetwarzaniem (wstępne wyostanie obrazu). Dopasowanie obrazów przed nakładaniem odbywa się automatycznie.
2.	Image Stacker	Tawbaware <a href="http://www.tawbaware.com/imgstack.htm">http://www.tawbaware.com/imgstack.htm</a>	Oprogramowanie z kilkoma opcjami nakładania obrazów oraz modulem redukcji szumu. Nie posiada zaawansowanych funkcji.
3.	Keith's Image Stacker	Keith Wiley <a href="http://www.cs.unm.edu/~kwiley/software...">http://www.cs.unm.edu/~kwiley/software...</a>	Oprogramowanie do nakładania obrazów, głównie do zastosowań astronomicznych. Program pozwala na przetwarzanie wyodrębnionych pojedynczych obrazów lub sekwencji video. Posiada także moduł filtrowania obrazu.
4.	RegiStax	Cor Berrevoets <a href="http://astronomie.be/registax">http://astronomie.be/registax</a>	Zaawansowane oprogramowanie głównie do zastosowań astronomicznych. Posiada m.in. moduł precyzyjnego ustawiania obrazów oraz możliwość dodatkowego przetwarzania obrazów wynikowych za pomocą filtrów opartych na algorytmach falkowych.
5.	IRIS	Chyrtian Buil <a href="http://www.astrosurf.com/buil/">http://www.astrosurf.com/buil/</a>	Zaawansowane oprogramowanie o dużych możliwościach nakładania i przetwarzania obrazów. Uśrednianie nakładanych obrazów odbywa się m.in. z wykorzystaniem algorytmu autoadaptacyjnej średniej ważonej. Dodatkowo oprogramowanie posiada rozbudowane funkcje filtrowania obrazu.
6.	AstroArt	MSB Software <a href="http://www.msb-astroart.com">http://www.msb-astroart.com</a>	Oprogramowanie pozwalające na przetwarzanie obrazów, pochodzących głównie ze źródeł astronomicznych. Posiada możliwość tworzenia własnych skryptów programowych za pomocą języka ABasic (zbliżonego do Visual Basic™).
7.	Deep Sky Stacker	Luc Coiffier <a href="http://deepskystacker.free.fr">http://deepskystacker.free.fr</a>	Zaawansowane oprogramowanie o bardzo dużych możliwościach. Posiada rozbudowany moduł łączenia obrazów (7 metod uśredniania) oraz ich dalszego przetwarzania za pomocą filtrów.

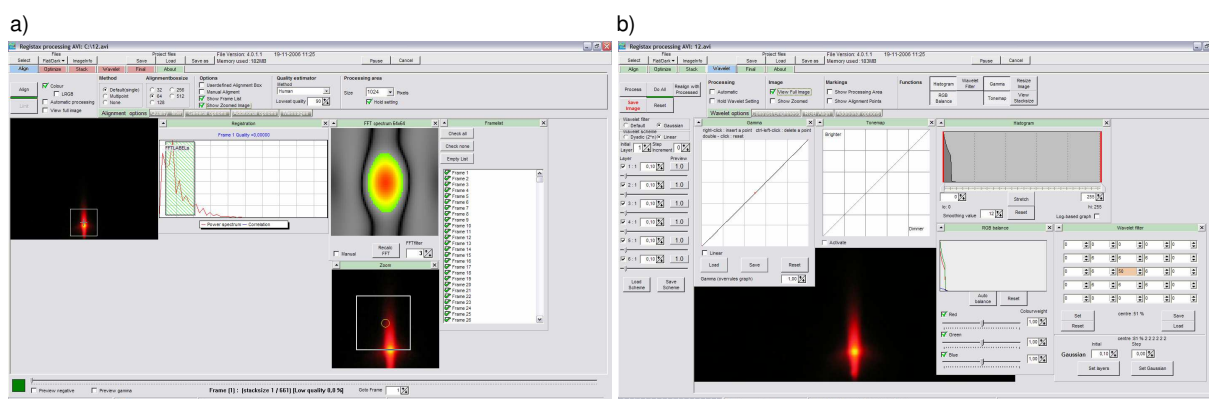
Przedstawione w tabelicy 7 (□49) oprogramowanie dokonuje przetwarzania obrazów wg przyjętego algorytmu, realizowanego w kolejnych krokach. Kroki te można prześledzić na podstawie działania specjalistycznego oprogramowania o nazwie RegiStax [BER2004], [MIN2005]. Jest to program typu freeware o otwartej architekturze do pozycjonowania, nakładania i przetwarzania obrazów rozwijany przez Cora Berrevoetsa. Zwiera on pięć głównych modułów odpowiadających kolejnym etapom przetwarzania obrazów, pokazanych na rysunku 29 (□48).



Rys. 29. Kolejne kroki przetwarzania obrazów realizowane przez oprogramowanie RegiStax  
Fig. 29. The following steps of image processing realized by RegiStax software



Oprogramowanie RegiStax pozwala na przetwarzanie wcześniej wydzielonych obrazów zapisanych w formatach: \*.JPG, \*.PNG, \*.BMP, \*.TIF, lub na automatyczne wydzielanie obrazów z sekwencji video zapisanej w formacie \*.AVI. Po wybraniu klatki referencyjnej, stanowiącej obraz odniesienia do wyrównania pozostałych obrazów, program automatycznie dokonuje ich wyrównania. Wyrównanie obrazów polega na porównaniu obrazu referencyjnego z kolejnym obrazem i minimalizowaniu różnic między nimi. Odbywa się to metodą kolejnych przybliżeń. Wyrównanie kontynuowane jest dopóki różnica pomiędzy ostatnim, a poprzednim wyrównaniem nie zmniejszy się do założonej wartości. Po tej operacji, obrazy poddawane są optymalizacji polegającej na odrzuceniu klatek o gorszej jakości. Po optymalizacji obrazy są nakładane, przy czym oprogramowanie automatycznie dokonuje ich uszeregowania w zależności od jakości (od najlepszego do najgorszego). W wyniku nałożenia  $n$  obrazów powstaje pojedynczy obraz wynikowy o uśrednionej wartości. Obraz taki może być poddany dodatkowemu filtrowaniu z wykorzystaniem filtrów falkowych dostępnych w module *Wavelet*. Końcowe przetwarzanie pozwala na przeprowadzenie prostych operacji geometrycznych (kadrowanie, zmiana rozdzielczości) przed zapisaniem obrazu do wybranego pliku. Przykładowe okna oprogramowania RegiStax 4.0 podczas procesu przetwarzania obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszenia przedstawiono na rysunku 30 (49).



Rys. 30. Okna oprogramowania RegiStax 4.0 podczas przetwarzania obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego: a) moduł wstępnego przetwarzania (wczytywanie plików i pozycjonowanie), b) zaawansowany moduł filtracji falkowej  
Fig. 30. The windows of RegiStax 4.0 software during processing of images of angular distribution of the scattered light intensity: a) pre-processing module (file opening and aligning), b) advanced wavelet filtering module

Z racji dużej użyteczności i uniwersalności opisana wyżej metodę nakładania obrazów wykorzystuje się m.in. w takich dziedzinach jak: astrofizyka [ZIB2007], medycyna [GUT2003], kartografia [CHI2001], geofizyka [RAB2007], tektonika [OZI2004], grafika komputerowa [SHI2006].

Próbę zastosowanie tej metody do pomiarów SGP podjęto również w Zakładzie Metrologii i Jakości Politechniki Koszalińskiej [KAP2007-1], [KAP2008-1], [KAP2008-4], [KAP2009-2] [KAP2009-4]. Badane próbki znajdujące się w ruchu oświetlano stosując promieniowanie laserowe. Obrazy skaterometryczne, tworzone na matowej tablicy rejestrowano za pomocą aparatów cyfrowych i kamer TV. Obrazy ruchome w postaci sekwencji video poddawano przetwarzaniu i analizie za pomocą różnego rodzaju oprogramowania komputerowego. Pozwalało ono na wyznaczenie niektórych parametrów geometrycznych i fotometrycznych charakteryzujących zarejestrowane obrazy, a także na przeprowadzenie analiz densytometrycznych. W niektórych przypadkach stosowano także filtrowanie obrazu z wykorzystaniem filtrów opartych na algorytmach falkowych [KAP2008-1]. Rezultaty prowadzonych badań potwierdziły, iż przetwarzanie ruchomych obrazów skaterometrycznych umożliwia uzyskanie zwiększonego zakresu wartości tonalnych, a co za tym idzie bardziej precyzyjnego odwzorowania badanej powierzchni. Pozwala to na poprawną ocenę metrologiczną powierzchni części maszyn i urządzeń pod względem m.in. mikronierówności, jednorodności, a także umożliwia wykrywanie różnego rodzaju wad, defektów oraz zniekształceń.

## 2.4. Wnioski z analizy literatury

Na podstawie przeanalizowanej literatury dotyczącej aktywnej kontroli SGP i wymiaru można wyciągnąć następujące wnioski o charakterze ogólnym:

- Ze względu na specyfikę warunków przemysłowych i laboratoryjnych zastosowanie metod stykowych do kontroli SGP i wymiaru jest ograniczone.
- W przypadku aktywnej kontroli SGP i wymiaru najczęściej stosuje się optyczne metody pomiarowe ze względu na szybkość i dokładność oceny oraz bezstykowy sposób przeprowadzenia pomiaru.
- Wśród optycznych metod pomiarowych można wyodrębnić dwie grupy metod rokujących duże nadzieje na zastosowanie ich w aktywnej kontroli SGP i wymiaru. Są to grupy metod triangulacyjnych i metod rozpraszania światła. Wymienione grupy metod są często wspomagane nowoczesnymi technikami obrazowania cyfrowego oraz przetwarzania i analizy obrazu w celu zwiększenia ich możliwości i efektywności oceny. Informacja obrazowa pozwala na znacznie lepsze przedstawienie natury procesów obróbkowych, jaki i na analizowanie cech struktury geometrycznej powierzchni.
- W większości analizowanych przypadków metody optyczne wykorzystywano do pomiarów SGP i wymiarów w warunkach statycznych. Wynikało to z faktu, iż pomiary prowadzone w czasie ruchu są bardziej skomplikowane i wymagają bardziej złożonych urządzeń pomiarowych.
- Metody optyczne znalazły zastosowanie w licznych systemach i przyrządach pomiarowych stosowanych do aktywnej kontroli SGP i wymiaru. Są one realizowane za pomocą specjalistycznych systemów i przyrządów pomiarowych, najczęściej o charakterze eksperymentalnym. W niewielkim tylko stopniu zostały one wdrożone do przemysłu. Jedną z wad tych systemów jest to, iż dokonują one na ogół pomiaru tylko jednego parametru. W przypadku pomiaru kilku parametrów, pomiar przeprowadzany jest oddzielnie dla każdego z nich za pomocą innego układu pomiarowego. Jak dotychczas w literaturze nie opisano urządzenia pozwalającego na ocenę wielu parametrów (np. chropowatości powierzchni, wymiaru, kształtu) jednocześnie, w czasie rzeczywistym.
- Przytoczony powyżej wniosek wykazuje istnienie problemu aktywnej kontroli wielu parametrów jednocześnie w czasie ruchu badanej powierzchni. Jednym z rozwiązań tego problemu wydaje się być opracowanie koncepcji zintegrowanej metody pomiarowej łączącej opisane w analizie literatury metody optyczne. Istnieje duża szansa na integrację opisanych metod optycznych, przy czym trzeba mieć na uwadze wynikające z tego trudności dotyczące m.in. odpowiedniego dobrania konfiguracji układu pomiarowego, uzyskania małej niepewności pomiaru oraz dużego zakresu pomiarowego, liczby ocenianych jednocześnie parametrów.



CELE, HIPOTEZA I ZAKRES PRACY



### 3.1. Cele pracy

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono istnienie nierozwiązanego w sposób zadowalający problemu jednoczesnej aktywnej kontroli SGP i wymiaru przedmiotu obrabianego. W związku z tym poniżej sformułowano najważniejsze cele niniejszej pracy.

Podstawowym celem pracy jest opracowanie zintegrowanej metody optycznej – łączącej różne optyczne metody pomiarowe z technikami przetwarzania i analizy obrazu – pozwalającej na jednoczesną ocenę SGP i wymiaru podczas ruchu przedmiotu obrabianego. W oparciu o cel podstawowy sformułowano dwa dodatkowe cele niniejszej pracy. Pierwszy z nich to opracowanie sposobów przetwarzania i analizy sygnału optycznego pozwalających na ocenę SGP i wymiaru przedmiotu na podstawie zarejestrowanych ruchomych obrazów optycznych. Obrazy te mogą przedstawiać powierzchnię rzeczywistą badanego elementu, wzór optyczny rzutowany na taką powierzchnię lub jak ma to np. miejsce w przypadku metod skaterometrycznych, obraz światła rozproszonego przez taką powierzchnię. Drugim dodatkowym celem pracy jest eksperymentalne zweryfikowanie opracowanej metody wraz ze wstępnym określeniem jej podstawowych właściwości metrologicznych oraz zakresu zastosowań.

### 3.2. Hipoteza badawcza

Na podstawie analizy źródeł literaturowych prezentujących aktualny stan wiedzy o rozpatrywanych zagadnieniach dotyczących aktywnych pomiarów SGP i wymiaru oraz rozważań własnych wysunięto sformułowaną poniżej hipotezę badawczą.

**Jeżeli dokonana zostanie integracja metod triangulacji i skaterometrii laserowej z technikami nakładania obrazów i śledzenia obiektów w obrazach ruchomych, to możliwa będzie jednoczesna aktywna kontrola struktury geometrycznej powierzchni oraz wymiaru przedmiotu obrabianego.**

### 3.3. Zakres pracy

W celu weryfikacji postawionej hipotezy badawczej przyjęto, że zakres realizowanej pracy obejmie:

- Analizę teoretyczną zjawisk optycznych wykorzystywanych w zintegrowanej metodzie (m.in. takich jak odbicie wiązki światła laserowego od powierzchni, rozpraszanie światła na powierzchniach nierównych).
- Wybór koncepcji jednoczesnej oceny SGP i wymiaru podczas ruchu przedmiotu.
- Projekt i konstrukcję stanowiska badawczego do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru podczas ruchu przedmiotu.
- Opracowanie takiego sposobu przetwarzania obrazu, który pozwoli na ocenę SGP i wymiaru podczas ruchu przedmiotu.
- Doświadczalne sprawdzenie zintegrowanej metody optycznej z wykorzystaniem wcześniej zbudowanego stanowiska pomiarowego.
- Analizę uzyskanych wyników badań oraz sformułowanie wniosków końcowych.





ANALIZA TEORETYCZNA

---





#### 4.1. Podstawy teoretyczne metod triangulacyjnych

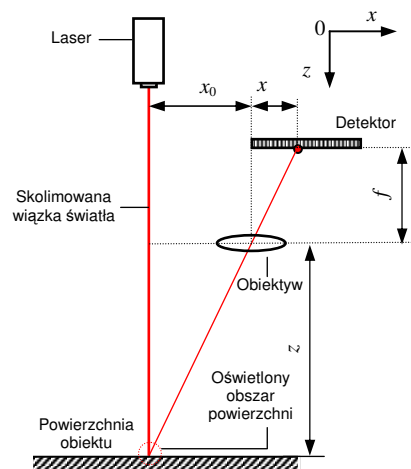
W budowie maszyn metody triangulacyjne są stosowane w pomiarach wielkości geometrycznych od wielu lat. W najprostszym przypadku metody te polegają na rzutowaniu na powierzchnię badanego obiektu plamki świetlnej i obserwacji jej położenia za pomocą układu optyczno-elektronicznego (rysunek 31 [57]). Pomiar położenia plamki na powierzchni detektora fotoelektrycznego oraz analiza trójkąta utworzonego przez wiązkę padającą i kierunek obserwacji pozwalają wyznaczyć odległość  $z$  oświetlonego punktu powierzchni od środka obiektywu, mierzoną wzdłuż osi  $Oz$ . Odległość  $z$  jest proporcjonalna do  $1/x$ :

$$z = f \frac{x_0}{x}, \quad (20)$$

gdzie:  $f$  – długość ogniskowej obiektywu,  $x_0$  – odległość środka obiektywu od wiązki laserowej, mierzona wzdłuż osi  $Ox$ ,  $x$  – położenie plamki światła na powierzchni detektora, mierzone wzdłuż  $Ox$  osi od punktu określonego odległością  $x_0$ .

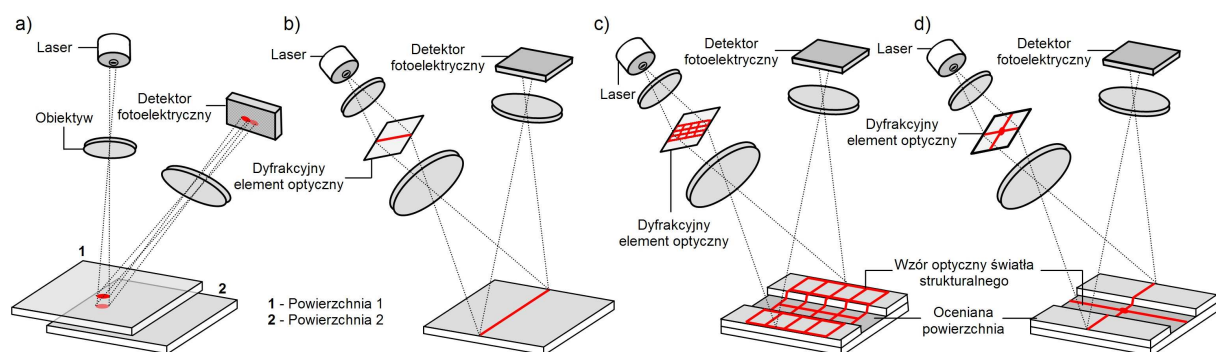
Z równania (20) wynika, że czułość tej metody jest najlepsza dla blisko położonych obiektów.

Jeśli wiązka światła rzutowana na powierzchnię obiektu jest nieruchoma, a powierzchnia zmienia swój kształt lub położenie, to śledzenie położenia plamki na powierzchni pozwala ujawnić te zmiany i dokonać bezwzględnego lub względnego pomiaru wartości przemieszczeń w oświetlonym miejscu powierzchni. Niekiedy triangulacja stosowana jest do skanowania powierzchni obiektów. Wówczas plamka świetlna w zaprogramowany sposób przemieszcza się po badanej powierzchni, a system obserwacji analizuje jej położenie w poszczególnych punktach. W celu uniknięcia skanowania i skrócenia czasu analizy, zamiast przemieszczania plamki świetlnej można na powierzchnię obiektu rzutować zbiór punktów, linię, zbiór linii lub inny wzór optyczny i analizować jak zmienia się położenie poszczególnych elementów obrazu. Rzutowany na powierzchnię wzór optyczny może być monochromatyczny lub barwny. W ostatnim przypadku uzyskuje się lepsze odwzorowanie badanej powierzchni, ale układ detekcji i analizy musi oddzielnie rejestrować i analizować poszczególne barwy, co czyni proces przetwarzania sygnału bardziej złożonym. Jeżeli rzutowany na powierzchnię wzór (punkt, linia, itp.) porusza się w zaprogramowany sposób, to taki rodzaj triangulacji niekiedy nazywa się triangulacją dynamiczną.



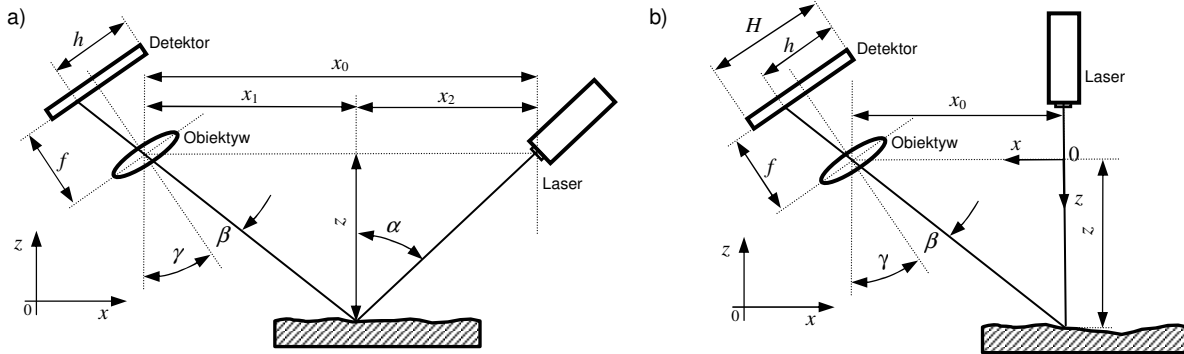
Rys. 31. Prosta metoda triangulacyjna  
Fig. 31. Simple triangulation method

Do oświetlania powierzchni badanego obiektu mogą być stosowane różne źródła światła, ale najczęściej stosowane są lasery. Mamy wówczas do czynienia z triangulacją laserową. Jeżeli zamiast plamki świetlnej (rysunek 32a [57]) na powierzchnię obiektu rzutowany jest wzór optyczny pozwala to na triangulację liniową (rysunek 32b [57]) lub powierzchniową, co pokazano na rysunku 32c i 32d [57]. Zmiana wzoru optycznego rzutowanego na powierzchnię może być realizowana za pomocą sterowanego komputerowo projektora stanowiącego źródło światła. Rzutowanie wzorów optycznych stosowane jest zarówno w niektórych metodach triangulacyjnych, jak i w metodach światła strukturalnego.



Rys. 32. Podstawowe metody triangulacji laserowej: a) triangulacja punktowa (jednowymiarowa), b) triangulacja liniowa (dwuwymiarowa), c), d) triangulacja powierzchniowa (trójwymiarowa)  
Fig. 32. Principal methods of laser triangulation: a) spot triangulation (1D triangulation), b) line triangulation (2D triangulation), c), d) areal triangulation (3D triangulation)

Rozpatrzmy przypadek triangulacji laserowej z ukośnym oświetleniem mierzonej powierzchni. Schemat układu pokazano na rysunku 33a (□58). Wiązka światła laserowego pada na powierzchnię przedmiotu pod kątem  $\alpha$ . Położenie oświetlonego punktu na powierzchni analizowane jest przez układ detekcyjny pod kątem  $\beta + \gamma$ . Układ detekcyjny składa się z obiektywu, o długości ogniskowej  $f$ , i detektora fotoelektrycznego czułego na pozycję plamki świetlnej, ustawionego w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu. Oś optyczna obiektywu jest nachylona pod kątem  $\gamma$  względem normalnej do nominalnej powierzchni przedmiotu mierzonego. Promień światła odbity od powierzchni przedmiotu, przechodzący przez środek obiektywu, tworzy z jego osią optyczną kąt  $\beta$ .



Rys. 33. Oświetlenie powierzchni w metodzie triangulacji laserowej: a) oświetlenie ukośne, b) oświetlenie prostopadłe  
Fig. 33. Illumination of the surface in the laser triangulation: a) oblique illumination, b) perpendicular illumination

Przeanalizujemy, w jaki sposób można wyznaczyć odległość  $z$  oświetlonego punktu powierzchni od linii prostej przechodzącej przez środek obiektywu i równoległej do powierzchni nominalnej przedmiotu. Linie tę nazwiemy linią bazową. Po pierwsze, z rysunku 33a (□58) wynika, że długość odcinka linii bazowej  $x_0$  mierzona od środka obiektywu do punktu przecięcia z promieniem padającym na powierzchnię określona jest sumą odcinków  $x_1$  i  $x_2$ :

$$x_0 = x_1 + x_2. \quad (21)$$

Zauważmy ponadto, że długości odcinków  $x_1$  i  $x_2$  można wyznaczyć z poniższych równań:

$$x_1 = z \operatorname{tg}(\beta + \gamma), \quad (22)$$

$$x_2 = z \operatorname{tg} \alpha, \quad (23)$$

gdzie:  $\alpha$  – kąt padania światła na powierzchnię nominalną przedmiotu,  $\beta$  – kąt nachylenia promienia światła odbitego od powierzchni przedmiotu, przechodzącego przez środek obiektywu, w stosunku do osi optycznej,  $\gamma$  – kąt wyznaczający położenie osi optycznej obiektywu względem normalnej do nominalnej powierzchni przedmiotu mierzonego.

Korzystając z prostych zależności trygonometrycznych równania (22) i (23) można przekształcić do następującej postaci:

$$z = x_1 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \beta - \gamma\right), \quad (24)$$

$$z = x_2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right). \quad (25)$$

Dodając równania (22) i (23) stronami i uwzględniając równanie (21) otrzymuje się równanie (26). Pozwala ono wyznaczyć odległość  $z$  oświetlonego punktu powierzchni przedmiotu od linii bazowej. Korzystanie z równań (24) i (25) pozwala także wyznaczyć wartość odległości  $z$  wymaga jednak znajomości zmiennych parametrów  $x_1$  i  $x_2$ . Wartość parametru  $x_0$  występująca w równaniu (26) jest stała. Zależność (26) przyjmuje postać:

$$z = \frac{x_0}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg}(\beta + \gamma)}. \quad (26)$$

Parametry  $x_0$ ,  $\alpha$ , i  $\gamma$  są parametrami, które ustalane są przez konstruktora układu pomiarowego. Natomiast kąt  $\beta$  zależy także od położenia powierzchni przedmiotu i może być wyznaczony z zależności:

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{h}{f}, \quad (27)$$

gdzie:  $h$  – położenie plamki świetlnej na powierzchni detektora fotoelektrycznego mierzone względem osi optycznej obiektywu,  $f$  – długość ogniskowej obiektywu.

Jeżeli w układzie triangulacji laserowej kąt  $\gamma$  przyjmuje wartość zerową, to wówczas równanie (26) upraszcza się do postaci (28):

$$z = \frac{x_0}{\operatorname{tg} \alpha + \frac{h}{f}}. \quad (28)$$

W wielu zastosowaniach praktycznych przyjmuje się zerową wartość kąta padania  $\alpha$ , co pokazuje rysunek 33b (□58). Jest to spowodowane tym, że przy zerowym kącie padania światła na powierzchnię unika się przesłaniania padającej wiązki laserowej przez inne elementy przedmiotu. Jeśli zerową wartość kąta padania podstawimy do równania (28), to otrzymamy równanie (29):

$$z = \frac{x_0 f}{h}. \quad (29)$$

Jest ono w istocie rzeczy tożsame z równaniem (20). Różnica polega tylko na innym oznaczeniu w równaniach (20) i (29) położenia plamki świetlnej na powierzchni detektora fotoelektrycznego. Zerową wartość kąta padania można także podstawić do równania (26). Otrzymuje się wówczas równanie (30):

$$z = \frac{x_0}{\operatorname{tg}(\beta + \gamma)}. \quad (30)$$

Wartość kąta  $\beta$  występującą w równaniu (30) wyznacza się korzystając z zależności (27).

Równanie (28) można zapisać także w innej postaci, którą przedstawiono poniżej:

$$z = \frac{f x_0}{f \operatorname{tg} \alpha + h}. \quad (31)$$

Postać ta jest szczególnie przydatna do określenia błędów występujących podczas pomiarów triangulacyjnych odległości  $z$  oświetlonego punktu powierzchni od linii bazowej.

#### 4.1.1. Analiza podstawowych właściwości metrologicznych

Na podstawie zależności (29) można ogólnie wnioskować o podstawowych właściwościach metrologicznych metody triangulacyjnej, takich jak zakres pomiarowy, czułość metody oraz rozdzielczość. Zakres pomiarowy metody triangulacyjnej można określić z poniższego rozumowania. Załóżmy, że przy danym wymiarze  $H$  detektora fotoelektrycznego (rysunek 33a (□58)), położenie plamki świetlnej  $h$  na jego powierzchni może się zmieniać w zakresie od  $h_1$  do  $h_2$ . Wówczas, zgodnie z równaniem (29), zmiany mierzonej odległości  $z$  określające zakres pomiarowy będą zawarte w następującym zakresie:

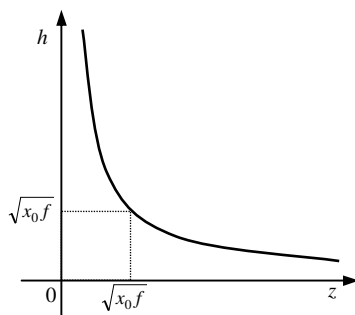
$$z_1 = \frac{x_0 f}{h_1} \leq z \leq \frac{x_0 f}{h_2} = z_2. \quad (32)$$

Zakres pomiarowy zawarty w przedziale wartości  $z$  od  $z_1$  do  $z_2$  można dobrać dla danego zadania pomiarowego wybierając obiektyw o odpowiedniej długości ogniskowej  $f$ , ustalając odległość  $x_0$  oraz dobierając detektor fotoelektryczny o odpowiedniej szerokości  $H$  powierzchni światłoczułej.

Z zakresem pomiarowym metody triangulacyjnej wiąże się jej czułość. Czułość określana jest na ogół jako stosunek zmiany wartości wielkości wyjściowej do zmiany wartości wielkości wejściowej. W naszym przypadku czułość optycznej części układu triangulacyjnego można wyrazić za pomocą równania:

$$k \cong \frac{\Delta h}{\Delta z} = \frac{dh}{dz}, \quad (33)$$

gdzie:  $\Delta h$  – zmiana położenia plamki świetlnej na powierzchni detektora fotoelektrycznego,  $\Delta z$  – zmiana mierzonej odległości  $z$ ,  $dh/dz$  – pochodna położenia plamki świetlnej na powierzchni detektora względem mierzonej odległości  $z$ .



Rys. 34. Poglądowy wykres zależności (34)  
Fig. 34. A general plot of equation (34)

W celu zilustrowania czułości metody triangulacyjnej równanie (29) warto przekształcić do postaci:

$$h = \frac{x_0 f}{z}. \quad (34)$$

Następnie stosując różniczkowanie wynikające z wzoru (33) do zależności (34) otrzymuje się:

$$k = \frac{dh}{dz} = -\frac{f x_0}{z^2}. \quad (35)$$

Z równania (35) wynika, że czułość metody triangulacyjnej nie jest stała i nieliniowo zależy od mierzonej odległości  $z$ . Jest ona pochodną hiperboli równoosiowej określonej równaniem (34). Poglądowy wykres tej hiperboli pokazano na rysunku 34 (□60). Analiza wykresu pokazuje, że dobór parametrów układu triangulacyjnego wymaga pewnego kompromisu. Najczęściej polega on na takim ograniczeniu zakresu pomiarowego, aby uzyskać jednocześnie odpowiednią czułość oraz stosunkowo małą nieliniowość układu triangulacyjnego.

Inną ważną właściwością układów pomiarowych jest rozdzielczość. Rozdzielczość układu pomiarowego, jest wyrażana w jednostkach wielkości mierzonej i określa najmniejszą zmianę tej wielkości, na którą reaguje układ. Jest ona ściśle związana z czułością układu pomiarowego. Na ogół wzrost czułości układu umożliwiłaby uzyskanie wyższej rozdzielczości.

W przypadku układów triangulacyjnych rozdzielczość zależy od kilku czynników. Przede wszystkim od wyboru zakresu pomiarowego i czułości układu, co wynika z rysunku 34 (□60). Zależy ona także od właściwości wiązki światła emitowanego przez laser i rzutowanego na powierzchnię, rodzaju i charakterystyk zastosowanego w układzie detektora fotoelektrycznego oraz od właściwości rozpraszających powierzchni mierzonego obiektu. Wiązka światła padająca na powierzchnię tworzy na niej plamkę o określonym kształcie, wielkości i rozkładzie natężenia światła. Dzięki obiektywowi obraz tej plamki jest odwzorowany na powierzchni światłoczułej detektora fotoelektrycznego. Jeżeli powierzchnia obiektu oświetlana jest światłem laserowym, to w obrazie plamki tworzonej na powierzchni detektora występują tzw. szumy koherentne powodujące znaczne lokalne zmiany natężenia światła, co utrudnia określenie położenia plamki. Położenie plamki na powierzchni detektora jest określane najczęściej na podstawie punktu, w którym występuje maksimum natężenia światła lub na podstawie centroidu, czyli środka geometrycznego plamki. Ponadto, w praktyce dokładność określenia położenia plamki na powierzchni światłoczułej detektora zależy także od tego, czy fotoelektryczny detektor położenia generuje sygnał ciągiły czy dyskretny (np. detektory CCD). Jeśli powierzchnia obiektu jest niejednorodna i inaczej rozprasza światło w poszczególnych kierunkach, to obraz plamki na powierzchni detektora będzie dodatkowo zniekształcony.

Analiza zależności (26) – (31) pokazuje, że zwiększanie długości ogniskowej obiektywu oraz odległości od lasera do obiektywu wzdłuż linii bazowej sprzyja zwiększeniu rozdzielczości układu pomiarowego. Towarzyszy jednak temu zwiększenie gabarytów układu i zmniejszenie zakresu pomiaru. Dlatego też z praktycznego punktu widzenia dobór parametrów konstrukcyjnych układu triangulacyjnego powinien przede wszystkim uwzględniać wymagania i specyfikę zadania pomiarowego. W typowych układach triangulacyjnych rozdzielczość zawiera się od 0,01 % do 0,05% zakresu pomiarowego.

#### 4.1.2. Analiza czynników powodujących błędy pomiaru

Mimo wielu zalet metody triangulacji laserowej posiadają pewne ograniczenia i wady. Do czynników, które powodują szereg niedogodności w pomiarach triangulacyjnych można zaliczyć:

- wielkość i niejednorodność plamki laserowej,
- możliwość przesłaniania plamki laserowej przez inne elementy obiektu,
- ograniczenie wynikające z kąta padania promienia laserowego na powierzchnię obiektu,
- zakłócenia pomiaru na krawędziach obiektu,
- zakłócenia pomiaru związane ze niejednorodnością struktury i właściwości refleksyjnych powierzchni,
- pochłanianie, kierunkowe odbicie i rozpraszanie światła laserowego,
- szумы koherentne wynikające z tzw. zjawiska plamkowania,
- rozmycie obrazu plamki laserowej w efekcie ruchu.

Do podstawowych czynników powodujących błędy pomiaru współrzędnej  $z$  badanej powierzchni metoda triangulacyjną należy zaliczyć niejednorodny rozkład natężenia światła w plamce rzutowanej na powierzchnię światłoczułą detektora fotoelektrycznego. Niejednorodność tego rozkładu będzie potęgowana przez zjawisko plamkowania światła laserowego. Ruch powierzchni mierzonej może powodować uśrednienie szumów koherentnych spowodowanych tym zjawiskiem. Jednak z uwagi na towarzyszące ruchowi przemieszczenia powierzchni oczekiwać należy wzrostu niepewności pomiaru położenia plamki świetlnej za pomocą detektora fotoelektrycznego. Jeśli przyjąć, że niepewność ta wyrażona jest za pomocą odchylenia standardowego  $\sigma_h$  to korzystając z równania (31) i stosując prawo propagacji błędów otrzymuje się następującą zależność wyrażającą niepewność pomiaru odległości  $z$ :

$$\sigma_z \cong \frac{z^2}{x_0 f} \sigma_h, \quad (36)$$

gdzie:  $\sigma_z$  – odchylenie standardowe określające niepewność pomiaru odległości  $z$ ,  $\sigma_h$  – odchylenie standardowe położenia plamki świetlnej na powierzchni detektora fotoelektrycznego, względem osi optycznej obiektywu,  $x_0$  – odległość od lasera do obiektywu wzdłuż linii bazowej,  $f$  – długość ogniskowej obiektywu.

Z równania (36) wynika, że niepewność pomiaru wartości  $z$  jest odwrotnie proporcjonalna do odległości ogniskowej obiektywu oraz do odległości lasera od obiektywu. Jak już wspomniano o tym wcześniej nadmierne zwiększanie wartości tych parametrów konstrukcyjnych może doprowadzić do zwiększenia gabarytów układu i zmniejszenia zakresu pomiarowego. Najważniejszy wniosek, który wynika z zależności (36) odnosi się do tego, że większą dokładność metody triangulacyjnej uzyskamy zbliżając linię bazową układu do mierzonego obiektu. Sprzyjać to będzie wzrostowi czułości i rozdzielczości układu triangulacyjnego.

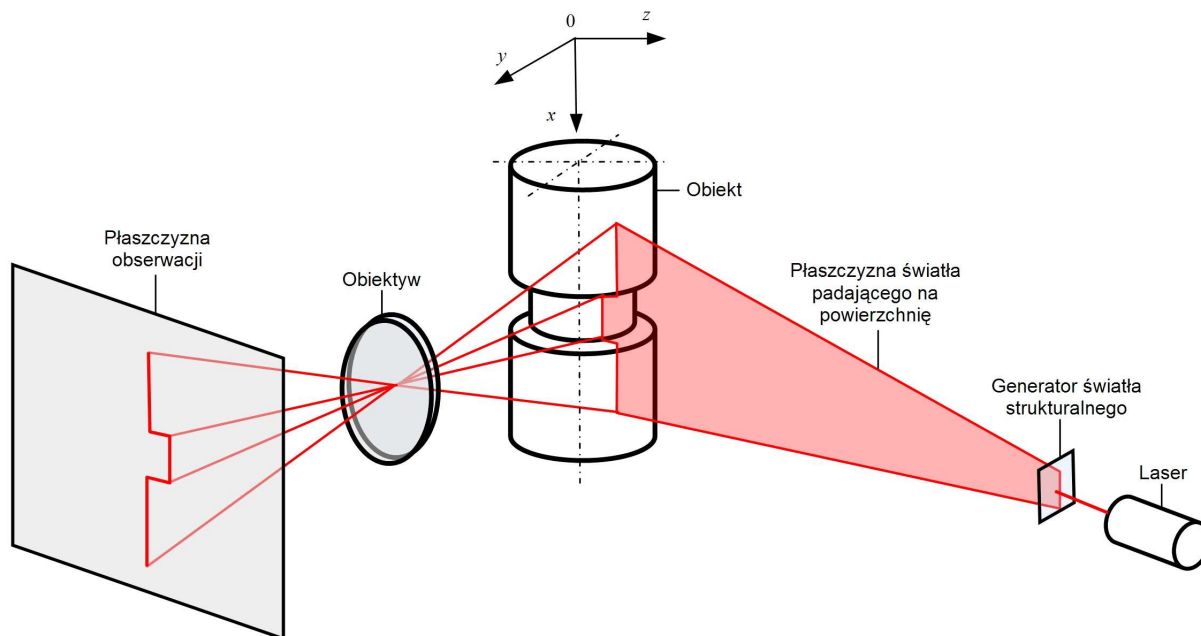
#### 4.2. Podstawy teoretyczne metod światła strukturalnego

Metody światła strukturalnego są często wykorzystywane w aktywnych i współrzędnościowych pomiarach wielkości geometrycznych charakteryzujących ukształtowanie powierzchni obiektu. W metodach tych na mierzoną powierzchnię rzutowany jest pod określonym kątem wzór optyczny o znanej strukturze i wymiarach. Obraz tego wzoru tworzony na powierzchni obiektu ulega zdeformowaniu odwzorowując kształt powierzchni. Na podstawie obserwacji i pomiarów zdeformowanego obrazu wzoru optycznego oraz znajomości warunków oświetlenia powierzchni wyznaczany jest rzeczywisty kształt powierzchni obiektu.

Rzutowanie wzorów optycznych na powierzchnię obiektu w metodach światła strukturalnego jest podobne do rzutowania takich wzorów w metodach triangulacyjnych, z tą różnicą, że w metodach światła strukturalnego na ogół na powierzchnię obiektu rzutuje się bardziej skomplikowane wzory optyczne. Zasadnicza różnica między tymi metodami polega przede wszystkim na sposobie określenia i pomiaru mierzonej wielkości. W metodach triangulacyjnych mierzona jest odległość oświetlonych punktów powierzchni od pewnej linii lub powierzchni bazowej. Natomiast w metodach światła strukturalnego mierzone są rzuty odległości między oświetlonymi punktami powierzchni obiektu, na pewną wybraną płaszczyznę.

### 4.2.1. Ogólna idea metod światła strukturalnego

Rozpatrzmy prosty przypadek oświetlenia obiektu światłem strukturalnym w postaci pojedynczego odcinka linii prostej, co pokazano na rysunku 35 (□62). Linia ta może być np. generowana za pomocą układu projekcyjnego i zwykłej przysłony szczelinowej, dyfrakcyjnego elementu optycznego, skanera laserowego lub innego systemu optycznego. Obraz linii na powierzchni obiektu ulega deformacji stosownie do kształtu tej powierzchni. Jest on za pomocą obiektywu rzutowany na płaszczyznę obserwacji. Analiza i pomiary zniekształcenia linii w płaszczyźnie obserwacji oraz znajomość warunków oświetlenia i parametrów układu obrazującego pozwalają odwzorować kształt powierzchni w oświetlonych miejscach i wyznaczyć wartości wymiarów opisujących ten kształt.



Rys. 35. Zasada pomiaru kształtu powierzchni metodą światła strukturalnego  
Fig. 35. The measurement principle of surface form by structured light method

Ogólna idea takiego odwzorowania polega na wyznaczeniu współrzędnych punktów obiektu w wybranym układzie współrzędnych  $0xyz$ . W przypadku pokazanym na rysunku 35 (□62) dokonuje się tego wyznaczając współrzędne punktów przecięcia promieni tworzących obraz w płaszczyźnie obserwacji z płaszczyzną światła emitowanego przez laser i przekształcanego przez generator światła strukturalnego. Aby wyznaczyć równanie tej płaszczyzny światła przeprowadza się kalibrację układu. W tym celu, w ogólnym przypadku, oświetla się obiekt o znanym kształcie i wymiarach rejestrując obraz w płaszczyźnie obserwacji. Mając zidentyfikowanych  $n$  punktów o różnych wartościach współrzędnych, lecz położonych na tej samej płaszczyźnie świetlnej, wykorzystuje się współrzędne tych  $n$  punktów do utworzenia układu równań:

$$a_1x_i + a_2y_i + a_3z_i + a_4 = 0, \text{ dla } i = 1, \dots, n. \quad (37)$$

W celu uniknięcia rozwiązania trywialnego, dla którego wszystkie współczynniki  $a_1, a_2, a_3, a_4$  są równe zero dzieli się równanie (37) stronami przez  $a_3$ , przyjmując, że  $a_3 \neq 0$ . W rezultacie otrzymuje się układ równań:

$$b_1x_i + b_2y_i + z_i + b_3 = 0, \text{ dla } i = 1, \dots, n, \quad (38)$$

lub po przekształceniu wyrażenia (38) układ równań w nieco zmienionej postaci:

$$b_1x_i + b_2y_i + b_3 = -z_i, \text{ dla } i = 1, \dots, n, \quad (39)$$

przy czym współczynniki  $b_1, b_2, b_3$  dane są następującymi zależnościami:

$$b_1 = \frac{a_1}{a_3}, \quad (40)$$

$$b_2 = \frac{a_2}{a_3}, \quad (41)$$

$$b_3 = \frac{a_4}{a_3}. \quad (42)$$

Nadokreślony układ równań (39), zapisany poniżej w postaci macierzowej:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z_1 \\ -z_2 \\ -z_3 \\ \vdots \\ -z_n \end{bmatrix}, \text{ dla } n > 3, \quad (43)$$

lub równoważnie (oznaczając macierz układu symbolem  $\mathbf{A}$ , macierz kolumnową niewiadomych symbolem  $\mathbf{B}$ , zaś macierz kolumnową wyrazów wolnych symbolem  $\mathbf{Z}$ ):

$$\mathbf{AB} = \mathbf{Z}, \text{ dla } n > 3, \quad (44)$$

może być rozwiązany metodą pseudoinwersji opartej na wyznaczeniu uogólnionej macierzy odwrotnej. Uogólniona macierz odwrotna, nazywana także macierzą pseudoodwrotną, ma własności podobne do zwykłej macierzy odwrotnej, z tym, że macierz pseudoodwrotna - w odróżnieniu do macierzy odwrotnej - istnieje dla każdej macierzy. Metoda pseudoinwersji pozwala znaleźć rozwiązanie układu równań liniowych, jako najlepszą aproksymację według kryterium najmniejszych kwadratów [PEN1956]:

$$\mathbf{B}_0 = \min \|\mathbf{Z} - \mathbf{AB}\|^2. \quad (45)$$

Rozwiązanie  $\mathbf{B}_0$  ma postać macierzy kolumnowej zawierającą współczynniki  $b_1^0, b_2^0, b_3^0$  równania płaszczyzny optymalnie położonej względem  $n$  zmierzonych punktów, w sensie najmniejszych kwadratów. Macierz tę można wyznaczyć jako iloczyn macierzy pseudoodwrotnej Moore'a-Penrose'a  $\mathbf{R}$  i macierzy kolumnowej  $\mathbf{Z}$ :

$$\mathbf{B}_0 = \mathbf{RZ}. \quad (46)$$

Pseudoodwrotna macierz Moore'a-Penrose'a  $\mathbf{R}$  jest uogólnioną macierzą odwrotną  $\mathbf{A}^+$  do macierzy  $\mathbf{A}$  i może być wyznaczona z zależności:

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (47)$$

gdzie:  $\mathbf{A}^+$  – uogólniona macierz odwrotna do macierzy  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{A}^T$  – macierz transponowana,  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$  – macierz odwrotna do macierzy  $(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ .

Jeżeli w układzie współrzędnych  $0xyz$  wyznaczone zostanie równanie, utworzonej przez generator światła strukturalnego, płaszczyzny świetlnej opisanej równaniem:

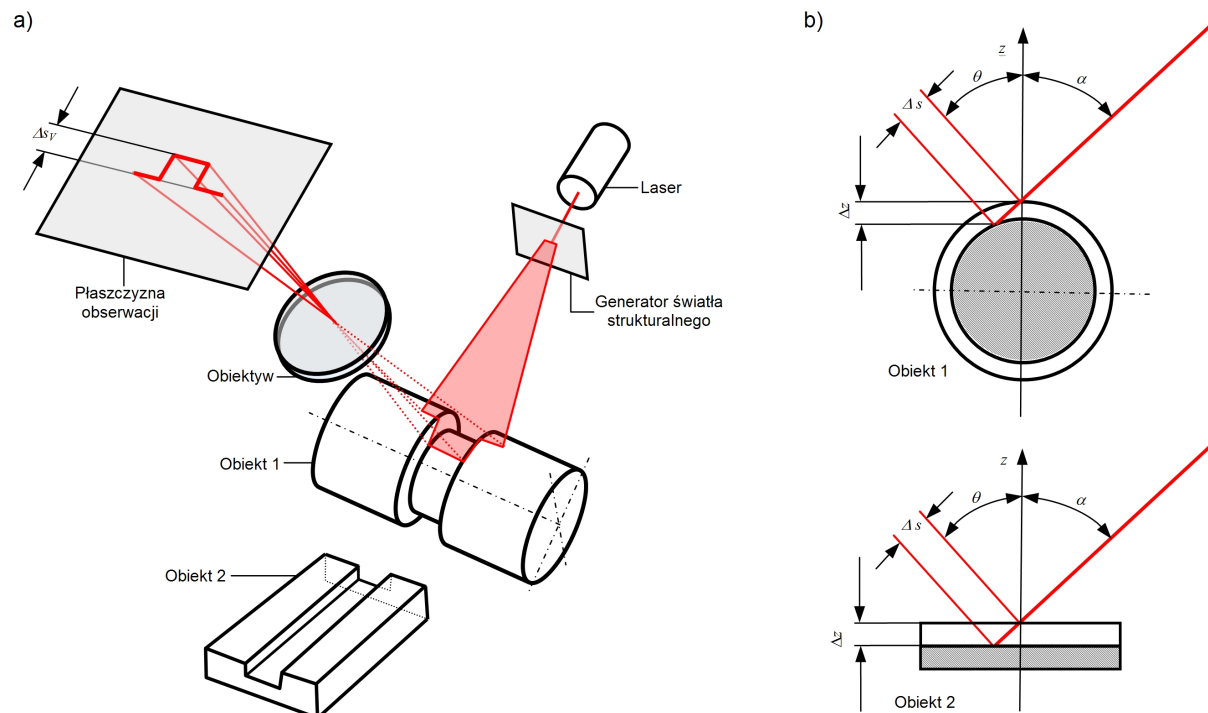
$$b_1^0 x + b_2^0 y + b_3^0 z = 0, \quad (48)$$

to stosując odwrotne przekształcenie perspektywiczne (rzutowe) uzyskuje się układ trzech równań liniowych. Rozwiązanie tego układu pozwala, dla danego oświetlonego punktu powierzchni, określić współrzędne położenia odpowiedniego punktu w linii odwzorowanej w płaszczyźnie obserwacji.

Przedstawione rozumowanie można zastosować analogicznie w stosunku do bardziej złożonych wzorów optycznych, takich np. jak zbiór punktów, zbiór linii, siatka linii, krzyż itp., przy czym wybór odpowiedniego wzoru optycznego powinien być dostosowany do potrzeb danego zadania pomiarowego.

#### 4.2.2. Ocena kształtu powierzchni metodą światła strukturalnego

Przeprowadzona analiza pokazuje, że metody światła strukturalnego mają bardzo ogólny charakter, gdyż pozwalają wyznaczać współrzędne wybranych punktów obiektu w trójwymiarowym układzie współrzędnych. To właśnie sprawia, że metody te znajdują ostatnio coraz szersze zastosowanie w pomiarach współrzędnościowych wielkości geometrycznych, w systemach wizyjnych robotów itp. Jeżeli zależy nam jedynie na zmierzeniu różnic w położeniu poszczególnych punktów powierzchni obiektu, a nie na wyznaczeniu ich współrzędnych, to można zastosować znacznie prostszy, chociaż mniej ogólny wariant metod światła strukturalnego. Polega on na wyznaczeniu wielkości charakteryzujących kształt powierzchni na podstawie zmierzonych zniekształceń wzoru optycznego rzutowanego na powierzchnię oraz kątów padania i obserwacji. Na rysunku 36 (□64) pokazano przykład ilustrujący takie uproszczone podejście.



Rys. 36. Pomiar głębokości rowka na różnych powierzchniach metodą światła strukturalnego: a) na powierzchni walcowej, b) na powierzchni płaskiej

Fig. 36. The measurement of groove depth on different surfaces by structured light method: a) on cylindrical surfaces, b) on plane surface

Niech na powierzchnię obiektu pod znanym kątem  $\alpha$  pada wąska wiązka światła ukształtowana w postaci płaszczyzny tak jak pokazano to na rysunku 36 (□64). Wiązka taka, jak już wspomniano o tym wcześniej, może być wytworzona różnymi sposobami. Na powierzchni wiązka ta tworzy wąską linię, której postać zależy od kształtu powierzchni obiektu. Mierząc zdeformowanie  $\Delta s$  tej linii i znając kąt padania  $\alpha$  światła na powierzchnię oraz kąt obserwacji  $\theta$ , możemy wyznaczyć wartość różnicy  $\Delta z$  współrzędnych  $z$  rozpatrywanych punktów. Różnica ta, jak wynika z rysunku 36b (□64), w przypadku obiektu 2 równa będzie głębokości rowka, natomiast w przypadku obiektu 1 będzie ona nieco większa niż różnica promieni odpowiednich powierzchni walcowych. Powodem tego jest to, że z uwagi na ukośne oświetlenie przedmiotu analizowane punkty powierzchni odpowiadające górnej i dolnej powierzchni rowka leżą w innych, przesuniętych względem siebie przekrojach powierzchni. Jest to pewien niedostatek tej metody podobnie jak możliwość przesłaniania wiązki padającej na powierzchnię obiektu przez inne jego elementy.

Jeżeli kąt padania  $\alpha$  światła na powierzchnię obiektu, kąt obserwacji  $\theta$  oraz powiększenie układu obrazującego (obiektywu)  $V$  są znane, to zależność między obserwowanym zniekształceniem obrazu linii w płaszczyźnie obserwacji a zdeformowaniem powierzchni obiektu można wyznaczyć korzystając z przedstawionego niżej rozumowania.



Niech miarą zmiany kształtu powierzchni będzie wartość różnicy  $\Delta z$  współrzędnych  $z$  dwóch rozpatrywanych punktów A i B, tak jak pokazano to na rysunku 37 (□65). Z trójkąta ABC wynika, że różnicę  $\Delta z$  współrzędnych  $z$  punktów A i B określa równanie:

$$\Delta z = AC = AB \cos \alpha. \quad (49)$$

Obserwowany pod kątem  $\theta$  odcinek AB ma długość  $\Delta s$ , równą długości odcinka BD. Z prostokątnego trójkąta ABD wynika, że długość odcinka BD wynosi:

$$BD = \Delta s = AB \sin(\pi - \alpha - \theta) = AB \sin(\alpha + \theta), \quad (50)$$

przy czym wszystkie kąty w równaniu (50) wyrażane są w radianach. Z równania (50) można wyznaczyć długość odcinka AB jako:

$$AB = \frac{BD}{\sin(\alpha + \theta)}. \quad (51)$$

Następnie podstawiając wyrażenie (51) do równania (49) otrzymujemy:

$$\Delta z = AC = AB \cos \alpha = \frac{BD \cos \alpha}{\sin(\alpha + \theta)} = \frac{\Delta s \cos \alpha}{\sin(\alpha + \theta)}. \quad (52)$$

W płaszczyźnie obserwacji dokonywany jest pomiar odległości  $\Delta s_V$ , która jest proporcjonalna do długości  $\Delta s$ . Współczynnik proporcjonalności odległości  $\Delta s_V$  do długości  $\Delta s$  jest równy powiększeniu obiektywu  $V$ . Uwzględniając ten fakt, możemy zapisać równanie (52) w postaci:

$$\Delta z = \frac{\Delta s_V \cos \alpha}{V \sin(\alpha + \theta)}. \quad (53)$$

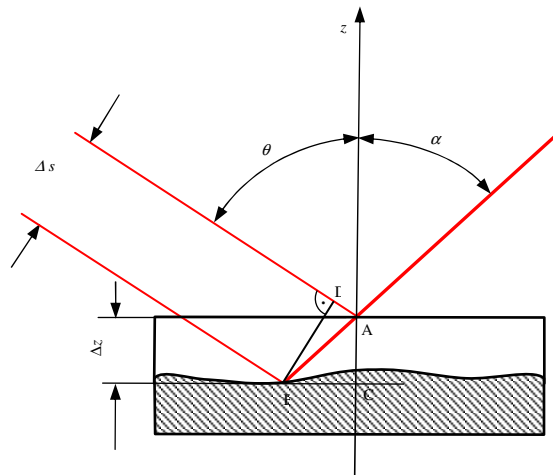
Równanie (53) najczęściej jest stosowane w praktyce w jeszcze prostszej postaci. Uzyskuje się ją zazwyczaj przyjmując pewne charakterystyczne wartości kąta padania  $\alpha$  światła na powierzchnię obiektu oraz kąta obserwacji  $\theta$ . Na przykład, przyjmując wartość kąta padania  $\alpha$  równą  $\pi/4$  radiana i wartość kąta obserwacji  $\theta$  równą zero otrzymuje się:

$$\Delta z = \frac{\Delta s_V \cos(\pi/4)}{V \sin(\pi/4)} = \frac{\Delta s_V}{V}. \quad (54)$$

Natomiast przyjmując wartość kąta padania  $\alpha$  równą wartości kąta obserwacji  $\theta$  i wynoszącą  $\pi/4$  radiana, po podstawieniu ich do równania (53) uzyskujemy:

$$\Delta z = \frac{\Delta s_V \cos(\pi/4)}{V \sin(\pi/2)} = \frac{\Delta s_V}{\sqrt{2} V}. \quad (55)$$

Analizując równania (54) i (55) widać, że czułość układu - wyrażona stosunkiem  $\Delta s_V$  do  $\Delta z$  - dla układu opisanego równaniem (54) równa jest powiększeniu obiektywu  $V$ , podczas gdy czułość układu opisanego równaniem (55) jest ponad 40 % większa.



Rys. 37. Schemat oświetlenia powierzchni i obserwacji światła strukturalnego

Fig. 37. Illumination of the surface and observation of the structured light

Warto jeszcze przeanalizować przypadek prostopadłego rzutowania wzoru optycznego na powierzchnię obiektu ( $\alpha = 0$ ) i obserwacji powierzchni pod kątem  $\theta = \pi/4$  rad. Wówczas, korzystając z równania (53) otrzymujemy:

$$\Delta z = \frac{\Delta s_V \cos(0)}{V \sin(\pi/4)} = \frac{\sqrt{2} \Delta s_V}{V}. \quad (56)$$

Łatwo stwierdzić, że w tym przypadku czułość jest o około 30 % mniejsza niż w przypadku układu opisanego równaniem (54). Z punktu widzenia czułości układu ten przypadek jest niezbyt korzystny, ale ma on niewątpliwą zaletę polegającą na tym, że analizowane punkty powierzchni odpowiadające górnej i dolnej powierzchni rowka leżą w tym samym przekroju powierzchni obiektu. Ponadto układ taki jest najmniej narażony na przesłanianie wiązki padającej na powierzchnię obiektu przez inne jego elementy.

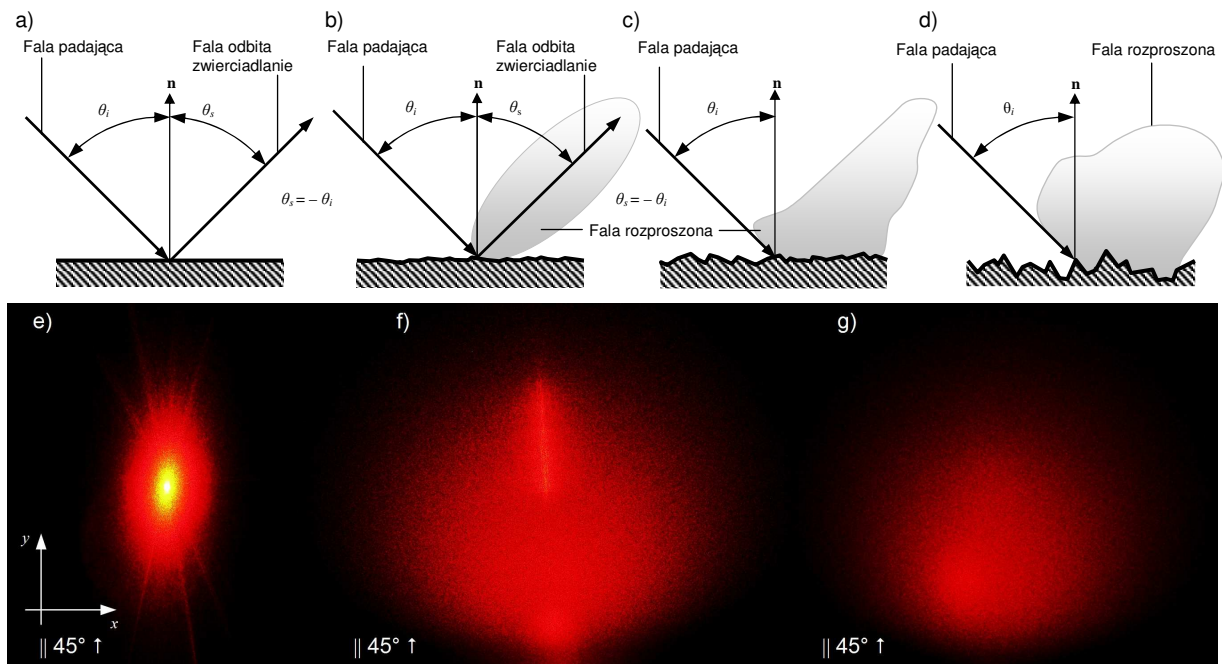
### 4.3. Podstawy teoretyczne metod skaterometrycznych

Propagacji światła w ośrodkach materialnych towarzyszy rozpraszanie światła. Zjawisko to uwidacznia się w takim oddziaływaniu materii ośrodka i fali świetlnej, które powoduje, że część energii światła propaguje w innych kierunkach niż kierunek fali padającej. Zjawisko to jest najczęściej wyjaśniane pochłanianiem energii pierwotnej fali świetlnej przez naładowane elektrycznie cząstki ośrodka materialnego, np. elektrony. Proces absorpcji energii fali świetlnej powoduje wymuszone drgania cząstek. To z kolei jest przyczyną generowania i reemisji przez te cząstki wtórnych sferycznych fal świetlnych. W przypadku, gdy ośrodek materialny jest optycznie izotropowy i jednorodny, w wyniku interferencji spójnych fal wtórnych powstaje jedynie fala świetlna, której kierunek propagacji jest zgodny z kierunkiem fali pierwotnej. Wówczas światło nie jest rozpraszane. W sytuacji, gdy ośrodek materialny zawiera jakiegokolwiek niejednorodności, fale wtórne tracą spójność, a w rezultacie ośrodek materialny rozprasza światło w różnych kierunkach.

Rozpraszanie światła (ang. *Light Scattering*) obserwujemy wtedy, gdy światło podczas propagacji napotyka na niejednorodności ośrodka optycznego. W rezultacie, niejednorodności ośrodka powodują zmiany lokalnych kierunków propagacji światła. Niejednorodności te często występują we wnętrzu ośrodka lub na granicy rozdzielającej dwa ośrodki optyczne. Wewnętrzne niejednorodności ośrodka mogą być spowodowane np. lokalnymi fluktuacjami gęstości, niejednorodnością i anizotropią materiału, wtrąceniami itp. Podczas propagacji światło napotyka niekiedy na swej drodze granicę rozdziału dwóch różnych, lecz wewnętrznie jednorodnych, ośrodków optycznych. Jeśli ta powierzchnia graniczna, rozdzielająca dwa ośrodki optyczne, jest nierówna, to światło ulega na niej rozproszeniu, podobnie jak w ośrodku wewnętrznie niejednorodnym.

Jak już stwierdzono zjawisko rozpraszania światła zachodzi w wyniku odbicia fali światła od powierzchni rzeczywistej, na której występują nierówności. Jeżeli powierzchnia jest płaska i idealnie gładka to światło odbijane jest od niej zgodnie z prawem odbicia światła. Energia światła odbitego od tej powierzchni emitowana jest w jednym kierunku. Odbicie takie nazywa się odbiciem zwierciadlanym (ang. *Specular Reflection*) [RAO2003]. Jeśli na powierzchni występują nierówności, których wymiary porównywalne są z długością fali światła, to część energii zostanie odbita zgodnie z prawem odbicia, część zaś ulegnie rozproszeniu w wielu kierunkach. W przypadku, gdy nierówności są znacznie większe od długości fali światła, cała energia światła odbitego ulega rozproszeniu. Odbicie takie nazywane jest odbiciem dyfuzyjnym (ang. *Diffuse Reflection*) [RAO2003].

Za pomocą prostych doświadczeń można stwierdzić, iż zjawisko rozpraszania światła na granicy dwóch ośrodków optycznych, np. przy oświetleniu światłem o stałej długości fali, ujawnia się tym wyraźniej, im bardziej nierówna jest ta granica. To proste spostrzeżenie jest podstawą praktycznego wykorzystania zjawiska rozpraszania światła do oceny nierówności powierzchni. Na rysunku 38a-38d (□67) schematycznie pokazano różnice w odbiciu światła od powierzchni o różnych nierównościach. Przykładowe obrazy światła laserowego rozproszonego przez powierzchnie rzeczywiste o różnych nierównościach pokazano na rys. 38e-38g (□67). Można zauważyć, że odbiciu światła od powierzchni nierównej, oprócz zjawiska rozpraszania światła, towarzyszy także zjawisko pochłaniania światła przez powierzchnię. W przypadku powierzchni silnie pochłaniających światło zjawisko to objawia się znacznym obniżeniem natężenia światła odbitego.



Rys. 38. Odbicie światła od powierzchni: a) gładkiej, b) o niewielkiej chropowatości, c) o średniej chropowatości, d) bardzo chropowatej; obrazy światła laserowego (długość fali:  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , kąt padania:  $45^\circ$ ) odbitego od powierzchni: e) o niewielkiej chropowatości – polerowana próbka stalowa ( $Ra = 0,081 \mu\text{m}$ ), f) o średniej chropowatości – mikrowygładzana próbka z tworzywa sztucznego Rtalon 6 PLA ( $Ra = 0,17 \mu\text{m}$ ), g) bardzo chropowatej – powierzchnia ściernicy ( $Ra > 3 \mu\text{m}$ )

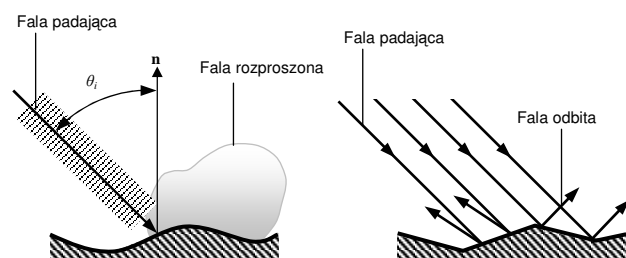
Fig. 38. Reflection of the light from surface: a) smooth surface, b) slightly rough surface, c) moderately rough surface, d) very rough surface; images of the laser light (wavelength:  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , incidence angle:  $45^\circ$ ) reflected from surface: e) slightly rough surface – polished steel sample ( $Ra = 0.081 \mu\text{m}$ ), f) moderately rough surface – microfinished Rtalon 6 PLA plastic sample ( $Ra = 0.17 \mu\text{m}$ ), g) very rough surface – grinding wheel ( $Ra > 3 \mu\text{m}$ )

### 4.3.1. Model powierzchni zwierciadlanej

Analiza rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne dokonywana jest najczęściej metodami optyki falowej. Światło rozpatrywane jest wtedy jako fala elektromagnetyczna, która odbijając się od powierzchni nierównej zostaje zmodulowana fazowo i amplitudowo. Zmienia się także stan polaryzacji tej fali. W wielu przypadkach pomija się jednak stan polaryzacji światła rozproszonego, analizując jedynie skalarną amplitudę pola elektrycznego. Zastosowanie w analizie modelu falowego pozwala na uzyskanie wielu istotnych informacji zarówno o zjawisku rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne, jak też wpływie ukształtowania powierzchni na jego przebieg. Jednakże sama analiza jest na tyle skomplikowana, iż rzadko wykorzystuje się ją w pracach z zakresu inżynierii powierzchni.

Niekiedy w celu uproszczenia analizy rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne model falowy zastępowany bywa modelem promieniowym. Otrzymuje się go przy założeniu, iż długość fali światła dąży do zera. Podejście takie zaproponował w latach 60. XX wieku P. Beckmann [BEC1963]. Uproszczony opis powierzchni charakterystyczny dla tego podejścia nazwano później modelem powierzchni Zwierciadlanej (*ang. Mirror Facet Model*). Analizowana powierzchnia nierówna traktowana jest w tym modelu jako zespół połączonych, odpowiednio zorientowanych, płaskich miniaturowych zwierciadeł. Ocenę nachylenia zboczy tego typu powierzchni w układzie 2D i 3D przedstawiono m.in. w pracach [PAW2004], [PAW2005-2].

Wiązka światła padająca na taką powierzchnię rozpatrywana jest jako zbiór promieni. Promienie odbijane są zgodnie z prawem odbicia. Pole wypadkowe światła odbitego jest więc w tym modelu sumą wszystkich promieni odbitych w danym kierunku. W ten sposób model powierzchni zwierciadlanej staje się bardziej geometrycznym niż fizycznym modelem rozpraszania. Na rysunku 39 (67) w sposób obrazowy pokazano porównanie falowego modelu rozpraszania światła i modelu powierzchni zwierciadlanej.

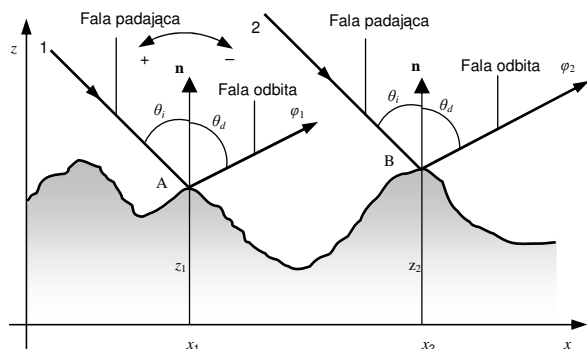


Rys. 39. Obrazowe porównanie falowego modelu rozpraszania światła i modelu powierzchni zwierciadlanej  
Fig. 39. Pictorial comparison between wave model of light scattering and mirror facet model

Model powierzchni zwierciadlanej z racji dużego uproszczenia nie może opisywać wielu aspektów zjawiska rozpraszania światła. Ma on jednak tę zaletę, iż jest chętnie wykorzystywany w praktyce [BRO1986-1], [ŁUK1989-1], [DES1996], [ABI1999], [ŁUK2000] do oceny powierzchni o dużych nierównościach.

### 4.3.2. Kryterium Rayleigha

Jednym z podstawowych problemów w analizie rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne jest określenie warunków, w których odbicie światła od powierzchni nierównej zmienia się z odbicia zwierciadlanego w odbicie dyfuzyjne. Warunki takie nie mogą być ściśle określone, gdyż w praktyce widzimy, że część światła odbija się od tej samej powierzchni zwierciadlanie, a część dyfuzyjnie. Jednak zagadnienia to warto jest rozpatrzyć po to, aby ujawnić czynniki wpływające na rozpraszanie światła przez powierzchnię nierówną.



Rys. 40. Odbicie fali światła od powierzchni nierównej  
Fig. 40. Reflection of the light wave from rough surface

Przeprowadzona poniżej analiza pokazuje, że odbicie światła od powierzchni zależy nie tylko od jej nierówności, ale także długość fali światła oraz od kąta padania światła na powierzchnię. Pierwsze rozważania jakościowe dotyczące rozpraszania fal akustycznych przeprowadził Lord Rayleigh [OGI1991]. Uogólniono je potem na odbicie fal elektromagnetycznych [BEC1963].

Niech płaska fala światła o długości  $\lambda$ , pada pod kątem  $\theta_i$ , na nominalnie płaską powierzchnię nierówną, co pokazano na rysunku 40 (□68). Różnica drogi optycznej  $\Delta r$  między falą odbitą w punkcie B i falą odbitą w punkcie A wynosi:

$$\Delta r = (x_2 - x_1)(\sin \theta_d + \sin \theta_i) + (z_1 - z_2)(\cos \theta_i + \cos \theta_d), \quad (57)$$

gdzie:  $z_1, z_2$  – wysokości nierówności w punktach o współrzędnych  $x_1, x_2$ ,  $\theta_i$  – kąt padania,  $\theta_d$  – kąt rozproszenia.

W przypadku, gdy  $\theta_d = -\theta_i$  otrzymujemy:

$$\Delta r = 2\Delta z \cos \theta_i, \quad (58)$$

gdzie:  $\Delta z = z_1 - z_2$  – różnica wysokości nierówności  $z_1$  i  $z_2$ .

Zatem różnica faz  $\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  między obiema częściami fali jest równa:

$$\Delta \varphi = 2k \Delta z \cos \theta_i, \quad (59)$$

gdzie:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – liczba falowa.

Na ogół przyjmuje się, że jeżeli różnica faz  $\Delta \varphi = 0$ , to odbicie fali od powierzchni nierównej jest odbiciem zwierciadlanym. Gdy różnica faz  $|\Delta \varphi| = \pi$  radianów, to obie części fali odbitej są w przeciwnej fazie. W wyniku interferencji nastąpi wygaszenie światła propagującego w kierunku odbicia zwierciadlanego. Zgodnie z zasadą zachowania energii, światło odbite od powierzchni musi propagować w innych kierunkach. Rayleigh przyjął, iż powierzchnie wprowadzające bezwzględną różnicę faz  $|\Delta \varphi| < \pi/2$  rad będą zaliczane do powierzchni gładkich. Po nałożeniu tego warunku na prawą stronę wyrażenia (59) otrzymujemy tzw. kryterium Rayleigha (ang. *Rayleigh Criterion*):

$$\Delta z < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}. \quad (60)$$

Określa ono, jaka jest największa dopuszczalna, wg tego kryterium, wysokość nierówności  $\Delta z_{\max}$  powierzchni gładkiej. Kryterium to jednak jest umowne i niedoskonałe. Ważną jego zaletą jest prostota oraz to, że określone jest ono za pomocą trzech łatwych do zmierzenia parametrów geometrycznych.

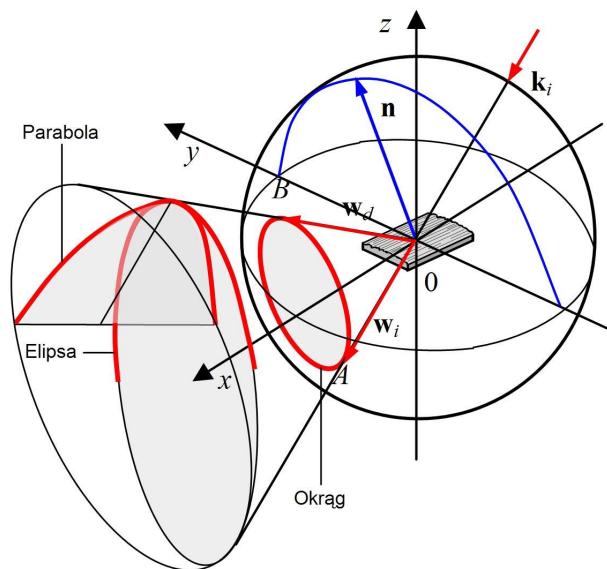
### 4.3.3. Rozkład światła rozproszonego

Określenie ogólnej postaci przestrzennego rozkładu natężenia światła rozproszonego na ogół nie jest łatwe. W pracy [ŁUK2001] pokazano, że wykorzystując zasady optyki geometrycznej można z dużym przybliżeniem określić ogólną postać tego rozkładu. Zależy ona od wielu czynników. Wpływają na nią wymiary oraz ukształtowanie nierówności, a także nominalny kształt i sposób oświetlenia powierzchni. W przytoczonej wyżej pracy określono przybliżoną postać rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystując prosty, geometryczny model rozpraszania światła.

W przypadku niektórych powierzchni, np. powierzchni szlifowanych, można przyjąć, że nierówności mają kształt rowków równoległych do jednej z osi układu współrzędnych np. do osi  $0x$ . Opisane są one w przybliżeniu funkcją  $z = f(y)$ , która praktycznie nie zależy od współrzędnej  $x$ . Analizę rozpraszania światła przez takie powierzchnie przeprowadzono w pracy [ŁUK2001]. Pokazała ona, że ogólna postać rozkładu natężenia światła rozproszonego przez takie powierzchnie ma kształt fragmentu krzywej stożkowej. Ilustruje to rysunek 41 [69].

Rodzaj krzywej opisującej przestrzenny kształt rozkładu światła rozproszonego zależy od kierunku wektora falowego  $\mathbf{k}_i$  fali padającej, a także od położenia płaszczyzny obserwacji względem stożka zakreślonego przez wektor  $\mathbf{w}_d$ . Najczęściej krzywą tą jest elipsa, okrąg lub parabola. W przypadku szczególnym, gdy wektor falowy  $\mathbf{k}_i$  leży w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku nierówności (na rysunku 41 [69] jest to płaszczyzna  $0yz$ ), rozkład natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię  $z = f(y)$  jest położony na odcinku prostej, będącej linią przecięcia płaszczyzny padania i płaszczyzny obserwacji.

Dla powierzchni obrabianych np. szlifowanych, polerowanych itp. kąty nachylenia nierówności do osi  $0x$  zmieniają się w pewnym niewielkim zakresie. Z tego powodu pojawia się nieznaczne rozproszenie poprzeczne. Krzywe stożkowe opisujące rozkład natężenia światła rozproszonego ulegają pewnemu poprzecznemu rozmyciu. Będzie ono tym większe, im większy będzie zakres zmian kątów nachylenia nierówności względem osi, której kierunek jest zgodny z kierunkiem nierówności.

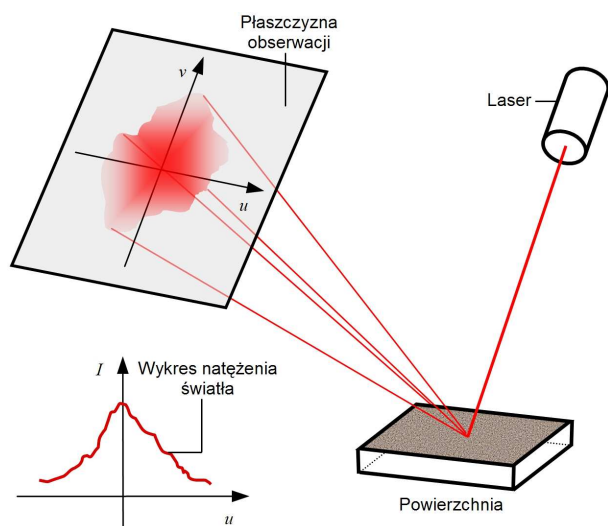


Rys. 41. Układ geometryczny rozpraszania: sfera do analizy geometrii rozpraszania i kształt rozkładu natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię  $z = f(y)$ , w zależności od położenia płaszczyzny obserwacji  
 Fig. 41. Scattering geometry: sphere for scattering analysis and form of scattered light distribution obtained from  $z = f(y)$  depending to position of observation plane

To, że rozkład natężenia światła rozproszonego jest tylko fragmentem krzywej stożkowej, wynika na ogół z ograniczonego zakresu zmiany kątów nachylenia nierówności do osi  $0y$  dla powierzchni rzeczywistych. To ograniczenie zakresu zmiany kątów, powoduje znaczny spadek natężenia światła rozproszonego dla większych kątów rozproszenia. Ale nawet wtedy, gdy kąty te zmieniają się w zakresie od  $-\pi/2$  do  $\pi/2$  radiana, rozkład natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie nieprzezroczyste, nie może być obserwowany w tych punktach płaszczyzny obserwacji, w których współrzędna  $z$  jest ujemna. Powodem tego są odbicia wielokrotne, pojawiające się na pewno wtedy, gdy wartość bezwzględna kąta odbicia  $\theta_d$ , mierzony względem osi  $0z$ , przekroczy  $\pi/2$  radiana.

Analiza przestrzennego rozkładu natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię  $z = f(y)$ , której nierówności mają kształt rowków równoległych do jednej z osi układu współrzędnych, jest stosunkowo prosta. W przypadku, gdy powierzchnia ma bardziej złożoną strukturę nierówności lub inny kształt nominalny, jest to bardziej skomplikowane. Jeżeli np. struktura nierówności powierzchni jest dwukierunkowa lub wielokierunkowa, to przybliżony kształt rozkładu natężenia światła rozproszonego, w wybranej płaszczyźnie obserwacji, wyznacza się na podstawie analizy rozproszenia dla każdego z kierunków oddzielnie, a następnie dokonuje się superpozycji uzyskanych wyników. Analiza postaci przestrzennego rozkładu natężenia światła rozproszonego upraszcza się jeszcze bardziej, gdy światło pada na powierzchnię  $z = f(y)$  pod kątem  $\theta_i$  równym zeru.

Ilościowa ocena rozkładu natężenia światła rozproszonego przez powierzchnie nierówne nie jest łatwa. Najczęściej rozkład taki, zarejestrowany w płaszczyźnie obserwacji, oceniany jest na podstawie zakresu kątów rozproszenia. Zakres kątów rozproszenia na ogół ocenia się na podstawie wymiarów zarejestrowanego obrazu światła rozproszonego. Ocena taka, zwłaszcza w przypadku rozkładu światła rozproszonego przez powierzchnie anizotropowe, dokonywana jest niekiedy względem wybranego układu współrzędnych położonego w płaszczyźnie obserwacji. Pozwala to dodatkowo scharakteryzować ukierunkowanie śladów obróbki na badanej powierzchni.



Rys. 42. Rozkład natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię  
Fig. 42. Intensity distribution of light scattered from surface

Załóżmy, że w płaszczyźnie obserwacji rejestrujemy rozkład natężenia światła opisany pewną funkcją  $I = f(u, v)$ , gdzie  $I$  oznacza natężenie światła, a  $u$  i  $v$  są zmiennymi niezależnymi wybranego układu współrzędnych położonego w płaszczyźnie obserwacji. Pokazano to na rysunku 42 (□70). Na podstawie funkcji  $I = f(u, v)$  można wyznaczyć różne parametry charakteryzujące tę funkcję. Ogólnie rzecz ujmując mogą to być parametry geometryczne i fotometryczne. Parametry geometryczne będą charakteryzować te cechy funkcji  $I = f(u, v)$ , które są niezależne od natężenia światła  $I$ , a zależą jedynie od zmiennych  $u$  i  $v$ . Natomiast parametry fotometryczne będą zależne od natężenia światła  $I$ , lecz mogą też zależeć od zmiennych  $u$  i  $v$ . Na ogół przed oceną rozkładu natężenia światła rozproszonego na podstawie zarejestrowanego obrazu natężenia światła rozproszonego obraz taki poddaje się operacji progowania, a następnie dokonuje się oceny parametrów geometrycznych i fotometrycznych.

Spośród parametrów geometrycznych, oprócz charakterystycznych wymiarów obrazu, dobrą charakterystyką może być pole powierzchni obrazu. Wyznacza się je przez operację całkowania funkcji  $I = f(u, v)$ , przyjmując, że we wszystkich punktach, w których jest ona niezerowa, wartość natężenia jest równa jedności:

$$S = \iint du dv. \quad (61)$$

W przypadku, gdy mamy do czynienia z zarejestrowanym obrazem cyfrowym, operacja całkowania zostanie zastąpiona operacją sumowania tych obszarów płaszczyzny obserwacji, w których wartości funkcji po progowaniu są różne od zera.

Ważnym parametrem fotometrycznym jest sumaryczne natężenie światła  $I_{\Sigma}$  w obrazie światła rozproszonego przez powierzchnię. Parametr ten wyznacza się po dokonaniu operacji progowania zgodnie z zależnością:

$$I_{\Sigma} = \iint_S I(u, v) du dv. \quad (62)$$

Podobnie jak poprzednio, w przypadku obrazu cyfrowego, operacja całkowania zostanie zastąpiona operacją sumowania wartości natężeń w poszczególnych obszarach płaszczyzny obserwacji.

Dwa ostatnio przedstawione parametry są parametrami ogólnymi i mogą być zastosowane do oceny rozkładu natężenia światła rozproszonego o dowolnej postaci. W przypadku gdy oceniamy rozkłady wykazujące pewne cechy charakterystyczne można zastosować do ich oceny inne parametry geometryczne i fotometryczne.



BADANIA DOŚWIADCZALNE

---





W ramach pracy przeprowadzono badania doświadczalne. Celem tych badań była eksperymentalna weryfikacja hipotezy badawczej. Polegała ona na takiej integracji metod triangulacji i skaterometrii laserowej z technikami nakładania obrazów i śledzenia obiektów, aby możliwa była jednoczesna aktywna kontrola SGP oraz wymiaru przedmiotu obrabianego. Opracowanie takiej zintegrowanej metody pomiarowej wymagało najpierw przeprowadzenia badań rozpoznawczych wybranych metod optycznych oraz metod przetwarzania i analizy obrazu, w celu określenia konfiguracji stanowiska badawczego umożliwiającego odpowiednią integrację tych metod. Następnie, po zbudowaniu odpowiedniego stanowiska badawczego, możliwe było przeprowadzenie badań właściwych.

## 5.1. Badania rozpoznawcze

Głównym celem badań rozpoznawczych było przeanalizowanie wymienionych w analizie literatury optycznych metod pomiarowych pod kątem możliwości wykorzystania ich do aktywnej kontroli SGP i wymiaru. Analizie poddano następujące metody optyczne:

- metodę triangulacji laserowej (ocena wymiaru przedmiotu),
- metodę skaterometrii laserowej (ocena struktury geometrycznej powierzchni pod względem chropowatości powierzchni),
- metodę światła strukturalnego wykorzystującą projekcję wzorów optycznych (analiza struktury geometrycznej powierzchni pod względem kształtu).

Starano się przetestować ww. metody przy różnych konfiguracjach aparatury pomiarowej, wykonując pomiary na powierzchniach obrobionych różnymi technikami obróbkowymi. Sprawdzano także możliwości wykorzystania metod przetwarzania i analizy obrazu, jako technik wspomagających klasyczne metody pomiarowe. W prowadzonych badaniach korzystano z następujących metod:

- metody śledzenia obiektów (ocena wymiaru przedmiotu),
- metody nakładania obrazów (ocena struktury geometrycznej powierzchni),

Badania rozpoznawcze prowadzono tak, aby określić rzeczywiste możliwości integracji wymienionych metod. Uwzględniano m.in. ich wady i zalety, jakość otrzymywanych danych pomiarowych, sposób ich wizualizacji i analizy. Wyniki badań zostały szczegółowo przedstawione w publikacjach autora. Ze względu na zachowanie odpowiedniej proporcji pomiędzy badaniami wstępnymi, a właściwymi postanowiono przedstawić w tej części pracy jedynie wybrane przykłady prowadzonych badań.

### 5.1.1. Badania wymiaru przedmiotu

Badania wymiaru prowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym korzystano z klasycznej metody triangulacji laserowej. Celem tej części badań było określenie przemieszczenia odbitej wiązki światła laserowego na detektorze w zależności od zmian wymiaru elementu badanego [KAP2006-2]. Wyniki badań zestawiono z założeniami teoretycznymi, jakie przyjęto w makroinstrukcji *Wymiar* opracowanej w arkuszu kalkulacyjnym Excel 2002 SP2 firmy Microsoft<sup>43</sup>. Wpływ na detekcję wiązki odbitej od powierzchni mierzonego elementu miał kąt padania wiązki  $\alpha$  oraz odległość źródła światła od ocenianej powierzchni  $a$ . Po wprowadzeniu danych ( $\alpha$ ,  $a$ ,  $a'$ ) makro wylczyło zakres, w jakim odbita wiązka będzie przemieszczała się na czynnym elemencie detektora. Na rysunku 43 (□74) pokazano okno makroinstrukcji *Wymiar* (po lewej) oraz schemat ustawień źródła światła i detektora względem ocenianej powierzchni (po prawej).

Do analizy wymiaru zestawiono stanowisko pomiarowe, wykorzystujące wybrane elementy zestawu optoelektronicznego typu KB 10114 firmy Cobrabid<sup>44</sup>. Jako źródło światła zastosowano laser półprzewodnikowy CQL800/D firmy Philips<sup>45</sup>, emitujący wiązkę o długości fali  $\lambda = 675$  nm i mocy 5 mW. Laser zamocowany był w uchwycie pryzmatycznym typu KB 11723<sup>46</sup> i zasilany z zasilacza typu PZL-1 firmy Zopan. Badane próbki mocowano w uchwycie pochylonym typu KB 11740<sup>47</sup>. Odbita od powierzchni próbki wiązka padała na płytkę z podziałką imitującą detektor, gdzie dokonywano oceny jej przemieszczenia. Wszystkie elementy zamocowano na dwóch ławach optycznych typu ZHL firmy PZO<sup>48</sup> ustawionych względem siebie pod kątem od 30° do 60°. Widok stanowiska przedstawiono na rysunku 44 (□74).

<sup>43</sup> Microsoft, 15010 NE 36<sup>th</sup> Street, Redmond, WA 98052, USA. <http://www.microsoft.com>

<sup>44</sup> Centralny Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Aparatury Badawczej i Dydaktycznej, Zakład Doświadczalny w Opolu, ul. Szpitalna 5a, 45-010, Opole, Polska. <http://www.cobrabid.com.pl>

<sup>45</sup> Royal Philips Electronics, Amstelplein 2 Breinert Center P.O. Box 77900, 1070 MX Amsterdam, Netherlands. <http://www.philips.com>

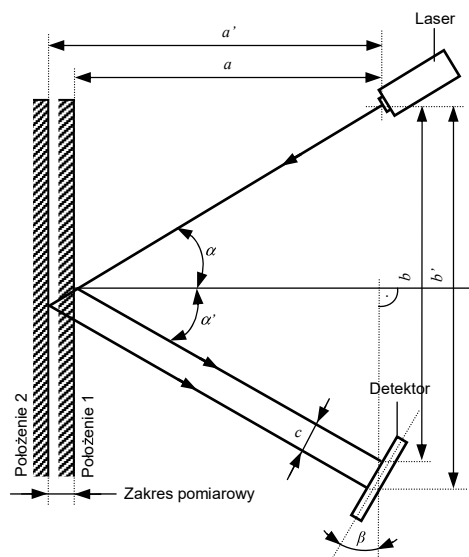
<sup>46</sup> Uchwyt przeznaczony do mocowania elementów walcowych. Maksymalna średnica mocowanego elementu wynosi  $\phi = 80$  mm dla pryzm 90° lub  $\phi = 100$  mm dla pryzm 120°.

<sup>47</sup> Uchwyt służył do mocowania elementów walcowych o średnicy  $\phi$  do 23 mm. Zakres kątów pochylecia uchwytu wynosił  $\pm 5^\circ$ .

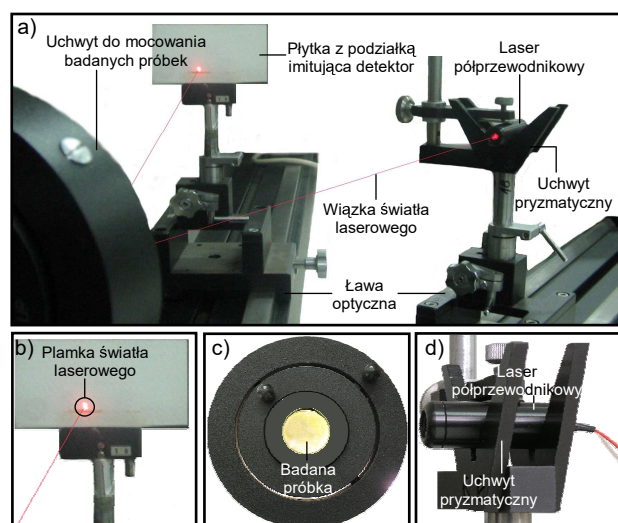
<sup>48</sup> PZO – Polskie Zakłady Optyczne Sp. z o.o., ul. Grochowska 43, 04-186 Warszawa, Polska. <http://www.pzo.warszawa.pl>

Podaj kąt padania wiązki światła	30	[°]
	0,523598776	[Rad]
Odległość $c$ od źródła światła do ocenianej powierzchni	140	[mm]
Maksymalna odległość $c'$ od źródła światła do ocenianej	141	[mm]
Wartość $\text{tg}\alpha$	0,577350269	[-]
Odległość $b$	80,82903769	[mm]
Odległość $b'$	81,40638796	[mm]
Różnica odległości $b'-b$	0,577350269	[mm]
Przesunięcie plamki $c$	1	[mm]

Kąt pochylenia detektora	30	[°]
	0,523598776	[Rad]
Wartość $\text{tg}\alpha$	0,577350269	[-]



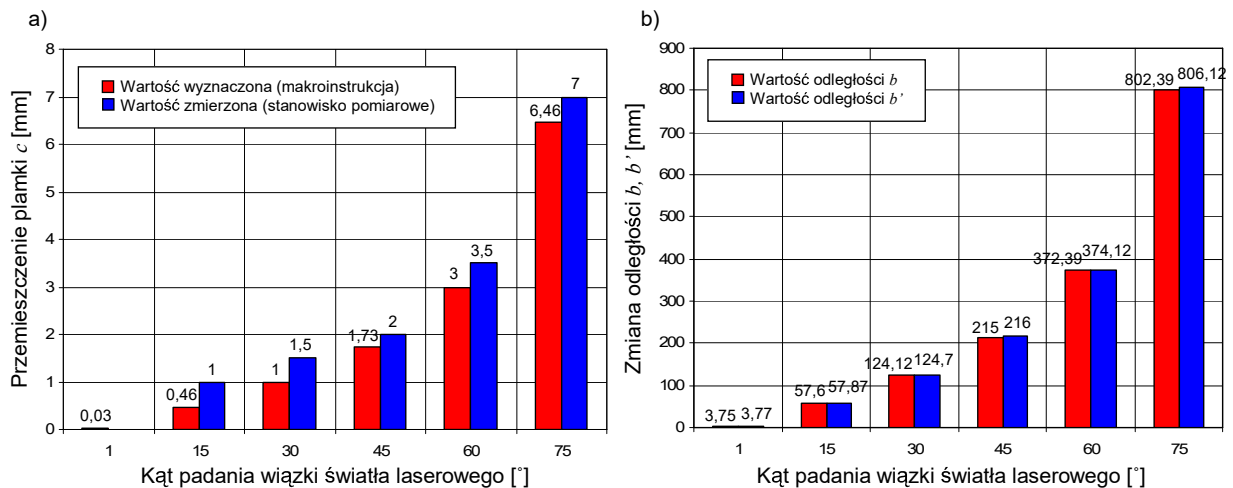
Rys. 43. Okno makroinstrukcji *Wymiar* służącej do analizy propagacji wiązki światła laserowego odbitej od powierzchni badanego przedmiotu pod różnymi kątami padania oraz schemat ustawienia źródła światła i detektora względem ocenianej powierzchni Fig. 43. The window of *Wymiar* (eng. *Dimension*) - MS Excel's software macro for the analysis of laser light beam propagation reflected from surface of measuring object at different angles of incidence as well as the orientation of a light source and detector in relation to surface



Rys. 44. Stanowisko pomiarowe do oceny wymiaru metodą triangulacji laserowej: a) widok ogólny, b) płytka z podziałką imitująca detektor, c) uchwyt pochylny z zamocowaną próbką, d) laser półprzewodnikowy zamocowany w uchwycie pryzmatycznym Fig. 44. Experimental setup for measurement of dimensions by laser triangulation: a) general view, b) plate with scale for imitation of detector, c) lift holder with sample, d) semiconductor laser fixed in prismatic holder

Do badań przeznaczono zestaw czterech próbek walcowych o średnicy  $\phi = 25$  mm i wysokości  $h = 10$  mm. Próbki wykonane były ze stali EN C45 oraz aluminium EN AW-6082. Powierzchnie próbek były polerowane. Badania obejmowały ocenę wymiaru w zakresie  $\pm 1$  mm, dla wiązki światła padającej na element mierzony pod różnym kątem. Zgodnie z założeniami przyjętymi w makroinstrukcji *Wymiar*, zmierzono zakres przesunięcia  $c$  odbitej wiązki światła na elemencie detekcyjnym dla kątów padania wynoszących  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  oraz  $60^\circ$ . Na rysunku 45 (□75) przedstawiono wyniki pomiarów uzyskane dla próbki wykonanej ze stali EN C45 ( $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ ). Próbka znajdowała się początkowo w odległości  $a = 215$  mm od źródła światła, a następnie była przesuwana na odległość  $a' = 216$  mm. Przy zakresie pomiarowym wynoszącym  $\pm 1$  mm dokonano odczytu wartości przesunięcia plamki  $c$  na elemencie detekcyjnym oraz odczytu wartości odległości  $b$  i  $b'$  źródła światła od detektora. Kąt  $\beta$  był równy kątowi padania  $\alpha$ . Pomiarów dokonano także dla kątów  $< 30^\circ$  i  $> 60^\circ$ .

Badania wymiaru prowadzone z wykorzystaniem klasycznej triangulacji laserowej wykazały zgodność przesunięcia plamki światła laserowego w pozycji horyzontalnej z wcześniej przyjętymi założeniami określonymi w makroinstrukcji *Wymiar*. Zakres zmian zależny był od wartości kąta padania wiązki światła laserowego na powierzchnię. Stwierdzono, iż czułość na zmiany wymiaru jest tym większa, im większy jest kąt padania, pod jakim wiązka światła laserowego rzutowana jest na powierzchnię. Jeżeli kąt padania był  $> 0^\circ$ , czułość wzrastała, lecz mogło dochodzić do przesunięcia plamki, co było niekorzystne. Jeżeli kąt padania wynosił  $0^\circ$ , czułość była mniejsza, ale nie dochodziło do przesunięcia plamki, a dodatkowo znajdowała się ona cały czas w tym samym miejscu powierzchni. Pomimo, iż drugi wariant pomiaru stosowany jest częściej w rozwiązaniach komercyjnych (czujniki odległości), to w badaniach rozpoznawczych stosowano wariant pierwszy, głównie ze względu na większą czułość.



Rys. 45. Przykładowe wyniki oceny wymiaru realizowane z wykorzystaniem metody triangulacji laserowej dla próbki wykonanej ze stali EN C45 ( $R_a = 0,11 \mu\text{m}$ ): a) zależność przemieszczenia plamki  $c$  na aktywnym obszarze detektora od kąta padania wiązki światła laserowego, b) zależność zmiany odległości  $b$  i  $b'$  (źródło światła – detektor) od kąta padania wiązki światła laserowego, przy różnym położeniu powierzchni w zakresie  $\pm 1 \text{ mm}$

Fig. 45. Example results of assessment of dimension by laser triangulation method for sample made from steel EN C45 ( $R_a = 0.11 \mu\text{m}$ ): a) dependence of spot shift  $c$  on the angle of incidence of laser light, b) dependence of change of distance  $b$  and  $b'$  (light source – detector) on the angle of incidence of laser light for different orientation of surface in range  $\pm 1 \text{ mm}$

Ujawnione rozbieżności w wartościach wyliczonych i uzyskanych na stanowisku pomiarowym (rysunek 45 (□75)), wynikać mogły z niedokładności w ustawieniu kąta padania wiązki światła laserowego lub błędu w odczycie wartości. Tym niemniej rezultaty tej części badań można uznać za poprawne.

W drugim wariantcie metodę triangulacji laserowej połączono z metodą śledzenia obiektów. Celem tej części badań było przeanalizowanie możliwości zastosowania ww. metod do kontroli wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrabianych różnymi technikami obróbkowymi znajdujących się w ruchu [KAP2009-1]. Na potrzeby badań wykonano sześć próbek w formie pierścieni o różnych wymiarach zewnętrznych. Powierzchnię każdej z próbek podzielono na dwie strefy, które obrabiano stosując inną technikę obróbkową lub inne parametry obróbki. Próbki mocowano na trzpieniu w różnej konfiguracji.

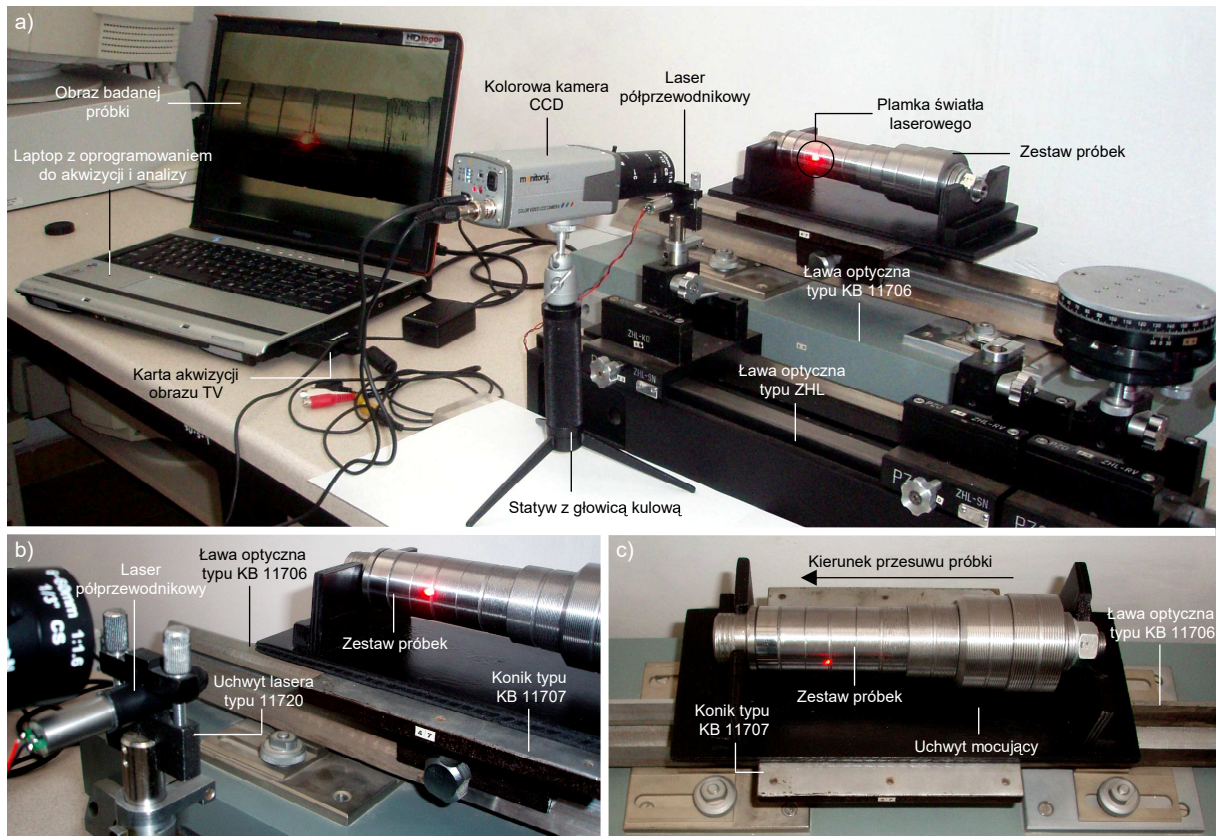
W celu rejestracji sekwencji video zestawiono specjalne stanowisko pomiarowe. Wykorzystano w nim dwie ławy optyczne (typu ZHL firmy PZO oraz typu KB 11706 firmy Cobrabid), przy czym na jednej z nich ustawiono stolik z zamocowanym w uchwycie zestawem próbek, a na drugiej źródło światła w postaci lasera półprzewodnikowego CPS180 firmy Thorlabs. Laser o mocy 1 mW emitował w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali  $\lambda = 635 \text{ nm}$  padającą prostopadle na powierzchnię ocenianej próbki. Badania prowadzono podczas osiowego przesuwu zestawu próbek realizowanego manualnie, tak, aby plamka światła laserowego przemieszczała się po wszystkich badanych powierzchniach. Akwizycja sekwencji video dokonywana była za pomocą kolorowej kamery TV UC-HR550B<sup>49</sup> z matrycowym przetwornikiem typu CCD - SONY Exview HAD CCD o powierzchni  $4,9 \times 3,7 \text{ mm}$ . Kamera wyposażona była w obiektyw o zmiennej ogniskowej od 6 do 60 mm, F1,4 i kącie obserwacji od  $45^\circ$  do  $4,5^\circ$ . Sygnał z kamery przekazywany był do karty akwizycji obrazu TV AVer Media E501R firmy AVerMedia Technologies, Inc.<sup>50</sup>, zainstalowanej w złączu PCMCIA laptopa Satellite M60 firmy Toshiba<sup>51</sup> (Intel® Pentium® M750 1,86GHz, 1024MB DDR2, 60 GB, TruBrite WXGA 17").

Zarejestrowane sekwencje video oceniano za pomocą oprogramowania do przetwarzania i analizy obrazu Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics. Program pozwalał na analizę ruchu obiektów w sekwencji video za pomocą narzędzia *Track Objects*. W celu automatyzacji procesu przetwarzania sekwencji video opracowano makroinstrukcję o nazwie *SpotTracking*. W wyniku jej działania uzyskano wartości przemieszczeń plamki laserowej, które wyznaczały zmianę wymiarów zewnętrznych badanych próbek. Wyniki porównywano z wynikami otrzymanymi z pomiarów przeprowadzonych mikrometrem. Na rysunku 46 (□76) przedstawiono widok ogólny wykorzystywanego stanowiska pomiarowego, a na rysunku 47 (□76) fragment kodu makroinstrukcji *SpotTracking* służącej do automatycznego śledzenia i analizy ruchu obiektów. Przykładowe wyniki oceny wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrabianych uzyskane za pomocą triangulacji laserowej i śledzenia obiektów pokazano na rysunku 48 (□77).

<sup>49</sup> Monitoruj.pl, ul. Lechicka 59, 61-695 Poznań, Polska. <http://www.monitoruj.pl>

<sup>50</sup> AVerMedia Technologies, Inc., 135, Jian Yi Rd, Chung Ho City, Taipei Hsien, Taiwan. <http://www.avermedia.com>

<sup>51</sup> Toshiba Corporation, 1-1, Shibaura 1-chrome, Minato-ku, Tokyo 105-8001, Japan. <http://www.toshiba.co.jp>



Rys. 46. Stanowisko pomiarowe do oceny wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrabianych znajdujących się w ruchu metodą triangulacji laserowej połączonej z techniką śledzenia obiektów: a) widok ogólny stanowiska, b) zbliżenie na laser półprzewodnikowy emitujący wiązkę światła tworzącą na badanej powierzchni plamkę o średnicy  $\phi = 1$  mm, c) zbliżenie na próbkę zamocowaną w uchwycie

Fig. 46. Experimental setup for assessment of external dimension of machined parts being in movement by laser triangulation and object tracking: a) general view of setup, b) near-view of semiconductor laser emitting light beam, which created on measured surface the spot on diameter about 1 mm, c) near view of sample fixed in holder

```

'*****
' Macro: SpotTracking v.1.0
' Author: Wojciech Kapłonek, Koszalin University of Technology
' Required version: Image-Pro 5.1 or better.
'*****

Function CloseEverything() As Integer
ret = IpAppCloseAll()
ret = IpAppCloseTools()
ret = IpOutputShow(0)
CloseEverything = 0
End Function

Sub SpotTracking ()

CloseEverything

Dim str1 As String * 255
Dim PathName As String
Dim MaskId%, OrigIm%

ret = IpAppGetStr(GETAPPDIR, 0, str1)
PathName = Trim$(Replace(str1, Chr$(0), " "))

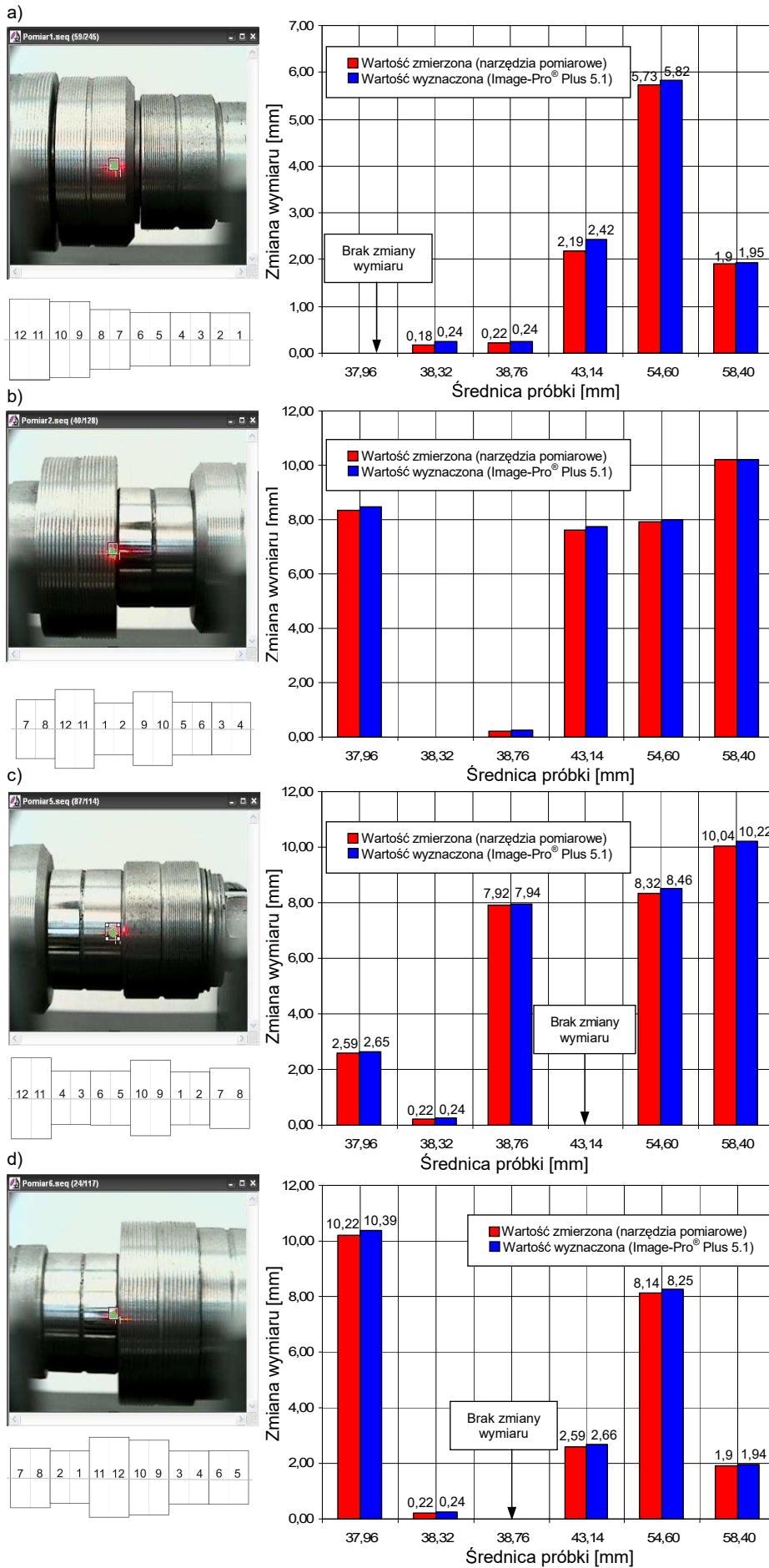
OrigIm = IpWsLoad(PathName + "Images\Pomiar1.seq", "seq")
If OrigIm < 0 Then
MsgBox "Could not find demo image: Pomiar1.seq"
Exit Sub
End If

ret = IpTrackOptionsFile(PathName + "Documents and Settings\Pomiar1.tro", 0)
If ret < 0 Then
MsgBox "Could not find tracking options file: Pomiar1.tro"
Exit Sub

```

Rys. 47. Fragment kodu makroinstrukcji *SpotTracking*, przeznaczonej do automatycznego śledzenia i analizy ruchu obiektów

Fig. 47. Fragment of *SpotTracking* macro used for automatic object tracking



Rys. 48. Przykładowe wyniki oceny wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrabianych za pomocą triangulacji laserowej i śledzenia ruchu obiektów. Na rysunku przedstawiono okno sekwencji video z markerem śledzącym, kolejność ustawienia próbek w danym zestawie oraz wykres przedstawiający zmiany wymiaru dla różnych średnic próbek. Na wykresie podano wartości zmierzone za pomocą narzędzi pomiarowych (mikrometr) oraz wartości wyznaczone z obrazu (Image-Pro® Plus 5.1) dla: a) próbki nr 1, b) próbki nr 2, c) próbki nr 5, d) próbki nr 6

Fig. 44. The example results of assessment of external dimensions of machined parts by laser triangulation and object tracking. On the image was showed the window of video sequence with tracker, sequence of samples in given and the plot presenting the change of dimension on the sample diameter. On the plot were showed the values measured by measuring instruments (micrometer) and values calculated from image (Image-Pro® Plus 5.1) for: a) sample no. 1, b) sample no. 2, c) sample no. 5, d) sample no. 6

Przeprowadzone badania wykazały, iż możliwe jest wsparcie klasycznej metody triangulacji laserowej technikami przetwarzania i analizy obrazu, szczególnie wtedy, gdy badana powierzchnia znajduje się w ruchu. Uzyskane ww. metodami wyniki były w dużej mierze zbliżone do wyników referencyjnych uzyskanych za pomocą narzędzi pomiarowych (mikrometr). Błąd metody był niewielki i wynosił ok. 1–1,3%, przy domyślnych ustawieniach oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1. Celem zminimalizowania błędu od strony programowej należałoby zmodyfikować nieco ustawienia (np. zwiększyć wielkość obszaru markera śledzącego lub ustawić śledzenie tylko jednego, największego obiektu w przetwarzanym obrazie).

Niezależnie od tego źródłem błędów mogły być także ustawienia poszczególnych elementów stanowiska pomiarowego. Lepsze efekty uzyskano by, gdyby próbka była zamocowana w nieco stabilniejszy sposób i przesuwana była mechanicznie ze stałą prędkością. Także wskazane byłoby rozważenie zmiany ustawienia geometrii oświetlenia badanej próbki – laser oraz kamera CCD powinny być ustawione w tym wariacie pod kątem padania wynoszącym 0°. Zauważono również, że na jakość otrzymywanych wyników miała znaczący wpływ rozdzielczość rejestrowanych sekwencji video. Znacznie korzystniejszy byłoby oczywiście rejestrowanie ich w największej możliwej rozdzielczości, jednak należy zauważyć, iż w tym wypadku do przetwarzania takiego materiału video potrzebny byłby komputer o dość szybkim procesorze, dużej pamięci RAM i odpowiedniej ilości wolnego miejsca na dysku twardym. W przypadku opisanych badań wybrano kompromis pomiędzy jakością materiału video, a możliwościami sprzętowymi.

Podsumowując tę część badań rozpoznawczych dotyczących pomiarów wymiaru powierzchni przedmiotów w stanie statycznym i w ruchu, należy stwierdzić, iż uzyskane wyniki można ocenić pozytywnie. Zastosowana metoda triangulacji laserowej zarówno w najprostszej, klasycznej postaci, jak i wsparta technikami przetwarzania i analizy obrazu może stanowić efektywny sposób pomiaru odległości (wymiaru) w wielu rozwiązaniach laboratoryjnych lub przemysłowych.

### 5.1.2. Badania struktury geometrycznej powierzchni

Badania struktury geometrycznej powierzchni prowadzono pod względem oceny takich jej elementów jak chropowatość oraz kształt. W tym celu wykorzystano dwie grupy metod optycznych – metody skaterometryczne wykorzystujące zjawisko rozpraszania światła i metody światła strukturalnego wykorzystujące projekcję wzorów optycznych.

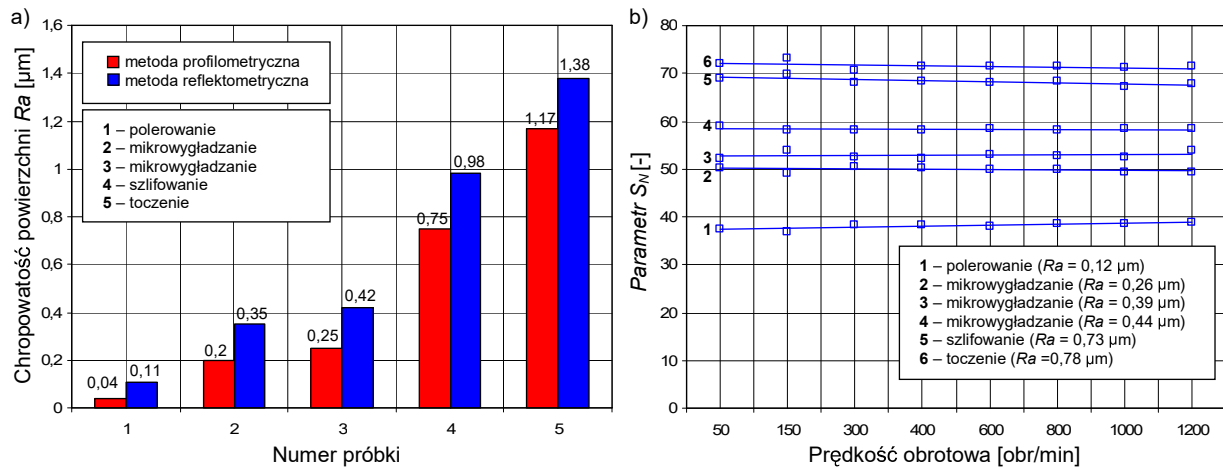
#### Ocena chropowatości powierzchni

Podczas oceny chropowatości powierzchni, dokonywanej w sposób ilościowy i pośredni, korzystano z metod skaterometrycznych (rozpraszania światła). Metody te stosowano w różnych wariantach łącząc je z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Badania prowadzono na powierzchniach płaskich oraz walcowych, także tych znajdujących się w ruchu. Większość uzyskanego materiału badawczego przedstawiono w licznych pracach, takich jak m.in. [KAP2007-1], [KAP2008-1], [KAP2008-4], [KAP2008-5], [KAP2009-2], [KAP2009-4]. W niniejszym rozdziale omówione zostaną jedynie wybrane wyniki prowadzonych badań.

Jedną z metod rozpraszania światła – reflektometrię laserową zastosowano do oceny chropowatości powierzchni przedmiotów znajdujących się w ruchu. Głównym celem tej części badań było przeanalizowanie możliwości wykorzystania tej metody do bezstykowej oceny powierzchni przedmiotów obrabianych różnymi technikami obróbkowymi, zarówno w stanie statycznym, jak i podczas ruchu badanej powierzchni. Dodatkowym celem było sprawdzenie przydatności wykorzystania zależności parametru  $S_N$  od parametru  $R_a$ , opracowanej głównie dla powierzchni szlifowanych, również dla powierzchni obrabianych innymi metodami obróbki ścierniej.

Badania prowadzono na powierzchniach walcowych (wałki ze stali EN C45 o twardości 36 ÷ 40 HRC, średnica  $\phi = 54$  mm, długość  $l = 130$  mm) obrabianych różnymi technikami obróbkowymi (toczenie, szlifowanie, mikrowygładzanie, polerowanie). Stosowano prędkości obrotowe z zakresu od 50 do 1200 obr/min. Pomiary przeprowadzono na zaprojektowanym i wykonanym w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej systemie kontrolno-pomiarowym do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu [ŁUK1994], [KOC2001], [ŁUK2001], [STO2006]. Ocena nierówności powierzchni za pomocą tego systemu prowadzona była na podstawie uzyskanych wartości wariancji kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego  $S_N$  (opisanych równaniem (11)). Odczyt parametru  $S_N$  dokonywany był w czterech miejscach na każdej z próbek, zaś liczba rejestrowanych indykatorów rozproszenia wynosiła dziesięć.

Korzystając z eksperymentalnej charakterystyki, uzyskanej doświadczalnie podczas testowania systemu [KOC2001], dokonywano estymacji parametru chropowatości powierzchni  $R_a$ . Uzyskane wyniki badań porównywano z wynikami uzyskanymi za pomocą profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke. Na rysunku 49 (□79) przedstawiono wybrane wyniki badań prowadzonych za pomocą opisanego powyżej systemu pomiarowego.



Rys. 49. Wybrane wyniki pomiarów nierówności powierzchni przeprowadzonych za pomocą systemu kontrolno-pomiarowego do bezstykowej oceny mikronierówności w ruchu: a) porównanie wyników pomiarów uzyskanych metodą optyczną (reflektometria laserowa) i stykową (profilometria) dla powierzchni obrabianych różnymi technikami obróbkowymi, b) zależność wartości parametru  $S_N$  od prędkości obrotowej badanej powierzchni

Fig. 49. The results of measurements of surfaces roughness obtained by measuring system for evaluation of surface irregularities while moving surface: a) comparison of results obtained by optical method (laser reflectometry) and stylus method (profilometry), b) dependence of  $S_N$  parameter on the rotational speed of surface

Porównanie wyników pomiarów chropowatości powierzchni uzyskanych różnymi metodami (rysunek 49a (□79)), wykazało iż zastosowana do estymacji parametru  $R_a$  zależność nie jest w pełni uniwersalna i tylko częściowo może być wykorzystana do oceny powierzchni obrabianych innymi technikami obróbkowymi niż szlifowanie. Dla każdej z takich powierzchni należałoby wyznaczyć oddzielne zależności na podstawie odpowiednich badań doświadczalnych. Przedstawione na rysunku 49b (□79) zależności pokazują, że wzrost prędkości obrotowej nie miał w zasadzie wpływu na uzyskane wartości parametru  $S_N$ . Wynikało to ze zminimalizowania zakłóceń<sup>52</sup> występujących podczas pracy systemu, w wyniku uśredniania wielu obrazów plamkowych, w czasie ekspozycji detektora CCD. Stwierdzono, iż korzystniej było przeprowadzać pomiary chropowatości powierzchni podczas ruchu badanego przedmiotu, gdyż wtedy zmiany sygnału pomiarowego były mniejsze, a tym samym mniejsze były oddziaływania zakłóceń.

Rezultaty przeprowadzonych badań można uznać za pozytywne. Testowana metoda reflektometrii laserowej może być wykorzystywana do bezstykowych pomiarów SGP zarówno w stanie statycznym, jak i w ruchu. Przy czym korzystniejsze jest wykonywanie pomiarów podczas ruchu powierzchni z ww. względów. Skonstruowany system kontrolno-pomiarowy charakteryzował się krótkim czasem pomiaru parametru  $S_N$  oraz możliwością oceny także innych elementów SGP jak kształt i falistość powierzchni. Dzięki niewielkim gabarytom może być wykorzystywany do pomiarów prowadzonych zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych.

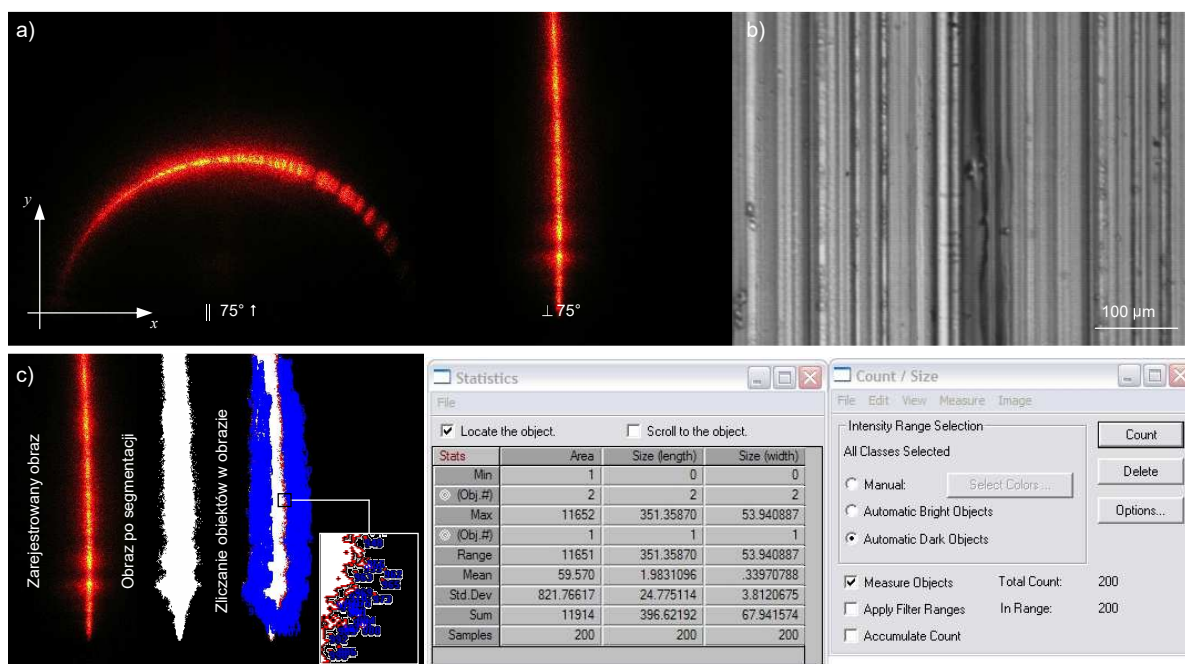
Ocena ilościowa dająca konkretne wartości wybranych parametrów SGP jest najczęściej stosowaną formą oceny. W niektórych jednak przypadkach, ze względu na pewne ograniczenia wynikające m.in. z braku odpowiedniej aparatury pomiarowej lub niedostatecznych jej parametrów, nie może być stosowana. W tych przypadkach korzysta się z innego rodzaju oceny, która dokonywana jest w sposób pośredni. W przypadku pomiarów chropowatości powierzchni metodami optycznymi może być ona przeprowadzana m.in. na podstawie zarejestrowanego obrazu optycznego światła rozproszonego przez powierzchnię nierówną. Obraz taki zarejestrowany w stanie statycznym (pojedynczy obraz) lub ruchomym (sekwencja video), za pomocą aparatu cyfrowego lub kamery TV z detektorem fotoelektrycznym, po przesłaniu do komputera oceniany jest przez odpowiednie oprogramowanie. Korzysta się przy tym z różnych technik przetwarzania i analizy obrazu.

<sup>52</sup> Źródłem zakłóceń występujących w podczas pomiaru był szumy koherentne powstające na skutek występowania zjawiska plamkowania. Generatorem szumów było zastosowane źródło światła – laser półprzewodnikowy.

Próbie połączenia technik przetwarzania i analizy obrazu z metodami optycznymi (m.in. skaterometrią laserową) przeanalizowano podczas badań SGP przedmiotów płaskich. Starano się stwierdzić, czy integracja ww. metod może pozwolić na efektywniejszą i pełniejszą ocenę powierzchni badanego przedmiotu pod względem różnych jego cech. Dodatkowo analizowano także, czy możliwe jest korelowanie parametrów uzyskanych z analizy obrazu z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni.

Do badań przeznaczono próbki płaskie obrobione przez toczenie, wykonane ze stali EN C45, aluminium EN AW6082 oraz mosiądzu EN CW612N. Powierzchnie próbek oświetlano wiązką światła o długości fali  $\lambda = 635$  nm, skierowaną pod kątem padania wynoszącym  $75^\circ$ . Źródłem światła był laser półprzewodnikowy CPS182 firmy Thorlabs, o mocy 4,5 mW. Wykonano dwie serie pomiarów. W pierwszej serii płaszczyzna padania była prostopadła, a w drugiej zaś równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. Światło rozproszone obserwowane było na matowym ekranie, z naniesioną podziałką służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu. Obrazy światła rozproszonego powstające na matowym ekranie, rejestrowano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Aparat wyposażony był w zintegrowany obiektyw zmiennoogniskowy 5,7 – 22,9 mm (odpowiednik obiektywu 27 – 110 mm w aparacie małoobrazkowym), umożliwiający uzyskanie 4-krotnego zbliżenia. Elementem detekcyjnym była matryca CCD o wymiarach 7,18 mm  $\times$  5,32 mm i efektywnej liczbie 5,10 miliona pikseli. Obrazy rejestrowano z następującymi parametrami: czas ekspozycji  $t_{exp} = 5$  s, czułość ISO 80, rozdzielczość obrazu 2592  $\times$  1944 pikseli, format zapisu pliku \*.jpg.

Do analizy zarejestrowanych obrazów światła rozproszonego obrazów wykorzystano oprogramowanie komputerowe Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics. Posłużyło ono do wyznaczenia parametrów geometrycznych (pole powierzchni jasných obszarów obrazu, szerokość, długość obrazu) oraz przeprowadzenia analizy densytometrycznej analizowanych obrazów. Na rysunku 50 (□80) przedstawiono przykładowe wyniki analizy obrazu dla próbki nr 5 wykonanej ze stali EN C45 o chropowatości powierzchni  $Ra = 1,1$   $\mu$ m.

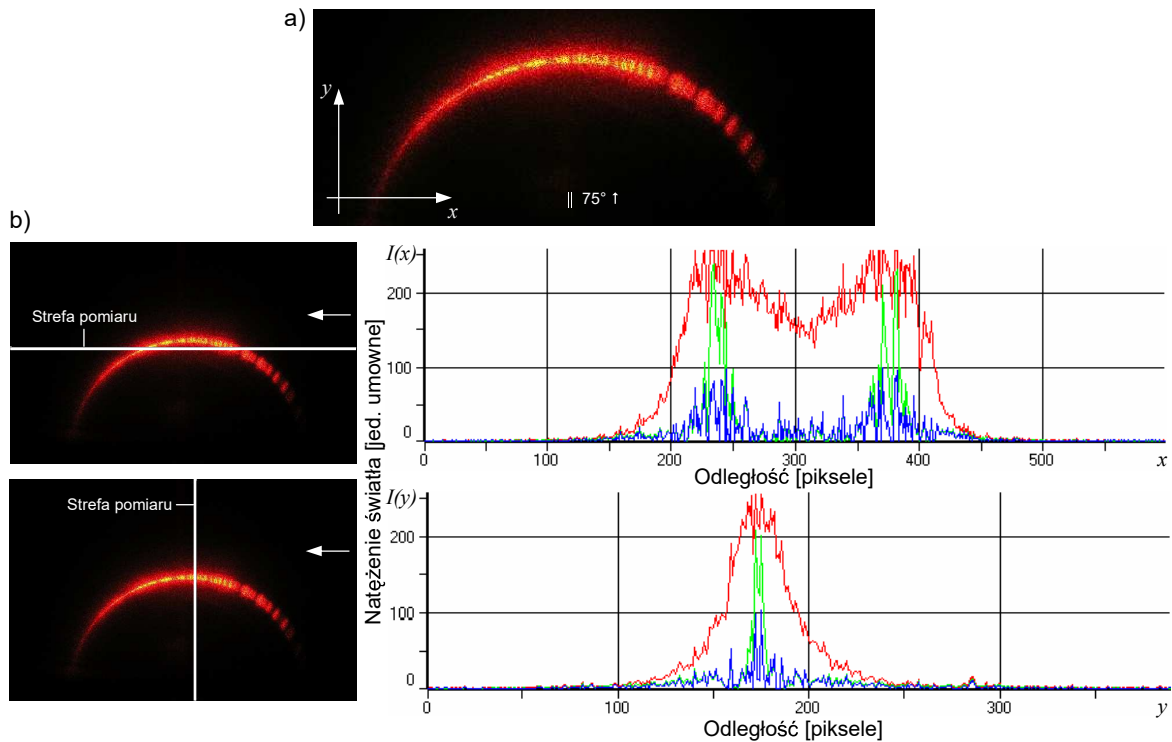


Rys. 50. Wyniki badań skaterometrycznych dla próbki nr 5: a) obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, b) obraz mikroskopowy powierzchni próbki uzyskany za pomocą mikroskopu metalograficznego Epityp 2 firmy Carl Zeiss Jena, z obiektywem Planachromat 12,5 $\times$  / 0,25, c) wybrane parametry geometryczne wyznaczone za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1

Fig. 50. Results of scatterometric investigations for sample No. 5: a) images of angular distribution of the scattered light intensity b) microscopic images of surface obtained by metallographic microscope Epityp 2 produced by Carl Zeiss Jena with Planachromat 12,5 $\times$  / 0,25 lens, c) selected geometrical parameters calculated by Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 software

Na rysunku 51 (□81) przedstawiono przykładową analizę densytometryczną prowadzoną na obrazie światła rozproszonego zarejestrowanym dla próbki nr 5. Obraz wejściowy pokazany został na rysunku 51a (□81). Natomiast na rysunku 51b (□81) pokazano pomiar natężenie światła  $I(x)$  dokonywany horyzontalnie wzdłuż osi x oraz pomiar natężenie światła  $I(y)$  dokonywany wertykalnie wzdłuż osi y. Po prawej stronie pokazano odpowiadające obrazom wykresy natężenia światła  $I(x)$  oraz  $I(y)$ .

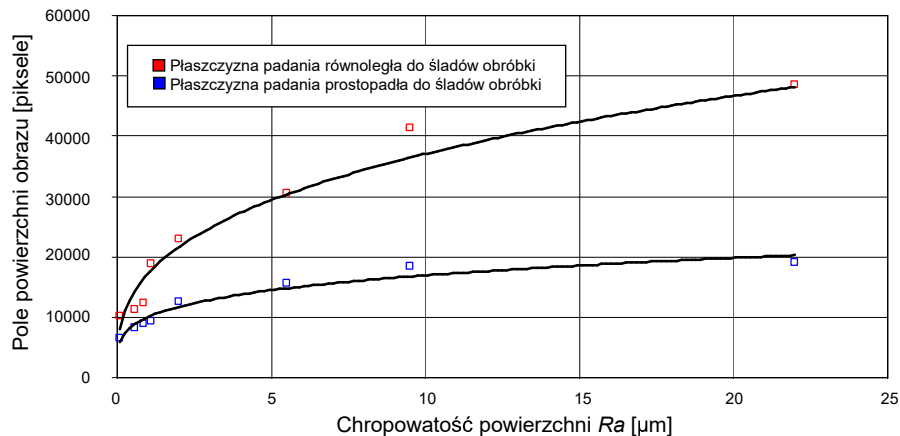




Rys. 51. Wyniki badań skaterometrycznych dla próbki nr 5: a) zarejestrowany obraz kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego, b) przykład analizy densytometrycznej przeprowadzonej w dwóch prostopadłych kierunkach do śladów obróbki za pomocą oprogramowania do Image-Pro® Plus

Fig. 51. Results of scatterometric investigations for sample No. 5: a) image of angular distribution of the scattered light intensity, b) example of densitometry analysis of this image in two perpendicular directions by Image-Pro® Plus software

Analiza parametrów geometrycznych wyznaczonych przez oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 pozwoliła na opracowanie zależności wartości pola powierzchni obrazów światła rozproszonego od chropowatości powierzchni  $R_a$  dla różnej geometrii oświetlenia badanej próbki. Zależność ta została pokazana na rysunku 52 (□81).



Rys. 52. Zależność pola powierzchni obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego od chropowatości powierzchni  $R_a$  podczas oświetlenia powierzchni próbek toczonej wiązką światła laserowego  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , gdy płaszczyzna padania była prostopadła do osi próbek oraz śladów obróbki i równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki

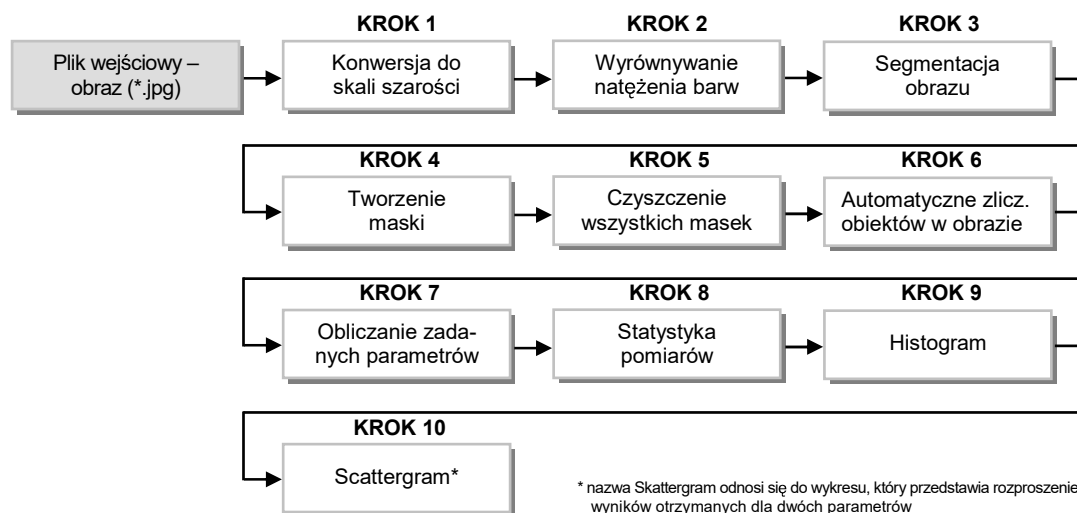
Fig. 52. The dependence of area of image of angular distribution of the scattered light intensity on the surface roughness  $R_a$  during illumination of surface of measuring turned sample by laser light  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , when the plane of incidence was perpendicular to axis of sample and machined grooves as well as parallel to axis of sample and machined grooves

Z przedstawionej zależności wynika, że wartości pól powierzchni obrazów skaterometrycznych uzyskanych dla próbki toczonej wzrastały wraz ze wzrostem wartości chropowatości powierzchni. Wzrost ten jednak nie miał charakteru liniowego. Ponadto można stwierdzić, że większe wartości pól powierzchni otrzymywano dla obrazów tworzonych wtedy, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była równoległa do śladów obróbki. Wynika stąd, iż takie oświetlenie dla tego typu obróbki jest korzystniejsze.

Uzyskane wyniki badań potwierdziły, że możliwe jest połączenie metody optycznej (skaterometrii laserowej) z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Takie połączenie z racji dużych możliwości wymienionych technik oraz szeroko dostępnego oprogramowania pozwala nie tylko na uzyskanie parametrów charakteryzujących badaną powierzchnię, ale także na odpowiednią analizę, wizualizację i ocenę danych pomiarowych. Opracowana zależność, pokazana na rysunku 52 (□81), może być przydatna do korelowania parametrów uzyskiwanych z obrazu z parametrami chropowatości powierzchni. Tego typu ocena poślednia SGP może być stosowna m.in. jako uzupełnienie pomiarów przeprowadzanych innymi metodami np. stykowymi.

W opisanej powyżej pośredniej ocenie SGP dokonywano analizy obrazów światła rozproszonego. Niekiedy korzystne jest zautomatyzowanie procesu takiej analizy. Jest to szczególnie ważne wtedy, gdy istnieje potrzeba oceny tych samych parametrów dla kilkudziesięciu lub nawet kilkuset obrazów w krótkim czasie. Podczas kolejnego etapu badań sprawdzono możliwość prowadzenia automatycznej analizy obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1. Program pozwala na przeprowadzenie takiej analizy, z wykorzystaniem makroinstrukcji tworzonych za pomocą języka Visual Basic w edytorze o nazwie IPBasic 4.0.

Autor opracował makroinstrukcję o nazwie SLIA (*Scattered Light Image Analysis*), która automatycznie realizowała w kolejnych krokach analizę obrazów światła rozproszonego w zakresie oceny wybranych parametrów geometrycznych oraz fotometrycznych. Kolejne kroki makroinstrukcji SLIA przedstawiono w formie schematu na rysunku 53 (□82), natomiast na rysunku 54 (□82), pokazano fragment kodu źródłowego.



Rys. 53. Kolejne kroki przetwarzania i analizy obrazu za pomocą makroinstrukcji SLIA (*Scattered Light Image Analysis*)  
Fig. 53. The following steps of the image processing and analysis by SLIA (*Scattered Light Image Analysis*) macro

```

Sub Scattered_Light_Image_Analysis()
    Dim i As Integer, j As Integer, n As Integer
    Dim lRet As Long
    Dim numobj As Integer
    Dim TmpStr As String
    Dim GearMask As Integer, GearIm As Integer, ToothMask As Integer
    Dim CurrentIm As Integer
    Dim ImInfo As ipdocinfo
    Dim BlankIm As Integer
    Dim PutText As pointapi
    ret = ipappcloseall()
    GearIm = ParsePathName("*.jpg", "JPG")
    If GearIm < 0 Then
        Exit Sub
    End If

    ret = IpMacroPause("KROK 1:Konwersja obrazu kolorowego do obrazu w skali szarości.", _
        MS_MODAL + MP_RESPECTSETTING, D_MEDIUM)
    ret = IpWsConvertToGray()
    ret = IpMacroPause("KROK 2:Wyrównywanie natężenie barw.", _
        MS_MODAL + MP_RESPECTSETTING, D_MEDIUM)
    ret = IpHstEqualize(EQ_BESTFIT)
  
```

Rys. 54. Fragment kodu makroinstrukcji SLIA (*Scattered Light Image Analysis*) do automatycznego przetwarzania i analizy obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego  
Fig. 54. Fragment of code of SLIA (*Scattered Light Image Analysis*) macro used for the automatic processing and analysis of images of the angular distribution of scattered light intensit

Rezultaty zastosowania makroinstrukcji SLIA do automatycznej analizy obrazów światła rozproszonego były zadowalające. W przyszłości planuje się w nieco większym stopniu zmodyfikować kod źródłowy tak, aby opracować bardziej zaawansowaną wersję makroinstrukcji, pozwalającą na szerszą analizę obrazów skaterometrycznych.

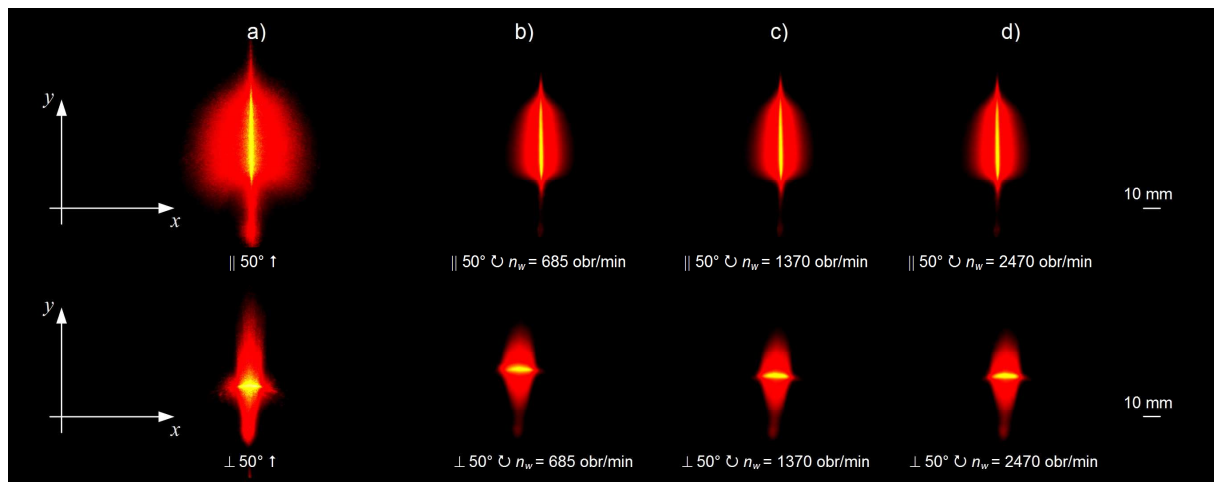
Przedstawiona powyżej części badań dotycząca pośredniej oceny SGP odnosiła się do powierzchni statycznych. Tę samą ocenę zastosowano również w badaniach SGP przedmiotów znajdujących się w ruchu. Głównym celem tych badań było uzyskanie odpowiedzi na następujące pytania:

1. Czy na podstawie sekwencji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego można wyznaczyć reprezentatywny obraz światła rozproszonego przez różne obszary powierzchni nierównej?
2. Czy metoda nakładania obrazów umożliwi uzyskanie takiego reprezentatywnego obrazu przez uśrednienia rejestrowanych obrazów natężenia światła rozproszonego i czy może być ona stosowana w pomiarach skaterometrycznych?
3. Czy posiadane oprogramowanie do przetwarzania i analizy obrazu pozwoli ocenić właściwości geometryczne i fotometryczne rejestrowanych obrazów światła rozproszonego? Jeśli tak, to czy na podstawie uzyskanych parametrów (geometrycznych i fotometrycznych) możliwe jest uzyskanie większej ilości informacji o analizowanej powierzchni?

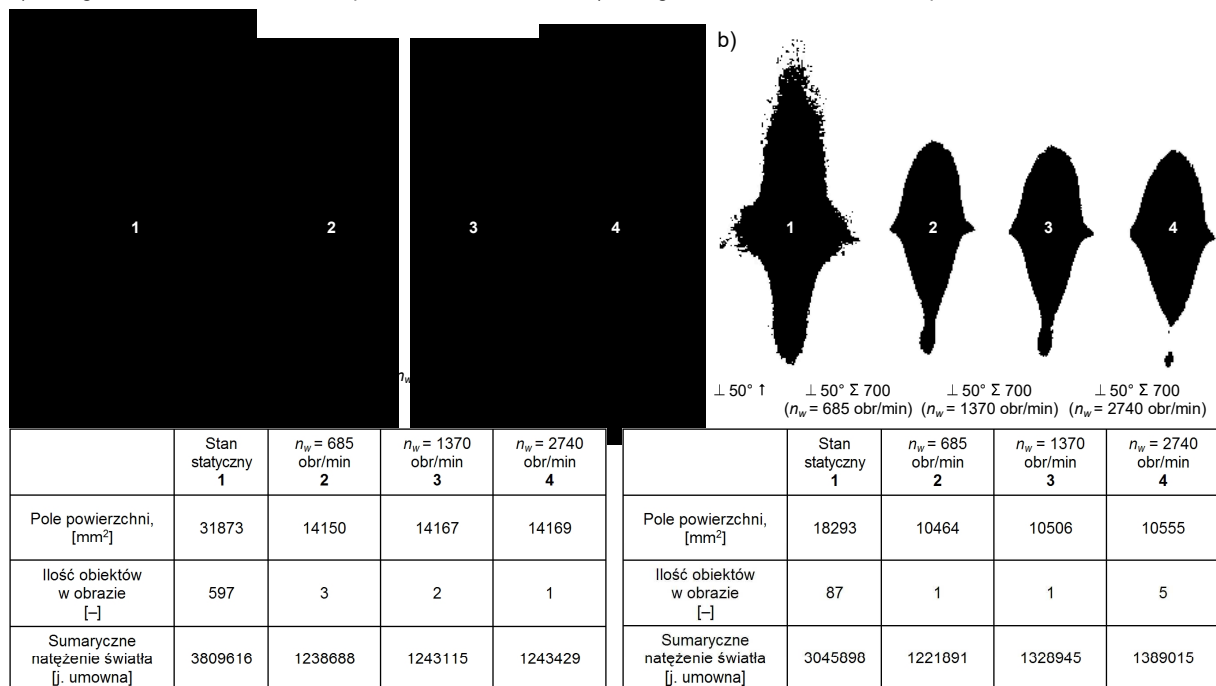
Pytanie drugie dotyczyło możliwość wykorzystania jednej z technik przetwarzania i analizy obrazu – metody nakładania obrazów – do oceny SGP w czasie ruchu. Metoda ta nie miała do tej pory implementacji w tego typu pomiarach. Próba jej zastosowania była przedmiotem wielu badań opisanych m.in. w pracach [KAP2007-1], [KAP2008-1], [KAP2008-4], [KAP2009-2], [KAP2009-4]. Poniżej przedstawiono wybrane rezultaty uzyskane podczas pomiarów SGP próbek walcowych znajdujących się w ruchu prowadzonych z wykorzystaniem skaterometrii laserowej i metody nakładania obrazów.

Ocenie poddano zestaw trzech próbek w formie wałków wykonanych ze stali EN C45 o średnicy  $\phi = 40$  mm i długości  $l = 170$  mm obrabianych przez szlifowanie, mikrowygładzanie oraz polerowanie. W celu rejestracji obrazów kąтового rozkładu światła rozproszonego w ruchu przygotowano odpowiednie stanowisko pomiarowe. Zostało ono zbudowane na bazie tokarki SK-1, na której zamontowano prowadnice służące do mocowania cyfrowego aparatu fotograficznego i lasera półprzewodnikowego. Prowadnice mocowane były dwojako. W pierwszym wariantcie zamocowane one były do suportu. Taka konfiguracja pozwalała na akwizycję obrazów światła rozproszonego, gdy płaszczyzna padania była równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. W drugim wariantcie mocowano je do konika, co pozwalało na akwizycję obrazów światła rozproszonego, gdy płaszczyzna padania była prostopadła do osi próbek oraz śladów obróbki. Badane próbki podczas ich ruchu oświetlane były wiązką światła laserowego o długości fali  $\lambda = 635$  nm, generowaną przez laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs. Laser zamocowany był przegubowo, co pozwalało na ustawianie go pod żądanym kątem. Światło rozproszone obserwowane było na matowym ekranie, na którym naniesiono podziałkę służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu.

Akwizycja obrazów odbywała w dwóch seriach. W pierwszej serii rejestrowano powstające obrazy światła rozproszonego przy nieruchomej powierzchni każdej z próbek. Laser ustawiony był tak, aby wiązka światła oświetlała powierzchnię próbek pod kątem padania wynoszącym  $50^\circ$ , a płaszczyzna padania była najpierw prostopadła, a po zmianie konfiguracji równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. Obrazy statyczne (o rozdzielczość  $2560 \times 1929$  pikseli, format \*.jpg), rejestrowano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Dimage 7i firmy Minolta. Aparat wyposażony był w zintegrowany obiektyw zmienneogniskowy 7,2 – 50,8 mm (odpowiednik obiektywu 28 – 200 mm w aparacie małoobrazkowym), umożliwiającą uzyskanie 7-krotnego zbliżenia. Elementem detekcyjnym była matryca CCD o wymiarach 8,80 mm  $\times$  6,60 mm i efektywnej liczbie 5,24 miliona pikseli. W drugiej serii rejestrowano powstające obrazy światła rozproszonego w czasie ruchu obrotowego kolejnych próbek. Rejestracji dokonano dla trzech prędkości obrotowych –  $n_w = 685$  obr/min,  $n_w = 1370$  obr/min,  $n_w = 2740$  obr/min, przy takich samych ustawieniach płaszczyzny padania jak w serii pierwszej. Obrazy w postaci sekwencji video (rozdzielczość  $640 \times 480$  pikseli, format \*.mov), rejestrowano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Aparat wyposażony był w zintegrowany obiektyw zmienneogniskowy 5,7 – 22,9 mm (odpowiednik obiektywu 27 – 110 mm w aparacie małoobrazkowym), umożliwiającą uzyskanie 4-krotnego zbliżenia. Elementem detekcyjnym była matryca CCD o wymiarach 7,18 mm  $\times$  5,32 mm i efektywnej liczbie 5,10 miliona pikseli. Na rysunku 55 (84) przedstawiono przykładowe obrazy światła rozproszonego zarejestrowane za pomocą opisanego stanowiska dla próbki polerowanej o chropowatości powierzchni  $Ra = 0,04$   $\mu\text{m}$ .



Rys. 55. Obrazy kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali  $\lambda = 635$  nm od powierzchni próbki polerowanej ( $Ra = 0,04 \mu\text{m}$ ), gdy płaszczyzna padania była równoległa (górną) i prostopadła (dół) do osi próbki oraz śladów obróbki: a) w warunkach statycznych, b) podczas ruchu z prędkością obrotową  $n_w = 685$  obr/min, c) podczas ruchu z prędkością obrotową  $n_w = 1370$  obr/min, d) podczas ruchu z prędkością obrotową  $n_w = 2470$  obr/min Fig. 55. Images of angular distribution of the scattered light intensity obtained as a result of laser beam (wavelength of  $\lambda = 635$  nm) reflection from the surface of polished sample ( $Ra = 0.04 \mu\text{m}$ ), when the plane of incidence was parallel (top) and perpendicular (bottom) to axis of sample and machined grooves: a) in static conditions, b) during movement with rotational speed  $n_w = 685$  rev/min, c) during movement with rotational speed  $n_w = 1370$  rev/min, d) during movement with rotational speed  $n_w = 2470$  rev/min

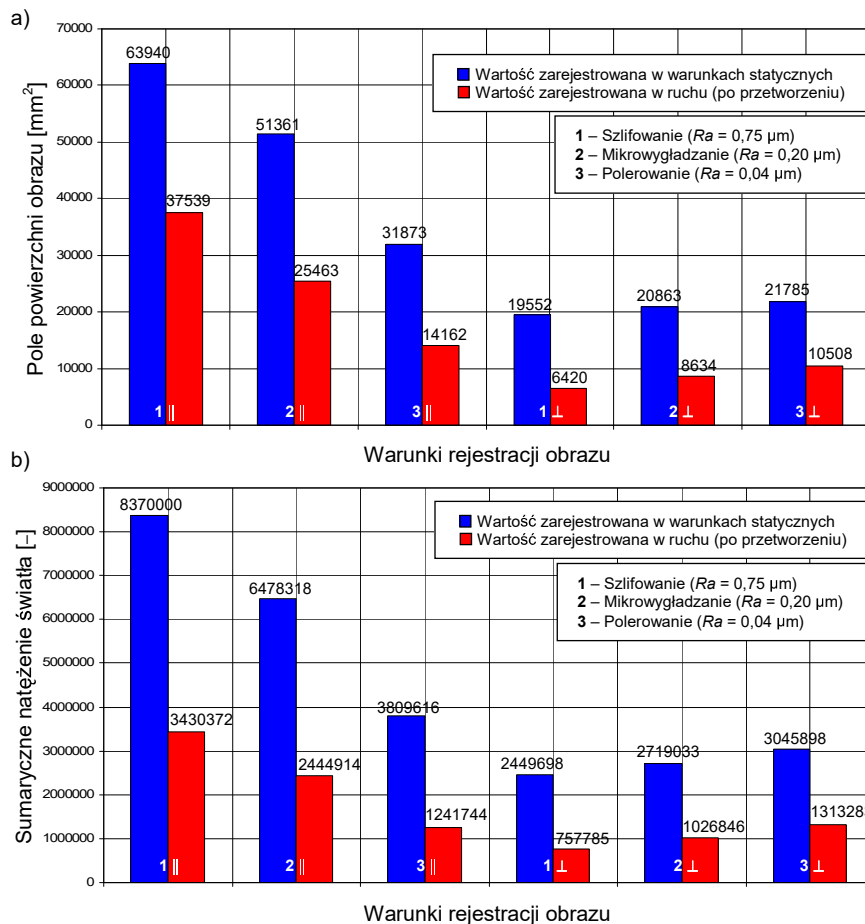


Rys. 56. Przykładowe wyniki analizy obrazu przeprowadzonej dla próbki polerowanej ( $Ra = 0,04 \mu\text{m}$ ): a) kontury otrzymane przez segmentację dla obrazów światła rozproszonego zarejestrowanych, gdy płaszczyzna padania była równoległa do osi próbki oraz śladów obróbki w stanie statycznym (1) i w ruchu (2 – 4) przetworzonych metodą nakładania obrazów wraz z wyznaczonymi parametrami geometrycznymi i fotometrycznymi, b) kontury otrzymane przez segmentację dla obrazów zarejestrowanych, gdy płaszczyzna padania była prostopadła do osi próbki oraz śladów obróbki w stanie statycznym (1) i w ruchu (2 – 4) przetworzonych metodą nakładania obrazów wraz z wyznaczonymi parametrami geometrycznymi i fotometrycznymi Fig. 56. The results of image analysis for polished sample ( $Ra = 0.04 \mu\text{m}$ ): a) contours obtained by image segmentation for acquired images of the scattered light, when the plane of incidence was parallel to axis of sample and machined grooves in static conditions (1) and in movement (2 – 4) processed by image stacking, b) contours obtained by image segmentation for acquired images, when the plane of incidence was perpendicular to axis of sample and machined grooves in static conditions (1) and in movement (2 – 4) processed by image stacking. Below obtained geometrical and photometrical parameters for both group of acquired images

Zarejestrowane obrazy ruchome po wstępnym przetworzeniu przesłano do oprogramowania RegiStax 4.0, gdzie dokonano automatycznego pozycjonowania i nałożenia obrazów oraz uśrednienia ich wartości. W wyniku tych operacji powstały pojedyncze obrazy wynikowe. Obrazy te analizowano porównywno i z obrazami uzyskanymi podczas rejestracji statycznej korzystając z oprogramowania ImageJ 1.34 oraz Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1. Za pomocą programu ImageJ 1.37 określono parametry geometry-

czne (pole powierzchni jasnych obszarów obrazu, długość, szerokość obrazu) ocenianych obrazów. Natomiast za pomocą programu Image-Pro® Plus 5.1 dokonywano analizy densytometrycznej i wyznaczono wybrane parametry fotometryczne analizowanych z obrazów. Jednym z takich parametrów było sumaryczne natężenie światła jasnych obszarów obrazu (*ang. IOD – Integrated Optical Density*). Wartości tego parametru wyrażane w jednostkach umownych określone były na podstawie automatycznego zliczania jasnych obiektów występujących w ocenianym obrazie. O tym, który z obiektów był rozpoznawany przez program jako jasny decydowała wartość progowa natężenia światła dobierana przez oprogramowanie podczas analizy. Wartość tę program ustalał na podstawie porównania średniego natężenia tła i natężenia najjaśniejszych obszarów obrazu.

Przykładowe wyniki komputerowej analizy obrazu prowadzonej dla powierzchni próbki polerowanej ( $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ ) przedstawiono na rysunku 56 (□84), natomiast na rysunku 57 (□85) pokazano w formie graficznej uzyskane wartości wybranych parametrów geometrycznych (pole powierzchni jasnych obszarów obrazu) i fotometrycznych (sumaryczne natężenie światła jasnych obszarów obrazu) uzyskanych przy różnej geometrii oświetlenia próbki i dla różnych warunków rejestracji obrazu (statycznie lub w ruchu).



Rys. 57. Graficzne przedstawienie wartości pola powierzchni (a) i wartości sumarycznego natężenia światła (b) uzyskanych dla obrazów światła rozproszonego zarejestrowanych podczas oświetlenia powierzchni próbki polerowanej ( $R_a = 0,04 \mu\text{m}$ ) wiązką światła laserowego  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , gdy płaszczyzna padania była równoległa do osi próbki oraz śladów obróbki (słupki 1-3 po lewej) i prostopadła do osi próbki oraz śladów obróbki (słupki 1-3 po prawej), w warunkach statycznych i podczas ruchu

Fig. 57. The graphic representation of values of surface area (a) and values of integrated optical density (b) for images of the scattered light acquired during illumination of measuring surface of polished sample ( $R_a = 0.04 \mu\text{m}$ ) by laser light beam  $\lambda = 635 \text{ nm}$ , when the plane of incidence was parallel to axis of sample and machined grooves (columns 1-3 at left) as well as perpendicular to axis of sample and machined grooves (columns 1-3 at right)

Główny kierunek opisanych powyżej badań dotyczył oceny chropowatości powierzchni z wykorzystaniem skaterometrii laserowej wspomaganą jedną z technik przetwarzania obrazów. Przedstawione wyniki badań pokazują, iż taka ocena może być z powodzeniem prowadzona także za pomocą alternatywnych metod, stanowiących połączenie technik optycznych i obrazowych. Zastosowana metoda nakładania obrazów jest dobrym przykładem zaadaptowania techniki obrazowej nie mającej do tej pory implementacji w tego typu pomiarach. Uzyskane rezultaty skłaniają do udzielenia twierdzącej odpo-

wiedzi na pytania zadane przed przystąpieniem do badań. Należy stwierdzić, że na podstawie sekwencji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, zarejestrowanych podczas ruchu przedmiotu, można wyznaczyć reprezentatywny obraz dla całej jednorodnej powierzchni. Do uzyskania obrazu reprezentującego badaną powierzchnię może być przydatna wykorzystywana technika nakładania obrazów. Natomiast do przetwarzania i analizy obrazów skaterometrycznych może być zastosowane opisane oprogramowanie RegiStax 4.0, ImageJ 1.37 oraz Image-Pro® Plus 5.1.

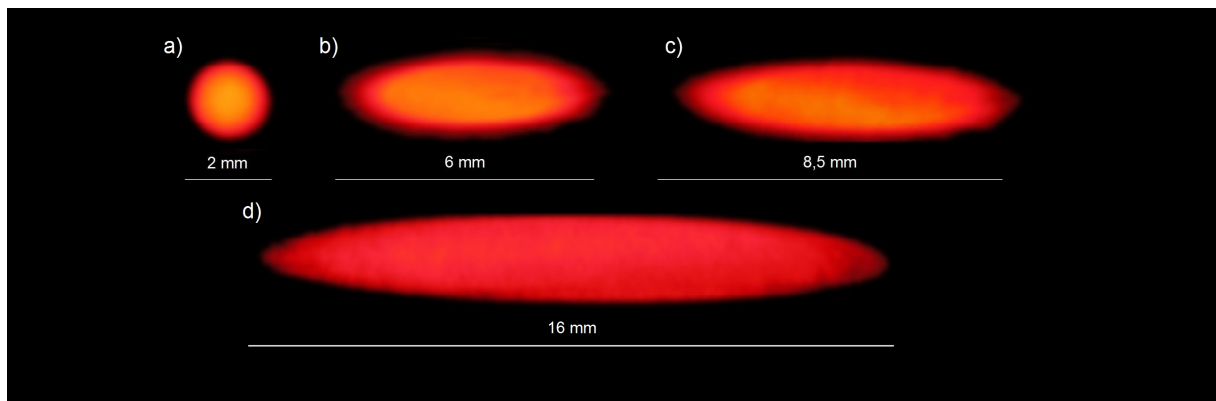
Tę część badań rozpoznawczych (prowadzonych w najszerszym zakresie) można uznać za zakończoną pozytywnie. Udało się uzyskać wiele cennych wniosków i wskazówek o charakterze ogólnym i szczegółowym. Wnioski te odnosiły się zarówno do teorii opisującej zastosowane metody optyczne oraz techniki przetwarzania i analizy obrazu, metodyki prowadzenia badań, jak i do działań związanych z projektowaniem, konstruowaniem oraz zestawianiem układów pomiarowych.

### Ocena kształtu powierzchni

W ramach badań struktury geometrycznej powierzchni analizowano również kształt. W badaniach wykorzystano jedną z metod światła strukturalnego polegającą na projekcji wzorów optycznych na badaną powierzchnię, którą łączono z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Celem badań była optyczna ocena powierzchni pod względem jej cech wymiarowych i kształtowych. Starano się sprawdzić, czy połączenie ww. metod pozwoli na analizowanie odchyłek kształtu powierzchni oraz wykrywanie błędów kształtu w postaci różnego rodzaju defektów. Badania prowadzono w dwóch wariantach różniących się rodzajem ocenianej powierzchni i typem zastosowanego oświetlenia strukturalnego.

W pierwszym wariacie ocenie poddano dziesięć powierzchni arkuszy ściernych o różnym kolorze nasypu i zmiennej granulacji ziarna (od 36 do 1000) [KAP2006-1]. Arkusze pocięte na pasy o długości  $l = 100$  mm i szerokości  $d = 50$  mm oświetlano wzorami optycznymi generowanymi przez źródło światła w postaci jednego lub dwóch laserów półprzewodnikowych. Korzystając z jednego źródła światła możliwe było wygenerowanie wzorów optycznych w postaci odpowiednio rozciągniętej plamki laserowej o eliptycznym kształcie. Wzory takie powstawały podczas rzutowania wiązki światła laserowego na powierzchnię pod różnymi kątami padania. Analizowano kąty od  $90^\circ$  do  $5^\circ$ , przy czym do oświetlania arkuszy ściernych zastosowano wzór powstający dla kąta padania wynoszącego  $15^\circ$ .

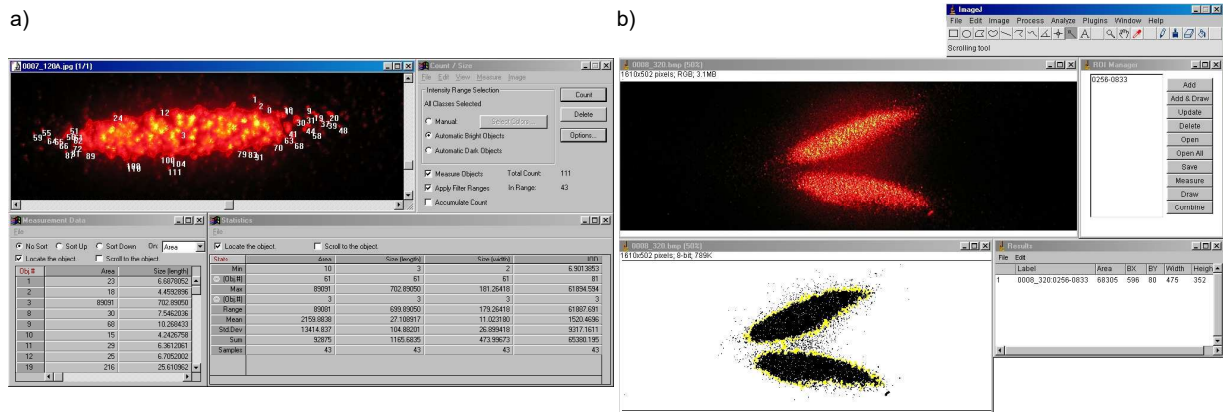
Na rysunku 58 (□86) pokazano wzory optyczne uzyskiwane dla różnych kątów padania wiązki światła laserowego na powierzchnię. Zastosowanie dwóch źródeł światła laserowego, przy tej samej geometrii oświetlenia, umożliwiło generowanie wzorów optycznych o nieco bardziej skomplikowanym kształcie (plamki laserowe o równoległych dłuższych osiach, prostopadłych dłuższych osiach lub inne). Przykłady tego typu wzorów pokazano na rysunku 12c (□30).



Rys. 58. Generowane wzory światła strukturalnego w formie wydłużonej plamki: a) typowa plamka o średnicy 2 mm powstała przez rzutowanie wiązki światła laserowego pod kątem padania  $90^\circ$ ; b) wydłużona plamka o długości 6 mm powstała przez rzutowanie wiązki światła laserowego pod kątem padania  $25^\circ$ ; c) wydłużona plamka o długości 8,5 mm powstała przez rzutowanie wiązki światła laserowego pod kątem padania  $15^\circ$ ; d) wydłużona plamka o długości 16 mm powstała przez rzutowanie wiązki światła laserowego pod kątem padania  $5^\circ$

Fig. 58. The structured light pattern in a form of elongated spot: a) typical spot (diameter 2 mm) obtained as a result of projecting of laser light beam at the incidence angle at 90 degree, b) elongated spot (length 6 mm) obtained as a result of projecting of laser light beam at the incidence angle at 25 degree, c) elongated spot (length 8.5 mm) obtained as a result of projecting of laser light beam at the incidence angle at 15 degree, d) elongated spot (length 16 mm) obtained as a result of projecting of laser light beam at the incidence angle at 5 degree

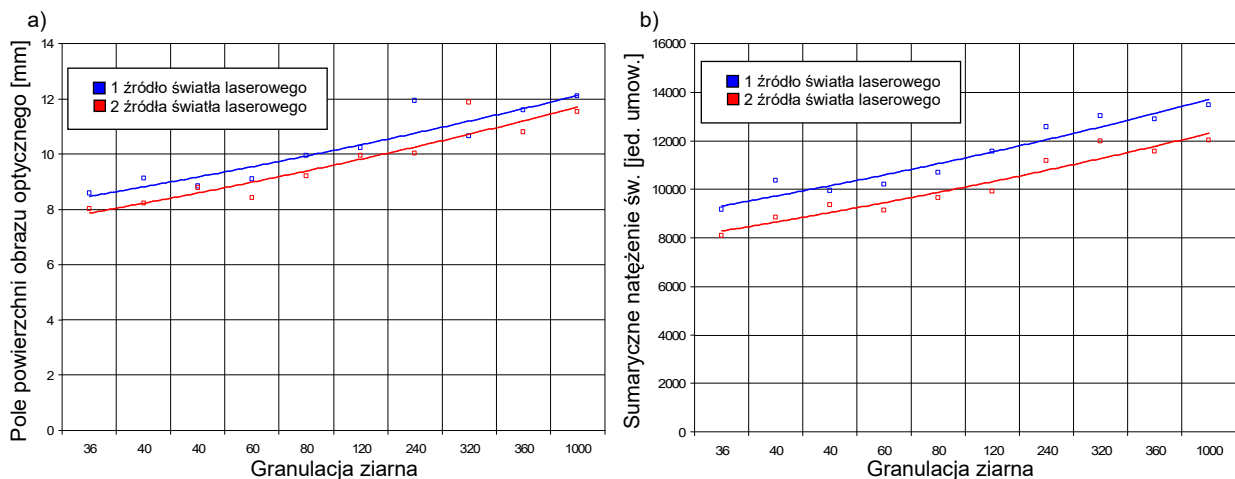
Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym, w którego skład wchodziły dwa lasery półprzewodnikowe – CPS182 firmy Thorlabs, (długość fali  $\lambda = 675 \text{ nm}$ , moc 4,5 mW, średnica plamki  $\phi = 2 \text{ mm}$ ) oraz CQL800/D firmy Philips (długość fali  $\lambda = 675 \text{ nm}$ , moc 5 mW, średnica plamki  $\phi = 2 \text{ mm}$ ). Oba lasery zamocowano w uchwycie. Do rejestracji zniekształconego obrazu wzoru optycznego wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Camedia C-5060WZ firmy Olympus<sup>53</sup>. Aparat wyposażony był w zintegrowany obiektyw zmiennoogniskowy 5,7 – 22,9 mm umożliwiającą uzyskanie 4-krotnego zbliżenia. Ustawiono go na specjalnym statywie, tak aby mógł wykonywać zdjęcia pod kątem 90°. Obrazy, zapisane w rozdzielczości 2592 × 1944 pikseli, o rozszerzeniu \*.jpg przetwarzano i analizowano za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, oraz ImageJ 1.34<sup>54</sup>. Okna wymienionych programów pokazano na rysunku 59 (□87).



Rys. 59. Okna programów komputerowych wykorzystywanych do przetwarzania i analizy obrazów wzorów optycznych światła strukturalnego rzutowanych na powierzchni badanych arkuszy ściernych: a) okno oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 podczas analizy obrazu powierzchni arkusza ściernego o granulacji ziarna 120, b) okno oprogramowania ImageJ 1.34 podczas analizy obrazu powierzchni arkusza ściernego o granulacji ziarna 320

Fig. 59. The windows of computer software used for processing and analysis of images of structured light patterns projected on surfaces of abrasive sheets: a) window of Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 software during analysis of image of 120 grain granulation abrasive sheet, b) window of ImageJ 1.34 software during analysis of image of 320 grain granulation abrasive sheet

Podstawowym celem analizy obrazu było określenie wybranych parametrów geometrycznych (np. pole powierzchni jasnych obszarów obrazu, długość, szerokość itp.) i fotometrycznych (np. sumaryczne natężenie światła jasnych obszarów obrazu) obrazów optycznych powstających na powierzchniach badanych arkuszach ściernych. Wyniki badań w postaci wykresów na rysunku 60 (□87).



Rys. 60. Wyniki badań arkuszy ściernych w postaci wykresów: a) uśrednionych wartości powierzchni obrazu optycznego od granulacji ziarna, b) wartości sumarycznego natężenia światła od granulacji ziarna

Fig. 60. Results of investigations of abrasive sheets in a form of diagrams: a) average values of spot area on the grain granulation, b) IOD (*Integrated Optical Density*) values on the grain granulation

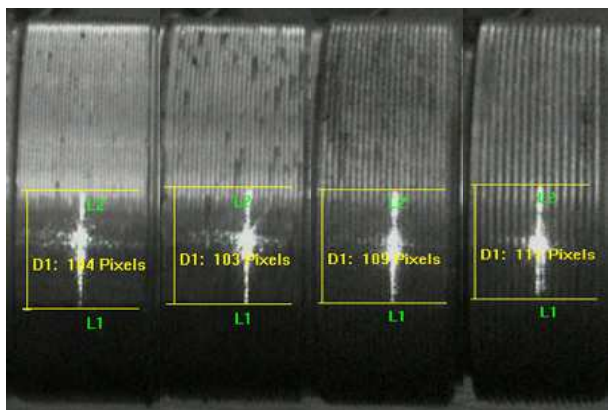
<sup>53</sup> Olympus Corporation, Shinjuku Monolith, 3-1 Nishi-Shinjuku 2-chromem Shinjuku-ku, Tokyo 163-0914, Japan. <http://www.olympus-global.com>

<sup>54</sup> Jest to oprogramowanie typu freeware o otwartej architekturze napisane w języku Java przez Wayne'a Rasbanda z National Institute of Health (<http://www.nih.gov>). Program dostępny jest pod adresem <http://rsbweb.nih.gov/ij/>

Uzyskane wyniki badań w postaci powyższych zależności pozwalają na stwierdzenie, że wartości zarówno pola powierzchni jasnych obszarów rzutowanych wzorów optycznych, jak i sumarycznego natężenia światła wzrastały wraz ze wzrostem granulacją ziarna arkusza ściernego. Wynikało to z wybitnie niejednorodnej struktury takiego materiału ściernego, która powodowała widoczne zniekształcenia rzutowanych na nią wzorów optycznych.

W drugim wariancie do oświetlenia powierzchni wykorzystano wzory optyczne tworzone za pomocą generatora światła strukturalnego w postaci elementu dyfrakcyjnego DOE-220-635 firmy Thorlabs. Stosowano wzory w kształcie pojedynczej linii, krzyża i zbioru linii pionowych. Do badań przeznaczono zestaw próbek w postaci pierścieni opisany już wcześniej w rozdziale 5.1.1. Pomiary dokonywano na zmodyfikowanej wersji stanowiska pokazanego na rysunku 46 (□76). Zastosowano w nim dodatkowo m.in. uchwyt imadłkowy typu KB 11738 firmy Cobrabid<sup>55</sup> do mocowania generatora światła strukturalnego.

Zestaw próbek zamocowany w uchwycie przesuwano manualnie, tak aby rejestrować rzutowany wzór optyczny na powierzchniach wszystkich próbek. Do rejestracji obrazów zastosowano monochromatyczną kamerę TV z przetwornikiem matrycowym CCD typu 3713 firmy CoHU<sup>56</sup>. Przetwornik CCD o powierzchni 7,84 × 6,40 mm, pozwalał na uzyskanie obrazu o rozdzielczości 510 × 492 pikseli. Kamera wyposażona była w obiektyw o zmiennej ogniskowej od 6 do 60 mm, F1,4 i kącie widzenia od 45° do 4,5°. Sygnał z kamery przekazywany był do karty akwizycji obrazu TV Pinnacle PCTV Hybrid Express Card firmy Pinnacle Systems<sup>57</sup>. Karta zainstalowana była w złączu PCMCIA laptopa Easynote MB85-P-012 firmy Packard-Bell<sup>58</sup> (Intel® Core™ 2 Duo T7500 2.2 GHz, 4096 MB DDR2, 160 GB HDD, WXGA Diamond View 15"). Poprawną pracę karty TV zapewniało oprogramowanie TVC Pro 4.8 firmy Pinnacle.



Rys. 61. Oceniane powierzchnie próbek oświetlone wzorem optycznym w kształcie pojedynczej linii pionowej tworzonej za pomocą generatora światła strukturalnego DOE-220-635 firmy Thorlabs Fig. 61. Assessed surfaces of samples illuminated by pattern in a form of a single vertical line created by structured light generator DOE-220-635 produced by Thorlabs

wyznaczonymi za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1. Wartości widoczne na rysunku podane w pikselach przeliczono na wartości podawane w mm. Natomiast na rysunku 62 (□89) przedstawiono wybrane wykresy zależności numeru powierzchni ocenianej próbki od długości wzoru optycznego dla oświetlenia wzorem w kształcie zbioru linii poziomych oraz pojedynczej linii. Dla pierwszego ze wzorów (rysunek 62a (□89)) można zauważyć, że największe zniekształcenia wystąpiły dla próbek (ustawionych w kolejności rosnącej) od 1 do 8. Natomiast najmniejsze, dla próbek od 9 do 12, przy czym różnica wymiarów wyniosła ok. 1 mm. Dla drugiego ze wzorów (rysunek 62b (□89)) uzyskano różnicę wymiarów wynoszącą ok. 2 mm. Dla pozostałych analizowanych wzorów różnica wymiarów była podobna i generalnie nie przekraczała wartości 2,7 mm. Stwierdzono, że dla wzorów ze strukturami pionowymi zniekształcenie było mniejsze. Wynikało, to z doboru kształtu wzoru oraz z geometrii oświetlenia badanych powierzchni. W tym przypadku oświetlano powierzchnie prostopadle do śladów obróbki pomimo, iż bardziej korzystniejsze jest oświetlenie kątowe.

Zarejestrowane obrazy poddano ocenie za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics. Ocena polegała na przeprowadzeniu prostej analizy geometrycznej – wyznaczeniu długości, szerokości lub wartości kąta dla każdego ze wzorów światła strukturalnego zarejestrowanego na obrazie. Na początku przeprowadzono analizę dla obrazu referencyjnego. Był on tworzony na płaskiej powierzchni, przy zachowaniu takich samych ustawień i geometrii oświetlenia, jak dla powierzchni próbek. Po określeniu jego charakterystycznych wymiarów, porównywano je z wymiarami kolejnych ocenianych obrazów przedstawiających zniekształcony wzór optyczny. Na podstawie różnicy wymiarów oceniano wielkość zniekształcenia. Na rysunku 61 (□88) przedstawiono wybrane obrazy powierzchni próbek oświetlone wzorem optycznym w kształcie pojedynczej linii wraz z ich wymiarami

<sup>55</sup> Uchwyt służy do mocowania płytek szklanych, matówek, ekranów itp. Mocowany element zaciskany jest między dwiema szczękami za pomocą śruby kontruującej.

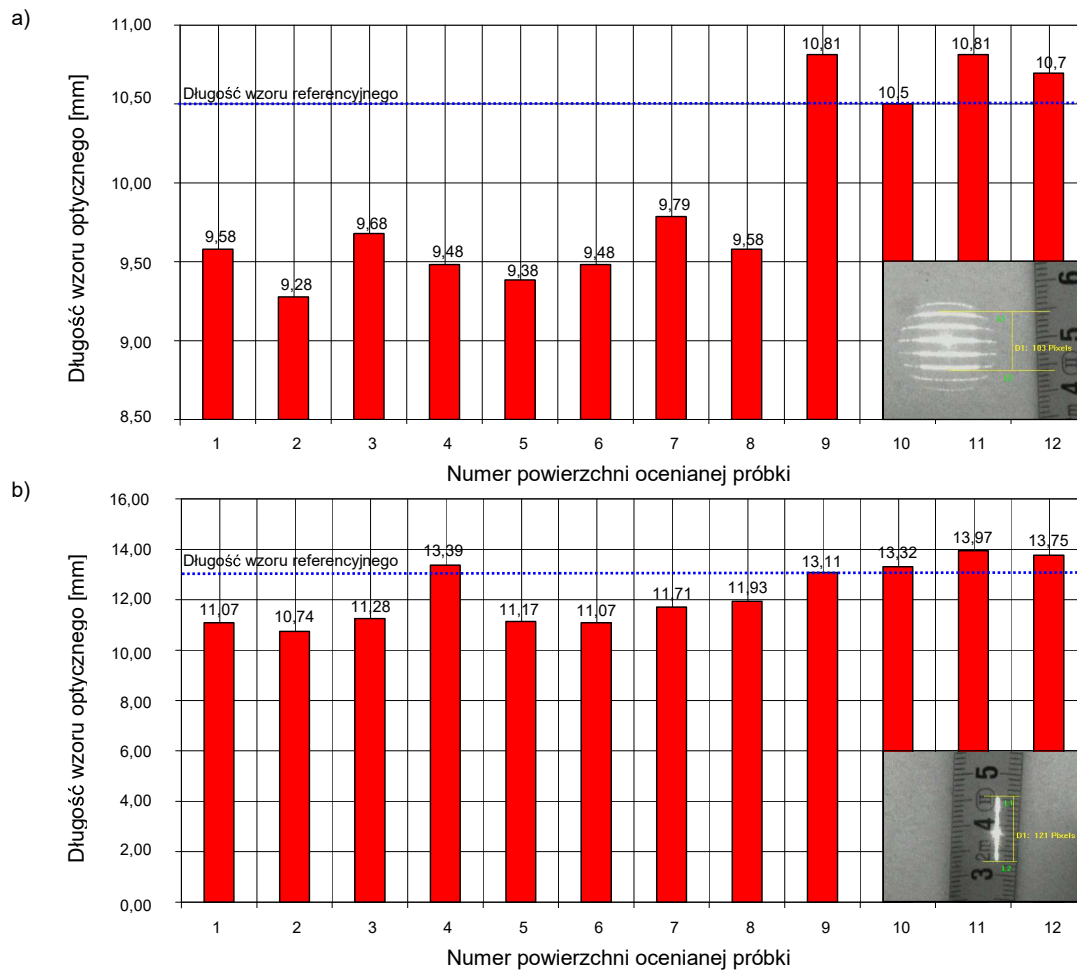
Maksymalna grubość mocowanego elementu wynosi 7 mm.

<sup>56</sup> CoHU, Inc. Electronics Division, 5755 Kearny Villa Road, P.O. Box 85623, San Diego, CA, USA. <http://www.cohu-cameras.com>

<sup>57</sup> Pinnacle Systems a division of Amid, 280 North Bernardo Avenue, Mountain View, CA 94043, USA. <http://www.pinnaclesys.com>

<sup>58</sup> Packard Bell BV, Jonkerbosplein 52, 6534 AB Nijmegen, P.O. Box 6925, 6503 GK Nijmegen, Netherlands. <http://www.packardbell.com>





Rys. 62. Wykresy zależności numeru powierzchni ocenianej próbki od długości wzoru optycznego światła strukturalnego rzutowanego na tę powierzchnię, przy oświetleniu wzorem w kształcie: a) zbioru linii poziomych (długość wzoru referencyjnego wynosiła 10,5 mm), b) pojedynczej linii pionowej (długość wzoru referencyjnego wynosiła 13 mm)

Fig. 62. The dependences of number of the assessed surfaces on the length of structured light pattern for illumination by pattern in a form of: a) multiline (length of references pattern was 10.5 mm), b) single vertical line (length of references pattern was 13 mm)

Badania kształtu powierzchni prowadzone metodami światła strukturalnego można uznać również za pozytywne. Przetestowano dwa warianty metody wykorzystując do generowania wzorów jedno lub dwa źródła światła laserowego oraz elementy dyfrakcyjne. Badaniom poddano zarówno powierzchnie płaskie jak i walcowe. W wyniku prowadzonych badań stwierdzono dużą użyteczność metody światła strukturalnego zwłaszcza w połączeniu z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Przedstawione wyniki badań pokazują jedynie proste analizy geometryczne. Mogą być one oczywiście bardziej skomplikowane i dotyczyć pomiarów bardzo niewielkich przemieszczeń elementu wzoru optycznego (np. w formie zbioru punktów). Wiąże się to jednak z koniecznością zastosowania lepszych kamer CCD o większej czułości i rozdzielczości rejestrowanego obrazu.

Podsumowując badania struktury geometrycznej powierzchni, można stwierdzić, że udało się przetestować zarówno klasyczne optyczne metody pomiarowe, jak i z powodzeniem łączyć je z nowoczesnymi technikami przetwarzania i analizy obrazu. Takie połączenie wymienionych metod i technik wykorzystujące informację optyczną w postaci np. obrazu światła rozproszonego lub obrazu zniekształconego wzoru optycznego może stanowić pewną alternatywę dla innych, typowych metod pomiarowych. Duże możliwości wynikające z zastosowania technik analizy obrazu implementowanych w oprogramowaniu komputerowym dają szansę na coraz lepszą, pełniejszą i bardziej kompleksową ocenę badanej powierzchni pod względem wielu jej cech.

### 5.1.3. Wnioski z badań rozpoznawczych

Przeprowadzone badania rozpoznawcze można podsumować następującymi wnioskami o charakterze ogólnym i szczegółowym:

- Metoda triangulacji laserowej może być zastosowana do szybkiej i bezstykowej oceny wymiaru przedmiotów płaskich lub walcowych, także tych znajdujących się w ruchu.
- W klasycznej triangulacji laserowej zakres zmian przemieszczenia plamki na detektorze zależny był od wartości kąta padania wiązki światła laserowego na powierzchnię ocenianej próbki. Oznacza to, iż czułość na zmiany wymiaru wzrastała wraz ze wzrostem wartości kąta, pod jakim wiązka światła laserowego padała na ocenianą powierzchnię.
- Klasyczna metoda triangulacji laserowej może być wsparta technikami przetwarzania i analizy obrazu, zwłaszcza wtedy gdy pomiar dokonywany jest podczas ruchu badanej powierzchni. Zastosowanie jednej z technik przetwarzania i analizy obrazu ruchomego – metody śledzenia obiektów, daje możliwości pełniejszej i dokładniejszej oceny wymiaru przedmiotu znajdującego się w ruchu. Metoda ta cechuje się stosunkowo prostą implementacją i niewielkim błędem pomiaru.
- Metody optyczne z grupy metod rozpraszania światła mogą zostać wykorzystane do oceny wybranych parametrów SGP części maszyn i urządzeń w stanie statycznym lub podczas ich ruchu.
- Zastosowanie reflektometrii laserowej pozwala na ilościową ocenę wybranych parametrów SGP. Metoda przeznaczona jest do pomiarów aktywnych, także podczas ruchu badanej powierzchni. Główne jej zalety to krótki czas i wysoka dokładność pomiaru oraz bezstykowy charakter prowadzonej oceny.
- Pośrednia ocena SGP może być prowadzona za pomocą innej metody rozpraszania światła – skaterometrii laserowej. Połączenie tej metody z technikami przetwarzania i analizy obrazu pozwala na uzyskanie pełnej informacji o stanie i charakterze badanej powierzchni. Informacja taka w postaci m.in. obrazu mikroskopowego powierzchni lub obrazu światła rozproszonego z takiej powierzchni może być analizowana za pomocą oprogramowania komputerowego.
- W przypadku pośredniej oceny struktury geometrycznej podczas ruchu powierzchni może być wykorzystana jedna z technik przetwarzania i analizy obrazu – metoda nakładania obrazów. Pozwala ona na wyznaczenie reprezentatywnego obrazu światła rozproszonego dla całej jednorodnej powierzchni na podstawie zarejestrowanych w ruchu sekwencji obrazów skaterometrycznych. Uzyskanie takich obrazów pozwala na przeprowadzenie poprawnej analizy metrologicznej ocenianej powierzchni oraz umożliwia wykrywanie różnego rodzaju wad i defektów.
- Ocena wymiaru, a także kształtu badanej powierzchni może być prowadzona z wykorzystaniem opartej na triangulacji metody światła strukturalnego wykorzystującej projekcję wzorów optycznych.
- W metodzie światła strukturalnego mogą być stosowane wzory optyczne o różnym kształcie, generowane m.in. za pomocą dyfrakcyjnych elementów optycznych. Dobór kształtu rzutowanego wzoru uzależniony jest od charakteru powierzchni, specyfiki pomiaru i parametrów urządzeń rejestrujących.
- Ocena zarejestrowanych obrazów przedstawiających wzory optyczne rzutowane na badane części maszyn i urządzeń pozwala na uzyskanie wielu informacji o stanie ich powierzchni. Jest to szczególnie ważne ze względu na detekcję różnego rodzaju defektów oraz zniekształceń. Analiza takich obrazów prowadzona z wykorzystaniem odpowiedniego oprogramowania komputerowego może być mniej lub bardziej skomplikowana. Zależy to w dużej mierze od właściwości ocenianej powierzchni oraz jakości uzyskanego obrazu przeznaczonego do analizy.

Najważniejszym wnioskiem nasuwającym się po przeprowadzeniu badań rozpoznawczych jest stwierdzenie o możliwości integracji ww. metod optycznych z technikami przetwarzania i analizy obrazu. Opisane metody roszą największe nadzieje na zastosowanie ich do jednoczesnej aktywnej kontroli SGP i wymiaru podczas ruchu badanego przedmiotu. Jest to przesłanka za tym, aby dokonać ich integracji i tym sposobem uzyskać nową zaawansowaną metodę pomiarową do zastosowań laboratoryjnych i przemysłowych.

## 5.2. Badania właściwe

Pozytywnie zakończona wstępna część prowadzonych prac, opisana szczegółowo w punkcie 5.1., obejmująca badania rozpoznawcze, pozwoliła określić cele i zakres realizacji badań właściwych.

### 5.2.1. Cele i zakres badań właściwych

Podstawowym celem badań właściwych było eksperymentalne zweryfikowanie zaproponowanej zintegrowanej metody optycznej pozwalającej na jednoczesną ocenę SGP i wymiaru.

Ponadto określono kilka celów dodatkowych. Pierwszym z nich było przeanalizowanie koncepcji optycznych układów pomiarowych, pozwalających na realizację jednoczesnego pomiaru SGP i wymiaru. Wnioski z analizy koncepcji takich układów pozwoliły na zaprojektowanie i skonstruowanie stanowiska badawczego.

Drugim celem dodatkowym było opracowanie odpowiednich sposobów przetwarzania i analizy sygnału optycznego pozwalających na ocenę SGP i wymiaru przedmiotu na podstawie zarejestrowanych ruchomych obrazów optycznych. Korzystano przy tym różnego rodzaju oprogramowania do przetwarzania i analizy obrazu.

Trzecim celem było określenie, podstawowych właściwości metrologicznych zintegrowanej metody optycznej oraz zakresu jej zastosowań. Cel ten zrealizowano w oparciu o wyniki uzyskane podczas przeprowadzonych badań.

Zakres badań właściwych obejmował:

- analizę koncepcji optycznych układów pomiarowych przeznaczonych do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru,
- wybór odpowiedniej koncepcji jednoczesnej oceny SGP i wymiaru,
- projekt i konstrukcję stanowiska badawczego na podstawie wybranej koncepcji,
- wykonanie próbek i określenie ich właściwości,
- opracowane metodyki prowadzenia badań,
- przeprowadzenie pomiarów za pomocą skonstruowanego stanowiska badawczego,
- analizę wyników pomiarów.

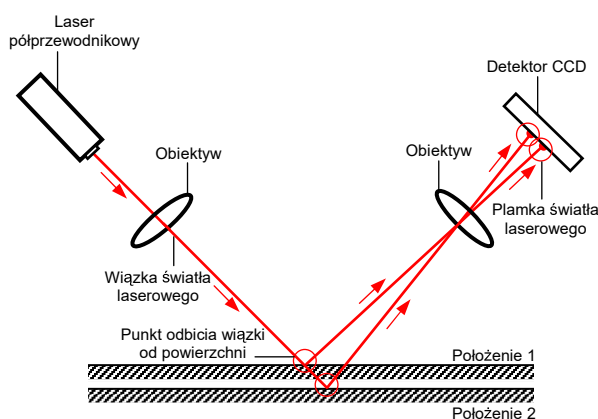
## 5.2.2. Stanowisko badawcze

W ramach realizowanych badań właściwych wykorzystano ze specjalnie zaprojektowanego i wykonanego stanowiska badawczego. Dokonywano na nim jednoczesnej oceny SGP i wymiaru badanego przedmiotu w czasie ruchu. Badanym przedmiotem był zestaw próbek walcowych w którego skład wchodził trzpień z osadzonymi na nim pierścieniami o zmiennej średnicy, wykonanymi z różnych materiałów.

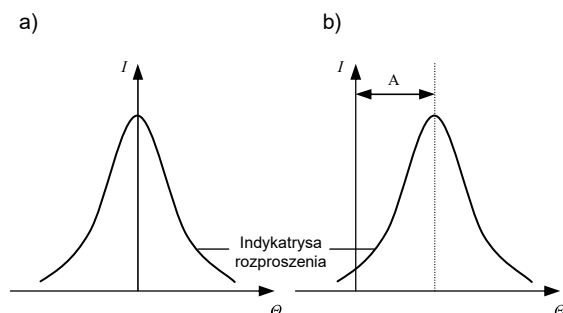
### 5.2.2.1. Analiza koncepcji optycznych układów pomiarowych

Konstrukcja i wykonanie docelowego stanowiska badawczego poprzedzone było wieloma analizami różnych koncepcji optycznych układów pomiarowych. Analizy te dotyczyły m.in. wyboru rodzaju źródła światła, układu detekcyjnego, elementów optycznych, geometrii oświetlenia oraz konfiguracji układu. Starano się opracować taką koncepcję, aby umożliwiała ona jednoczesną ocenę SGP i wymiaru, a przy tym charakteryzowała się prostą, mało skomplikowaną konstrukcją. Poniżej omówienie zostały niektóre analizowane koncepcje optycznych układów pomiarowych.

#### Koncepcja nr 1 (pomiar z wykorzystaniem pojedynczego elementu detekcyjnego CCD)



Rys. 63. Przegląd koncepcji optycznych układów pomiarowych do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru – optyczny układ pomiarowy zawierający pojedynczy element detekcyjny CCD  
Fig. 63. The review of conceptions of optical measuring setups for simultaneous assessment of GSS and dimension – optical measuring setup including a single CCD detector



Rys. 64. Modelowy obraz indyktrydy rozproszenia dla pomiaru przedmiotu o wymiarze: a) nominalnym, b) większym od nominalnego (A – przesunięcie maksimum natężenia światła spowodowane zmianą wymiaru)  
Fig. 64. Angular distribution of scattered light for measurement of object with: a) nominal dimension, b) positive in relation to nominal dimension (A – shift of maximum intensity of light causing the change of dimension)

wymiarach lub zastosowanie dwóch oddzielnych detektorów. W ostatnim przypadku, jeden z detektorów reagowałby na zmiany wymiaru, podobnie jak pokazano to na rysunku 63 (□92), drugi zaś byłby niewrażliwy na te zmiany i służyłby wyłącznie do pomiaru SGP. Po drugie, w przedstawionej koncepcji zmiana wymiaru przedmiotu powoduje, że zmienia się położenie oświetlonego obszaru powierzchni.

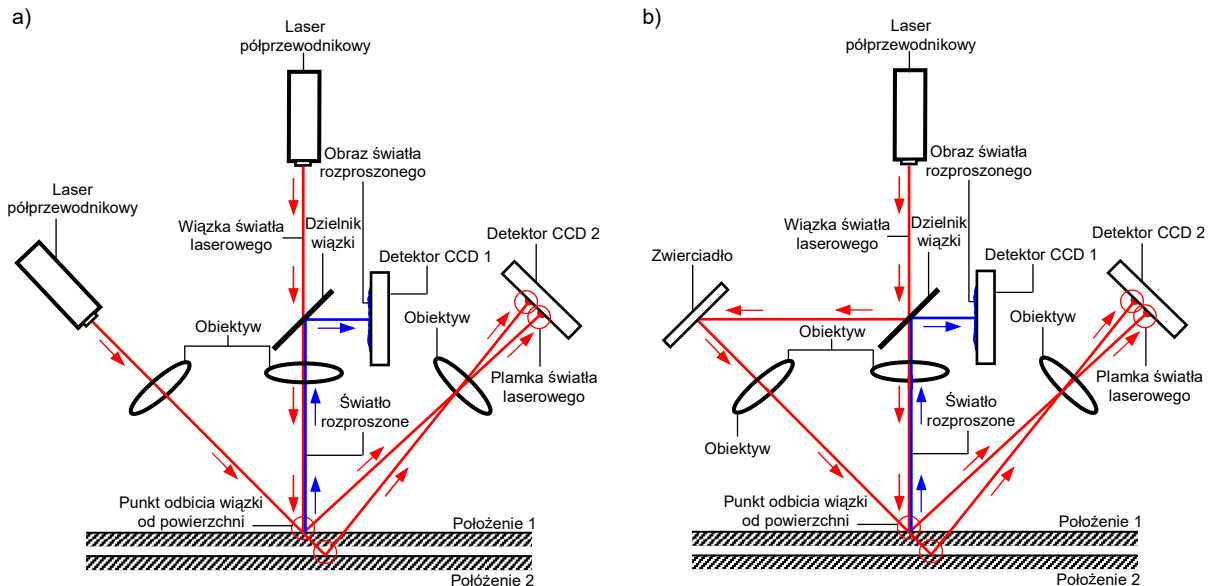
Koncepcja nr 1 zakładała wykorzystanie jednego źródła światła (laser półprzewodnikowy emitujący w sposób ciągły promieniowanie z zakresu widzialnego o długości fali  $\lambda = 670 \text{ nm}$  – barwa czerwona) i jednego elementu detekcyjnego CCD. Została ona przedstawiona na rysunku 63 (□92). W koncepcji tej ocena wymiaru przedmiotu dokonywana jest na podstawie położenia maksimum indyktrydy rozproszenia, a SGP na podstawie całego rozkładu natężenia światła rozproszonego.

Dzięki zarejestrowanej maksymalnej wartości natężenia światła na aktywnej części detektora fotoelektrycznego, możliwe jest określenie wymiaru elementu mierzzonego. Wraz ze zmianą wymiaru, a tym samym zmianą odległości powierzchni rozpraszającej, wartość maksymalnego natężenia światła ulega przesunięciu podobnie jak cała indyktryda rozproszenia. Dla wymiaru nominalnego, maksimum natężenia znajduje się w pozycji centralnej. Kierunek przesunięcia maksymalnej wartości natężenia światła informuje o zmniejszeniu lub zwiększeniu wymiaru elementu mierzzonego. Modelowy obraz indyktrydy rozproszenia dla przedmiotu o wymiarze nominalnym i dodatnim względem od nominalnego został pokazany rysunku 64 (□92).

Rozważana koncepcja posiadała jednak dwie istotne wady. Po pierwsze, indyktryda rozproszenia, dzięki której możliwa jest analiza chropowatości powierzchni, zajmuje pewien obszar czynnej powierzchni detektora i w sytuacji zbyt dużego jej przesunięcia, wskutek zmiany wymiaru, część rozkładu znajdować się będzie poza obszarem detekcji, co uniemożliwi otrzymanie informacji o powierzchni. Rozwiązanie tego problemu możliwe jest poprzez użycie detektora o większych

## Koncepcja nr 2 (pomiar z wykorzystaniem dwóch elementów detekcyjnych CCD)

Koncepcja nr 2, zrealizowana w dwóch wariantach, zakładała wykorzystanie jednego lub dwóch źródeł światła (lasery półprzewodnikowe emitujące w sposób ciągły promieniowanie z zakresu widzialnego o długości fali  $\lambda = 670 \text{ nm}$  – barwa czerwona) i dwóch elementów detekcyjnych CCD. Dzięki zastosowaniu dodatkowego źródła światła (rysunek 65a [93]) lub dzielnika wiązki i dodatkowego zwierciadła (rysunek 65b [93]) światło pada na badaną powierzchnię pod dwoma różnymi kątami. Umożliwia to pomiar za pomocą dwóch oddzielnych elementów detekcyjnych z wykorzystaniem różnych rozdzielczości dla pomiaru SGP i wymiaru przedmiotu mierzonego. Dzięki temu, znacząco można zwiększyć dokładność mierzonych wartości. Koncepcja nr 2 została pokazana na rysunku 65 [93].



Rys. 65. Przegląd koncepcji optycznych układów pomiarowych do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru – optyczny układ pomiarowy zawierający dwa elementy detekcyjne CCD: a) wariant 1 – z wykorzystaniem dodatkowego źródła światła, b) wariant 2 – z wykorzystaniem zwierciadła

Fig. 65. The review of conceptions of optical measuring setups for simultaneous assessment of GSS and dimension – optical measuring setup including two CCD detectors: a) version 1 – with additional light source, b) version 2 – with mirror

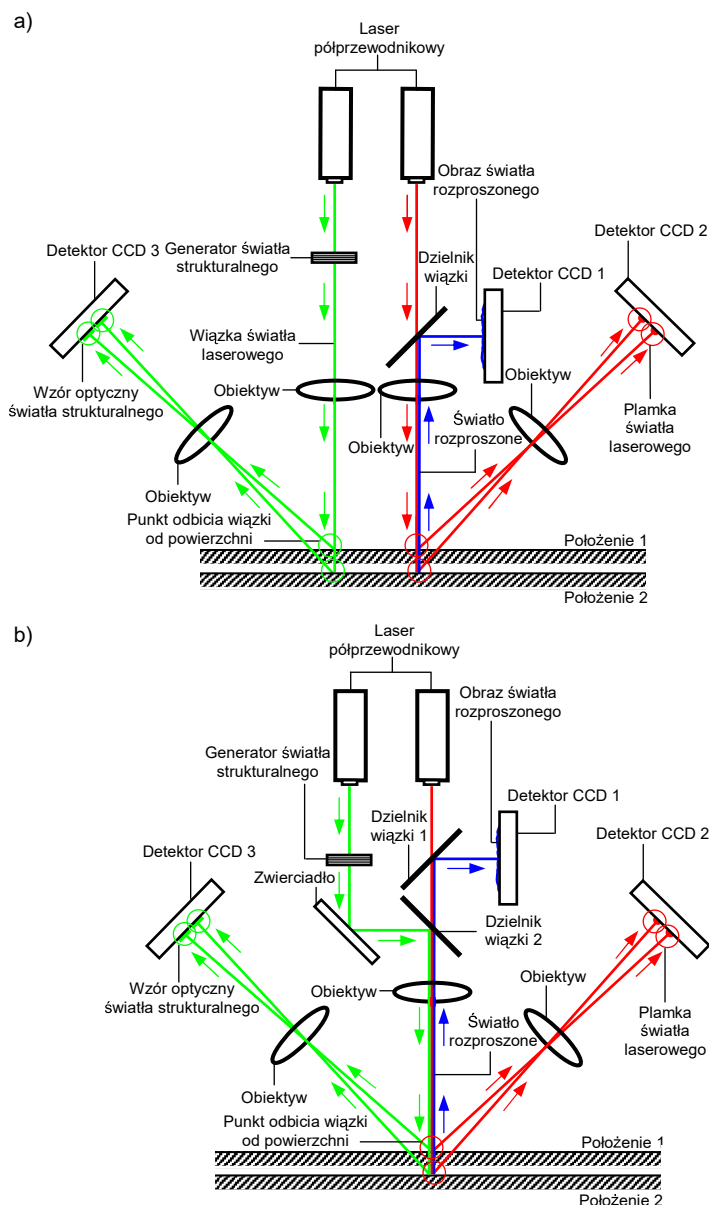
Zasada pomiaru w wariantach 1 i 2 polega na skierowaniu dwóch niezależnych wiązek światła na badaną powierzchnię. Wiązka z głównego źródła światła skierowana jest prostopadłe do mierzonej powierzchni, natomiast wiązka z dodatkowego źródła światła oświetla powierzchnię pod pewnym kątem padania (dobieranym z zakresu od  $30^\circ$  do  $60^\circ$ ). Rozproszona przez powierzchnię wiązka z głównego źródła światła wraca ponownie do układu optycznego na płytkę dzielącą (dzielnik wiązki), a następnie kierowana jest w stronę elementu detekcyjnego CCD. Na podstawie zmierzonych wartości natężenia światła, tworzona jest indyktrysa rozproszenia. Druga wiązka, po odbiciu od powierzchni pada pod pewnym kątem na drugi element detekcyjny CCD i umożliwia określenie wymiaru mierzonego elementu.

Zasada pomiaru w wariantach 1 i 2 była podobna. Wiązka światła jest rozdzielana za pomocą płytki dzielącej (dzielnika wiązki) na dwie wiązki. Wiązka padająca prostopadłe na badaną powierzchnię ulega rozproszeniu. Część rozproszonego światła powraca do układu optycznego, gdzie za pomocą płytki dzielącej (dzielnika wiązki) kierowana jest w stronę elementu detekcyjnego CCD. Na podstawie zmierzonych przez detektor wartości natężenia światła, tworzona jest indyktrysa rozproszenia. Druga część wiązki, po odbiciu od zwierciadła, pada na powierzchnię pod pewnym kątem i podobnie jak w wariantach 1 i 2, umożliwia określenie wymiaru mierzonego elementu.

Niestety koncepcja nr 2 posiadała również pewne istotne wady. Po pierwsze miejsce pomiaru SGP i wymiaru, było wspólne tylko dla wymiaru nominalnego. Zmiana wymiaru elementu mierzonego spowoduje przesunięcie punktu odbicia wiązki laserowej na powierzchni mierzonej. Wówczas pomiar SGP i wymiaru odnosić się będzie do dwóch różnych miejsc. W przypadku niewielkiego obszaru objętego pomiarem znajdującego się w pobliżu powierzchni o różnych parametrach geometrycznych, może to być przyczyną błędnej oceny wyników pomiaru. Po drugie w wariantach 1 i 2 rozpatrywanej koncepcji zastosowane zostało dodatkowe źródło światła. Jest to dobre rozwiązanie z punktu widzenia pomiaru dwóch wielkości (dwa oddzielne tory pomiarowe, odpowiednia moc światła potrzebna do

detekcji SGP i wymiaru). Natomiast w przypadku konstrukcji np. głowicy pomiarowej, należy liczyć się z ograniczeniem przestrzeni wewnętrznej spowodowanej umieszczeniem dodatkowego źródła światła wraz z układem zasilającym. Po trzecie w wariacie 2 rozpatrywanej koncepcji wiązka światła rozdzielana jest za pomocą dzielnika wiązki, co powoduje zmniejszenie jej natężenia o połowę. Dodatkowe jej osłabienie powodowane jest przez wielokrotne odbicia od elementów układu pomiarowego oraz powierzchnię mierzoną. Może to doprowadzić do niewystarczającej mocy światła potrzebnego w celu detekcji mierzonych wartości SGP i wymiaru przez elementy CCD.

### Koncepcja nr 3 (pomiar z wykorzystaniem trzech elementów detekcyjnych CCD)



Rys. 66. Przegląd koncepcji optycznych układów pomiarowych do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru – optyczny układ pomiarowy zawierający trzy elementy detekcyjne CCD: a) wariant 1 – z oddzielnym torom optycznym do pomiaru kształtu, b) wariant 2 – ze zwierciadłem i dodatkowym dzielnikiem wiązki Fig. 66. The review of conceptions of optical measuring setups for simultaneous assessment of GSS and dimension – optical measuring setup including three CCD detectors: a) version 1 – with separated optical path for shape measurement, b) version 2 – with mirror and beam splitter

przedmiotu mierzonych. W układzie wykorzystano również oddzielny tor optyczny do oceny kształtu powierzchni. Wiązka z dodatkowego źródła światła po przejściu przez generator światła strukturalnego w postaci elementu dyfrakcyjnego oświetla badaną powierzchnię, generując na niej wzór optyczny.

Koncepcja nr 3, zrealizowana także w dwóch wariantach, zakładała wykorzystanie dwóch źródeł światła (lasery półprzewodnikowy emitujące w sposób ciągły promieniowanie z zakresu widzialnego o długości fali  $\lambda = 550 \text{ nm}$  – barwa zielona oraz  $\lambda = 670 \text{ nm}$  – barwa czerwona) i trzech elementów detekcyjnych CCD. Przy zachowaniu pewnych cech poprzednich koncepcji zastosowano w niej dwie modyfikacje. Pierwsza polegała na rezygnowaniu z ukośnego oświetlenia powierzchni. Wiązka światła padająca prostopadłe na badaną powierzchnię może być także wykorzystana do oceny wymiaru, tak jak ma to miejsce w typowych metodach triangulacyjnych. Druga modyfikacja umożliwiała ocenę kształtu powierzchni i polegała na wprowadzeniu oddzielnego toru optycznego. Koncepcja nr 3 została pokazana na rysunku 66 [94].

Zasada pomiaru w wariacie 1 polega na prostopadłym skierowaniu na badaną powierzchnię dwóch niezależnych wiązek światła:

- wiązka czerwona z głównego źródła światła,
- wiązka zielona z dodatkowego źródła światła.

Rozproszona przez powierzchnię wiązka z głównego źródła światła wraca do układu optycznego i za pomocą płytki dzielącej (dzielnik wiązki), jest kierowana w stronę elementu detekcyjnego CCD 1. Na podstawie zmierzonych wartości natężenia światła, tworzona jest indykatorysa rozproszenia, która umożliwia ocenę SGP. Wiązka z głównego źródła światła generuje na badanej powierzchni plamkę, której obraz rzutowany jest na powierzchnię światłoczułą detektora CCD 2, co pozwala określić wymiar

Zniekształcony przez wady powierzchni wzór rejestrowany jest za pomocą detektora CCD 3 ustawionego pod pewnym kątem. Na tej podstawie możliwa jest ocena kształtu powierzchni.

Zasada pomiaru w wariancie 2 jest podobna, różnica polega jedynie na odpowiednim ustawieniu elementów optycznych, tak aby wiązki biegnęły we wspólnym torze optycznym i oświetlały ten sam fragment badanej powierzchni. Wiązka przechodząca przez generator światła strukturalnego kierowana jest przez zwierciadło na płytkę dzielącą (dzielnik wiązki 2), a następnie pada na badaną powierzchnię. Obraz zniekształconego wzoru optycznego rejestrowany jest za pomocą detektora CCD 3. Ocena SGP i wymiaru odbywała się w taki sam sposób jak w wariancie 1.

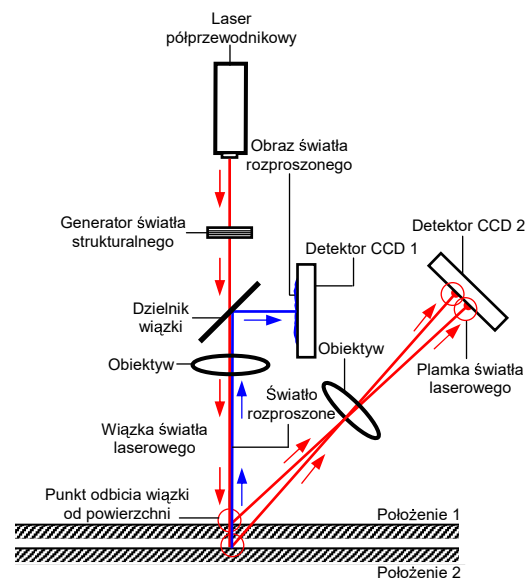
Zaletą prezentowanej koncepcji w stosunku do dwóch poprzednich jest to, że wprowadzenie dodatkowego toru optycznego umożliwi ocenę kształtu powierzchni, przy czym korzystniejszym wydaje się być wariant 2, w którym ocena wymiaru, chropowatości i kształtu dokonywana jest w tym samym miejscu powierzchni. Dwie poprzednio przedstawione koncepcje układów optycznych pozwalają dokonywać pomiaru wymiaru przedmiotu oraz SGP, z tym, że pomiar SGP ograniczony jest do oceny chropowatości powierzchni. Koncepcja 3 posiada również pewne wady. Po pierwsze, dwa oddzielne toru optyczne powodują zwiększenie gabarytów urządzenia pomiarowego. Po drugie, układ optyczny jest bardziej skomplikowany i wymaga precyzyjnej kalibracji poszczególnych elementów optycznych i elektronicznych. W tym przypadku pewne zalety wynikające z rozdzielenia torów optycznych okupione są większą komplikacją konstrukcji układu optycznego.

#### Koncepcja nr 4 (pomiar z wykorzystaniem dwóch elementów detekcyjnych CCD)

Ostatnia z prezentowanych koncepcji to optyczny układ pomiarowy zawierający jedno źródło światła (laser półprzewodnikowy emitujący w sposób ciągły promieniowanie z zakresu widzialnego o długości fali  $\lambda = 670 \text{ nm}$  – barwa czerwona) i dwa elementy detekcyjne CCD. Niniejsza koncepcja, pokazana na rysunku 67 (□95), przy wykorzystaniu zalet poprzednich rozwiązań jest stosunkowo prosta w realizacji.

Pomiar struktury geometrycznej powierzchni odbywa się w taki sam sposób jak w poprzednio prezentowanych koncepcjach. Ocena wymiaru mierzonego elementu odbywa się podobnie jak w koncepcji 3 i polega na analizie położenia plamki na aktywnym obszarze detektora CCD 2. W przedstawionym układzie istnieje również możliwość dokonywania oceny kształtu powierzchni metodą światła strukturalnego. W tej metodzie na badaną powierzchnię rzutowane są wzory optyczne generowane przez element dyfrakcyjny. Analiza zniekształconego wzoru dokonywana jest za pomocą detektora CCD 2. W tym przypadku stosowany jest wzór zawierający oprócz struktur liniowych centralnie umieszczoną plamkę. Detektor CCD 2 może pracować w trybie pomiaru wymiaru (rejestrując przemieszczenie plamki), oceny kształtu (rejestrując obraz wzoru światła strukturalnego) lub w trybie stanowiącym połączenie obu ww. wariantów pomiaru.

Prezentowana koncepcja nr 4 umożliwiła jednoczesny pomiar chropowatości, kształtu i wymiaru. Ponieważ koncepcja ta rokowała duże nadzieje na jednoczesną ocenę SGP i wymiaru zdecydowano się na kontynuowanie dalszych prac z jej wykorzystaniem w celu zastosowania jej w konstrukcji stanowiska pomiarowego.

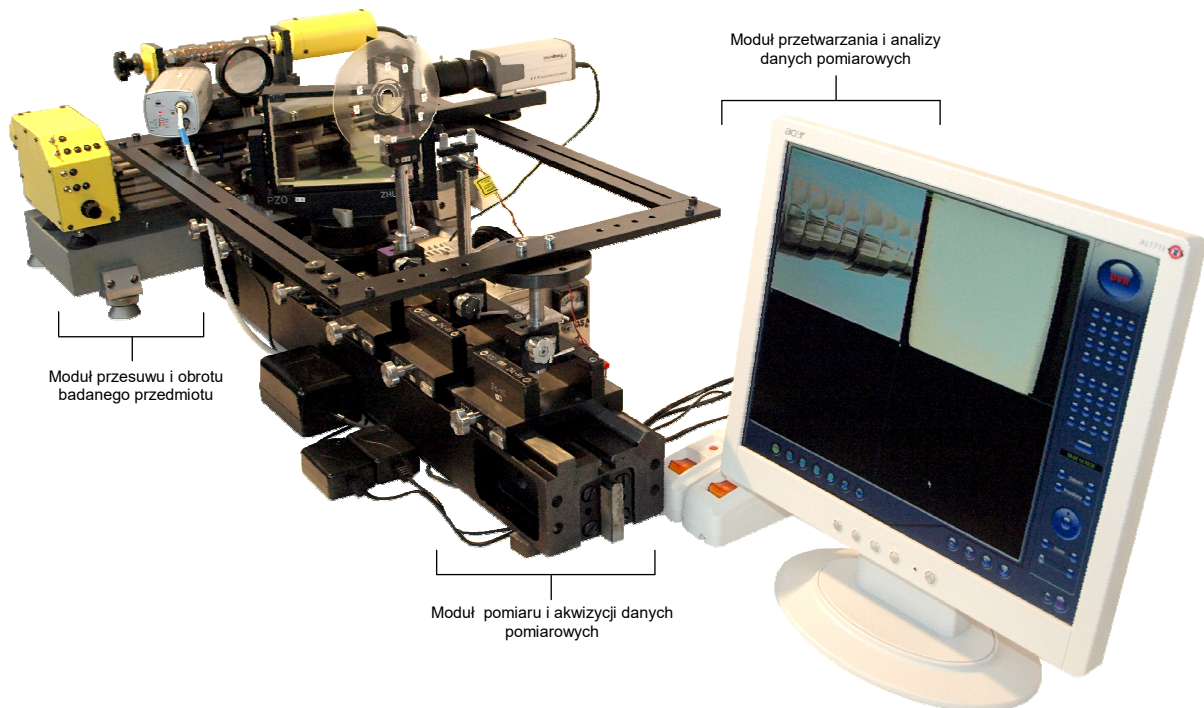


Rys. 67. Przegląd koncepcji optycznych układów pomiarowych do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru – optyczny układ pomiarowy z dwoma detektorami CCD (koncepcja końcowa)  
Fig. 67. The review of conceptions of optical measuring setups for simultaneous assessment of GSS and dimension – optical measuring setup including two CCD detectors (final conception)

### 5.2.2.2. Konstrukcja stanowiska badawczego

Po przeanalizowaniu różnych koncepcji układów pomiarowych do realizacji jednoczesnego pomiaru SGP i wymiaru w czasie ruchu badanego przedmiotu oraz dokonaniu wyboru odpowiedniej koncepcji przystąpiono do budowy stanowiska badawczego. Przyjęto założenie, że stanowisko zbudowane będzie z modułów, co w znacznym stopniu umożliwi dowolne jego konfigurowanie i w miarę potrzeb szybkie modyfikowanie. Taka budowa pozwoliła na prowadzenie badań przy różnych ustawieniach elementów optoelektronicznych oraz próbek podawanych ocenie. Stanowisko, którego widok ogólny pokazano na rysunku 68 (□96), składało się z trzech niezależnych modułów:

- modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu,
- modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych,
- modułu przetwarzania i analizy danych pomiarowych.



Rys. 68. Widok ogólny stanowiska pomiarowego do jednoczesnej oceny SGP i wymiaru podczas ruchu badanego przedmiotu  
Fig. 68. General view of setup for simultaneous assessment of GSS and dimension object in movement

Konstrukcję stanowiska oparto w głównej mierze na elementach Uniwersalnego Zestawu Optoelektronicznego typu KB 10114 firmy Cobrabid oraz elementach ławy optycznej typu ZHL produkcji PZO. Niektóre z elementów zestawu poddano modyfikacji, natomiast inne wykonano we własnym zakresie. Szerszy opis poszczególnych modułów stanowiska pomiarowego został przedstawiony poniżej.

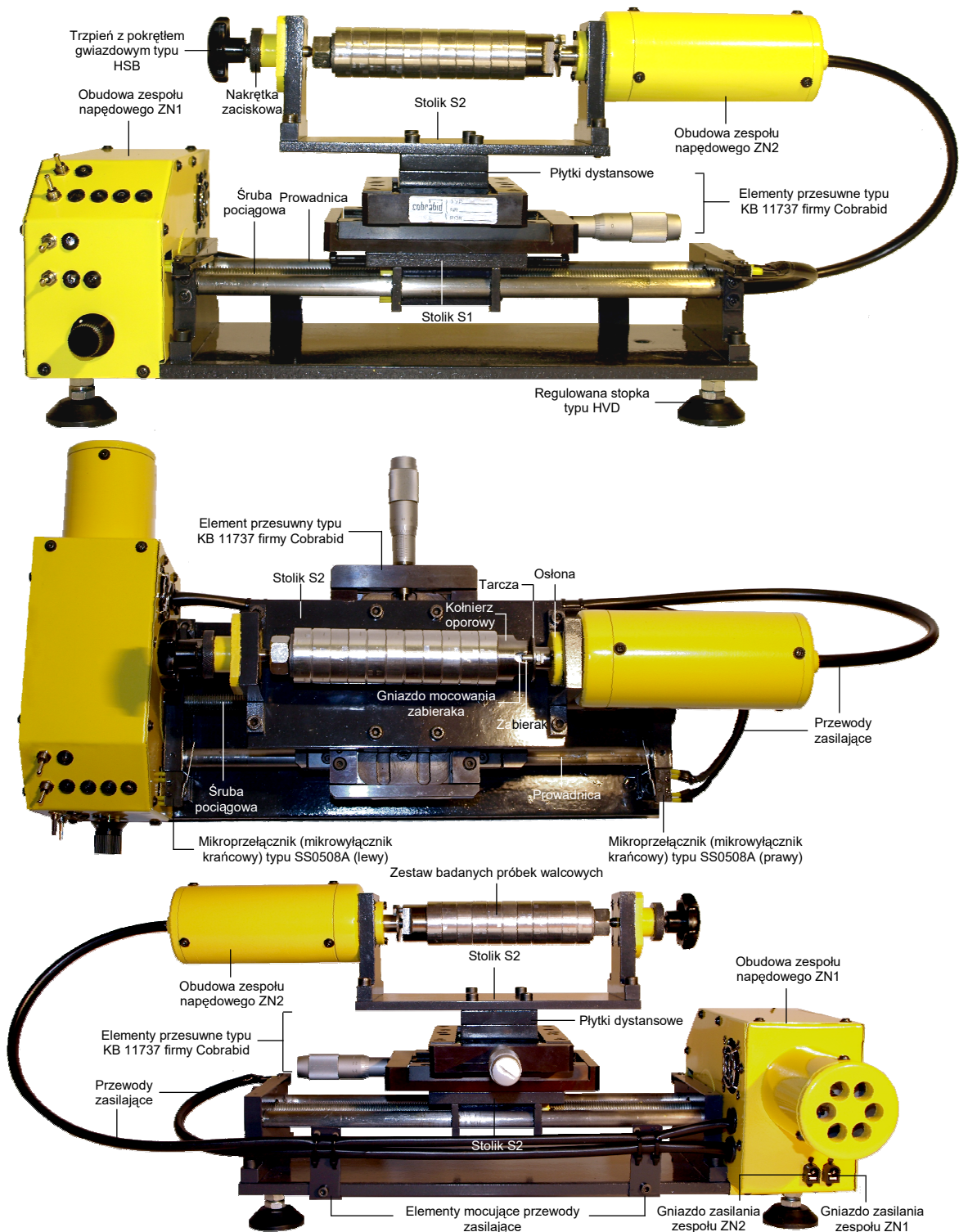
#### Moduł przesuwu i obrotu badanego przedmiotu

Moduł skonstruowany był w celu symulacji warunków produkcyjnych, w jakich przeprowadzana jest najczęściej kontrola aktywna. Chodziło głównie o możliwość realizacji i sterowania ruchem badanego przedmiotu (zestaw próbek), bez konieczności mocowania go na obrabiarce. Urządzenie mogło realizować ruch badanego przedmiotu w następujących trybach:

- ruch wzdłużny w prawo,
- ruch wzdłużny w lewo,
- ruch obrotowy w prawo (zgodnie z ruchem wskazówek zegara),
- ruch obrotowy w lewo (przeciwnie do ruchu wskazówek zegara)<sup>59</sup>.

<sup>59</sup> Dodatkowo możliwy był także tryb stanowiący połączenie ruchu wzdłużnego i obrotowego.





Rys. 69. Widok ogólny modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu  
 Fig. 69. General view of module of traverse and rotation of measuring object

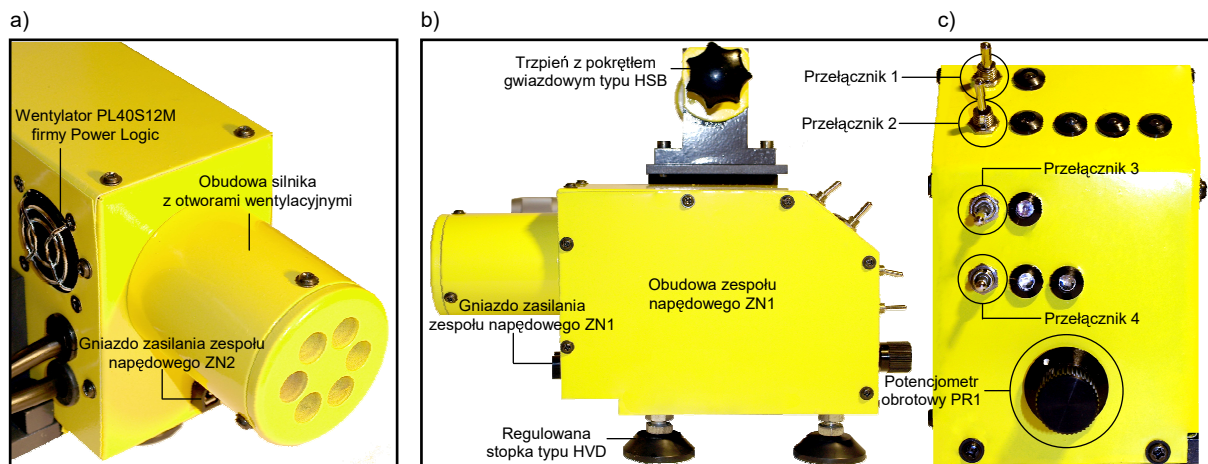
Urządzenie, którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 69 (□97), zbudowane zostało na płycie stalowej o wymiarach  $395 \times 130 \times 8$  mm. Płytę w celu stabilizacji wyposażono w 4 stopki HVD firmy Techmed<sup>60</sup>. Zastosowana w stopce nakrętka ułatwiała jej regulację kątową w zakresie od 0 do 3 stopni. Na płycie zamocowano dwa elementy płaskie o wymiarach  $120 \times 50 \times 8$  mm, służące do mocowania prowadnic i śruby pociągowej. Prowadnice w formie elementów walcowych o długości  $l = 320$  mm i średnicy  $\phi = 12$  mm wykonano ze stali i poddano obróbce szlifowaniem w celu uzyskania dużej gładkości powierzchni. Śruba pociągowa o gwincie M12×1 i długości  $l = 340$  mm zamocowana była na dwóch łoży-

<sup>60</sup> Techmed Sp.j., Lidziński, Pawłowski, Kandefer, ul. Młyńska 32, 76-200 Kobylnica, Polska. <http://www.techmedsc.com.pl>

skach tocznych kulkowych typu 608RS o średnicy zewnętrznej  $\phi_z = 22$  mm, wyprodukowanych przez Fabrykę Łożysk Tocznych w Kraśniku<sup>61</sup>. Na prowadnicach i śrubie pociągowej znajdowały się sanki z nakrętką wykonaną z brązu, w którą wkręcała się śruba, oraz płytką aluminiową o wymiarach 90 × 90 × 6 mm ze zderzakami. Wszystkie opisane elementy tworzyły stolik S1. Jeden z końców śruby pociągowej połączony był za pomocą zabieraka z przekładnią mechaniczną zębatą. Przekładnia posiadała 2 stopnie: przekładnię ślimakową oraz przekładnię zębatą o kołach zębatych z zębami walcowymi i prostymi. Przekładnia napędzana była silnikiem elektrycznym prądu stałego typu 5475 firmy Nisca<sup>62</sup>. Silnik wraz z przekładnią tworzył zespół napędowy ZN1, znajdujący się w obudowie po lewej stronie urządzenia. Obudowa stanowiła dodatkowo miejsce montażu elementów elektronicznych zapewniających poprawną pracę urządzenia. Chłodzenie zespołu napędowego ZN1, jak i pozostałych podzespołów mechanicznych oraz elektronicznych zapewniał mały wentylator PL40S12M firmy Power Logic<sup>63</sup>.

Na zewnętrznej płycie czołowej, pokazanej na rysunku 70c (□98), znajdował się panel sterujący służący do realizacji przesuwu wzdłużnego stolika S1 (przełączniki górne) oraz obrotu zamocowanej na stoliku S2 próbki (przełączniki dolne). Sterowanie ruchem stolika S1 odbywało się za pomocą przełącznika 1 (dwupołożeniowego, jednotorowego typu MTS 102, 3A/250V, 6A/125V), służącego do włączania zasilania stolika S1 (sygnalizowała to czerwona dioda LED), oraz przełącznika 2 (trójpołożeniowego, dwutorowego typu MTS 203, 3A/250V) służącego do włączania przesuwu stolika w lewą stronę (położenie górne), zatrzymania przesuwu (położenie środkowe), włączania przesuwu stolika w prawo (położenie dolne). Kierunek przesuwu stolika sygnalizowały zielone diody LED. Ruch stolika mógł być wstrzymany w dowolnym położeniu manualnie (za pomocą przełącznika 2) lub samoczynnie w momencie dojazdu do skrajnego położenia prowadnicy. W tym wypadku zderzak zamocowany w dolnej części stolika S1 stykał się z mikroprzełącznikiem (mikrowyłącznikiem krańcowym) typu SS0508A ( $l = 35$  mm, 5A/250V), powodując zatrzymanie stolika w skrajnych położeniach (sygnalizowały to czerwone diody LED).

Moduł sterowania obrotem próbki składał się z przełącznika 3 (dwupołożeniowego typu MTS 102) służącego do włączania zasilania silnika umieszczonego na stoliku S2 (sygnalizowała to czerwona dioda LED) oraz przełącznika 4 (trójpołożeniowego MTS 203) służącego do włączania napędu silnika (położenie górne-obroty w lewo, położenie środkowe-zatrzymanie, położenie dolne-obroty w prawo). Do płynnej regulacji obrotów w zakresie od 0 do 300 obr/min służył potencjometr obrotowy PR 1 (500 k $\Omega$ , 0,25 W, typu A) firmy Telpod<sup>64</sup> zamocowany poniżej przełącznika 4. Na rysunku 70 (□98) przedstawiono szczegóły konstrukcji modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu.



Rys. 70. Szczegóły konstrukcji modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu: a) obudowa zespołu napędowego ZN1 w zbliżeniu – po lewej stronie widoczne miejsce mocowania wentylatora PL40S12M firmy Power Logic oraz przewody zasilające zespół napędowy ZN1 i mikroprzełącznik (mikrowyłącznik krańcowy) typu SS0508A, b) widok z boku na lewą stronę urządzenia – obudowa mieszcząca silnik typu 5475 firmy Nisca, przekładnię mechaniczną oraz elementy elektroniczne, c) widok na panel sterowania z przełącznikami i potencjometrem służącym do regulacji prędkości obrotowej badanego przedmiotu

Fig. 70. The details of construction of module of traverse and rotation of measuring object: a) near view of housing of power unit ZN1. On the left side is visible the cooler fan PL40S12M produced by Power Logic as well as the power lead of unit ZN1 and microswitch type SS0508A, b) side view on the left side of module - the housing containing the DC motor type 5475 produced by Nisca, gear and electronic units, c) near view of control panel with switches and pot for adjustment of rotational speed of measuring object

<sup>61</sup> Fabryka Łożysk Tocznych - Kraśnik S.A., ul. Fabryczna 6, 23-210 Kraśnik, Polska. <http://www.flit.krasnik.pl>

<sup>62</sup> Nisca Corporation, 430-1, Kobayashi, Masuho-cho, Minamikoma-gun, Yamanashi, Japan. <http://www.nisca.jp>

<sup>63</sup> Power Logic, 7F-5, No.128, Shih-Chien rd., Pen-Chiao City, Taipei-Hsien, Taiwan. <http://www.powerlogic.cn>

<sup>64</sup> Telpod Kraków, ul Lipowa 4, 30-702 Kraków, Polska. <http://www.telpod.krakow.pl>

Na płycie stanowiącej górną część stolika S1 zamocowano dwa precyzyjne mechanizmy ruchu poziomego typu KB 11737<sup>65</sup> wyprodukowane przez firmę Cobrabid. Służyły one do precyzyjnej regulacji położenia stolika S2 w osiach x i y. Na górnym elemencie przesuwym zamocowano dwie płytki dystansowe wykonane z aluminium o wymiarach 88 × 506 mm. Do płytek mocowany był stolik S2, wykonany ze stalowej płyty o wymiarach 185 × 88 × 9 mm. Na płycie umieszczano dwa elementy płaskie służące do mocowania zespołu napędowego ZN2 oraz konika, wyposażonego w kiel z pokrętkiem gwiazdowym typu HSB i śrubą zaciskową, który służy do wyosiowania badanego zestawu próbek. Zespół napędowy ZN2 składał się z silnika elektrycznego prądu stałego RS-555 firmy Kingo Motors Factory<sup>66</sup>, planetarnej przekładni zębatej, wrzeczona z kłem i zabierakiem. Przekładnia planetarna zapewniała redukcję obrotów z prędkości obrotowej  $n_w = 9293$  obr/min do prędkości obrotowej  $n_w = 312$  obr/min. Silnik zasilany był poprzez zbiorczy przewód zasilający zawierające dwa przewody biegnące w izolacji (rurka igielitowej i rurka termo 1/4"- 8/2). Identyczny przewód zasilat prawy mikroprzełącznik (mikrowyłącznik krańcowy) typu SS0508A. Przewody biegły z tyłu urządzenia do obudowy zespołu napędowego ZN1 i były zamocowane na dwóch elementach mocujących opaskami zaciskowymi. Urządzenie zasilane było poprzez dwa zasilacze o napięciu  $U = 15$  V podłączone do wspólnej listwy zasilającej Acar F5 firmy HSK Data<sup>67</sup>. W tablicy 8 (□99) zestawiono wybrane parametry techniczne modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu.

Tab. 8. Charakterystyka modułu przesuwu i obrotu badanego przedmiotu  
Tab.8. The characteristics of module of traverse and rotation of measuring object

Charakterystyka ogólna	
Gabaryty modułu	395 × 130 × 235 mm
Masa całkowita modułu	~10 kg
Stolik S1	
Zakres przesuwu stolika	295 ± 25 mm
Czas przemieszczenia stolika z położenia początkowego do położenia końcowego	265 s
Prędkość przesuwu stolika	~1,11 mm/s
Zespół napędowy ZN1	Silnik elektryczny prądu stałego typu 5475 firmy Nisca połączony z przekładnią mechaniczną
Silnik elektryczny prądu stałego Nisca 5475 z przekładnią mechaniczną	
Długość / średnica silnika	82 / 54 mm
Długość / średnica osi	16 / 8 mm
Napięcie zasilające	24 V
Prąd znamionowy / maksymalny	2,5 / 9 A
Prędkość obrotowa / pod obciążeniem	3200 / 2300 obr/min
Moc	~75 W
Masa	0,7 kg
Typ przekładni mechanicznej	Dwustopniowa przekładnia zębata
Ilość kół zębatach	2 (stopień pierwszy) + 2 (stopień drugi)
Stolik S2	
Zakres przemieszczenia poziomego w osi x	25 mm
Zakres przemieszczenia poziomego w osi y	25 mm
Dokładność ustawień i odczytu	0,01 mm
Zespół napędowy ZN2	Silnik elektryczny prądu stałego serii RS-555 firmy Kingo Motors Factory połączony z przekładnią mechaniczną
Silnik elektryczny prądu stałego Kingo Motors Factory RS-555 z przekładnią mechaniczną	
Długość / średnica silnika	57 / 35,5 mm
Napięcie zasilające	24 V
Prędkość obrotowa / zredukowana	9293 / ~312 obr/min
Typ przekładni mechanicznej	Dwustopniowa przekładnia planetarna
Ilość kół zębatach	3 (stopień pierwszy) + 3 (stopień drugi)

Urządzenie przeznaczone było zarówno do pomiarów powierzchni walcowych jak i płaskich. Służył do tego specjalny stalowy trzpień  $\phi 14H7$  o długości  $l = 140$  mm, którego widok ogólny przedstawiono na rysunku 118 (□187) w załączniku. Jeden z jego końców stanowił kołnierz oporowy z gniazdem (rowkiem) mocowania zabieraka, natomiast drugi z końców stanowiła część gwintowana wraz z nakrętką zaciskową. Na powierzchniach czołowych końców trzpienia wykonane były nakiełki do jego osiowania w kłach wrzeczona zespołu napędowego ZN2 oraz konika. Przestrzeń pomiędzy zderzakiem, a nakrętką mogło zająć maksymalnie 11 próbek walcowych lub płaskich<sup>68</sup> przylegających do siebie, przy czym średnica próbek walcowych nie mogła przekraczać 80 mm.

<sup>65</sup> Elementy służą do realizacji precyzyjnych, prostoliniowych przemieszczeń wzdłuż lub w poprzek ławy optycznej. Umożliwiają realizację przemieszczeń w zakresie 25 mm z dokładnością ustawienia i odczytu wynoszącą 0,01 mm.

<sup>66</sup> Ningbo Haishu Kingo Motors Factory, Xin Xing Village Industrial Park Haishu Zone, Ningbo, Zhejiang, China. <http://www.cnmotor.cn>

<sup>67</sup> HSK Data Ltd. Sp. z o.o., ul. E. Godlewskiego 22, 30-198 Kraków, Polska. <http://www.hsk.com.pl>

<sup>68</sup> Dla minimalnej szerokości próbki wynoszącej 10 mm.

## Moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych

Moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych był największym gabarytowo modułem stanowiska pomiarowego. Zainstalowano na nim elementy optyczne i elektroniczne w postaci źródła promieniowania, elementów generujących wzory optyczne o odpowiednim kształcie i wielkości, elementy optyczne pozwalające na kierowanie wiązki światła na układ detekcyjny oraz detektory umożliwiające akwizycję danych pomiarowych. Dane, w formie obrazów statycznych oraz sekwencji video, mogły być rejestrowane jako:

- obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego (na podstawie których, przeprowadzana była ocena SGP),
- obrazy przemieszczenia plamki światła laserowego (na podstawie których, przeprowadzana była ocena wymiaru),
- obrazy zniekształconych wzorów optycznych światła strukturalnego (na podstawie których, przeprowadzana była analiza kształtu).

Podstawą modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych była ława optyczna typu ZHL firmy PZO o długości 800 mm i szerokości 130 mm. Ława posiadała dwie prowadnice na których zamocowano sześć zespołów przesuwnych, których konfigurację zestawiono w tabelicy 9 (□100).

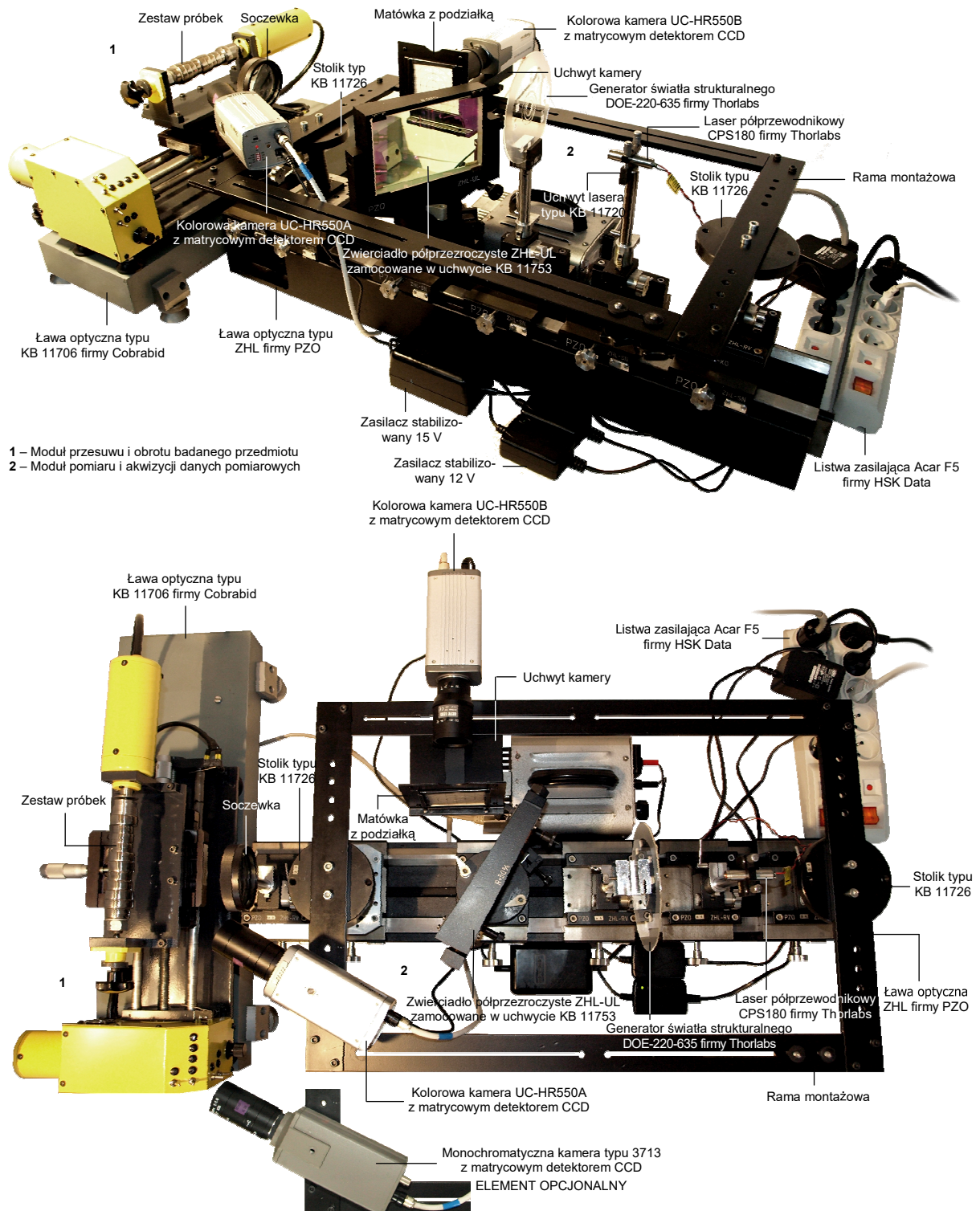
Tab. 9. Charakterystyka i konfiguracja elementów przesuwnych stosowanych w module pomiaru i akwizycji danych pomiarowych  
Tab. 9. The characteristics and configuration of slidable elements used in module of measurement and acquisition of measuring data

Typ elementu przesuwnego wchodzący w skład zespołu przesuwnego	Charakterystyka	Nr zespołu przesuwnego*					
		1	2	3	4	5	6
Sanki przesuwnie ZHL-SN	Służą jako podstawa do mocowania lub zestawiania innych elementów, wymiary: 90 × 130 × 15 mm.	+	+	+	+	+	+
Element dystansowy ZHL-KD	Służy do zwiększania wysokości mocowanego zestawu elementów, wymiary: 90 × 10 × 30 mm.	+	+	+	+	+	+
Element z regulacją wysokości ZHL-RV	Służy do płynnej regulacji wysokości w zakresie 20 mm, wymiary: 90 × 85 × 5 mm.	+			+	+	+
Płyta redukcyjna typu KB 11751 na sanki ZHL	Służy do mocowania na ławie optycznej typu ZHL produkcji PZO elementów zestawu optoelektronicznego typu KB 10114 firmy Cobrabid, wymiary: 110 × 85 mm.		+				
Kolumna typu KB 11711	Służy do mocowania różnego rodzaju elementów walcowych, wymiary: $\phi = 13,7$ mm, $h = 80$ mm.		+				
Pręt 1 typu KB 11712	Element nośny, służący do łączenia różnych elementów ławy optycznej, gwint M8x1, wymiary: $\phi = 13,7$ mm, $h = 115$ mm (pręt 1), $h = 75$ mm (pręt 2).	+			+	+	
Pręt 2 typu KB 11712			+				+
Stolik typu KB 11726	Błąd do mocowania drobnych elementów optycznych (np. przyzm, przysłon), wymiary: $\phi = 50$ mm.		+				+
Zwierciadło płaskie półprzezroczyste ZHL-UL z uchwytem KB 11753	Element optyczny światłodzielnący o podziale mocy wiązki światła 50% / 50%, wymiary (bez uchwyty): 120 × 80 mm.			+			
Uchwyt imadełkowy typu KB 11738	Służy do mocowania elementów optycznych (np. matówek) o grubości do 7 mm, wymiary: 35 × 20 × 25 mm.				+		
Uchwyt typu KB 11720 do mocowania elementów okrągłych	Służy do mocowania niewielkich elementów okrągłych o średnicy do 15 mm, wymiary: 40 × 5 × regulowane w zakresie od 0 do 15 mm.					+	

\*kolejność ustawienia zespołów przesuwnych patrząc od strony modułu przesuwu i obrotu badanego elementu

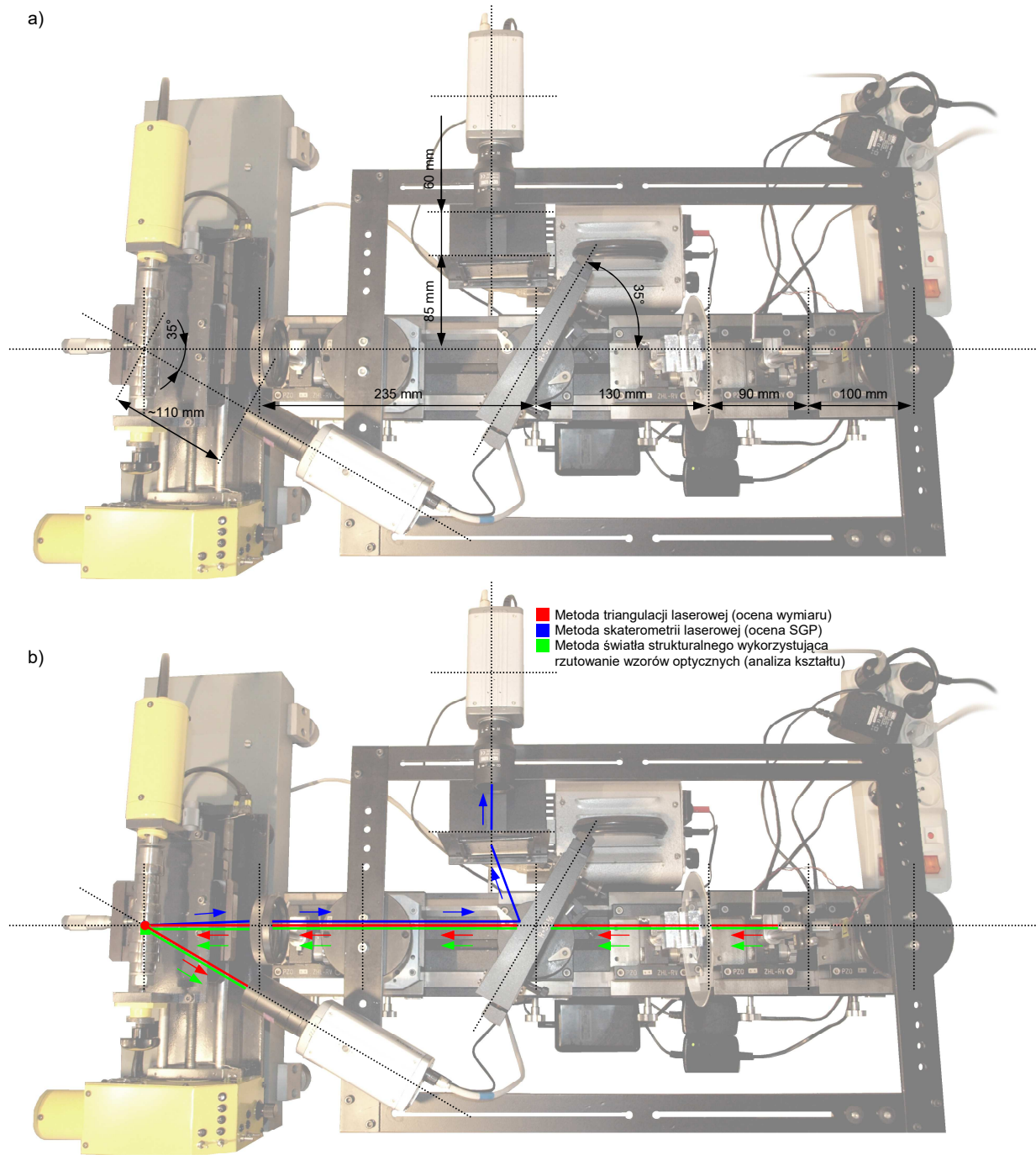
Na zespole przesuwnym nr 1 zamocowana była soczewka dwuwypukła o średnicy  $\phi = 60$  mm umieszczona w specjalnej oprawce. Była ona stosowana w połączeniu z generatorem światła strukturalnego umieszczonym na zespole przesuwnym nr 4. Soczewkę wykorzystywano do zmniejszenia wielkości tworzonego wzoru optycznego (dopasowania go do wymiarów powierzchni próbki). Elementy nr 2 i 6 wyposażone były w stoliki typu KB 11726, stanowiące podstawę dla ramy montażowej. Zastosowanie elementu ZHL-RV pozwalało na regulację wysokości podniesienia ramy w zakresie od 0 do 20 mm oraz na jej wypoziomowanie. Rama montażowa w formie prostokąta wykonana była z płaskowników aluminiowych o wymiarach – boki dłuższe (600 × 40 × 8 mm), boki krótsze (400 × 40 × 8 mm). Płaskowniki mocowane były na bokach śrubami imbusowymi M6, natomiast do stolików typu KB 11726 śrubami imbusowymi M8. Szttywna konstrukcja ramy pozwalała na instalowanie różnego rodzaju urządzeń do akwizycji obrazu, mocowanych na krótkich i długich bokach ramy. Do mocowania na krótkich bokach służyły otwory montażowe o średnicy  $\phi = 6$  mm, umieszczone po cztery symetrycznie na każdym z końców. Natomiast do montażu na dłuższych bokach służyły rowki o wymiarach 235 × 5 mm, umieszczone po dwa na długości każdego z boków. Do mocowania urządzeń stosowano specjalnie śruby z gwintem całowym 1/4", zakończone pokrętelem gwiazdowym typu HSB. Zespół przesuwny nr 3 stanowił podstawę pod kątowno usta-

wione zwierciadło półprzezroczyste ZHL-UL o kształcie prostokątym z klinowatym przekrojem poprzecznym. Wymiary zwierciadła wynosiły  $120 \times 80$  mm, natomiast kąt klina w przekroju poprzecznym wynosił  $5^\circ$ . Element mocowany był w uchwycie KB 11753. Zakres pochylenia zwierciadła względem osi poziomej wynosił  $6^\circ$ , a dokładność ustawienia wynosiła  $4'$ . Na rysunku 71 (□101), przedstawiono widok ogólny oraz ważniejsze elementy optyczne i elektroniczne modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych.



Rys. 71. Widok ogólny modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych (na pierwszym planie) oraz modułu przesuwu i obrotu badanego elementu (po lewej). Dodatkowo pokazano również opcjonalnie stosowaną kamerę monochromatyczną 3713 firmy Cohu Fig. 71. General view of module of measurement and acquisition of measuring data (center) and module of traverse and rotation of measuring element (left). Monochromatic camera type 3713 produced by Cohu optional used in investigations was showed additionally

Na rysunku 72 (□102), przedstawiono widok z góry modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych. Na obraz naniesiono odległości od elementów optycznych i elektronicznych wraz z wartościami kątów pod jakimi były one ustawione w czasie wykonywania pomiarów (72a (□102)), oraz bieg promieni światła laserowego z podziałem na poszczególne wykorzystywane metody optyczne (72b (□102)).



Rys. 72. Widok z góry modułu pomiaru i akwizycji danych pomiarowych z zaznaczonymi: a) geometrią ustawienia elementów optycznych i elektronicznych, b) biegiem promieni światła laserowego oraz wykorzystywanymi metodami optycznymi  
 Fig. 72. Top view of module of measurement and acquisition of measuring data with described: a) angles and distances of optical and electronic elements, b) directions of laser light beams as well as the used optical methods

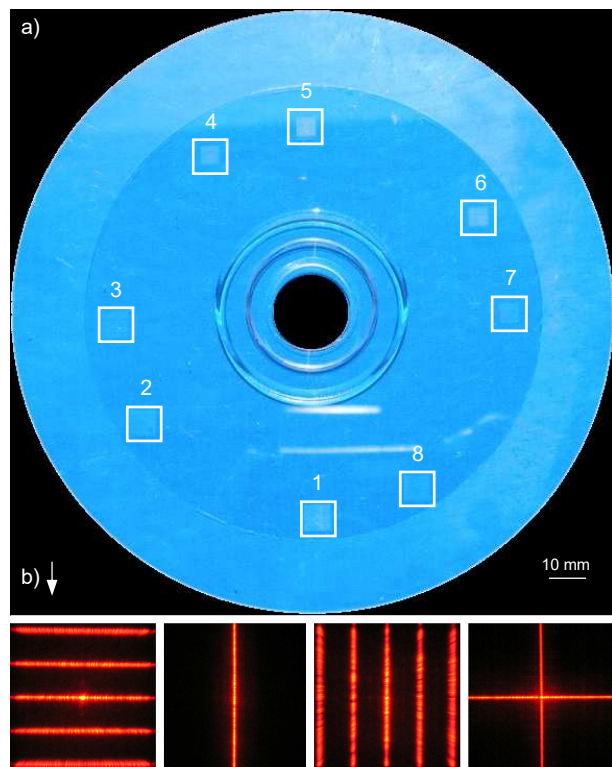
Tab. 10. Parametry generatora światła strukturalnego DOE-220-635 firmy Thorlabs  
 Tab. 10. The parameters of structured light generator DOE-220-635 produced by Thorlabs

Numer wzoru	Wymiary apertury [mm]	Liczba punktów tworzących wzór	Zakres kątów ugięcia [°]	Wielkość wzoru z odległości 1 m [mm]	Kształt wzoru optycznego
1	3,84 × 3,84	± 64	± 1,8	± 31	Zbiór linii pionowych
2	3,84 × 3,84	± 128	± 3,6	± 63	Krzyż
3	3,84 × 3,84	± 126	± 3,6	± 63	Pojedyncza linia
4	3,69 × 3,69	± 32	± 1,9	± 33	Zbiór linii poziomych
5	5,12 × 5,12	± 64	± 1,8	± 31	Zbiór linii pionowych
6	5,12 × 5,12	± 128	± 3,6	± 63	Krzyż
7	5,12 × 5,12	± 126	± 3,6	± 63	Pojedyncza linia
8	4,92 × 4,92	± 32	± 1,9	± 33	Zbiór linii poziomych

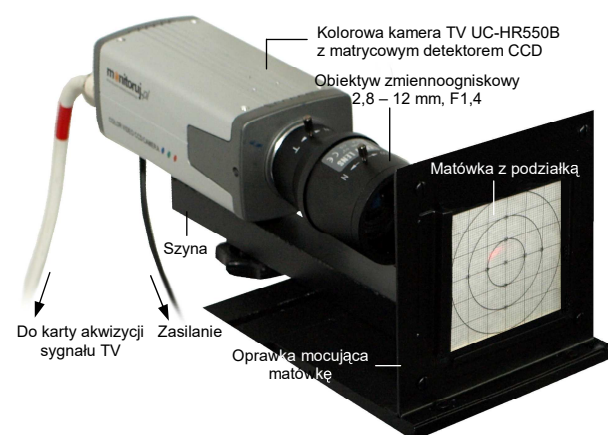
Na kolejnym zespole mocowany był generator światła strukturalnego w formie dysku o średnicy  $\phi = 115$  mm, wyprodukowany przez firmę Thorlabs, o symbolu DOE-220-635. Parametry tego generatora przedstawiono w tabelicy 10 (□103), natomiast na rysunku 73 (□103) pokazano jego widok ogólny oraz kształty tworzących wzorów światła strukturalnego. Dysk posiadał 8 elementów dyfrakcyjnych i umożliwiał generowanie wzorów światła strukturalnego w kształcie pojedynczej linii, zbioru linii (poziomych i pionowych) oraz krzyża (73b (□103)). Elementy dyfrakcyjne przeznaczone były do pracy z wiązką światła laserowego o długości fali  $\lambda = 635$  nm. Generator światła strukturalnego stosowany był głównie do oceny kształtu badanej powierzchni. W przypadku oceny SGP i wymiaru element był demonkowany lub ustawiany tak, aby nie przechodziła przez niego wiązka światła laserowego. Na zespole przesuwym nr 5 (Tab. 9 (□100)) zainstalowano źródło światła w postaci lasera półprzewodnikowego CPS180 firmy Thorlabs. Laser o mocy 1 mW emitował w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali  $\lambda = 635$  nm, tworzącą na badanej powierzchni plamkę o średnicy  $\phi = 1$  mm. Do zasilania źródła światła zastosowano zasilacz prądu stałego z regulacji napięcia w zakresie od 0 do 16 V, a prądu w zakresie od 0 do 5 A.

Jak już wspomniano wcześniej na ramie montażowej mocowano urządzenia przeznaczone do akwizycji obrazu. Były to kamery TV z matrycowymi detektorami CCD. Zgodnie z przyjętą koncepcją pomiaru stanowisko wyposażone było w dwie kamery TV realizujące jednoczesną ocenę SGP i wymiaru z osobną rejestracją obrazu światła rozproszonego oraz przemieszczenia plamki laserowej. Wybrane parametry kamer TV stosowanych w module akwizycji danych pomiarowych przedstawiono w tabelicy 11 (□104).

Kamera UC-HR550B, pokazana na rysunku 74 (□103), służąca do rejestracji kąтового rozkładu światła rozproszonego (ocena SGP) wyposażona była w obiektyw zmiennoogniskowy 2,8 – 12 mm, F1,4, o kącie obserwacji od 90° do 24°.



Rys. 73. Generator światła strukturalnego DOE-220-635 firmy Thorlabs w formie dysku z naniesionymi elementami dyfrakcyjnymi: a) widok ogólny, b) kształty generowanych wzorów optycznych  
 Fig. 73. The structured light generator DOE-220-635 produced by Thorlabs in a form of disc with DOE: a) general view, b) structured light patterns

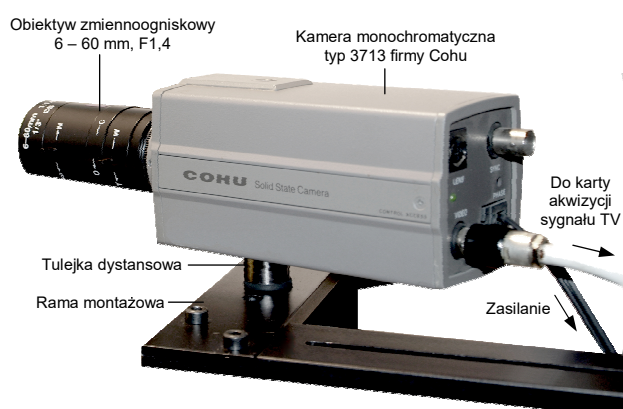


Rys. 74. Kolorowa kamera TV UC-HR550B z matrycowym detektorem CCD wraz z matówką zamocowana w uchwycie  
 Fig. 74. Color TV camera UC-HR550B with CCD matrix and focusing screen mounted in holder

Przed kamerą, w odległości 60 mm, ustawiona była matówka z podziałką, w celu dokładniejszego określania wielkości rejestrowanego obrazu światła rozproszonego. Kamera zamocowana była na szynie, stanowiącej wraz z oprawką mocującą matówkę część specjalnego uchwytu umieszczonego na ramie.

Tab. 11. Wybrane parametry techniczne kamer TV stosowanych w module pomiaru i akwizycji danych pomiarowych  
Tab. 11. The characteristics of TV cameras used in module of measurement and acquisition of measuring data

	Kolorowa kamera TV	Kolorowa kamera TV	Monochromatyczna kamera TV
Model	UC-HR550A	UC-HR550B	3713
Producent	dystrybuowana przez <a href="http://www.monitoruj.pl">www.monitoruj.pl</a>	dystrybuowana przez <a href="http://www.monitoruj.pl">www.monitoruj.pl</a>	Cohu
Typ elementu detekcyjnego	Matryca CCD	Matryca CCD	Matryca CCD
Powierzchnia elementu detekcyjnego [mm]	4,9 × 3,7	4,9 × 3,7	7,84 × 6,40
Rozdzielczość obrazu [piksele]	752 × 582	752 × 582	510 × 492
Czas otwarcia migawki [ms]	2 – 0,001	2 – 0,001	20 – 0,1
Rozdzielczość telewizyjna [linie]	450 (poziom), 550 (pion)	450 (poziom), 550 (pion)	> 370 (poziom), > 450 (pion)
Czułość [lux]	0,8	0,05	0,03 do 3
Stosunek sygnału do szumu [dB]	> 48	> 48	> 50



Rys. 75. Monochromatyczna kamera TV typu 3713 firmy Cohu wykorzystawana opcjonalnie w pomiarach wymiaru  
Fig. 75. Monochromatic TV camera type 3713 produced by Cohu optional used for measurement of dimension

w obiektyw zmiennoogniskowy od 6 – 60 mm, F1,4 i kącie obserwacji od 45° do 4,5°. Kamery zasilane były dwoma zasilaczami o napięciu 12 V, podłączonymi do listwy zasilającej Acar F5 firmy HSK Data. Sygnał z kamer przekazywany był przewodami R59 typu BNC (ang. *Bayonet Neill-Concelman*) firmy Satec<sup>69</sup> do karty akwizycji obrazu TV. W module zastosowano 4-kanalową kartę DVR (ang. *Digital Video Recording*) typu ether 10104 firmy SWIT (Shenzhen Wave-particle Intelligent Technology)<sup>70</sup>, powszechnie stosowaną m.in. w systemach telewizji przemysłowej. Karta pozwalała na jednoczesny zapis sygnału z obydwu kamer w postaci pojedynczych obrazów (format \*.bmp) lub sekwencji video (format \*.dvr). Wybrane parametry karty TV typu ether 10104 firmy SWIT przedstawiono w tabelicy 12 (□104).

W celu rejestracji obrazu przemieszczenia plamki laserowej (ocena wymiaru) oraz zniekształconych wzorów optycznych światła strukturalnego (analiza kształtu) stosowano kamerę UC-HR550A. Była ona wyposażona w obiektyw o zmiennej ogniskowej od 6 – 60 mm, F1,4 i kącie obserwacji od 45° do 4,5°. Kamera zamocowana była na ramie montażowej w odległości około 110 mm od badanej powierzchni (w zależności od jej średnicy). Podczas niektórych pomiarów, obraz kolorowy z układ detekcyjnego kamery UC-HR550A wykazywał pewne błędy. Dotyczyło to szczególnie tych przypadków, gdy badana powierzchnia miała bardzo dobre właściwości odbiciowe. W takich przypadkach korzystano z kamery monochromatycznej 3713 firmy Cohu, pokazanej na rysunku 75 (□104). Była ona wyposażona

Tab. 12. Wybrane parametry karty TV typu ether 10104 firmy SWIT zastosowanej w module pomiaru i akwizycji danych pomiarowych  
Tab. 12. The characteristics of TV card 10104 produced by SWIT used in module of measurement and acquisition of measuring data

Charakterystyka ogólna	
Karta pozwala na rejestrację sygnału z czterech niezależnych źródeł. Istnieje możliwość łączenia kart do czterech w jednym komputerze, co do daje maksymalne 16 kanałów. Oprogramowanie karty pozwala na korekcję kolorów niezależnie dla każdego kanału. Obraz z 4. źródeł wyświetlany jest na monitorze z podziałem ekranu na 1, 4, 9, 16 odrębnych okien. Program pozwala także na inteligentne wyszukiwanie nagrań archiwalnych z opcją synchronicznego podglądu do 16 kanałów oraz obsługę detekcji ruchu.	
Parametry techniczne	
Liczba wejść video	4 kanały
Jakość obrazu	Ustawiana manualnie
Kompresja obrazu	H.264 i MPEG4
Częstotliwość odświeżania [kl./s]	30 (system NTSC), 25 (system PAL)
Rozdzielczość obrazu [piksele]	640 × 480, 352 × 288, 320 × 240, 240 × 180
Obsługiwane systemy operacyjne	Windows2000 / XP

<sup>69</sup> Satec S.C., ul. Wigury 21, 90-319 Łódź, Polska, <http://www.satec.com.pl>

<sup>70</sup> SWIT – Shenzhen Wave-particle Intelligent Technology Co., Ltd., 7/F, China Economic Trade Building, Zhu zi lin, Shennan Road, Shenzhen, China, <http://www.wave-p.com>



## Moduł przetwarzania i analizy danych pomiarowych

Ostatnim modułem wchodzący w skład stanowiska bawczego od jednoczesnego pomiaru SGP i wymiaru w czasie ruchu badanego przedmiotu był moduł przetwarzania i analizy danych pomiarowych. W jego skład wchodziła stacjonarna jednostka komputerowa (Intel® Pentium® 4 533 MHz, 512 MB DDRAM, 80 GB HDD,) z monitorem LCD – AL171 firmy Acer<sup>71</sup> (17", 1280 × 1024 pixeli, 450:1, 300 cd/m<sup>2</sup>) oraz zainstalowaną kartą akwizycji sygnału TV typu ether 10104 firmy SWIT. Jednostka komputerowa wyposażona była w zestaw oprogramowania pozwalającego na akwizycję, przetwarzanie oraz analizę obrazu pochodzącego z kamer TV. W tablicy 13 (□105) przedstawiono wykorzystywane oprogramowanie komputerowe wraz z krótką charakterystyką.

Tab. 13. Oprogramowanie komputerowe wykorzystywane w module przetwarzania i analizy danych pomiarowych  
Tab. 13. Computer software used in module of processing and analysis of measuring data

Lp.	Nazwa oprogramowania	Producent	Charakterystyka
Akwizycja obrazu			
1.	DVR System	SWIT <a href="http://www.wave-p.com.cn">http://www.wave-p.com.cn</a>	Aplikacja przeznaczona do zdalnego sterowania pracą kamer TV podłączonych do systemu oraz akwizycji sygnału telewizyjnego. Oprogramowanie pozwala na niezależne ustawianie parametrów dla każdej z kamer oraz zapis obrazu w formacie *.dvr.
Wstępne przetwarzanie obrazu			
2.	AVS Video Converter 6.2	Online Media Technologies Ltd. <a href="http://www.avs4you.com">http://www.avs4you.com</a>	Konwerter pozwalający na przetwarzanie plików zapisanych w formacie *.dvr na inne bardziej użyteczne formaty video np. *.avi, *.mpeg.
3.	VideoStudio™ 7 SE DVD	Ulead Systems, Inc. <a href="http://www.ulead.com">http://www.ulead.com</a>	Rozbudowany edytor video. Pozwala na wstępne przygotowanie materiału video do późniejszego przetwarzania (m.in. korekcja obrazu, przycinanie klatek, łączenie wielu sekwencji, wprowadzenie tekstu do materiału video itp.)
4.	AVI2BMP 1.1	Niek Albers, DaanSystems <a href="http://www.daansystems.com">http://www.daansystems.com</a>	Prosta, freewareowa aplikacja pozwalająca na wydzielenie z dowolnej sekwencji video zapisanej w formacie *.avi pojedynczych klatek. Klatki zapisywane są jako pliki w formacie *.bmp. Aplikacja stosowana była m.in. do przygotowania obrazów do przetwarzania w programie RegiStax.
Przetwarzanie obrazu ruchomego			
5.	Image-Pro® Plus 5.1 (moduł <i>Track Objects</i> )	Media Cybernetics, Inc. <a href="http://www.mediacy.com">http://www.mediacy.com</a>	Zaawansowane oprogramowanie do przetwarzania i analizy obrazów o charakterze uniwersalnym. Program pozwala na analizę ruchu obiektów w sekwencji video zaimportowanej do programu w formie pliku o rozszerzeniu *.seq. Śledzenie odbywa się za pomocą narzędzia <i>Track Objects</i> . Po uruchomieniu wyświetlana jest Tablica <i>Tracking Data Table</i> przedstawiająca różne dostępne opcje dotyczące śledzenia obiektów. Wyniki prezentowane są w formie wykresów.
6.	RegiStax 4.0	Cor Berrevoets <a href="http://www.astronomie.be/registax/">www.astronomie.be/registax/</a>	Zaawansowane oprogramowanie głównie przetwarzania obrazu metodą nakładania obrazów. Program posiada m.in. moduł precyzyjnego ustawiania i nakładania obrazów oraz możliwość dodatkowego przetwarzania obrazów wynikowych za pomocą filtrów opartych na algorytmach falkowych.
Analiza obrazu			
7.	ImageJ 1.37	Wayne Rasband, NIOH <a href="http://rsb.info.nih.gov/ij">http://rsb.info.nih.gov/ij</a>	Oprogramowanie freeware i open source służące do przetwarzania i analizy obrazów. Do standardowych funkcji realizowanych przez ImageJ należą: korekcja obrazu, określanie krawędzi, filtrowanie, przekształcenia geometryczne, ekstrakcja obrazu na pojedyncze kanały. Środowisko programu pozwala również na tworzenie makroinstrukcji. Dodatkowo istnieje możliwość rozszerzenia działania programu poprzez zastosowanie pluginów.
8.	Image-Pro® Plus 5.1	Media Cybernetics, Inc. <a href="http://www.mediacy.com">http://www.mediacy.com</a>	Specjalistyczne środowisko przeznaczone do badań naukowych, które umożliwia przetwarzanie i analizowanie obrazów na pojedynczym komputerze lub poprzez sieć. Oprogramowanie to umożliwia realizowanie następujących funkcji: akwizycję obrazu, przetwarzanie obrazu, pomiary, analizę obrazu, tworzenie makroinstrukcji programowych, archiwizowanie danych. Aplikacja pozwala na prowadzenie skomplikowanych, wielokryterialnych analiz na obrazach statycznych i ruchomych oraz wizualizację danych pomiarowych.

<sup>71</sup> Acer Inc., 8F, 88, Sec. 1, Hsin Tai Wu Road, Hsichih, Taipei 221, Taiwan. <http://www.acer.com>

### 5.2.3. Próbki wykorzystywane w badaniach

#### Założenia do przygotowania próbek

Korzystając z doświadczeń wynikających z przeprowadzonych wcześniej badań rozpoznawczych stwierdzono, iż dla oceny powierzchni w ruchu niezbędne będzie przygotowanie odpowiedniego zestawu próbek. Przyjęto przy tym pewne założenia dotyczące kształtu próbek oraz typu obróbki powierzchni. Analizę cech próbek przeznaczonych do pomiarów SGP i wymiaru przedstawiono w tabelicy 14 (□106).

Tab. 14. Analiza cech próbek przeznaczonych do badań  
Tab. 14. The analysis of samples features used for investigations

Grupy cech	Cecha	Możliwe rozwiązania	Zalety rozwiązania	Przyjęte rozwiązanie
Cechy konstrukcyjne	Kształt	Powierzchnie walcowe, powierzchnie płaskie	Możliwość realizacji pomiarów w ruchu	Zestaw powierzchni walcowych w postaci pierścieni
	Wymiar	Zmienna średnica zewnętrzna	Możliwość realizacji pomiarów wymiaru	Zmienna średnica
	Rodzaj materiału	Różne materiały	Możliwość przeprowadzenia badań dla różnych materiałów	Aluminium, mosiądz, żeliwo, stal
Inne cechy	Rodzaj obróbki	Toczenie i obróbka ścierna	Uzyskanie powierzchni o charakterystyce zbliżonej do rzeczywistych powierzchni precyzyjnie obrobionych części maszyn	Szlifowanie i polerowanie
	Parametry chropowatości powierzchni	Różne	Pełna ocena chropowatości powierzchni	$Ra = 0,05 \pm 0,5 \mu m$ i inne
	Połysk	Różne	Możliwość przeprowadzenia badań dla powierzchni o różnej refleksyjności	Powierzchnie o ograniczonym, ale wysokim połysku

Mając na uwadze powyższe założenia przystąpiono do realizacja procesu przygotowania próbek. Proces ten przebiegał w dwóch etapach obejmujących obróbkę wstępną oraz wykańczającą próbek.

#### Charakterystyka materiałów próbek

Materiałem wyjściowym do przygotowania próbek był zestaw czterech prętów o wymiarach: średnica zewnętrzna  $\phi_z = 40$  mm, długość  $l = 150$  mm. Pręty wykonane były z następujących materiałów: aluminium EN AW-6082 (stop aluminium), mosiądz EN CW612N (mosiądz ołowiowy), żeliwo EN GJL150 (żeliwo szare) oraz stal EN C45 (stal konstrukcyjna). Charakterystykę tych materiałów przedstawiono w tablicach od 15 (□106) do 18 (□107).

Tab. 15. Charakterystyka aluminium EN AW-6082  
Tab. 15. The characteristics of aluminium EN AW-6082

Charakterystyka ogólna									
Stop aluminium 6082 jest stopem strukturalnym charakteryzującym się średnią wytrzymałością i udarnością oraz bardzo dobrą odpornością na korozję. Posiada najwyższą wytrzymałość ze stopów aluminium serii 6000. Z tego względu zastępuje dotychczas powszechnie stosowany stop 6061. Stosowany jest w średnio obciążonych elementach konstrukcji lotniczych, motoryzacyjnych, w elementach nośnych statków, dźwigów, mostów, ciężarówek, autobusów, barier zabezpieczających.									
Właściwości fizyczne									
Gęstość	Temperatura topnienia	Moduł sprężystości (moduł Younga)	Rezystywność (oporność właściwa)	Współczynnik przewodzenia ciepła	Rozszerzalność cieplna				
[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[GPa]	[Ωm]	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[1/K]				
2,7	555	70	$0,038 \times 10^{-6}$	180	$24 \times 10^{-6}$				
Właściwości mechaniczne									
Odmiana stopu po odprężaniu	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wytrzymałość na ścinanie	Twardość w skali Vickersa					
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[HV]					
O	60	130	85	35					
T4	170	260	170	75					
T6/T651	310	340	210	100					
Skład chemiczny i procentowy udział pierwiastków*									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Cr	Al	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
0,7 ÷ 1,3	0,5	0,1	0,4 ÷ 1,0	0,6 ÷ 1,2	0,2	0,1	0,25	reszta	

\*Zgodnie z [N05/573-3]

Tab. 16. Charakterystyka mosiądzu EN CW612N  
 Tab. 16. The characteristics of brass EN CW612N

Charakterystyka ogólna						
Mosiądz ołowiowy CW 612N charakteryzuje się dobrą skrawalnością, dostateczną podatnością na odkształcenia plastyczne na zimno i dobrą – na gorąco. Posiada także bardzo dobrą odpornością na korozję. Dzięki większej zawartości miedzi wykazuje bardzo dobrą płynność już przy niższych temperaturach. Produkowany jest najczęściej w formie kształowników, rur lub prętów. Jest szeroko stosowanym materiałem w przemyśle elektronicznym, maszynowym, okrętowym, precyzyjnym, chemicznym.						
Właściwości fizyczne						
Gęstość	Temperatura topnienia	Moduł sprężystości (moduł Younga)	Konduktywność (przewodność właściwa)	Współczynnik przewodzenia ciepła		
[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[MPa]	[S/m]	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]		
8,44	< 1000	102	13,9 × 10 <sup>6</sup>	109		
Właściwości mechaniczne						
Materiał w stanie	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zerwaniu	Twardość w skali Vickersa		
	[MPa]	[MPa]	[%]	[HV]		
Miękkim	180	390	35	95		
Twardym	500	560	3	150		
Skład chemiczny i procentowy udział pierwiastków						
Cu	Pb	Sn	Al	Fe	Ni	Zn
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
59 ÷ 60	1,6 ÷ 2,5	≤ 0,3	≤ 0,05	≤ 0,3	≤ 0,3	reszta

Tab. 17. Charakterystyka żeliwa EN GJL 150  
 Tab. 17. The characteristics of gray cast iron EN GJL 150

Charakterystyka ogólna					
Żeliwo szare GJL 150, to ferrytyczno-perlityczna odmiana żeliwa, w którym węgiel występuje w postaci grafitu płatkowego. Charakteryzuje się dużą wytrzymałością na ściskanie, dużą odpornością na zużycie powierzchni ślizgowych oraz dobrym tłumieniem drgań. Żeliwo GJL 150 posiada dobrą leżność i niewielki skurcz odlewniczy (rzędu 1,0%). Jest bardzo dobrze obrabialne. Wytwarza się z niego części maszyn narażone na zmienne obciążenia dynamiczne o znacznej wytrzymałości, takie jak: wały korbowe, koła zębate, gaśnice ciągników, korpusy pras, młotów, walcarek, korpusy i wirniki pomp, głowice frezarskie.					
Właściwości fizyczne					
Gęstość	Temperatura topnienia	Moduł sprężystości (moduł Younga)	Rezystywność (oporność właściwa)	Współczynnik przewodzenia ciepła	Rozszerzalność cieplna
[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[MPa]	[Ωm]	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[1/K]
6,8 – 7,25	1150 – 1250	25 – 35	2 – 5 × 10 <sup>-6</sup>	52,5 (100 °C)	–
Właściwości mechaniczne					
Materiał w stanie	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zerwaniu	Twardość w skali Brinella	
	[MPa]	[MPa]	[%]	[HB]	
Miękkim	98	150	0,8	135	
Twardym	165	250	0,3	200	
Skład chemiczny i procentowy udział pierwiastków					
C	Si	Mn	P	S	
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
3,5	2,3	0,6	0,01	< 0,2	

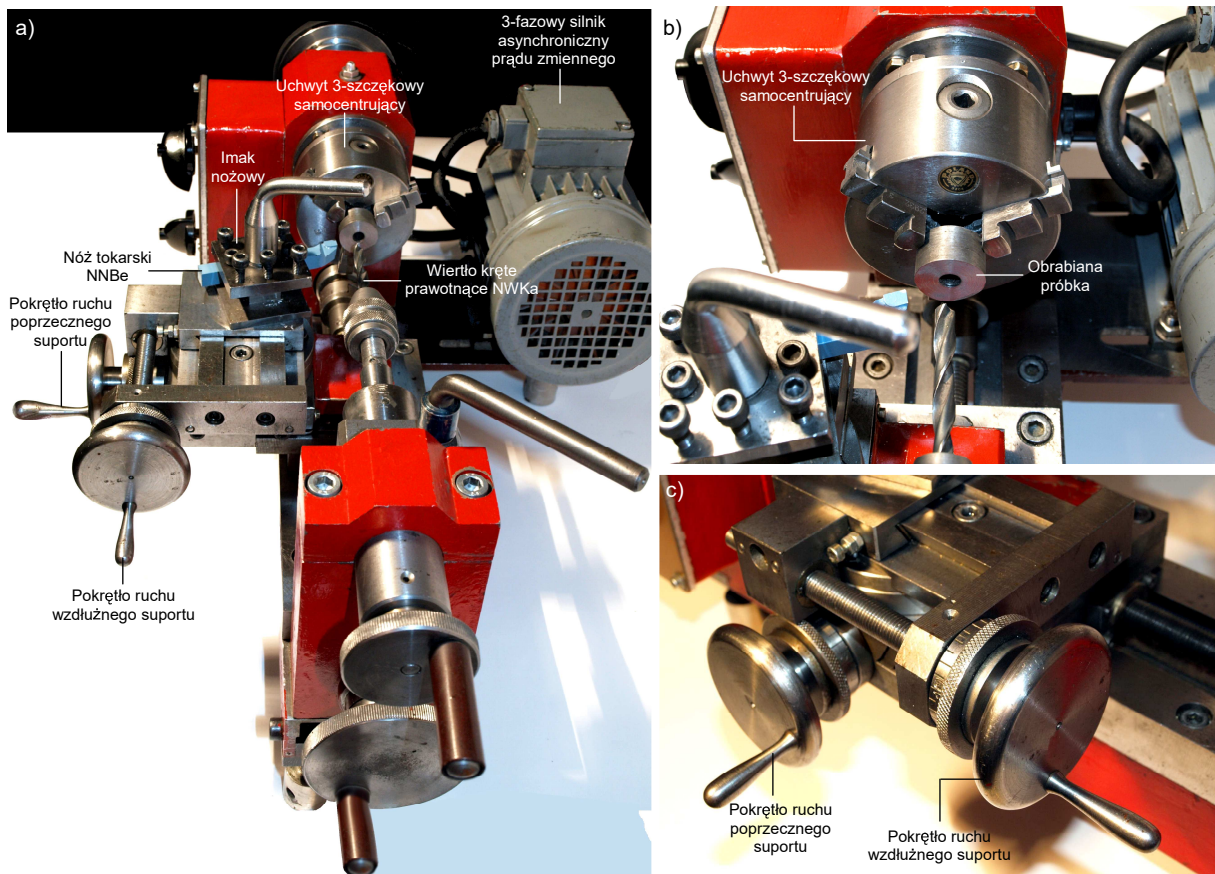
Tab. 18. Charakterystyka stali EN C45  
 Tab. 18. The characteristics of steel EN C45

Charakterystyka ogólna							
Stal C45 jest typową stalą konstrukcyjną powszechnie stosowaną do budowy konstrukcji stalowych, części urządzeń oraz maszyn wykorzystywanych w standardowych warunkach. C45 stosuje się m.in. do wyrobu osi, wrzecion, walców, wirników.							
Właściwości fizyczne							
Gęstość	Temperatura topnienia	Moduł sprężystości (moduł Younga)	Współczynnik przewodzenia ciepła	Współczynnik rozszerzalności cieplnej			
[g/cm <sup>3</sup> ]	[°C]	[GPa]	[W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]	[1/K]			
7,85	1540	210	50	11,7 × 10 <sup>-6</sup>			
Właściwości mechaniczne							
Materiał w stanie	Granica plastyczności	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie przy zerwaniu	Udarność			
	[MPa]	[MPa]	[%]	[J/cm <sup>2</sup> ]			
Miękkim	340	600	16	50			
Twardym	400	800					
Skład chemiczny i procentowy udział pierwiastków							
C	S	P	Si	Mn	Cr	Ni	Cu
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,5	0,04	0,04	0,37	0,8	0,3	0,3	0,3

## Obróbka wstępna próbek

Proces obróbki wstępnej próbek prowadzono za pomocą tokarki SK-1. Była to obrabiarka typu stołowego przeznaczona do obróbki małogabarytowych elementów wykonanych z metalu, drewna i tworzyw sztucznych. Napęd tokarki stanowił 3-fazowy silnik asynchroniczny prądu zmiennego o mocy 370 W, wyprodukowany przez firmę MEZ<sup>72</sup>. Dzięki zastosowaniu kół zmianowych i odpowiedniej ręcznej kombinacji ustawień paska klinowego możliwe było uzyskanie trzech prędkości obrotowych:  $n_w = 675$  obr/min,  $n_w = 1370$  obr/min oraz  $n_w = 2740$  obr/min (dla obrotów w prawo i w lewo). Obrabiane elementy mocowane były w 3-szczękowym uchwycie tokarskim samocentrującym PUTm o wielkości nominalnej 80 mm z mocowaniem ręcznym (typu 3204), wyprodukowanym przez firmę Bison<sup>73</sup>. Narzędzia skrawające w postaci noży tokarskich imakowych (nieprzekraczających przekroju trzonka  $16 \times 16$  mm) mocowane były w imaku nożowym znajdującym się na saniach narzędziowych. Przesuw sań narzędziowych wynosił 1 mm/obr w zakresie do 60 mm. Przemieszczenie suportu w osi x zapewniała śruba pociągowa przesuwu wzdłużnego o skoku 1,5 mm. Długość toczenia wynosiła 150 mm, a średnica toczenia 80 mm. Narzędzia skrawające do wykonywania otworów (nieprzekraczające średnicy 15 mm) mocowane były w uchwycie konika. Obrabiarka charakteryzowała się niewielkimi gabarytami: długość 650 mm, szerokość 400 mm, wysokość 320 mm. Masa tokarki wynosiła ok. 25 kg.

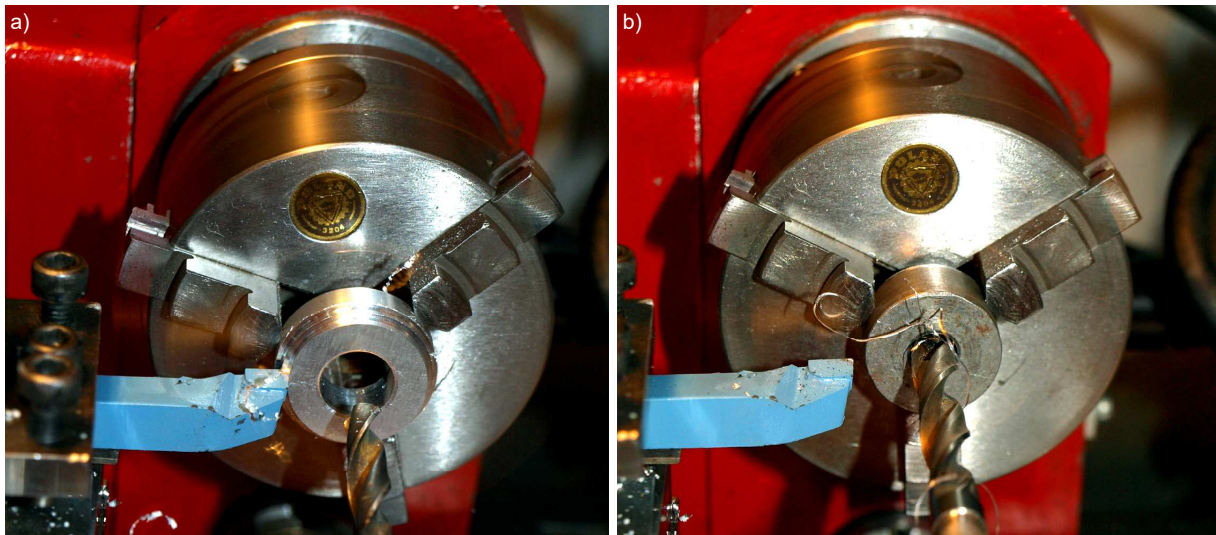
Na rysunku 76 (□108) przedstawiono widok ogólny obrabiarki SK-1, zbliżenie na uchwyt tokarski 3-szczękowy samocentrujący PUTm oraz pokrętła ruchu poprzecznego i wzdłużnego suportu. Rysunek 77 (□108) przedstawia natomiast fragment przebiegu procesu obróbkowego – toczenie zgrubne próbki wykonanej z aluminium EN AW-6082 oraz wiercenie otworu o średnicy  $\phi = 13$  mm w próbce wykonanej z żeliwa EN GJL 150.



Rys. 76. Tokarka SK-1: a) widok ogólny obrabiarki, b) zbliżenie na uchwyt tokarski 3-szczękowy samocentrujący z zamocowaną próbka, c) zbliżenie na pokrętła ruchu poprzecznego i wzdłużnego suportu  
 Fig. 76. Lathe SK-1: a) general view of machine, b) near-view of 3-jaw self-centering chucks with fixed sample, c) near-view of handwheel for lateral and longitudinal movement of slide

<sup>72</sup> MEZ Mohelnice S. P., Masarykova 33, 789 85 Mohelnice, Czech Republic. <http://www.mezmohelnice.cz>

<sup>73</sup> Fabryka Przystrojów i Uchwytów Bison-Biał S. A., ul. Łąkowa 3, 15-950 Białystok, Polska. <http://www.bison-bial.pl/>



Rys. 77. Obróbka próbek za pomocą tokarki SK-1: a) toczenie zgrubne próbki wykonanej z aluminium EN AW-6082, b) wiercenie otworu w próbce wykonanej z żeliwa EN GJL 150  
 Fig. 77. The machining of samples by lathe SK-1: a) roughly turning of aluminium EN AW-6082 sample, b) drilling the hole in cast iron EN GJL 150 sample

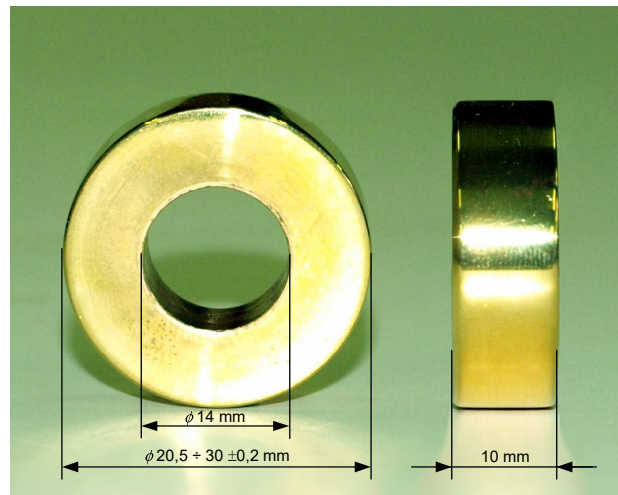
Do prowadzenia procesu obróbkowego wykorzystano następujące narzędzia skrawające:

- nóż tokarski imakowy boczny wygięty (prawy) NNBe,
- nóż tokarski imakowy przecinak (prawy) NNBa,
- wiertło kręte z chwytem walcowym płaskim, prawotnące NWKa,
- rozwiertak maszynowy (zdzierak) z chwytem stożkowym Morse'a NRTa,
- rozwiertak maszynowy (wykańczak) z chwytem stożkowym Morse'a NRTc.

Charakterystykę wymienionych narzędzi przedstawiono w tablicach 49 (187) i 50 (187) w załączniku, natomiast ich widoki ogólne oraz geometrię na rysunkach 119 (187) i 120 (188) w załączniku.

Pracę rozpoczęto od wstępnego przygotowania powierzchni każdego z walców. Po splanowaniu czoła, walce toczono zgrubnie na średnicę zewnętrzną  $\phi_z = 31$  mm, a następnie dokładnie na średnicę zewnętrzną  $\phi_z = 30 \pm 0,2$  mm (nóż tokarski NNBe, prędkość obrotowa  $n_w = 685$  obr/min., posuw ręczny). Korzystając z noża tokarskiego NNPa, każdy z walców pocięto na 11 próbek o szerokości  $h = 10$  mm (prędkość obrotowa  $n_w = 685$  obr/min., posuw ręczny). Następnie każdą z próbek obrabiano oddzielnie na założoną średnicę zewnętrzną  $\phi_z$ , zwiększając dla kolejnej próbki o 0,5 mm (nóż tokarski NNBe, prędkość obrotowa  $n_w = 685$  obr/min., posuw ręczny).

Po zakończeniu obróbki przystąpiono do wykonywania otworów o średnicy wewnętrznej  $\phi_w = 14$  mm. Zgodnie z [N74/57025] rozpoczęto od wiercenia otworu o średnicy  $\phi = 13$  mm (wiertło kręte NWKa, prędkość obrotowa  $n_w = 685$  obr/min., posuw ręczny). Następnie otwór rozwiercano zgrubnie na średnicę  $\phi = 13,8$  mm, a później wykańczając na średnicę  $\phi = 14$  mm (rozwiertak maszynowy – zdzierak NRTa oraz rozwiertak maszynowy – wykańczak NRTc, prędkość obrotowa  $n_w = 685$  obr/min., posuw ręczny). Na rysunku 78 (109) przedstawiono widok ogólny wykonanej próbki wraz z jej geometrią.



Rys. 78. Widok ogólny oraz geometria próbki  
 Fig. 78. General view and geometry of sample

## Obróbka wykańczająca próbek

Po przeprowadzeniu obróbki wstępnej przystąpiono do obróbki wykańczającej zewnętrznych powierzchni próbek. Obróbkę tę prowadzono korzystając z arkuszy ściernych i past mikrościernych, których charakterystykę przedstawiono w tablicy 19 (□110) oraz 20 (□110).

Tab. 19. Charakterystyka arkuszy ściernych stosowanych do obróbki próbek  
Tab. 19. The characteristics of abrasive sheets used for machining of samples

Lp.	Producent	Nazwa komercyjna	Oznaczenie	Spoivo	Typ ziarna	Granulacja ziarna	Kolor nasypu
1.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	200	Zielony
2.	UNION-VIS <sup>74</sup>	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	220	Niebieskoszary
3.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	240	Niebieskoszary
4.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	240	Zielony
5.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	280	Zielony
6.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	280	Piaskowy
7.	ZCC-China <sup>75</sup>	Diamond Brand	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	320	Zielony
8.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	320	Niebieskoszary
9.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	360	Niebieskoszary
10.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	360	Zielony
11.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	400	Zielony
12.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	500	Brazowoszary
13.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	800	Niebieskoszary
14.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	800	Zielony
15.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	1000	Niebieskoszary
16.	Klingspor <sup>76</sup>	–	PS 8 A	Żywica synt.	Węglik krzemu	1000	Szary
17.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	1000	Zielony
18.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	1200	Jasnoszary
19.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	1500	Niebieskoszary
20.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	1500	Jasnoszary
21.	Starcke GmbH & Co. KG <sup>77</sup>	Matador	991 A	Żywica synt.	Węglik krzemu	2000	Szarozielony
22.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	2000	Piaskowy
23.	Starcke GmbH & Co. KG	Matador	991 A	Żywica synt.	Węglik krzemu	2500	Szaroniebieski
24.	UNION-VIS	FAS-UNION	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	2500	Jasnoszary
25.	Indasa <sup>78</sup>	Rhynowet	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	2500	Czerwony
26.	–	Fisher	–	Żywica synt.	Węglik krzemu	2500	Piaskowy

Tab. 20. Charakterystyka past mikrościernych i polerskich stosowanych do obróbki próbek  
Tab. 20. The characteristics of microabrasive and polished pastes used for machining of samples

Lp.	Nazwa	Oznaczenie	Producent	Składnik pasty	Przybliżona chropowatość powierzchni Ra po obróbce pastą [μm]
1.	Pasta mikrościerna	DS 3/2 N O	Marbad <sup>79</sup>	Ziarno diamentowe	0,63 ÷ 0,32
2.	Pasta mikrościerna	DS 14/10 N O	Marbad	Ziarno diamentowe	0,32 ÷ 0,08
3.	Pasta mikrościerna	DS 60/40 N O	Marbad	Ziarno diamentowe	0,08 ÷ 0,04
4.	Pasta polerska	308000	Sonax <sup>80</sup>	Tlenek glinu	< 0,04
Przykład oznaczenia DS 3/2 N O		DS – mikroziarno diamentowe: diament syntetyczny 3/2 – wielkość mikroziaren [μm] N – koncentracja mikroziaren: normalna 10% wag. diamentu O – rodzaj łącznika: zmywalny i rozpuszczalny w olejach maszynowych, nafcie, benzynie itd.			

Obróbka wykańczająca prowadzona była zgodnie z planem przedstawionym w tabelach od 51 (□189) od 54 (□194) w załączniku. W wyniku opisanych powyżej prac uzyskano cztery zestawy próbek w formie pierścieni o zmiennej średnicy zewnętrznej  $\phi_z = 20,5 \div 30 \pm 0,2$  mm i stałej średnicy wewnętrznej  $\phi_w = 14$  mm. Każdy zestaw zawierał jedenaście próbek. Łączna liczba wszystkich próbek wynosiła czterdzieści cztery.

<sup>74</sup> UNION-VIS Sp. z o. o., ul. Tadeusza Regera 58, 43-382 Bielsko-Biała, Polska. <http://www.union-vis.com.pl>

<sup>75</sup> ZCC-China, Diamond Road, Zhuzhou, Hunan, China. <http://www.ecvv.com/supplier/C-827637-China-zcc-china.html>

<sup>76</sup> Klingspor AG, Hüttenstraße 36, D-35708 Haiger, Germany. <http://www.klingspor.de>

<sup>77</sup> Starcke GmbH & Co. KG, Schleifmittelwerk, Markt 10 - D-49324 Melle, P.O.Box 1260 - D-49304 Melle, Germany. <http://www.starcke.de>

<sup>78</sup> Indasa, Zona Industrial de Aveiro Lt 46 - Apartado 3005, 3801-903 Aveiro, Portugal. <http://www.indasa.pt>

<sup>79</sup> Marbad Zakład Technik Obróbki Powierzchni, ul. Kulczyńskiego 14, 02-777, Warszawa, Polska. <http://www.marbad.pl>

<sup>80</sup> Sonax GmbH & Co AG, Münchener Str. 75, 86633 Neuburg, Germany. <http://www.sonax.com>

## Pomiary wymiarów zewnętrznych próbek

Po zakończonej obróbce wykańczającej próbek przystąpiono do etapu drugiego. Na tym etapie dokonano oceny wszystkich wykonanych próbek pod względem wymiarów oraz przeprowadzono ocenę wybranych parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

Pomiary wymiarów zewnętrznych prowadzono korzystając z prostych narzędzi pomiarowych oraz optycznego systemu pomiarowego Video-Check<sup>®</sup> - IP 250 firmy Werth<sup>81</sup>. Charakterystykę wykorzystywanych narzędzi pomiarowych przedstawiono w tablicy 21 (□111).

Tab. 21. Charakterystyka narzędzi pomiarowych stosowanych do oceny wymiarów zewnętrznych próbek  
Tab. 21. The characteristics of measuring instruments used for assessment of external dimensions of samples

Nazwa	Oznac.	Producent	Zakres pomiarowy [mm]	Wartość działki elementarnej [mm]	Materiał
Suwmiarka jednostronna z głębokościomierzem z zewnętrznymi szczękami krawędziowymi, z zaciskiem i noniusem	MAU <sup>82</sup>	Luna <sup>83</sup>	0 – 190	0,05	Stal nierdzewna utwardzana
Suwmiarka jednostronna elektroniczna z odczytem cyfrowym	MAUa-E1	VIS <sup>84</sup>	0 – 150	0,01	Stal nierdzewna, utwardzona
Mikrometr zewnętrzny z powierzchniami pomiarowymi płaskimi	MMZa	VIS	0 – 25	0,01	Stal narzędziowa
Mikrometr zewnętrzny z powierzchniami pomiarowymi płaskimi (typ ciężki)	MMZc	VIS	25 – 50	0,01	Stal narzędziowa

Dla każdej z próbek przeprowadzono pięć pomiarów w losowo wybranych miejscach, a otrzymane wyniki uśredniono. W tablicy 22 (□113) przedstawiono wyniki pomiarów wymiarów zewnętrznych badanych próbek przeprowadzone za pomocą narzędzi pomiarowych wymienionych w tablicy 21 (□111).

Dodatkowo dokonano oceny wymiarów zewnętrznych próbek korzystając z optycznego systemu pomiarowego Video-Check<sup>®</sup> -IP 250 firmy Werth. Urządzenie to było wieloczułkową współrzędnościową maszyną pomiarową typu stołowego [GRE2004] przeznaczoną do precyzyjnych laboratoryjnych [RAI2000] i przemysłowych pomiarów wielkości geometrycznych w układzie 2D i 3D. System pomiarowy charakteryzował się strukturą modułową, co umożliwiało dostosowanie go do konkretnych zastosowań. Video-Check<sup>®</sup> -IP 250 zbudowany był z dwóch zasadniczych modułów – stolika pomiarowego przemieszczającego się na łożyskach mechanicznych z mocowaniem magnetycznym oraz kolumny przesuwu pionowego mieszczącej głowicę pomiarową. Zastosowana w urządzeniu sonda pomiarowa Video IP pozwalała na wykonywanie pomiarów przy powiększeniu optycznym w zakresie od 50× do 150×. Obraz rejestrowany był przez wysokiej klasy kamerę z detektorem CCD i przesyłany do komputera. Dzięki zastosowaniu technik przetwarzania obrazu możliwa była detekcja konturu przedmiotu w świetle odbitym i przechodzącym. Na podstawie rozpoznanego konturu wyznaczone były punkty wg których wykonywano pomiar wielkości geometrycznych. W urządzeniu można było zastosować także inne typy sond pomiarowych (np. głowicy stykowej firmy Renishaw<sup>85</sup>), co zapewniało większą elastyczność pracy i szybkość pomiaru.

System pomiarowy wyposażony był w oprogramowanie komputerowe o nazwie WinWerth<sup>®</sup> 6.21. Pozwalało ono na wykonywanie pomiarów oraz tworzenie programów do szybkiej automatycznej oceny części maszyn. Informacje wyświetlane były na jednym z dwóch monitorów F-417 firmy AG Neovo<sup>86</sup>. Drugi monitor służył do obserwacji mierzonej powierzchni – wyświetlany był na nim obraz z kamery CCD. Charakterystykę urządzenia Video-Check<sup>®</sup> -IP 250 przedstawiono w tablicy 23 (□112), a jego widok ogólny pokazano na rysunku 79 (□112).

<sup>81</sup> Werth Messtechnik GmbH, Siemensstraße 19, 35394 Gießen, Germany. <http://www.werthmesstechnik.de>

<sup>82</sup> Oznaczenia suwmiarek zgodnie z [N72/53131]

<sup>83</sup> Luna Polska Sp. z o. o., ul. Srokowiecka 18, 41-100 Siemianowice Śląskie, Polska.

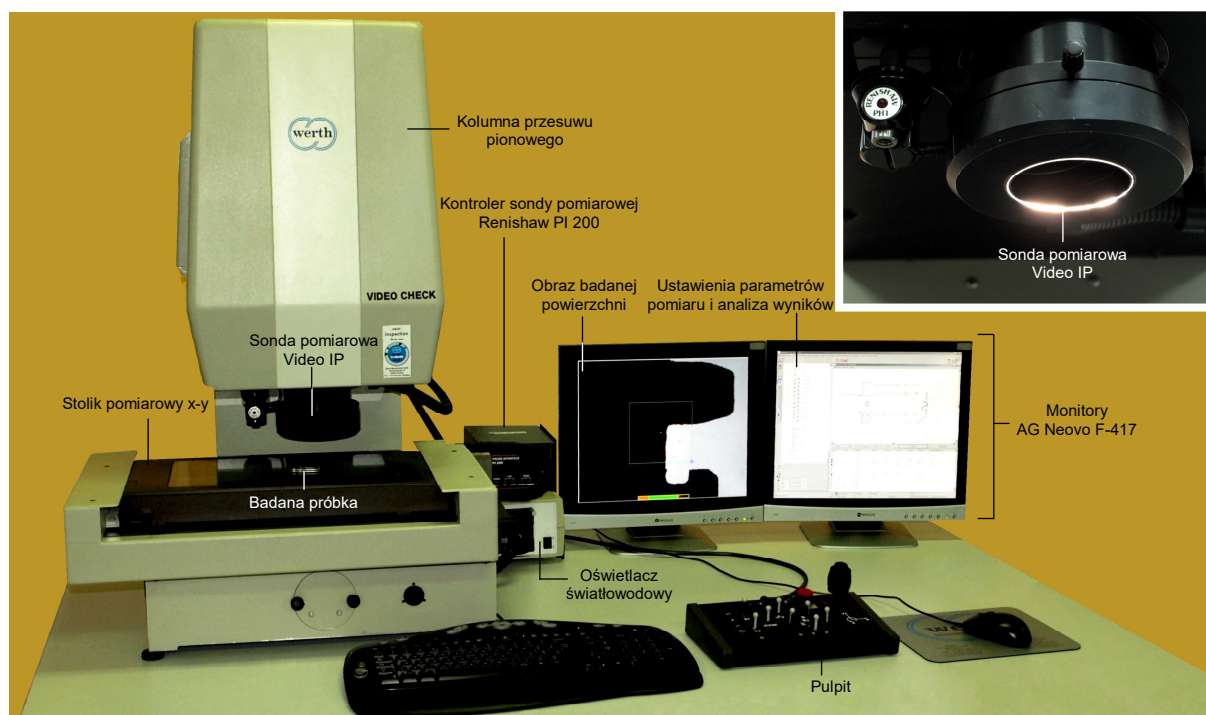
<sup>84</sup> VIS Sp. z o. o., ul. Kasprzaka 29/31, 01-234 Warszawa, Polska. <http://www.vis.com.pl>

<sup>85</sup> Renishaw, New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire GL12 8JR, UK. <http://www.renishaw.com>

<sup>86</sup> AG Neovo, 10F, No. 15, Chi-Nan Road, Section 1 Taipei, Taiwan. <http://global.agneovo.com/>

Tab. 23. Charakterystyka współrzędnościowej maszyny pomiarowej typu stołowego Video-Check® -IP 250 firmy Werth  
 Tab. 23. The characteristics of bench-type multisensor coordinate measuring machine Video-Check® -IP 250 produced by Werth

Parametry pomiaru	
Technika pomiaru	Współrzędnościowa technika pomiarowa, przetwarzanie obrazu powierzchni w celu detekcji krawędzi w świetle odbitym i przechodzącym
Zakres pomiarowy	250 mm (oś x), 125 mm (oś y), 200 mm (oś z)
Rozdzielczość	0,0001 mm
Czas pomiaru	Zależny od prowadzonego pomiaru
Parametry systemu pomiarowego	
Typ sondy pomiarowej	Video IP
Zakres powiększenia ekranowego	(9 stopni) od 50× do 150×
Maksymalna masa mierzonego elementu	$m_{max} = 30$ kg
Warunki pracy	
Temperatura / wilgotność	10 – 35 °C / 40 – 70% nie skondensowana
Wymiary	1600 mm (szerokość) × 1860 (wysokość) × 950 mm (głębokość)
Masa urządzenia	Do 380 kg



Rys. 79. Widok ogólny współrzędnościowej maszyny pomiarowej typu stołowego Video-Check® -IP 250 firmy Werth  
 Fig. 79. General view of bench-type multisensor coordinate measuring machine Video-Check® -IP 250 produced by Werth

Korzystając z systemu pomiarowego Video-Check® -IP 250 firmy Werth dokonano pomiarów dla wszystkie cztery kompletów próbek, a uzyskane wyniki zestawiono w tablicy 24 (113). Dodatkowo na rysunkach od 121 (195) do 124 (198) w załączniku przedstawiono mikroskopowe obrazy powierzchni wszystkich badanych próbek zarejestrowane przy powiększeniu 100×.

### Pomiary parametrów struktury geometrycznej próbek

Pomiary parametrów SGP prowadzone były za pomocą dwóch urządzeń pomiarowych – profilometru stykowego Hommel Tester T8000 (w wersji R60-400) firmy Hommelwerke<sup>87</sup> oraz mikroskopu interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd<sup>88</sup>.

Profilometr stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke [HOM2006] był nowoczesnym urządzeniem pomiarowym służącym do oceny parametrów struktury geometrycznej powierzchni w warunkach laboratoryjnych. Pozwalał na wykonywanie pomiarów zarówno w ujęciu dwuwymiarowym (rejestracja profilu chropowatości powierzchni) jak i przestrzennym (rejestracja topografii powierzchni). Zasada działania urządzenia polegała na odwzorowaniu profilu badanej powierzchni za pomocą ostrza przesuwającego

<sup>87</sup> Hommel-Etamic GmbH, Alte Tuttlinger Straße 20, D-78056 VS-Schwenningen, Germany. <http://www.hommel-etamic.de>

<sup>88</sup> Taylor Hobson Ltd., P.O. Box 36, 2 New Star Road, Leicester LE4 9JQ, UK. <http://www.taylor-hobson.com>



Tab. 22. Wyniki pomiarów wymiarów zewnętrznych próbek wykorzystywanych w badaniach doświadczalnych przeprowadzonych za pomocą narzędzi pomiarowych  
 Tab. 22. The results of measurements of external dimensions of samples used in experimental investigations by measuring instruments

Material		Numer próbki / Średnica zewnętrzna [mm]										
Aluminium EN AW-6082	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,5	21,43	22,45	23,45	24,45	25,25	26,45	27,43	28,45	29,35	30,15	
Mosiądz EN CW612N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,51	21,48	22,48	23,41	24,37	25,56	26,41	27,29	28,23	29,19	29,78	
Żeliwo EN GJL150	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,55	21,65	22,51	23,77	24,57	25,42	26,31	27,41	28,42	29,34	29,98	
Stal EN C45	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,68	21,57	22,53	23,47	24,57	25,53	26,34	27,64	28,37	29,27	29,37	

Tab. 24. Wyniki pomiarów wymiarów zewnętrznych próbek wykorzystywanych w badaniach doświadczalnych przeprowadzonych za pomocą urządzenia Video-Check® -IP 250 firmy Werth  
 Tab. 24. The results of measurements of external dimensions of samples used in experimental investigations by Video-Check® -IP 250 produced by Werth

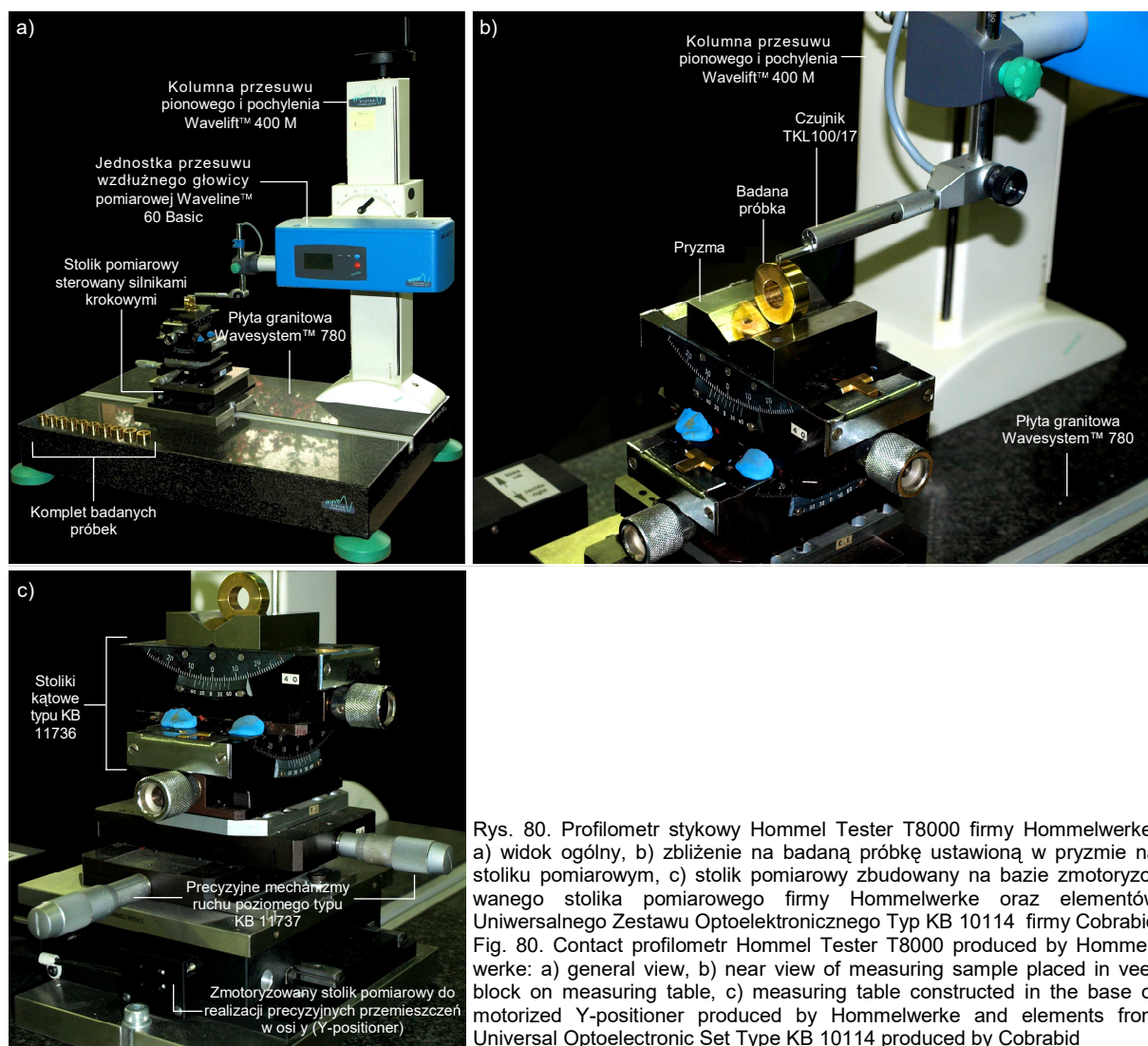
Material		Numer próbki / Średnica zewnętrzna [mm]										
Aluminium EN AW-6082	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,49	21,41	22,42	23,46	24,5	25,25	26,45	27,41	28,37	29,36	30,12	
Mosiądz EN CW612N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,5	21,44	22,44	23,39	24,36	25,55	26,37	27,27	28,21	29,16	29,76	
Żeliwo EN GJL150	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,53	21,63	22,49	23,54	24,56	25,4	26,2	27,39	28,38	29,33	29,96	
Stal EN C45	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
	20,65	21,54	22,49	23,43	24,5	25,5	26,14	27,61	28,34	29,28	29,84	

się wzdłuż powierzchni [WIE2003]. Zmiany jego położenia w kierunku prostopadłym do kierunku przesuwu zależały od kształtu i wymiarów nierówności powierzchni. Sygnał pomiarowy z czujnika indukcyjnego przekazywany był do karty analogowo-cyfrowej zainstalowanej w komputerze [PAW 2005]. Karta po odpowiednim wzmocnieniu i filtrowaniu, przetwarzała analogowy sygnał elektryczny na dane cyfrowe, które zapisywane były w pamięci komputera.

Urządzenie wyposażone było w jednostkę przesuwu głowicy pomiarowej Waveline™ 60 Basic o zakresie pomiarowym w osi x wynoszącym 60 mm. Głowica zamontowana była na kolumnie Wavelift™ 400 M, służącej do jej przesuwu w osi z (w zakresie 400 mm) oraz do pochylania głowicy w zakresie  $\pm 45^\circ$ . Kolumna zamocowana była na płycie granitowej Wavesystem™ 780. W płycie znajdował się rowek do mocowania zmotoryzowanego stolika pomiarowego (Y-positioner) wyposażonego w silnik krokowy, przeznaczonego do realizacji precyzyjnych przemieszczeń w osi y.

Podczas badań korzystano z oprogramowania Turbo Roughness for Windows w wersji 3.1 oraz HommelMap Basic w wersji 3.1.0 wykorzystującego Mountain Technology™ firmy DigitalSurf<sup>89</sup>. Pierwszy z programów służył do sterowania elementami urządzenia (głowica pomiarowa) oraz dokonywania pomiarów. Drugi natomiast pozwalał na analizę i wizualizację uzyskanych danych pomiarowych. Program umożliwiał wyznaczenie ok. stu parametrów profilu i ok. trzydziestu parametrów przestrzennych.

Na rysunku 80 (114) pokazano widok ogólny profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke znajdującego się w Laboratorium Metrologii i Systemów Pomiarowych Zakładu Metrologii i Jakości Politechniki Koszalińskiej.



Rys. 80. Profilometr stykowy Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke: a) widok ogólny, b) zbliżenie na badaną próbkę ustawioną w pryzmie na stoliku pomiarowym, c) stolik pomiarowy zbudowany na bazie zmotoryzowanego stolika pomiarowego firmy Hommelwerke oraz elementów Uniwersalnego Zestawu Optoelektronicznego Typ KB 10114 firmy Cobrabid Fig. 80. Contact profilometer Hommel Tester T8000 produced by Hommelwerke: a) general view, b) near view of measuring sample placed in vee-block on measuring table, c) measuring table constructed in the base of motorized Y-positioner produced by Hommelwerke and elements from Universal Optoelectronic Set Type KB 10114 produced by Cobrabid

<sup>89</sup> Digital Surf, 16 rue Lavoisier, 25000 Besançon, France. <http://www.digitalsurf.fr>

Dodatkowo na rysunku 81c (□114), pokazano zbliżenie na wykorzystywany do badania próbek stolik pomiarowy. Był on zbudowany na bazie zmotoryzowanego stolika pomiarowego (Y-positioner) firmy Hommelwerke oraz elementów Uniwersalnego Zestawu Optoelektronicznego typu KB 10114 firmy Cobrabid – stolika kąтового typu KB 11736<sup>90</sup> (2 szt.) i precyzyjnego mechanizmu ruchu poziomego typu KB 11737<sup>91</sup> (2 szt.). Charakterystykę profilometru stykowego Hommel Tester T8000 przedstawiono w tablicy 25 (□115).

Tab. 25. Charakterystyka profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke  
Tab. 25. The characteristics of contact profilometer Hommel Tester T8000 produced by Hommelwerke

Parametry pomiaru	
Technika pomiaru	Profilometria stykowa, ostrze odwzorowujące o promieniu zaokrąglenia wierzchołka 2 lub 5 $\mu\text{m}$
Zakres pomiarowy	6 $\times$ odcinek elementarny lub dowolna wartość w zakresie do 60 mm
Odcinki elementarne	0,08 – 0,25 – 0,8 – 2,5 – 8 mm
Zakres pomiarowy / Rozdzielczość	$\pm 8 \mu\text{m} / 1 \text{ nm}$ $\pm 80 \mu\text{m} / 10 \text{ nm}$ $\pm 800 \mu\text{m} / 100 \text{ nm}$
Czas pomiaru	Profil: kilka-kilkanaście sekund Topografia: zależny od ilości profili
Parametry systemu pomiarowego	
Czujnik pomiarowy (indukcyjny)	TKU 100/17
Jednostka przesuwu głowicy pomiarowej	Waveline™ 60 Basic Zakres pomiarowy: 60 mm Rozdzielczość: 0,014 $\mu\text{m}$
Prędkość przemieszczania głowicy	0,05 – 0,15 – 0,5 mm/s
Kolumna pomiarowa	Wavelift™ 400 M Zakres przesuwu głowicy: 400 mm Pochylenie głowicy pomiarowej w zakresie: $\pm 45^\circ$
Zmotoryzowany stolik pomiarowy do realizacji precyzyjnych przemieszczeń w osi Y	Y-positioner Wielkość mierzonych elementów: do 160 $\times$ 160 mm Masa mierzonych elementów: do 30 kg Dokładność: ok. 5 $\mu\text{m}$ Zakres ruchu stolika: do 50 mm Krok stolika: 0,5 $\mu\text{m}$
Warunki pracy	
Temperatura / wilgotność	10 – 40 $^\circ\text{C}$ / 85% nie skondensowana
Wymiary	780 mm (szerokość) $\times$ 500 mm (głębokość)

Przygotowania przed pomiarami obejmowały ustawienie próbki na stoliku pomiarowym, odpowiednie jej wypoziomowanie oraz przeprowadzenie pomiaru referencyjnego w celu ustalenia ustawień początkowych pomiaru. Po stwierdzeniu prawidłowego przebiegu referencyjnego dokonano właściwych ustawień pomiarowych korzystając z oprogramowania Turbo Roughness for Windows:

- Długość odcinka pomiarowego (oś x): 4,8 mm
- Liczba rejestrowanych profili chropowatości powierzchni: 1
- Liczba zarejestrowanych punktów pomiarowych: 1997
- Odległość między punktami profilu (oś x): 2,4  $\mu\text{m}$
- Czas przeprowadzenia pomiaru: ok. 10 s

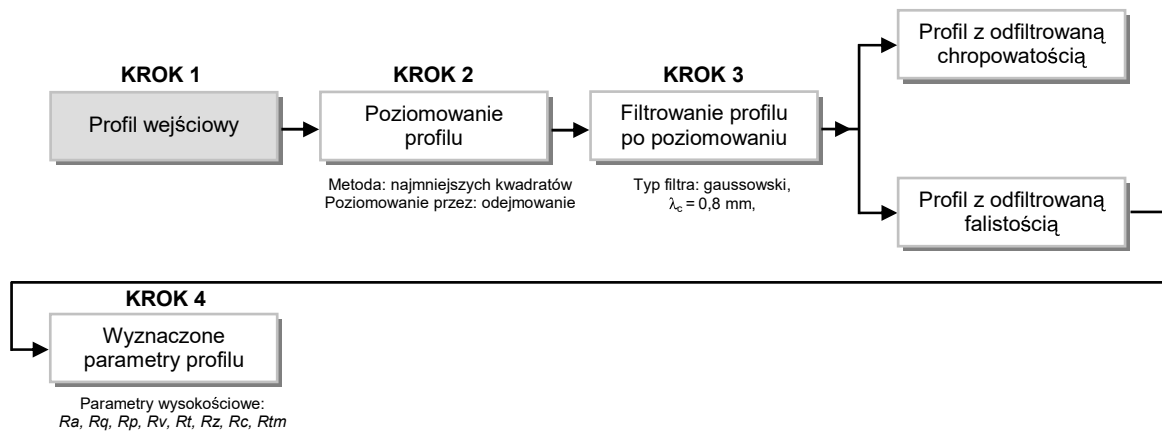
Pomiary wykonywano w trzech losowo wybranych miejscach na obwodzie każdej z próbek, wykorzystując czujnik indukcyjny TKU 100/17 z ostrzem odwzorowującym o kącie wierzchołkowym stożka wynoszącym  $90^\circ$  i promieniu zaokrąglenia wierzchołka stożka wynoszącym 5  $\mu\text{m}$ .

W wyniku pomiarów prowadzonych za pomocą profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke, otrzymano dla czterech kompletów próbek sto trzydzieści dwa profile chropowatości powierzchni. Uzyskane dane zapisane na dysku twardym komputera analizowano za pomocą oprogramowania HommelMap Basic. Program umożliwił m.in. uzyskanie profilu badanej powierzchni, wydzielenie (przez filtrowanie filtrem gaussowskim<sup>92</sup> o granicznej długości fali  $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$ ) profilu chropowatości i falistości oraz wyznaczenie parametrów wysokościowych profilu. Kolejne kroki przetwarzania danych pomiarowych pokazano na rysunku 81 (□116). Wybrane rezultaty pomiarów przeprowadzonych dla próbki nr 4 wykonanej z aluminium EN AW-6082 przedstawiono natomiast na rysunku 82 (□116).

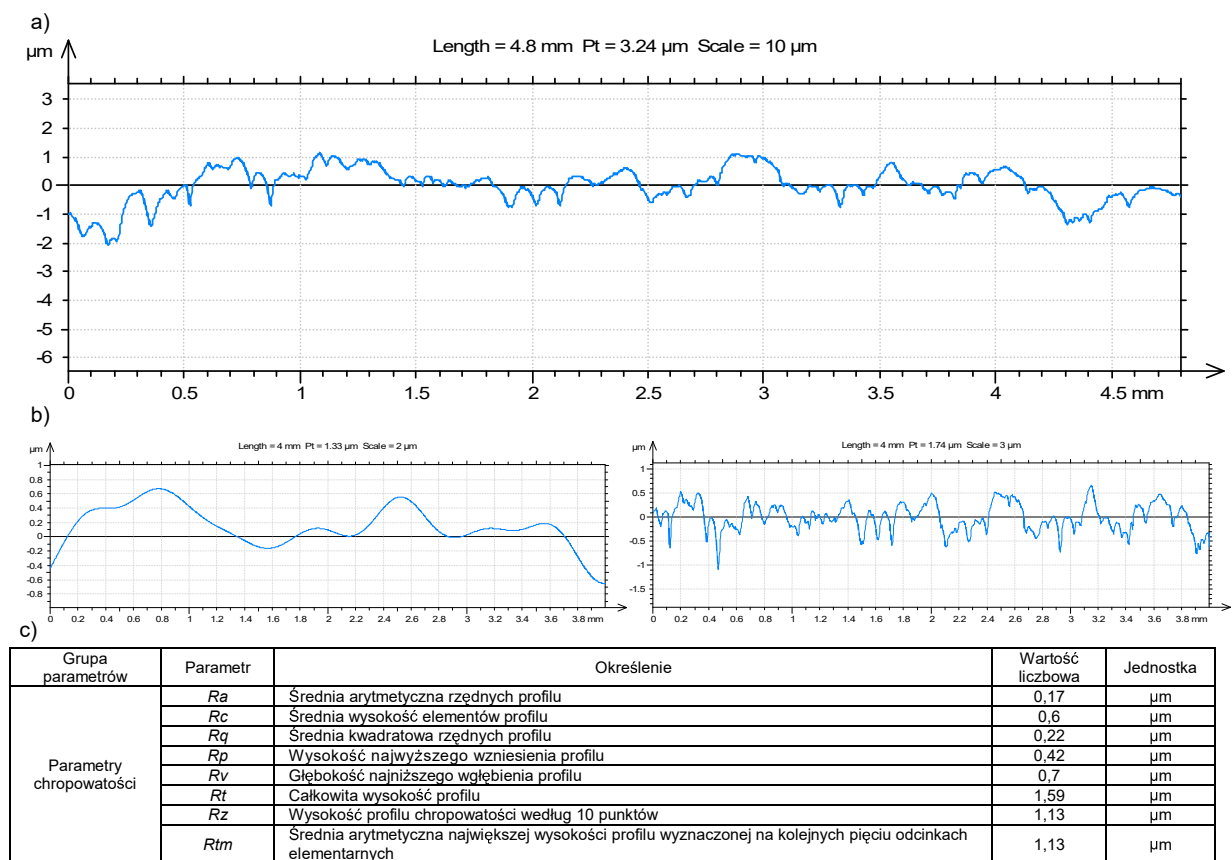
<sup>90</sup> Element służy do pochylania zamocowanych na nim próbek wokół osi poziomej. Zakres pochyleń wynosi  $\pm 25^\circ$ , natomiast dokładność ustawień wynosi  $\pm 15'$ .

<sup>91</sup> Element służy do realizacji precyzyjnych, prostoliniowych przemieszczeń wzdłuż lub w poprzek ławy optycznej. Mechanizm umożliwia realizację przemieszczeń w zakresie 25 mm z dokładnością ustawienia i odczytu wynoszącą 0,01 mm.

<sup>92</sup> Zgodnie z [N98/11562]



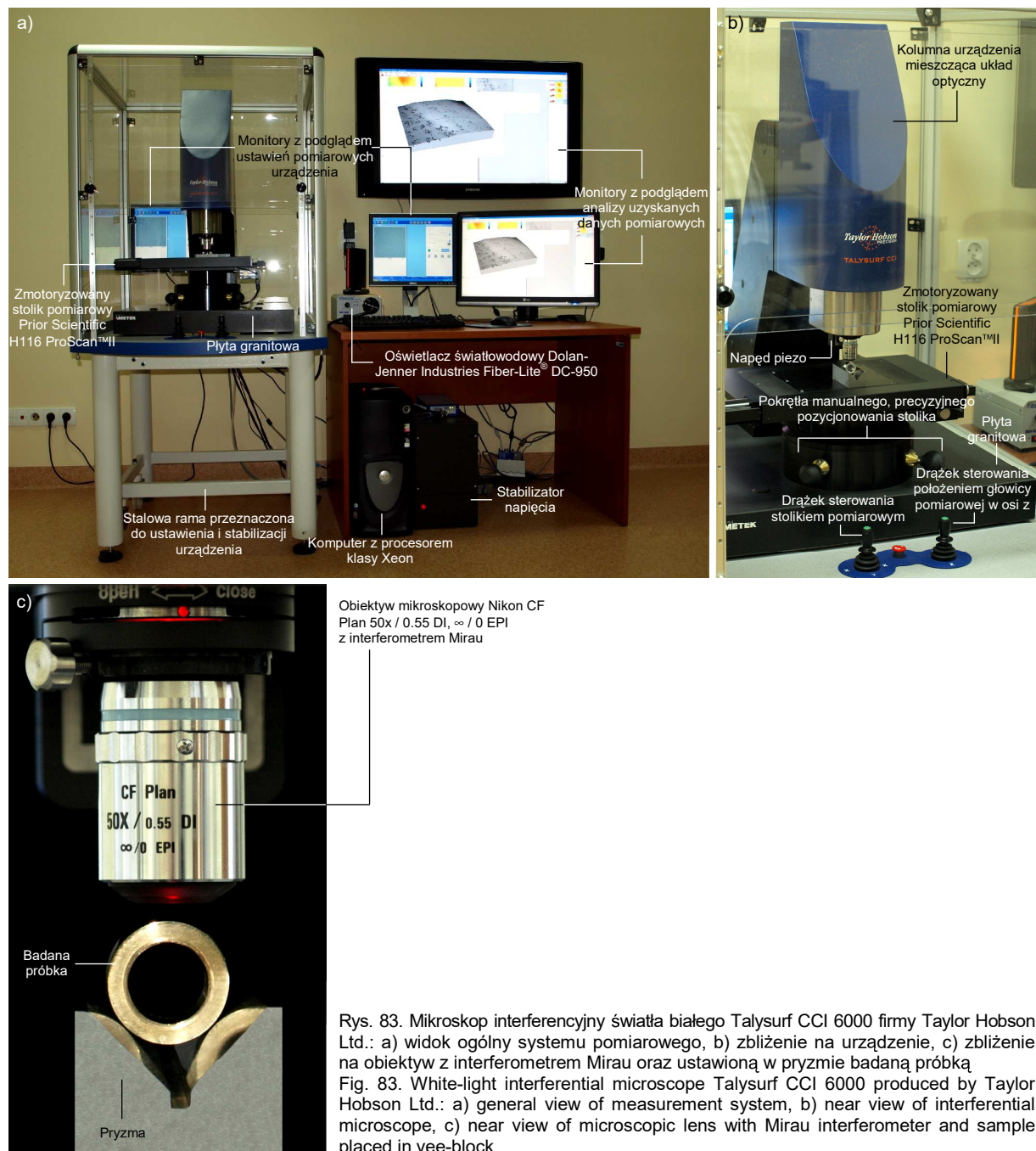
Rys. 81. Kolejne kroki przetwarzania danych pomiarowych w oprogramowaniu HommelMap Basic  
 Fig. 81. The following steps of processing of measuring data by HommelMap Basic software



Rys. 82. Przykładowe wyniki pomiarów chropowatości powierzchni dla próbki nr 4 wykonanej z aluminium EN AW-6082 prowadzonych za pomocą profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke oraz analizowanych z wykorzystaniem oprogramowania HommelMap Basic: a) profil chropowatości powierzchni po poziomowaniu, b) profil z odfiltrowaną chropowatością (z lewej) i falistością (z prawej), c) wyznaczone parametry profilu chropowatości powierzchni

Fig. 82. Example results of measurements of surface roughness for sample No. 4 made from aluminium EN AW-6082 obtained by contact profilometer Hommel Tester T8000 produced by Hommelwerke and analyzed by HommelMap Basic software: a) leveled profile of surface roughness, b) profile with filtered roughness (left) and waviness (right), c) calculated parameters of surface roughness profile

Mikroskop interferencyjny światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd., jest obecnie jednym z najbardziej zaawansowanych bezstykowych urządzeń optycznych posiadających możliwość przestrzennej oceny topografii powierzchni [KAP2009-3]. Widok ogólny urządzenia użytkowanego w Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii Katedry Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej pokazano na rysunku 83 (□117).



Rys. 83. Mikroskop interferencyjny światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd.: a) widok ogólny systemu pomiarowego, b) zbliżenie na urządzenie, c) zbliżenie na obiektyw z interferometrem Mirau oraz ustawioną w pryzmie badaną próbką  
 Fig. 83. White-light interferential microscope Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson Ltd.: a) general view of measurement system, b) near view of interferential microscope, c) near view of microscopic lens with Mirau interferometer and sample placed in vee-block

Zasada działania urządzenia oparta była na wykorzystaniu jednej z odmian interferometrii światła białego (ang. *WLI – White Light Interferometry*) [HAR2007] tzw. szerokopasmowej interferometrii skaningowej (ang. *SBI – Scanning Broadband Interferometry*) [TAY2005]. Światło białe generowane przez zewnętrzne źródło (lampa kwarcowa o mocy 150 W) doprowadzane było do urządzenia światłowodem (oświetlacz światłowodowy Fiber-Lite® DC-950 firmy Dolan-Jenner Industries<sup>93</sup>). Wewnątrz głowicy pomiarowej strumień światła padał na dzielnik wiązki, gdzie był rozdzielany na dwie równoległe wiązki. Jedna z nich podążała w kierunku niewielkiej powierzchni odniesienia znajdującej się wewnątrz obiektywu, druga natomiast w kierunku powierzchni próbki. Wiązki rekombinowały, dając

<sup>93</sup> Dolan-Jenner Industries, 159 Swanson Road, Boxborough, MA 01719, USA. <http://www.dolan-jenner.com>

w rezultacie miejscowy obraz interferencyjny. W celu rejestracji wiązki światła odbitego od powierzchni próbki i akwizycji danych stosowana była kamera z matrycowym detektorem typu CCD. Ponieważ światło białe zawiera wszystkie barwy składowe (jest światłem w szerokim paśmie spektralnym), to interferencja była obserwowana tylko wtedy, kiedy dwie drogi optyczne były jednakowej długości. Poprzez przesunięcie soczewki obiektywu pionowo (wzdłuż osi układu optycznego), ustalane było położenie, w którym występowało maksimum stopnia koherencji czasowej [ZIE2004], [PAT2005]. Metodę pomiarową oparto na opatentowanym algorytmie<sup>94</sup>, który producent określa jako tzw. interferometrię korelacji koherencji (ang. *CCI – Coherence Correlation Interferometry*) [BLU2006]. Rejestrowany obraz prążków interferencyjnych przetwarzany był przez komputer z procesorem klasy Xeon. Na podstawie przetworzonych danych tworzona była precyzyjna mapa przestrzenna topografii powierzchni o wysokiej rozdzielczości. Urządzenie pozwalało na uzyskanie rozdzielczości pionowej do 10 pm, przy zakresie pomiarowym (w osi z) do 10 mm. Niezależnie od zastosowanego powiększenia mapa topografii zawierała ponad jeden milion punktów pomiarowych (1024 × 1024 punkty). Wybrane parametry techniczne systemu pomiarowego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd. zestawiono w tablicy 26 (□118).

Tab. 26. Charakterystyka mikroskopu Interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd.

Tab. 26. The characteristics of white-light interferential microscope Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson Ltd.

Parametry pomiaru	
Technika pomiaru	Zaawansowana technologia interferometrii korelacji koherencji
Pionowy zakres pomiarowy (z)	100 μm (standard), 400 μm / 10 mm (opcja)
Rozdzielczość pionowa (dla zakresów większych niż 100 μm)	0,01 nm
Zakłócenia podłoża	0,05 nm
Powtarzalność przesuwu (kroku dyskretnego)	0,1 nm (25 nm krok) / 0,03% (50 μm krok)
Powtarzalność powierzchni (śr. odchylenie standardowe z)	0,003 nm
Obszar pomiarowy (x, y)	360 μm <sup>2</sup> – 7,0 mm <sup>2</sup>
Liczba punktów pomiarowych	1 048 576 (1024 × 1024 piksele)
Rozdzielczość optyczna	0,4 μm – 0,6 μm (zależnie od rodzaju powierzchni)
Liniowość (z)	0,03% wartości zmierzonej
Refleksyjność powierzchni	0,3% – 100%
Czas pomiaru	5 – 20 sekund
Parametry systemu pomiarowego	
Rozmiary elementów (max)	x i y = 300 mm, z = 100 mm
Masa dopuszczalna (max)	10 kg
Stolik ręczny x–y	25 × 25 mm
Stolik mechaniczny x–y (mały)	75 × 100 mm
Stolik automatyczny x–y (średni)	150 × 150 mm
Stolik automatyczny x–y (duży)	250 × 200 mm
Ręczny przesuw w osi z	100 mm
Automatyczny przesuw w osi z	100 mm (z autofokusem)
Warunki pracy	
Temperatura / wilgotność	15 – 30 °C / 80% nie skondensowana
Wibracje	Pneumatyczny system antywibracyjny
Wymiary	750 mm (szerokość) × 500 mm (głębokość)

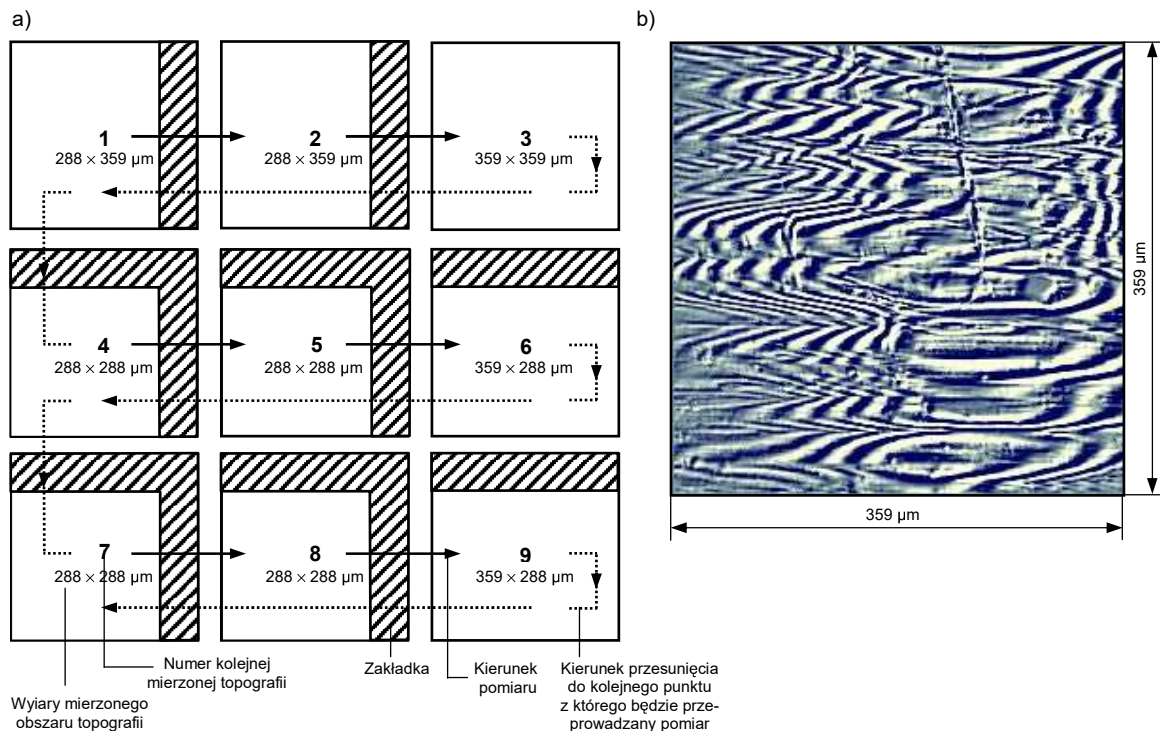
Wraz z urządzeniem producent dostarczył dedykowane oprogramowanie komputerowe. Były to dwie aplikacje: Talysurf CCI w wersji 2.0.7.3 (sterowanie elementami systemu, wykonywanie pomiarów) oraz TalyMap Platinum w wersji 4.0.5.3985 (wizualizacja i zaawansowana analiza danych). Ostatnia z wymienionych aplikacji pozwalała na kompleksową analizę badanej powierzchni na podstawie dostępnych ok. stu dwudziestu parametrów profilu i ok. czterdziestu parametrów przestrzennych.

Przed przystąpieniem do pomiarów przygotowano urządzenie instalując w głowicy pomiarowej obiektyw mikroskopowy z interferometrem Mirau o oznaczeniu 50× CF Plan IC EPI ELWD firmy Nikon<sup>95</sup>. Był to wysokiej klasy obiektyw typu IC (ang. *Infinity Corrected*) z optyką korygowaną do nieskończoności o powiększeniu 50×, zakresie pomiarowym 3,4 mm, rozdzielczości optycznej 0,36 μm, maksymalnym pochyleniu 14,6° oraz polu widzenia 0,36 × 0,36 mm. Na rysunku 83c (□117) pokazano zbliżenie na obiektyw z interferometrem Mirau oraz na ustawioną w pryzmie badaną próbkę. Pomiar przeprowadzano wybierając ten fragment powierzchni próbki, który znajdował się w środku pola widzenia obiektywu. Po dokonaniu kilku pomiarów zauważono, iż dla obiektywu o powiększeniu 50× obszar mierzony wynosi 359 × 359 μm. Stwierdzono, iż taki obszar powierzchni może być niewystarczający dla późniejszych

<sup>94</sup> A. Bankhead: UK Patent Application 0206023.4 oraz A. Bankhead, I. McDonnell: Surface Profiling Apparatus, US Patent No. 7,385,707 B2, 10, 2008.

<sup>95</sup> Nikon Corporation, Fuji Bldg., 2-3 Marunouchi 3-chrome, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8331, Japan. <http://www.nikon.com>

analiz. Postanowiono skorzystać z możliwości, które daje zaimplementowana w oprogramowaniu TalyMap Platinum funkcja łączenia inaczej tzw. zszywania obrazów (ang. *Image Stitching*). Funkcja ta realizowana była przez napisany w języku Visual Basic™ skrypt o nazwie *Advances DataStiching* w wersji 1.2.1. Skrypt pozwalał na tworzenie obrazów topografii dużych obszarów powierzchni przez łączenie i odpowiednie dopasowywanie fragmentów powierzchni o mniejszych wymiarach. W omawianym przypadku przyjęto, iż powierzchnia wynikowa będzie mozaiką złożoną z topografii powierzchni rejestrowanych jako macierz 3 × 3. Na rysunku 84 (□119) pokazano sposób przeprowadzania pomiarów topografii powierzchni mierzonych próbek z wykorzystaniem funkcji zszywania obrazów.



Rys. 84. Sposób przeprowadzania pomiarów topografii powierzchni z wykorzystaniem funkcji zszywania obrazów realizowanej przez oprogramowanie TalyMap Platinum: a) kolejność pomiarów topografii poszczególnych obszarów powierzchni, b) interferogram badanej powierzchni przy powiększeniu 50×

Fig. 84. The method of measurement of surface topographies with image stitching function realized by TalyMap Platinum software: a) sequence of measurement of individual surface topographies, b) interferogram of measured surface with magnification 50×

Po dokonaniu pomiaru referencyjnego potwierdzającego poprawność działania funkcji zszywania obrazów przystąpiono do pomiarów właściwych. Korzystając z oprogramowania Talysurf CCI dokonano następujących ustawień pomiarowych dla pojedynczej topografii powierzchni:

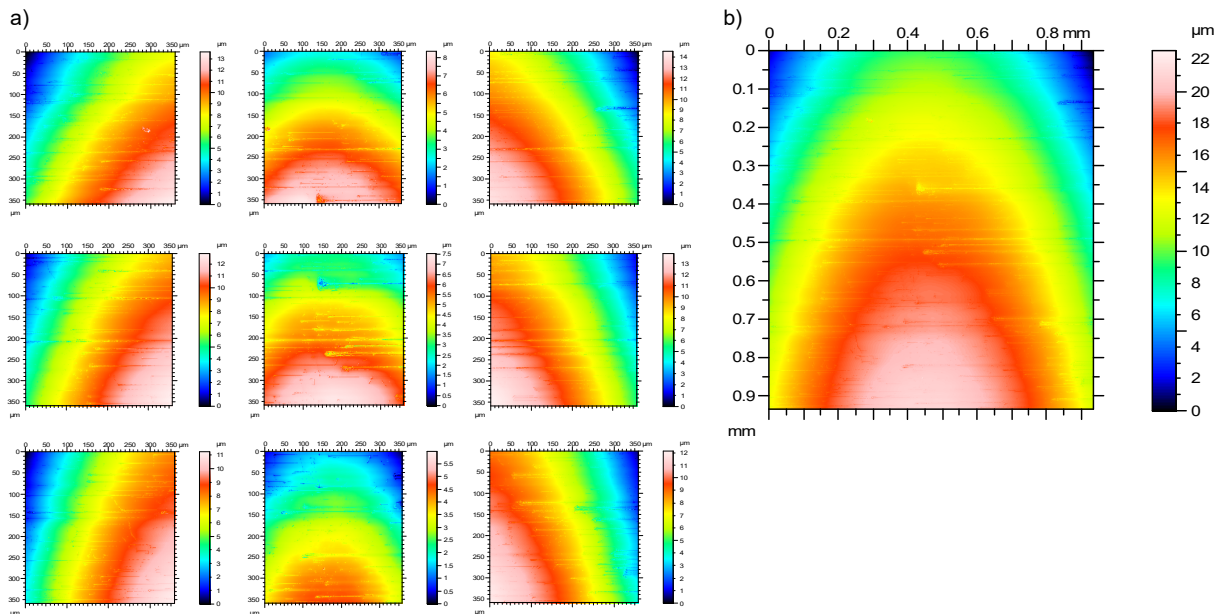
- wymiary badanej powierzchni (oś x, y, z):  $359 \times 359 \times 14,3 \mu\text{m}$ ,
- liczba punktów pojedynczego profilu (oś x): 256,
- odległość między punktami profilu (oś x):  $1,41 \mu\text{m}$ ,
- liczba rejestrowanych profili (oś y): 256,
- odległość między profilami (oś y):  $1,41 \mu\text{m}$ ,
- rozdzielczość pionowa (oś z): 0,01 nm,
- czas przeprowadzenia pomiaru: ok. 30 s.

Wynikowa topografia powierzchni, będąca mozaiką złożoną z topografii rejestrowanych jako macierz 3 × 3 była natomiast rejestrowana przy następujących ustawieniach pomiarowych:

- wymiary badanej powierzchni wynikowej (oś x, y, z):  $935 \times 935 \times 22,6 \mu\text{m}$ ,
- liczba punktów profilu wynikowego (oś x): 666,
- odległość między punktami profilu wynikowego (oś x):  $1,41 \mu\text{m}$ ,
- liczba rejestrowanych profili wynikowych (oś y): 666,

- odległość między profilami wynikowymi (oś y): 1,41  $\mu\text{m}$ ,
- rozdzielczość pionowa (oś z): 0,01 nm,
- liczba łączonych topografii powierzchni: 9 (macierz  $3 \times 3$ ),
- czas przeprowadzenia pomiaru: ok. 300 s.

Na rysunku 85 (□120) pokazano rezultat działania funkcji zszywania obrazów realizowanej przez oprogramowanie TalyMap Platinum. W tym przypadku przetwarzaniu poddano zarejestrowane topografie powierzchni próbki nr 7 wykonanej z żeliwa EN GJL150.

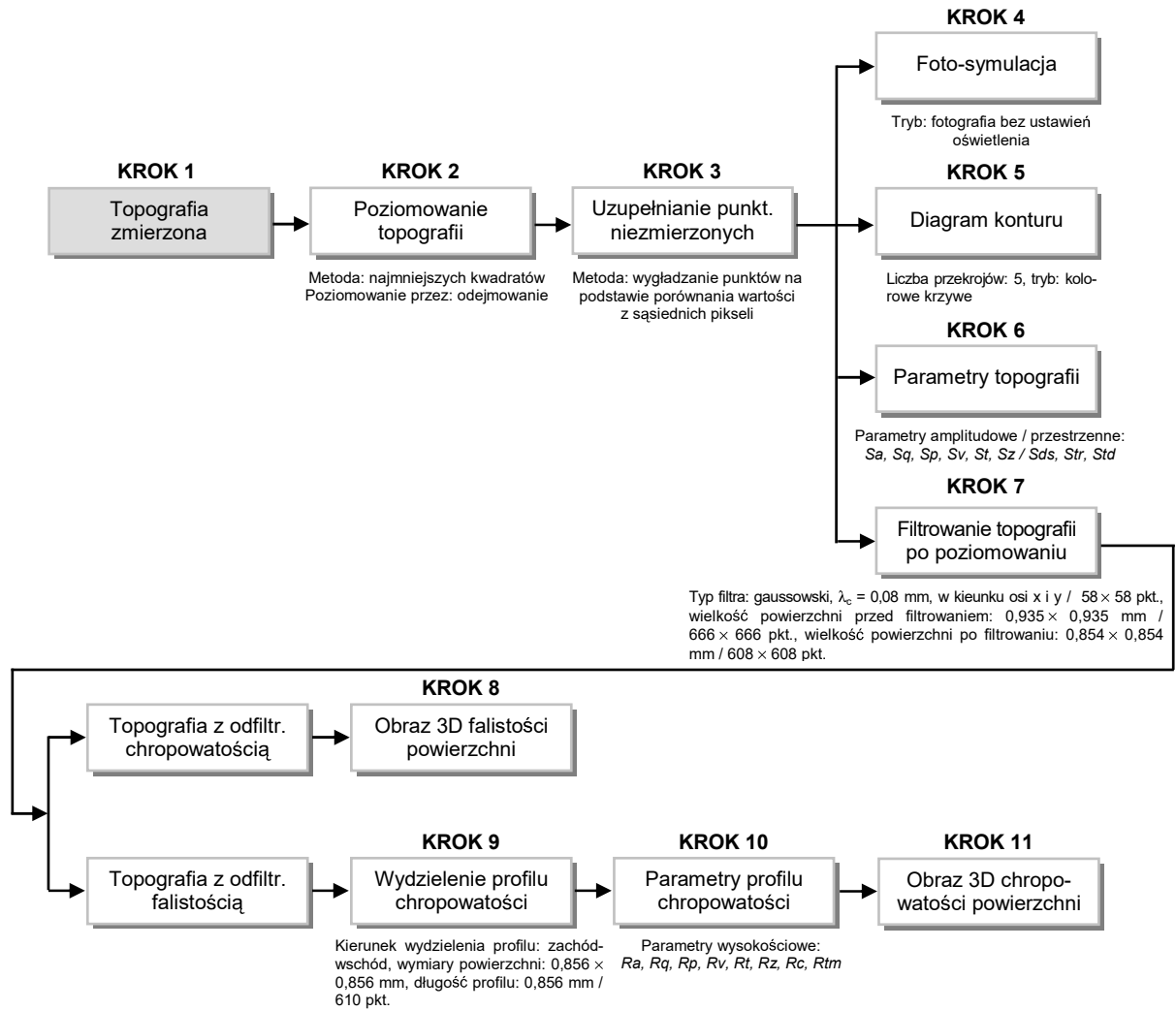


Rys. 85. Przykładowe wyniki pomiarów chropowatości powierzchni dla próbki nr 7 wykonanej z żeliwa EN GJL150 prowadzonych za pomocą mikroskopu interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd., przetwarzane z wykorzystaniem funkcji zszywania obrazów w oprogramowaniu TalyMap Platinum: a) pojedyncze topografie powierzchni, b) topografia wynikowa będąca mozaiką złożoną z topografii rejestrowanych jako macierz  $3 \times 3$  i przetwarzanych za pomocą zszywania obrazów

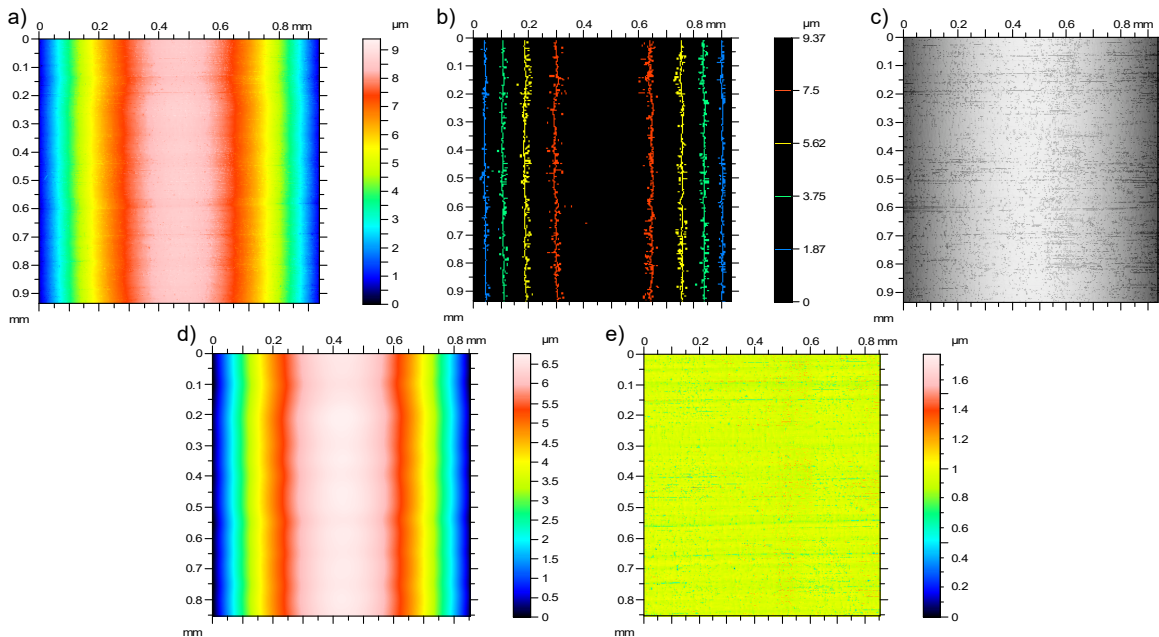
Fig. 85. Example results of measurements of surface roughness for sample No. 7 made from gray cast iron EN GJL 150 obtained by white-light interferential microscope Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson Ltd., processed by image stitching in TalyMap Platinum software: a) single surface topographies, b) output surface topography being a mosaic composed from a single surface topographies measured as a  $3 \times 3$  matrix and processed by image stitching

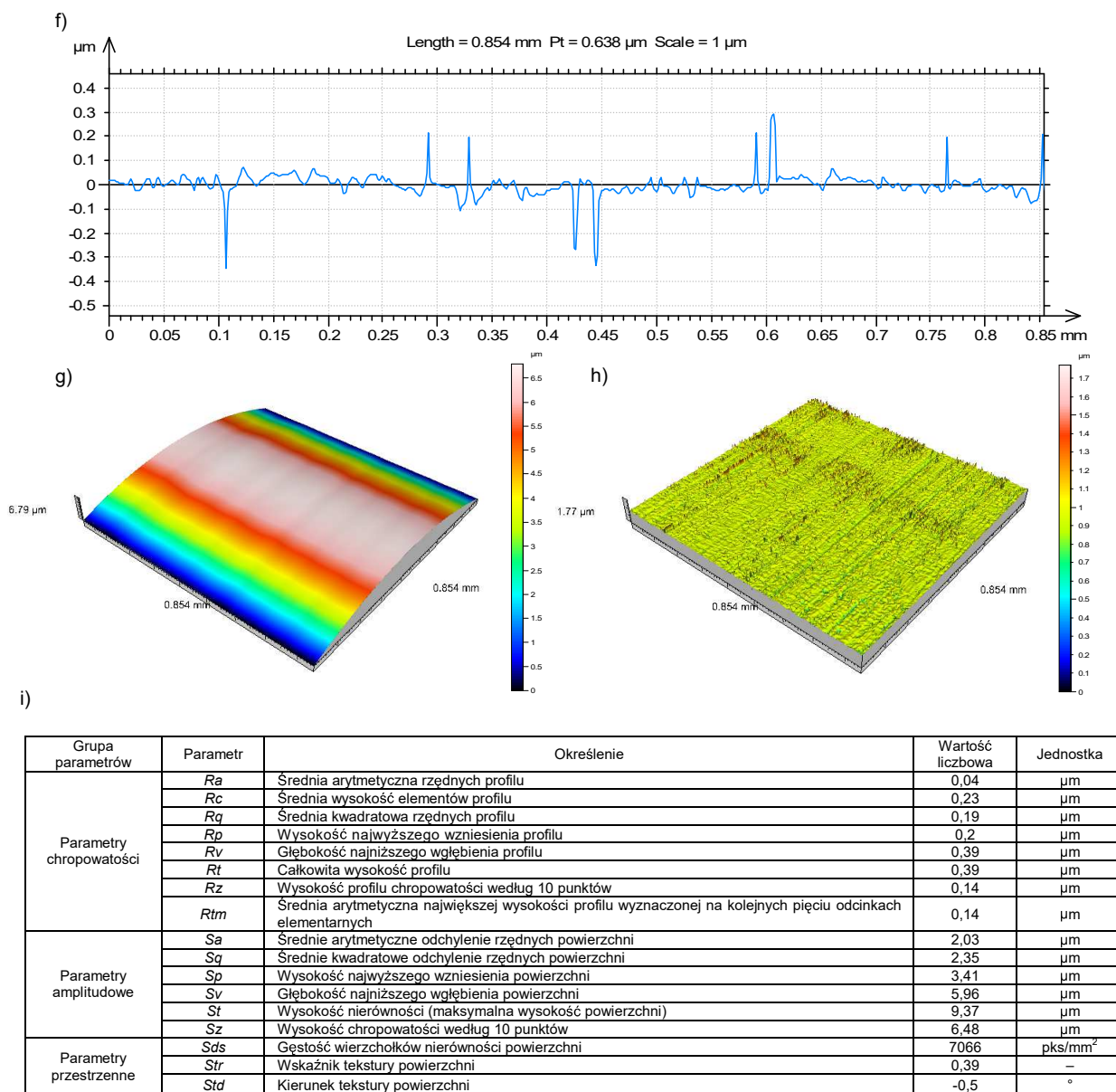
W wyniku pomiarów przeprowadzanych za pomocą mikroskopu interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd., uzyskano łącznie, dla wszystkich czterech kompletów próbek, trzysta dziewięćdziesiąt sześć pojedynczych topografii powierzchni oraz czterdzieści cztery topografie wynikowe otrzymane z wykorzystaniem funkcji zszywania obrazów. Uzyskane wyniki pomiarów zapisane na dysku twardym komputera analizowano następnie za pomocą oprogramowania TalyMap Platinum. Program umożliwiał wstępne przetworzenie wynikowej topografii powierzchni (poziomowanie oraz uzupełnienie punktów niezmiernych). Przetwarzanie obejmowało również m.in. wyznaczenie pseudo fotograficznego obrazu topografii powierzchni (foto-symulacja), diagramu konturu oraz wydzielenie (przez filtrowanie filtrem gaussowskim o granicznej długości fali  $\lambda_c = 0,08$  mm, w kierunku osi x i y) profilu chropowatości i falistości powierzchni. Analiza obejmowała natomiast wyznaczenie parametrów, amplitudowych (wysokościowych) i przestrzennych ocenianej topografii oraz ich odpowiednią interpretację. Kolejne kroki przetwarzania i analizy uzyskanych danych pomiarowych pokazano rysunku 86 (□121). Wybrane rezultaty pomiarów przeprowadzonych dla próbki nr 10 wykonanej z mosiądzu EN CW612N przedstawiono natomiast na rysunku 87 (□121).





Rys. 86. Kolejne kroki przetwarzania danych pomiarowych w oprogramowaniu TalyMap Platinum  
Fig. 86. The following steps of processing of measuring data by TalyMap Platinum software





Rys. 87. Przykładowe wyniki pomiarów chropowatości powierzchni dla próbki nr 10 wykonanej z mosiądzu EN CW612N prowadzonych za pomocą mikroskopu interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd., przetwarzane i analizowane w oprogramowaniu TalyMap Platinum: a) topografia powierzchni po poziomowaniu (obraz pseudokolorowy), b) diagram konturu (kolorowe krzywe), c) foto-symulacja, d) topografia z odfiltrowaną chropowatością, e) topografia z odfiltrowaną falistością, f) wydzielony profil chropowatości powierzchni, g) przestrzenny obraz falistości powierzchni, h) przestrzenny obraz chropowatości powierzchni, i) wyznaczone parametry chropowatości (profil) oraz parametry amplitudowe i przestrzenne (topografia)

Fig. 87. Example results of measurements of surface roughness for sample No. 10 made from brass EN CW612N obtained by white-light interferential microscope Talysurf CCI 6000 produced by Taylor Hobson Ltd., as well as processed and analysed in TalyMap Platinum software: a) leveled surface topography (pseudo-color image), b) contour diagram (color curves), c) photo simulation, d) topography with filtered roughness, e) topography with filtered waviness, f) extracted profile of surface roughness, g) 3D image of surface waviness, h) 3D image of surface roughness, i) calculated roughness parameters (profile) as well as amplitude and spatial parameters (topography),

W tablicach od 27 (□123) do 30 (□126) zestawiono wartości wybranych parametrów uzyskanych podczas pomiarów próbek prowadzonych za pomocą profilometru stykowego Hommel Tester T8000 firmy Hommelwerke oraz mikroskopu interferencyjnego światła białego Talysurf CCI 6000 firmy Taylor Hobson Ltd.

Tab. 27. Wyniki pomiarów chropowatości powierzchni dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082  
 Tab. 27. The results of measurements of surface roughness for samples made from aluminium EN AW-6082

Nr próbki / Parametr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Urządzenie pomiarowe
<i>Ra</i> [ $\mu\text{m}$ ]	0,53	0,32	0,24	0,22	0,05	0,09	0,08	0,08	0,04	0,04	0,15	Hommel Tester T8000
<i>Rq</i> [ $\mu\text{m}$ ]	0,66	0,42	0,3	0,28	0,08	0,12	0,11	0,11	0,05	0,05	0,19	
<i>Rp</i> [ $\mu\text{m}$ ]	1,18	0,7	0,49	0,53	0,15	0,19	0,19	0,21	0,1	0,11	0,32	
<i>Rv</i> [ $\mu\text{m}$ ]	1,69	1,11	0,92	0,8	0,24	0,4	0,38	0,4	0,26	0,22	0,61	
<i>Rt</i> [ $\mu\text{m}$ ]	3,73	2,28	1,8	1,76	0,52	0,71	0,73	0,8	0,52	0,49	1,38	
<i>Rz</i> [ $\mu\text{m}$ ]	2,88	1,82	1,45	1,34	0,39	0,6	0,58	0,62	0,36	0,33	0,94	
<i>Rc</i> [ $\mu\text{m}$ ]	1,57	1,09	0,84	0,7	0,16	0,32	0,3	0,31	0,14	0,12	0,55	
<i>Rtm</i> [ $\mu\text{m}$ ]	2,88	1,82	1,45	1,34	0,39	0,6	0,58	0,62	0,36	0,33	0,94	
<i>Sa</i> [ $\mu\text{m}$ ]	1,9	1,76	1,31	1,22	2,41	2,08	2,18	2,12	2,11	2,01	1,89	
<i>Sq</i> [ $\mu\text{m}$ ]	3,28	3,1	3,01	2,98	2,99	2,44	2,17	2,53	2,26	2,45	2,24	
<i>Sp</i> [ $\mu\text{m}$ ]	5,43	9,24	8,5	4,27	3,52	5,12	3,59	3,18	3,91	3,39	3,78	
<i>Sv</i> [ $\mu\text{m}$ ]	8,44	8,69	8,91	9,29	7,3	7,17	7,45	5,9	8,81	5,99	7,07	Talysur CCI 6000
<i>St</i> [ $\mu\text{m}$ ]	14,07	18,1	17,45	13,45	11,03	12,37	11,03	9,2	12,74	9,31	10,88	
<i>Sz</i> [ $\mu\text{m}$ ]	10,1	10,4	10,5	7,79	7,3	8,11	6,41	7,51	7,12	6,43	7,17	
<i>Sds</i> [pks/mm <sup>2</sup> ]	1076	2342	5830	2820	2604	4387	2826	4472	2940	1961	4990	
<i>Str</i> [°]	0,4	0,4	0,4	0,4	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,4	
<i>Std</i> [°]	-0,5	45,5	0,5	-0,5	-45	0,5	45	-0,5	-0,5	-0,5	45	

Tab. 28. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości powierzchni dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N  
 Tab. 28. The results of measurements of surface roughness for samples made from brass EN CW612N

Nr próbki / Parametr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Urządzenie pomiarowe
Ra [µm]	0,06	0,06	0,1	0,07	0,04	0,03	0,05	0,02	0,09	0,07	0,07	Hommel Tester T8000
Rq [µm]	0,08	0,08	0,14	0,1	0,06	0,05	0,07	0,04	0,12	0,09	0,1	
Rp [µm]	0,15	0,17	0,19	0,22	0,1	0,11	0,11	0,08	0,16	0,15	0,17	
Rv [µm]	0,37	0,36	0,57	0,49	0,32	0,21	0,32	0,19	0,48	0,4	0,43	
Rt [µm]	0,66	0,92	0,9	1,11	0,55	0,46	0,54	0,43	0,94	0,79	0,8	
Rz [µm]	0,53	0,53	0,77	0,72	0,42	0,33	0,44	0,28	0,64	0,56	0,61	
Rc [µm]	0,2	0,22	0,35	0,26	0,12	0,11	0,19	0,08	0,27	0,23	0,26	
Rtm [µm]	0,53	0,53	0,77	0,72	0,42	0,33	0,44	0,28	0,64	0,56	0,61	
Sa [µm]	2,91	2,76	2,62	2,52	2,4	2,27	2,21	2,15	2,1	2,03	1,97	
Sq [µm]	3,38	3,2	3,04	2,93	2,79	2,64	2,57	2,5	2,46	2,35	2,29	
Sp [µm]	5,63	9,44	8,5	4,17	3,67	5,22	3,67	3,26	3,9	3,41	3,85	
Sv [µm]	8,43	8,77	8,96	9,34	7,31	7,15	7,34	5,97	8,88	5,96	7,01	
St [µm]	14,1	18,2	17,5	13,5	11	12,4	11	9,22	12,8	9,37	10,9	
Sz [µm]	10	10,8	10,6	7,74	7,33	9,2	7,91	6,5	8,37	6,48	7,07	
Sds [pks/mm <sup>2</sup> ]	4076	4342	6850	1890	3804	6367	2326	4177	2541	7066	4793	
Str [-]	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	
Std [°]	-45,5	45,5	0,5	45	-45	0,5	-45	-0,5	-0,5	-0,5	45	

Talysur  
CCI 6000

Tab. 29. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości powierzchni dla próbek wykonanych z żeliwa EN G.JL 150  
 Tab. 29. The results of measurements of surface roughness for samples made from gray cast iron EN G.JL 150

Nr próbki / Parametr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Urządzenie pomiarowe
<i>Ra</i> [μm]	0,02	0,05	0,08	0,05	0,05	0,05	0,07	0,09	0,07	0,11	0,1	Hommel Tester T8000
<i>Rq</i> [μm]	0,03	0,08	0,33	0,08	0,07	0,07	0,1	0,13	0,11	0,17	0,15	
<i>Rp</i> [μm]	0,07	0,12	0,18	0,13	0,14	0,13	0,19	0,2	0,35	0,35	0,23	
<i>Rv</i> [μm]	0,13	0,37	0,63	0,45	0,38	0,4	0,45	0,61	0,4	0,7	0,55	
<i>Rt</i> [μm]	0,63	0,77	1,44	0,78	1,28	0,78	1,02	1,25	1,29	2,2	1,59	
<i>Rz</i> [μm]	0,2	0,5	0,81	0,59	0,46	0,54	0,65	0,82	0,75	1,05	0,79	
<i>Rc</i> [μm]	0,09	0,16	0,29	0,18	0,2	0,16	0,25	0,32	0,24	0,35	0,31	
<i>Rtm</i> [μm]	0,2	0,5	0,81	0,59	0,46	0,54	0,65	0,82	0,75	1,05	0,79	
<i>Sa</i> [μm]	2,87	2,7	2,63	2,52	2,4	2,3	2,28	2,06	2,09	2,02	1,98	
<i>Sq</i> [μm]	3,34	3,15	3,07	2,95	2,8	2,68	2,66	2,42	2,45	2,35	2,31	
<i>Sp</i> [μm]	4,05	4,54	5,61	4,76	4,17	4,65	4,95	3,91	6,45	4,45	4,58	
<i>Sv</i> [μm]	8,1	8,76	9,28	8,43	8,27	7,74	7,9	8	7,7	7,21	7,85	
<i>St</i> [μm]	12,2	13,3	14,9	13,2	12,4	12,4	12,8	11,9	14,2	11,7	12,4	Talysur CCI 6000
<i>Sz</i> [μm]	6,99	9,78	10,8	9,76	8,96	8,75	9,11	8,24	9,82	7,95	9,26	
<i>Sds</i> [pks/mm <sup>2</sup> ]	1246	1943	8533	1843	2673	2911	2355	4136	4019	3017	2803	
<i>Str</i> [-]	0,39	0,39	0,4	0,4	0,4	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	
<i>Std</i> [°]	45	-0,5	0,5	-45	-45	0,5	-0,5	-45	45	-45	0,5	

Tab. 30. Wyniki pomiarów parametrów chropowatości powierzchni dla próbek wykonanych ze stali EN C45  
 Tab. 30. The results of measurements of surface roughness for samples made from steel EN C45

Nr próbki / Parametr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Urządzenie pomiarowe	
$Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,05	0,07	Hommel Tester T8000	
$Rq$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,1	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,04	0,04	0,08	0,11		
$Rp$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,14	0,08	0,36	0,08	0,08	0,07	0,11	0,08	0,08	0,15	0,16		
$Rv$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,51	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,35	0,17	0,2	0,4	0,52		
$Rt$ [ $\mu\text{m}$ ]	1,17	0,32	0,33	0,35	0,34	0,37	1,04	0,37	0,41	0,99	1,62		
$Rz$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,65	0,27	0,27	0,27	0,27	0,24	0,46	0,26	0,28	0,56	0,69		
$Rc$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,18	0,09	0,11	0,09	0,08	0,09	0,13	0,09	0,1	0,16	0,26		
$Rtm$ [ $\mu\text{m}$ ]	0,65	0,27	0,27	0,27	0,27	0,24	0,46	0,26	0,28	0,56	0,69		
$Sa$ [ $\mu\text{m}$ ]	2,84	2,73	2,61	2,49	2,39	2,3	2,23	2,12	2,08	2,01	1,97		Talysur CCI 6000
$Sq$ [ $\mu\text{m}$ ]	3,3	3,17	3,04	2,9	2,78	2,68	2,61	2,47	2,43	2,34	2,3		
$Sp$ [ $\mu\text{m}$ ]	4,73	4,34	4,22	6,2	3,82	8,28	11,5	3,05	4,27	3,82	6,4		
$Sv$ [ $\mu\text{m}$ ]	8,24	7,95	7,59	7,69	7,55	6,81	7,14	6,51	6,41	6,49	7,65		
$St$ [ $\mu\text{m}$ ]	13	12,3	11,8	13,9	11,4	15,1	18,6	9,57	10,7	10,3	14		
$Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]	8,26	7,34	7,36	9,28	5,86	9,46	9,47	6,31	6,71	7,68	9,61		
$Sds$ [pks/mm <sup>2</sup> ]	1095	596	830	1670	1475	799	1186	963	1084	2096	2768		
$Str$ [-]	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,39	0,39		
$Std$ [°]	-45	-45	-45	-45	-45	45	45	45	-45	-45	-45		

### 5.2.4. Metodyka badań

Zaproponowano następującą metodykę badań właściwych, składającą się z pięciu kolejnych etapów:

- Etap 1: Przygotowanie zestawu próbek.
- Etap 2: Uruchomienie stanowiska pomiarowego.
- Etap 3: Ustawienie elementów stanowiska.
- Etap 4: Akwizycja obrazu statycznego i ruchomego.
- Etap 5: Przetwarzanie i analiza obrazu.

Do badań przeznaczono cztery zestawy próbek w formie pierścieni o różnej średnicach zewnętrznych (po jedenaście próbek w każdym zestawie) wykonanych z aluminium EN AW-6082, mosiądzu EN CW612N, żeliwa EN GJL150 i stali EN C45. Próbkki posiadały następujące wymiary – średnica zewnętrzna od  $20,5 \pm 0,2$  mm do  $30 \pm 0,2$  mm, średnica wewnętrzna  $\phi_w = 14$  mm, szerokość  $h = 10$  mm.

#### Etap 1: Przygotowanie zestawu próbek

Etap pierwszy wiązał się z przygotowaniem zestawu próbek<sup>96</sup>. Na początku należało określić, który z czterech zestawów miał być wykorzystany w badaniach jako pierwszy. Następnie ustalano kolejność ułożenia próbek<sup>97</sup> i nakładano je na trzpień stalowy o średnicy  $\phi = 14$  mm i długości  $l = 140$  mm. Na ostatnią z próbek nakładano podkładkę i dociskano cały zestaw śrubą zaciskową. Tak przygotowany zestaw próbek mocowano w kłach wrzeczona zespołu napędowego ZN2 oraz konika (moduł przesuwu wzdłużnego i obrotu badanego przedmiotu). Ostatnią czynnością było usunięcie z powierzchni próbek kurzu, pyłu lub wilgoci szmatką nasączoną w alkoholu.

#### Etap 2: Uruchomienie stanowiska pomiarowego

Etap drugi polegał na przygotowaniu stanowiska badawczego. Po włączeniu listwy zasilającej Acar F5 firmy HSK Data uruchamiano jednostkę komputerową (Intel® Pentium® 4 533 MHz, 512 MB DDRAM, 80 GB HDD) z monitorem LCD AL171 firmy Acer (17", 1280 × 1024 pikseli, 450:1, 300 cd/m<sup>2</sup>). Po załadowaniu systemu operacyjnego uruchamiano oprogramowanie do sterowania i akwizycji obrazu z kamer TV – DVR System firmy SWIT (Shenzhen Wave-particle Intelligent Technology). Następnie włączano drugą listwę, która zasilala kamery TV. Po zdjęciu osłonek z obiektywów na ekranie monitora obserwowano obraz przesyłany z kamer. Ostatnią czynnością było włączenie zasilacza prądu stałego ( $U = 1 \div 16$  V,  $I = 0,5 \div 5$  A). Manualnie ustawiano na nim napięcie 4,5 V potrzebne do zainicjowania pracy wykorzystywanego w badaniach lasera półprzewodnikowego CPS180 firmy Thorlabs ( $\lambda = 635$  nm,  $P_o = 1$  mW, plamka  $\phi = 1$  mm).

#### Etap 3: Ustawienie elementów stanowiska

W trzecim etapie sprawdzano poprawność ustawienia poszczególnych elementów stanowiska. Na początku kontrolowano położenie plamki światła laserowego lub wzoru optycznego światła strukturalnego (w zależności od typu pomiaru) na powierzchni badanego przedmiotu oraz światła rozproszonego na matówce. Jeśli ww. wzory optyczne były przesunięte wprowadzano korekcję ustawienia odległości<sup>98</sup> pomiędzy elementami przesuwymi (Tab. 9 (100)) zamocowanymi na ławie optycznej typu ZHL firmy PZO. Dodatkowo dokonywano manualnej regulacji ustawień elementów optycznych (generator światła strukturalnego DOE-220-635 firmy Thorlabs, zwierciadło półprzezroczyste ZHL-UL firmy PZO, soczewka dwuwypukła). Następnie dostrajano obraz wyświetlany na monitorze poprzez manualną regulację wartości zbliżenia, przysłony i ostrości pierścieniami obiektywów zamocowanych do kamer TV. Jeśli obraz nie był wystarczającej jakości wprowadzano jego korektę (jasność, kontrast, nasycenie barw itp.) korzystając z oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Wave-particle Intelligent Technology). Ostatnią czynnością na tym etapie było wybranie odpowiednich ustawień dotyczących akwizycji obrazu podczas pomiaru. Określano tutaj rozdzielczość i jakość obrazu, wybierano rodzaj kompresji oraz miejsce zapisania rejestrowanego obrazu. Stosowano następujące ustawienia:

<sup>96</sup> Zestaw próbek będzie w tym przypadku oznaczał trzpień z nałożonymi na niego w dowolnej kolejności próbkami w formie pierścieni o różnej średnicy zewnętrznej.

<sup>97</sup> Niezależnie od zestawu, każdy pierwszy pomiar odbywał się przy ustawieniu, w którym próbki ułożone były w kolejności wzrastającej od najmniejszej do największej średnicy. Przy kolejnych ustawieniach stosowano dowolną kombinację ustawień.

<sup>98</sup> Wszystkie odległości pomiędzy elementami przesuwymi wykorzystywanymi na stanowisku pomiarowym w konfiguracji stosowanej podczas badań właściwych zostały podane na rysunku 72a (102).

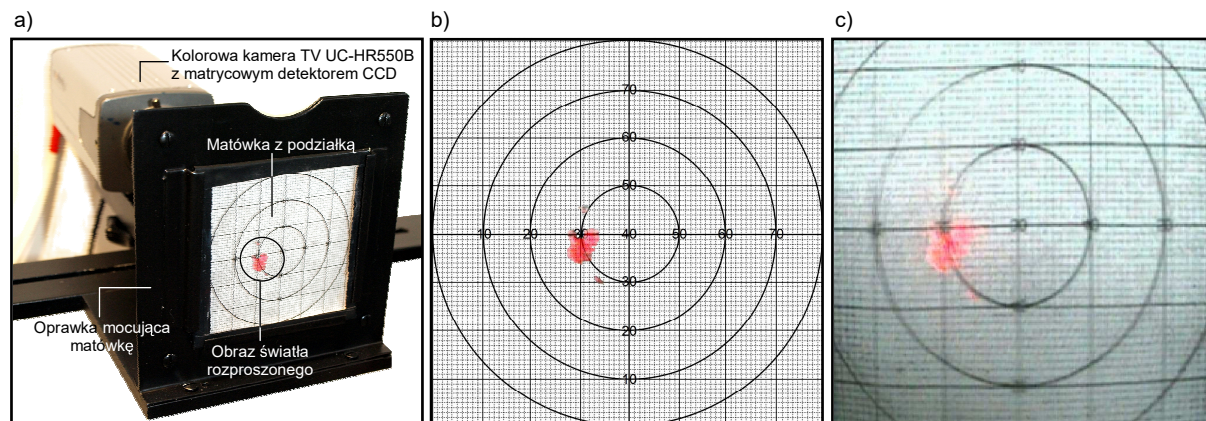
- obraz statyczny (rozdzielczość obrazu 640 × 480 pikseli, jakość obrazu: najwyższa, format zapisu: \*.bmp),
- obraz ruchomy (rozdzielczość obrazu 640 × 480 pikseli, jakość obrazu: najwyższa, kompresja: H.264, format zapisu: \*.dvr).

#### Etap 4: Akwizycja obrazu statycznego i ruchomego

Przedostatnim etapem była akwizycja obrazu statycznego i ruchomego. Przed przystąpieniem do rejestracji ustalano warunki pomiaru dla określanego zestawu próbek. Ustalenia dotyczyły wyboru:

- rodzaju pomiaru (SGP<sup>99</sup>, wymiar, kształt),
- trybu pomiaru (pojedynczy<sup>100</sup>, "od-do"<sup>101</sup>, pełny<sup>102</sup>),
- rodzaju ruchu powierzchni (postępowy, obrotowy, postępowo-obrotowy).

Po ustaleniu ww. warunków pomiaru uruchamiano urządzenie (moduł przesuwu i obrotu badanego przedmiotu). Dla pomiaru SGP lub kształtu rejestrowano na początku statyczny obraz referencyjny. W tym celu wybierano odpowiedni fragment powierzchni dowolnej próbki i oświetlano ją wiązką światła laserowego. Obraz światła rozproszonego rejestrowano kolorową kamerą TV UC-HR550B (rysunek 88 (□128)), natomiast obraz wzoru optycznego światła strukturalnego kolorową kamerą TV UC-HR550A. Po zarejestrowaniu statycznych obrazów referencyjnych, dokonywano akwizycji sekwencji video wg warunków, które dla poszczególnych próbek przedstawiono w tablicach od 31 (□129) do 34 (□130).



Rys. 88. Obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego tworzony na matówce z podziałką: a) widok układu akwizycji obrazu, b) widok od strony obserwatora, c) obraz rejestrowany przez kamerę TV (wydzielona pojedyncza klatka sekwencji video)  
Fig. 88. Image of angular distribution of the scattered light intensity created on the focusing screen with scale: a) view of acquisition setup, b) view from observer side, c) image acquired by TV camera (extracted a single frame from video sequence)

#### Etap 5: Przetwarzanie i analiza obrazu

Ostatnim, piątym etapem było przetwarzanie i analiza zarejestrowanego materiału. Pliki zapisane na dysku twardym komputera odpowiednio archiwizowano do późniejszego wykorzystania. Dla każdego z rodzajów pomiaru proces przetwarzania i analizy wyglądał nieco inaczej.

Przygotowanie obrazu światła rozproszonego (ocena SGP) rozpoczynało się od przekonwertowania pliku video zapisanego w formacie \*.dvr, na plik w formacie \*.avi za pomocą programu AVS Video Converter 6.2 firmy Online Media Technologies. Następnie plik video wstępnie przetwarzano w oprogramowaniu VideoStudio™ 7 SE DVD firmy Ulead Systems dokonując korekcji obrazu, przycięcia klatek oraz innych operacji. Z tak przygotowanej sekwencji video wydzielano pojedyncze klatki obrazu zapisane w formacie \*.bmp. Tę operację wykonywano za pomocą programu AVI2BMP 1.1 firmy DaanSystems. Wydzielone klatki wprowadzano do oprogramowania RegiStax 4.0, gdzie dokonywano ich przetworzenia metodą nakładania obrazów. Po wybraniu klatki referencyjnej (stanowiącej obraz odniesienia do wyrównania pozostałych klatek), program automatycznie dokonywał ich wyrównania.

<sup>99</sup> Pod terminem SGP należy rozumieć w tym przypadku chropowatość powierzchni.

<sup>100</sup> Pomiar pojedynczy odnosi się do pomiaru prowadzonego na powierzchni jednej, wybranej próbki (np. pomiar próbki nr 3).

<sup>101</sup> Pomiar "od-do" odnosi się do sekwencyjnego pomiaru kilku kolejnych próbek (np. pomiar od próbki nr 2 do próbki nr 5).

<sup>102</sup> Pomiar pełny odnosi się do pomiaru prowadzonego na pełnym zestawie próbek bez względu na kolejność ich ustawienia (np. pomiar 1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11)



Tab. 31. Ustawienia warunków pomiaru dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082  
 Tab. 31. The settings of measuring conditions for samples made from aluminium EN AW-6082

Nr pomiaru	Kolejność ustawienia pierścieni	Rodzaj pomiaru			Tryb pomiaru			Rodzaj ruchu powierzchni			Czas pomiaru [s]
		Pomiar SGP	Pomiar wymiaru	Pomiar kształtu	Pomiar pojedynczy	Pomiar "od-do"	Pomiar pełny	Ruch postępowy	Ruch obrotowy	Ruch postępowo-obrotowy	
1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11	+	+				+				175
2	8-3-6-9-11-5-10-1-2-7-4	+	+				+				80
3	4-2-7-10-6-8-11-1-5-3-9		+							+	175
4	5-2-7-3-9-4-1-11-8-6-10	+					+			+	60
5	5-10-8-11-6-3-2-4-9-7-1	+					+			+	140

Tab. 32. Ustawienia warunków pomiaru dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N  
 Tab. 32. The settings of measuring conditions for samples made from brass EN CW612N

Nr pomiaru	Kolejność ustawienia pierścieni	Rodzaj pomiaru			Tryb pomiaru			Rodzaj ruchu powierzchni			Czas pomiaru [s]
		Pomiar SGP	Pomiar wymiaru	Pomiar kształtu	Pomiar pojedynczy	Pomiar "od-do"	Pomiar pełny	Ruch postępowy	Ruch obrotowy	Ruch postępowo-obrotowy	
1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11	+	+								175
2	1-9-10-2-8-6-3-5-7-4-11	+			+				+		20
3	1-11-7-10-8-4-3-5-2-9-6		+				+				80
4	1-4-8-7-2-5-10-11-6-9-3			+					+		60
5	1-11-4-2-3-10-8-6-5-7-9	+			+					+	20

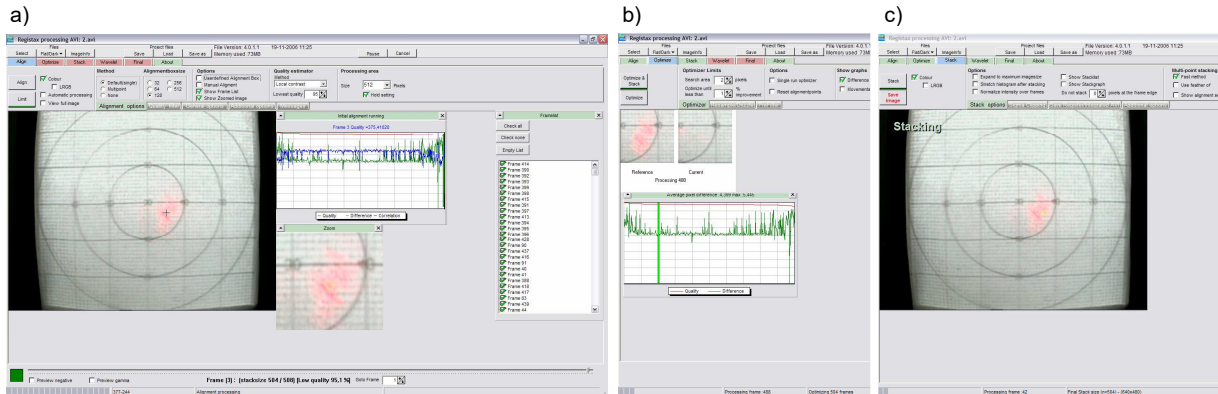
Tab. 33. Ustawienia warunków pomiaru dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150  
 Tab. 33. The settings of measuring conditions for samples made from cast iron EN GJL 150

Nr pomiaru	Kolejność ustawienia pierścieni	Rodzaj pomiaru			Tryb pomiaru				Rodzaj ruchu powierzchni			Czas pomiaru [s]	
		Pomiar SGP	Pomiar wymiaru	Pomiar kształtu	Pomiar pojedynczy	Pomiar "od-do"	Pomiar pęty	Ruch postępowy	Ruch obrotowy	Ruch postępowo-obrotowy			
1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11	+					+						175
2	3-8-10-4-5-9-2-6-7-1-11		+			+							60
3	5-1-2-6-11-9-7-10-4-3-8		+		+						+		20
4	11-2-6-5-8-3-1-10-9-7-4			+	+						+		20
5	5-11-10-6-4-8-7-2-3-1-9			+						+			175

Tab. 34. Ustawienia warunków pomiaru dla próbek wykonanych ze stali EN C45  
 Tab. 34. The settings of measuring conditions for samples made from steel EN C45

Nr pomiaru	Kolejność ustawienia pierścieni	Rodzaj pomiaru			Tryb pomiaru				Rodzaj ruchu powierzchni			Czas pomiaru [s]	
		Pomiar SGP	Pomiar wymiaru	Pomiar kształtu	Pomiar pojedynczy	Pomiar "od-do"	Pomiar pęty	Ruch postępowy	Ruch obrotowy	Ruch postępowo-obrotowy			
1	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11	+	+				+						175
2	5-4-6-3-9-2-8-10-1-7-11	+	+			+							80
3	10-2-7-4-1-8-11-5-3-9-6	+			+						+		20
4	9-4-2-11-3-6-8-10-5-1-7			+	+						+		20
5	6-11-10-3-9-2-5-7-4-1-8	+	+							+			175

Proces ten polegał na porównaniu obrazu referencyjnego z kolejnym obrazem i minimalizowaniu różnic między nimi metodą kolejnych przybliżeń. Po wyrównaniu klatek program dokonywał selekcji klatek wejściowych, odrzucając te o gorszej jakości. Tak wyselekcjonowane klatki zostały nałożone w kolejności odpowiadającej jakości obrazu (od najlepszej do najgorszej). W wyniku tej operacji powstawał pojedynczy obraz wynikowy o uśrednionej wartości luminacji. Na rysunku 89 (131) pokazano niektóre okna programu RegiStax w czasie przetwarzania obrazów światła rozproszonego.



Rys. 89. Okna oprogramowania RegiStax 4.0, służącego do przetwarzania obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego metodą nakładania obrazów: a) moduł wstępnego przetwarzania obrazu (wczytywanie plików i pozycjonowanie), b) moduł optymalizacji obrazu, c) moduł nakładania obrazów  
 Fig. 89. The windows of RegiStax 4.0 software used for processing of images of angular distribution of the scattered light intensity: a) image pre-processing module (file opening and aligning), b) image optimization module, c) image stacking module

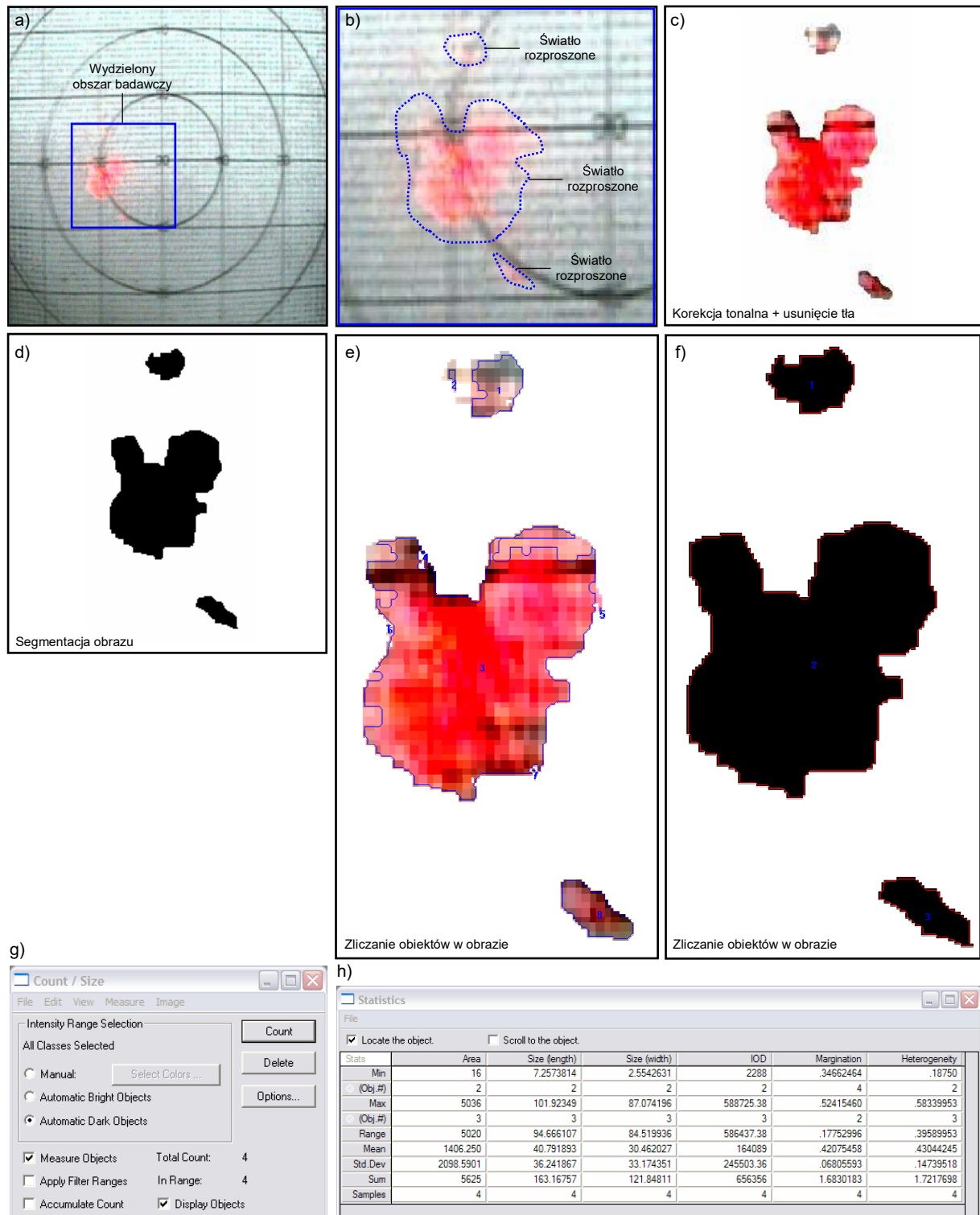
Uzyskane obrazy wynikowe analizowano za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, wyznaczając wybrane parametry geometryczne i fotometryczne. W tym celu wydzielano w każdym z obrazów obszar badawczy<sup>103</sup> zawierający światło rozproszone. Następnie, po usunięciu tła dokonywano ich segmentacji (w celu uzyskania konturów niezbędnych do wyznaczenia parametrów geometrycznych) lub korekcji tonalnej (poprawy m.in. jasności i kontrastu, w celu uzyskania poprawnych wartości parametrów fotometrycznych). Niektóre z wymienionych operacji przedstawiono na rysunku 90 (132). Niezależnie od sposobu wstępnego przetworzenia obrazów ww. parametry uzyskiwano korzystając z funkcji *Count/Size*. Pozwala ona na przeprowadzenie analizy ilościowej na podstawie automatycznego zliczania obiektów w ocenianych obrazach. Za pomocą funkcji *Count/Size* wyznaczono parametry, których charakterystykę przedstawiono w tabelicy 35 (131).

Tab. 35. Parametry geometryczne i fotometryczne wyznaczone dla obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 35. Geometric and photometric parameters calculated for images of the scattered light intensity by Image-Pro® Plus 5.1

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Jednostka	Określenie
Geometryczne	Pole powierzchni	mm <sup>2</sup>	Parametr wyznaczany poprzez zliczanie punktów obrazu należących do wydzielonego obszaru badawczego.
	Długość	mm	Średnica Fereta <sup>104</sup> wzdłuż dłuższej osi analizowanego obiektu w obrazie.
	Szerokość	mm	Średnica Fereta wzdłuż krótszej osi analizowanego obiektu w obrazie.
Fotometryczne	Jednorodność optyczna	j. umowna	Parametr służy do określania liczby pikseli, dla których wartość luminacja jest większa o 10%, w stosunku do średniej luminacji analizowanego obiektu w obrazie.
	Sumaryczne natężenie światła	j. umowna	Parametr informuje o sumarycznej jasności światła w wydzielonym obszarze analizowanego obrazu.
	Marginacja	j. umowna	Parametr informuje o rozkładzie jasności poszczególnych obiektów w obrazie na odcinku pomiędzy centrum, a krawędzią analizowanego obrazu.

Wyznaczone parametry dla obrazów wynikowych uzyskanych z oprogramowania RegiStax, porównywano z parametrami wyznaczonymi dla pojedynczego obrazu rejestrowanego statycznie oraz dla pojedynczej klatki wydzielonej z sekwencji video. Na podstawie rezultatów przeprowadzonych analiz wstępnie korelowano parametry uzyskane z analizy obrazu z wybranymi parametrami SGP.

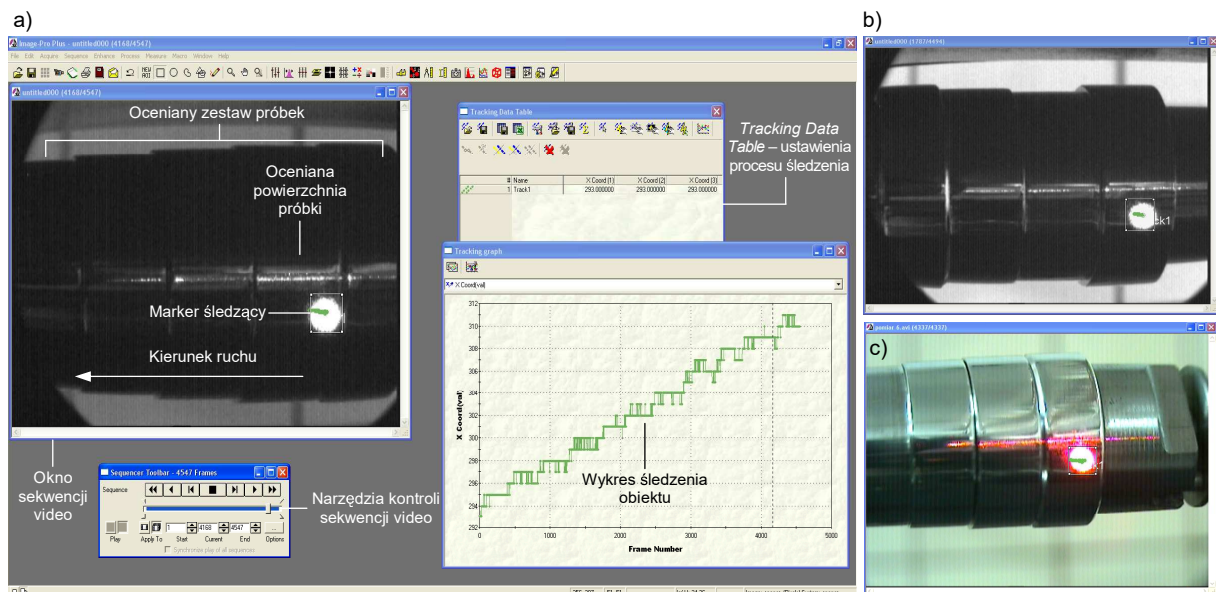
<sup>103</sup> Obszar badawczy (ang. *AOI – Area Of Interest*) – wydzielony obszar obrazu przeznaczony do analizy.  
<sup>104</sup> Średnica Fereta (ang. *FD – Feret Diameter*) – opisuje liniowy rozmiar analizowanych obiektów w obrazie. Jest miarą rozciągłości obiektu w pionie i poziomie. [TAD1997]



Rys. 90. Wybrane operacje na obrazach światła rozproszonego realizowane za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1: a) pojedyncza klatka sekwencji video zawierająca obraz światła rozproszonego z zaznaczonym obszarem badawczym, b) wydzielony z obrazu 90a (□132) obszar badawczy zawierający obraz światła rozproszonego, c) obszar badawczy zawierający obraz światła rozproszonego po korekcji tonalnej i usunięciu tła, d) kontur obrazu światła rozproszonego uzyskany po segmentacji, e), f) obrazy poddane zliczaniu obiektów, g) okno funkcji *Count/Size* przeznaczonej do zliczania obiektów w obrazie, h) wyniki analizy obrazu przeprowadzonej na podstawie zliczania obiektów w obrazie – wyznaczone parametry geometryczne i fotometryczne

Fig. 90. Selected operations on images of the scattered light realized by Image-Pro® Plus 5.1 software: a) single video frame including image of the scattered light with AOI, b) extracted from figure 90a (□132). AOI including image of the scattered light, c) AOI including image of the scattered light after tone correction and extraction of background, d) contour of image of the scattered light after segmentation, e), f) images with counted objects, g) window of *Count/Size* function for counting objects in image, h) results of the image analysis carried out in the base of counting objects in image – calculated geometric and photometric parameters

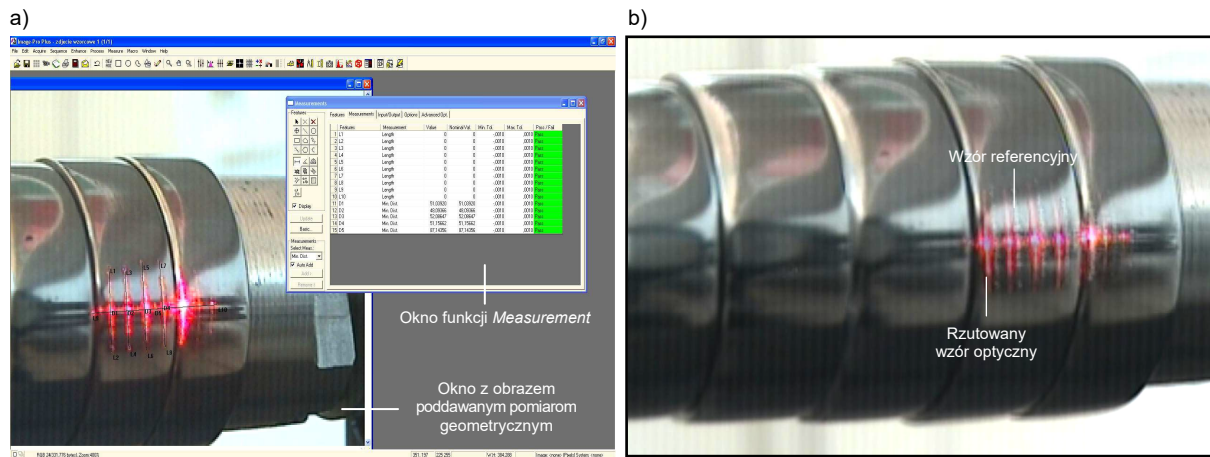
Przygotowanie sekwencji video, przedstawiającej przemieszczenie plamki światła laserowego na badanej powierzchni (ocena wymiaru), odbywało się tak samo jak opisane powyżej dla obrazów skaterometrycznych. Przygotowany obraz ruchomy poddawano przetwarzaniu za pomocą metody śledzenia obiektów zaimplementowanej w oprogramowaniu Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 firmy Media Cybernetics. Śledzenie odbywało się za pomocą narzędzia o nazwie *Track Objects*. Po wprowadzeniu sekwencji video zapisanej w formacie \*.avi program konwertował ją na plik o rozszerzeniu \*.seq. Następnie za pomocą *Tracking Data Table* określano parametry procesu śledzenia. Oprogramowanie Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 pozwalało na automatyzację analizy wielu sekwencji video przez tworzenie makroinstrukcji. Do tego celu służył wbudowany edytor języka Visual Basic<sup>™</sup> o nazwie IPBasic 4.0. Skorzystano z możliwości przeprowadzenia takiej analizy i wykorzystano makroinstrukcję o nazwie *SpotTracking*, służącą do automatycznego śledzenia plamki światła laserowego przemieszczającej się po powierzchniach badanych próbek. W wyniku jej działania otrzymywano wartości przemieszczeń plamki światła laserowego wraz z graficznym przedstawieniem procesu śledzenia (wykres). Końcowym elementem oceny wymiaru było porównanie wartości uzyskanych z obrazu z wartościami uzyskanymi z pomiarów referencyjnych (opisanych wcześniej). Na rysunku 91 (133) przedstawiono okno modułu *Tracking* wraz z narzędziami służącymi do śledzenia ruchu obiektu w analizowanym obrazie.



Rys. 91. Okno modułu *Tracking* pracującego w oprogramowaniu Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 służącego do śledzenia ruchu obiektów: a) widok ogólny okna modułu z narzędziami śledzącymi, b) okno sekwencji video zarejestrowanej za pomocą monochromatycznej kamery TV, c) okno sekwencji video zarejestrowanej za pomocą kolorowej kamery TV  
Fig. 91. The windows of *Tracking* module in Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 software, used for object tracking : a) general view of the window with tracking tools, b) window of video sequence acquired by monochromatic TV camera, c) window of video sequence acquired by color TV camera

Analiza kształtu powierzchni odbywała się na podstawie zarejestrowanego obrazu wzoru optycznego rzutowanego na badaną powierzchnię. Podobnie jak poprzednio przygotowanie obrazu w formie sekwencji video odbywało się przy wykorzystaniu programów AVS Video Converter 6.2 i VideoStudio<sup>™</sup> 7 SE DVD. Następnie dokonywano rozdzielania sekwencji video na pojedyncze klatki za pomocą aplikacji AVI2BMP 1.1 firmy DaanSystems. Na pojedynczych klatkach analizowano zmiany kształtu rzutowanego wzoru światła strukturalnego, odpowiadające charakterystyce badanej powierzchni oraz ewentualnym jej zniekształceniom. Uzyskane obrazy zapisywano w formacie \*.bmp i przenoszono do oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1. Ocena takich obrazów sprowadzała się do prostej analizy geometrycznej (m.in. wyznaczenia odległości, kątów). Na początku dokonywano pomiarów geometrycznych dla obrazu referencyjnego. Po określeniu jego charakterystycznych wymiarów, porównywano je z wymiarami kolejnych ocenianych obrazów przedstawiających zniekształcony wzór optyczny. Na podstawie różnicy wymiarów oceniano wielkość zniekształcenia.

Na rysunku 92 (134) przedstawiono okno oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1 z narzędziami przeznaczonymi do pomiarów geometrycznych oraz nałożenie dwóch obrazów wzorów optycznych światła strukturalnego rzutowanych na badaną powierzchnię. Takie przedstawienie obrazu uzyskanego z kolejnego pomiaru i obrazu referencyjnego pozwala na obserwację ewentualnych odchyłek kształtu powierzchni lub jej zniekształceń.



Rys. 92. Ocena kształtu powierzchni z wykorzystaniem przetwarzania i analizy obrazu: a) okno oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1 z narzędziami przeznaczonymi do pomiarów geometrycznych obiektów znajdujących się ocenianych obrazach (wyznaczanie długości, kątów itp.), b) nałożenie dwóch obrazów (referencyjnego i z kolejnego pomiaru) przedstawiających wzory optyczne światła strukturalnego w postaci zbioru linii pionowych rzutowane na badaną powierzchnię. Takie nałożenie obrazów pozwala obserwować ewentualne odchyłki kształtu powierzchni lub jej zniekształcenia

Fig. 92. Assessment of shape of surfaces by image processing and analysis: a) window of Image-Pro® Plus 5.1 software with tools for geometrical measurement of objects in images (dimensions, angles etc.), b) the combining of two images (reference and from measurement) presenting the patterns of structured light in a form of multiline projected on the measured surface. Such combining of images permits to observing possible shape deviations or distortion of surface

### Uproszczony plan badań właściwych

W tablicy 36 (134) przedstawiono uproszczony plan badań właściwych z podziałem na poszczególne etapy oraz opisem przeprowadzanych operacji.

Tab. 36. Uproszczony plan badań właściwych  
Tab. 36. The schedule of proper investigations

Lp.	Opis przeprowadzanej operacji	Uwagi, parametry, urządzenia, narzędzia
<b>Etap 1: Przygotowanie zestawu próbek</b>		
1.	Wybranie zestawu próbek przeznaczonego do pomiaru	1. Cztery zestawy próbek w formie pierścieni o różnej średnicy zewnętrznej (po jedenaście próbek w komplecie). 2. Materiały: aluminium EN AW-6082, mosiądz EN CW612N, żeliwo EN GJL150, stal EN C45. 3. Wymiary: $\phi_z = 20,5 \div 30 \pm 0,2$ mm, $\phi_w = 14$ mm, $h = 10$ mm.
2.	Ustalenie kolejności ułożenia próbek	1. Pierwszy pomiar niezależnie od zestawu – kolejność ułożenia próbek od najmniejszej średnicy do największej. 2. Kolejne pomiary – dowolna kombinacja ustawień.
3.	Nałożenie próbek na trzpień w odpowiedniej kolejności	1. Trzpień stalowy, wymiary: $\phi = 14$ mm, $l = 140$ mm. 2. Podkładka, wymiary: $\phi_z = 24$ mm, $\phi_w = 19$ mm. 3. Śruba zaciskowa.
4.	Zamocowanie zestawu próbek	1. Mocowanie w kłach wrzeciona zespołu napędowego ZN2 oraz konika (moduł przesuwu wzdłużnego i obrotu badanego przedmiotu). 2. Minimalizacja luzu kłom z pokręteł gwiazdowym typu HSB. 3. Minimalizacja luzu poprzez dokręcenie śruby zaciskowej.
5.	Przygotowanie powierzchni próbek do pomiaru	1. Usunięcie zanieczyszczeń (kurz, pył, wilgoć). 2. Szmatka nasączona alkoholem.
<b>Etap 2: Przygotowanie stanowiska pomiarowego</b>		
6.	Włączenie listwy zasilającej	1. Listwa zasilająca Acar F5 firmy HSK Data (uruchomienie jednostki komputerowej).
7.	Uruchomienie jednostki komputerowej	1. Komputer stacjonarny (Intel® Pentium® 4 533 MHz, 512 MB DDRAM, 80 GB HDD) z monitorem LCD AL171 firmy Acer (17", 1280 × 1024 pixeli, 450:1, 300 cd/m <sup>2</sup> ).
8.	Uruchomienie oprogramowania do sterowania i akwizycji obrazu z kamer TV	1. Oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Waveparticle Intelligent Technology).
9.	Włączenie listwy zasilającej	1. Listwa zasilająca Acar F5 firmy HSK Data (uruchomienie kamer TV).
10.	Zdjęcie osłonek z obiektywów	1. Obserwacja na monitorze obrazu pochodzącego z kamer TV.
11.	Włączenie zasilacza źródła światła	1. Zasilacz prądu stałego ( $U = 1 \div 16$ V, $I = 0,5 \div 5$ A). 2. Laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs ( $\lambda = 635$ nm, $P_o = 1$ mW, plamka $\phi = 1$ mm). 3. Manualne ustawienie napięcia zasilania lasera – 4,5 V.

Etap 3: Ustawienie elementów stanowiska		
12.	Sprawdzenie położenia plamki światła laserowego lub wzoru optycznego światła strukturalnego na powierzchni badanego przedmiotu oraz światła rozproszonego na matówce	
13.	Korekcja ustawienia odległości pomiędzy zespołami przesuwными	1. Elementy przesuwne (Tab. 9 (□100)) zamocowane na ławie optycznej typu ZHL firmy PZO.
14.	Korekcja położenia plamki, wzoru optycznego lub światła rozproszonego przez manualną regulację ustawień elementów optycznych	1. Elementy optyczne: generator światła strukturalnego DOE-220-635 firmy Thorlabs, zwierciadło półprzezroczyste ZHL-UL firmy PZO, soczewka dwuwypukła.
15.	Dostrojenie obrazu wyświetlanego na monitorze	1. Manualna regulacja wartości zbliżenia przysłony i ostrości pierścieniami obiektywu.
16.	Korekcja obrazu z kamer TV za pomocą ustawień programowych	1. Oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Waveparticle Intelligent Technology). 2. Korekcja obrazu (jasność, kontrast, nasycenie barw itp.).
17.	Wybranie odpowiednich ustawień dotyczących akwizycji obrazu	1. Oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Waveparticle Intelligent Technology). 2. Określenie rozdzielczości i jakości obrazu, wybranie rodzaju kompresji oraz miejsca zapisania zarejestrowanego obrazu. 3. Obraz statyczny (rozdzielczość obrazu 640 × 480 pikseli, jakość obrazu: najwyższa, format zapisu: *.bmp). 4. Obraz ruchomy (rozdzielczość obrazu 640 × 480 pikseli, jakość obrazu: najwyższa, kompresja: H.264, format zapisu: *.dvr).
Etap 4: Akwizycja obrazu statycznego i ruchomego		
18.	Określenie warunków pomiaru statycznego	1. Określenie rodzaju pomiaru (SGP, kształt), trybu pomiaru (pojedynczy).
19.	Uruchomienie urządzenia	1. Moduł przesuwu i obrotu badanego przedmiotu. 2. Wybranie odpowiedniej powierzchni referencyjnej.
20.	Rejestracja pojedynczego obrazu statycznego światła rozproszonego (lub obrazu wzoru optycznego rzutowanego na badaną powierzchnię) będącego obrazem referencyjnym przy ocenie SGP (lub analizie kształtu)	1. Kolorowa kamera TV UC-HR550A z matrycowym detektorem CCD (rejestracja wzoru światła strukturalnego – ocena kształtu). 2. Kolorowa kamera TV UC-HR550B z matrycowym detektorem CCD (rejestracja światła rozproszonego – ocena SGP). 3. Oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Waveparticle Intelligent Technology).
21.	Określenie warunków pomiaru ruchomego	1. Określenie rodzaju pomiaru (SGP, wymiar, kształt), trybu pomiaru (pojedynczy, "od-do", pełny), rodzaju ruchu powierzchni (postępowy, obrotowy, postępowo-obrotowy).
22.	Uruchomienie urządzenia	1. Moduł przesuwu i obrotu badanego przedmiotu (pomiar wg. pkt. 18). 2. Kolorowa kamera TV UC-HR550A z matrycowym detektorem CCD. 3. Kolorowa kamera TV UC-HR550B z matrycowym detektorem CCD. 4. Oprogramowania DVR System firmy SWIT (Shenzhen Waveparticle Intelligent Technology), rozpoczęcie rejestracji obrazu, zakończenie rejestracji obrazu.
Etap 5: Przetwarzanie i analiza obrazu		
23.	Przetwarzanie i analiza obrazu statycznego i ruchomego światła rozproszonego (ocena SGP)	1. Oprogramowanie AVS Video Converter 6.2 firmy Online Media Technologies (konwersja pliku *.dvr na plik *.avi). 2. Oprogramowanie VideoStudio™ 7 SE DVD firmy Ulead Systems (wstępne przetwarzanie obrazu – przygotowanie materiału video do dalszych operacji (korekcja obrazu, przycięcie klatek itp.)). 3. Oprogramowanie AVI2BMP 1.1 firmy DaanSystems (wydzielenie pojedynczych klatek w formacie *.bmp z sekwencji video zapisanej w formacie *.avi). 4. Oprogramowanie RegiStax 4.0 (przetwarzanie obrazu metodą nakładania obrazów). 5. Oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics (analiza obrazu uzyskanego z oprogramowania RegiStax – wyznaczenie parametrów geometrycznych i fotometrycznych).
24.	Przetwarzanie i analiza obrazu ruchomego przemieszczenia plamki światła laserowego (ocena wymiaru)	1. Oprogramowanie AVS Video Converter 6.2 firmy Online Media Technologies (konwersja pliku *.dvr na plik *.avi). 2. Oprogramowanie VideoStudio™ 7 SE DVD firmy Ulead Systems (wstępne przetwarzanie obrazu – przygotowanie materiału video do dalszych operacji (korekcja obrazu, przycięcie klatek itp.)). 3. Oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics (Track Object – moduł przetwarzania obrazu metodą śledzenia obiektów, porównanie wyników z wynikami referencyjnymi).
25.	Przetwarzanie i analiza obrazu statycznego i ruchomego przedstawiającego wzór optyczny rzutowany na badaną powierzchnię (analiza kształtu)	1. Oprogramowanie AVS Video Converter 6.2 firmy Online Media Technologies (konwersja pliku *.dvr na plik *.avi). 2. Oprogramowanie VideoStudio™ 7 SE DVD firmy Ulead Systems (wstępne przetwarzanie obrazu – przygotowanie materiału video do dalszych operacji (korekcja obrazu, przycięcie klatek itp.)). 3. Oprogramowanie AVI2BMP 1.1 firmy DaanSystems (wydzielenie pojedynczych klatek w formacie *.bmp z sekwencji video zapisanej w formacie *.avi). 4. Oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics (analiza geometryczna – pomiary odległości i kątów).

### 5.2.5. Wyniki badań i ich analiza

Korzystając z zaproponowanej wcześniej metodyki badań przeprowadzono pomiary, których wyniki i analizę przedstawiono w niniejszym punkcie. Na podstawie przyjętych warunków pomiarów przedstawionych w tablicach od 31 (□129) do 34 (□130), wykonano cztery serie badań, podczas których przeprowadzono łącznie dwadzieścia pomiarów.

Zrezygnowano z prezentacji wszystkich wyników badań i postanowiono przedstawić jedynie wybrane, najciekawszych i najbardziej reprezentatywne z nich. Taka skrótowa forma pozwala bowiem na lepsze zapoznanie się z uzyskanym materiałem badawczym i jego analizą.

Rezultaty badań prezentowano w następującej kolejności:

- informacja o pomiarze (opis próbki oraz warunków pomiaru),
- tablica z wartościami parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wyznaczonymi dla ocenianych próbek (pomiar struktury geometrycznej powierzchni),
- wykres zależności pola powierzchni obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego od chropowatości powierzchni ocenianych próbek (pomiar struktury geometrycznej powierzchni),
- wykres zależności sumarycznego natężenia światła rozproszonego od chropowatości powierzchni ocenianych próbek (pomiar struktury geometrycznej powierzchni),
- wykres zależności zmiany wymiaru dla różnych średnic próbek (pomiar wymiaru),
- wykres zależności numeru powierzchni ocenianej próbki od długości wzoru optycznego światła strukturalnego rzutowanego na tę powierzchnię (ocena kształtu powierzchni).

Ilość wyników przedstawionych dla kolejnych zestawów próbek uzależniona była od liczby wykonywanych pomiarów (tj. rodzaju pomiaru, trybu pomiaru, rodzaju ruchu powierzchni) zgodnie z warunkami przyjętymi (tablice od 31 (□129) do 34 (□130)). Każdy zbiór wyników pomiarów opatrzony został odpowiednią analizą dotyczącą uzyskanych rezultatów.

Na końcu niniejszego punktu zestawiono dodatkowo pełne wersje tablic od 45 (□152) do 48 (□155) z podanymi wartościami parametrów geometrycznych i fotometrycznych, dla wszystkich ocenianych powierzchni próbek (w stanie statycznym), wyznaczonymi za pomocą oprogramowania Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1.



**Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 (seria 1, pomiar 1)**

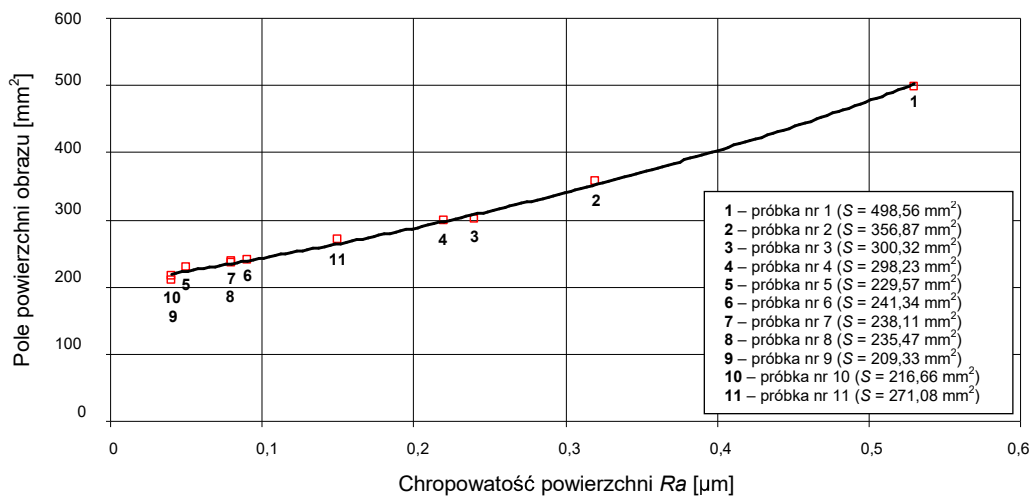
Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	1		Aluminium EN AW-6082	Kolejność ustawienia próbek
		Rodzaj pomiaru		SGP, wymiar
Numer pomiaru	1	Tryb pomiaru		Pomiar pełny (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowy
		Czas pomiaru		175 s



Rys. 93. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 podczas pomiar 1 w serii 1  
Fig. 93. Settings of sample set made from aluminium EN AW-6082 during measurement 1 in series 1

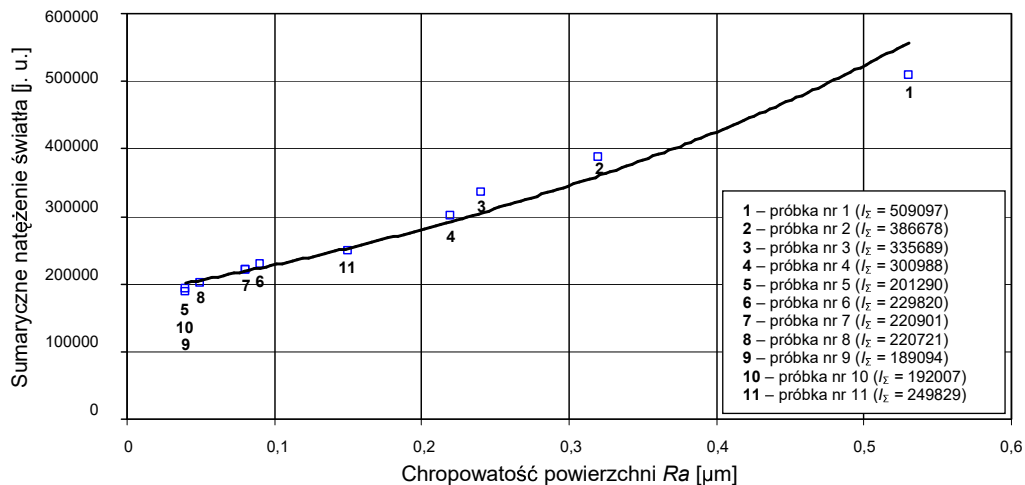
Tab. 37. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
Tab. 37. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from aluminium EN AW-6082 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (uśredniona wartość z 11 pojedynczych obrazów)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 4420 pojedynczych klatek)
-	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	47	19	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	281,41	136,23	134,78
	Długość obrazu [mm]	9,7	6,78	6,05
	Szerokość obrazu [mm]	6,62	4,95	4,71
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,21	0,21	0,2
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	276010	134879	133189
	Marginacja [j. umowna]	0,34	0,35	0,32



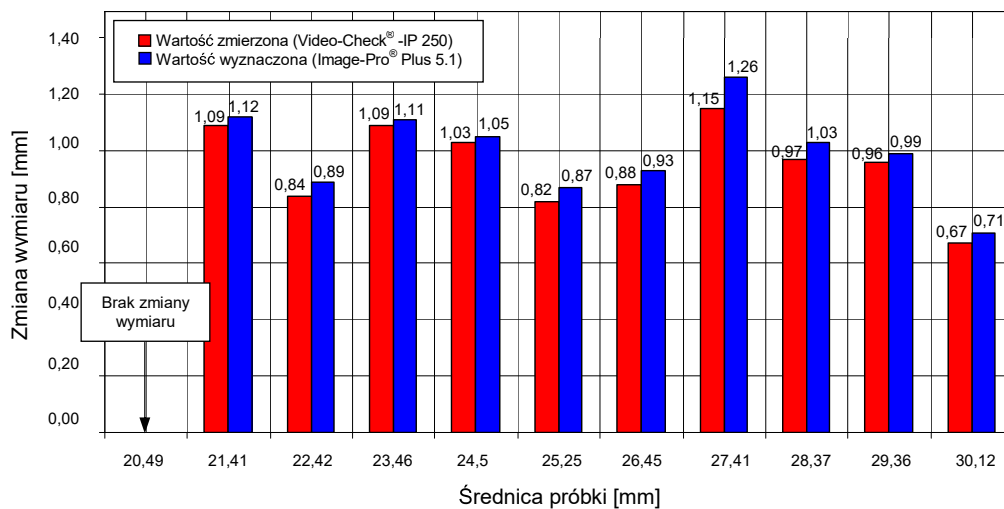
Rys. 94. Zależność pola powierzchni obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni Ra dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082  
Fig. 94. The dependence of area of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness Ra for samples made from aluminium EN AW-6082

(verte→)



Rys. 95. Zależność sumarycznego natężenia światła obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni  $R_a$  dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082

Fig. 95. The dependence of IOD (Integrated Optical Density) of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness  $R_a$  for samples made from aluminium EN AW-6082



Rys. 96. Wykres zmiany wymiaru dla różnych średnic próbek z podanymi wartościami zmierzonymi (system pomiarowy Video-Check® -IP 250 firmy Werth) i wyznaczonymi (Image-Pro® Plus 5.1) dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082

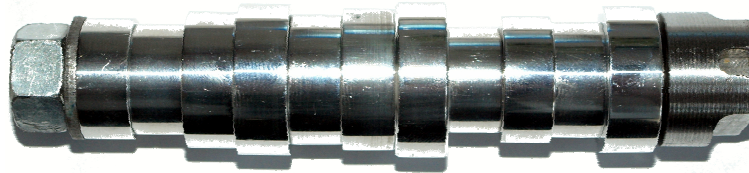
Fig. 96. The plot of change of dimension for different samples diameter with given measured values (measurement system Video-Check® -IP 250 produced by Werth) and calculated values (Image-Pro® Plus 5.1) for samples made from aluminium EN AW-6082

#### Analiza wyników pomiarów

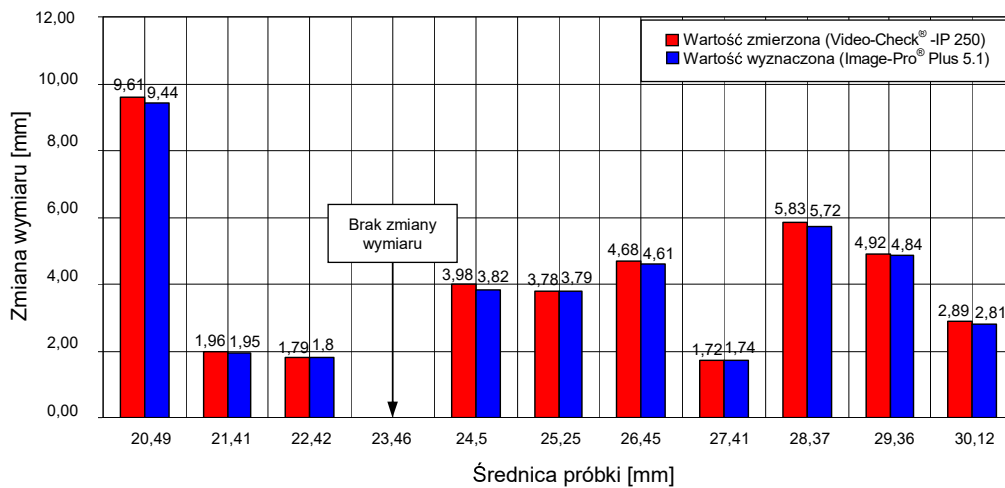
W pierwszej serii badań ocenie poddawano próbki wykonane z aluminium EN AW-6082. Podczas pomiaru nr 1, przy ustawieniach próbek w kolejności od najmniejszej średnicy do największej, dokonano oceny SGP oraz wymiaru. Na podstawie analizy obrazu wyznaczono wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych dla obrazu statycznego (wartość uśredniona z jedenastu obrazów rejestrowanych dla powierzchni każdej z próbek), obrazu ruchomego (wartości z pojedynczej klatki) oraz obrazu wynikowego uzyskanego za pomocą oprogramowania RegiStax, będącego uśrednioną wartością z ok. czterech tysięcy czterystu dwudziestu pojedynczych klatek wydzielonych z sekwencji video. Wartości parametrów geometrycznych podawane przez program w pikselach przeliczono na wartości podawane w mm. Przeliczenia dokonywano na podstawie pomiaru obiektu znanym wymiarze. Znając wartości w pikselach i w mm, wyznaczano z prostej proporcji wartości kolejnych parametrów. Uzyskane wyniki pokazują, że największe wartości parametrów uzyskano dla obrazu statycznego, a najmniejsze dla obrazu wynikowego. Stwierdzono także, że wartości niektórych parametrów fotometrycznych (jednorodność optyczna, marginacja) bez względu na rodzaj analizowanego obrazu pozostawały praktycznie na tym samym poziomie. Oprócz wyznaczenia średnich wartości parametrów (tab. 37 (137)), przedstawiono także wykresy zależności pola powierzchni obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni (rys. 94 (137)), oraz sumarycznego natężenia światła od chropowatości powierzchni (rys. 95 (138)). Wartości obydwu wymienionych parametrów skorelowanych z chropowatością powierzchni wzrastały wraz ze wzrostem parametru SGP. Wzrost był szczególnie widoczny dla tego zestawu próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082, gdyż były one obrabiane mechanicznie jako pierwsze i uzyskiwane wartości parametru  $R_a$  były zróżnicowane (od dziesiątych do setnych części mikrometra). Ocena wymiaru dokonywana była również dla wszystkich próbek (pomiar pełny), a jej wyniki pokazano na rysunku 96 (138). Kolumny czerwone oznaczały wartości uzyskane podczas pomiaru średnic próbek za pomocą systemu Video-Check® -IP 250 firmy Werth, a niebieskie wartości uzyskane metodą śledzenia obiektów z wykorzystaniem oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1. Jak widać z powyższego wykresu wartości uzyskane metodą przetwarzania obrazu były większe, przy czym wartość błędów wynosiła od kilku setnych do kilku dziesiątych mm. Można więc uznać, że błąd metody był niewielki.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 (seria 1, pomiar 3)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	1		Aluminium EN AW-6082	Kolejność ustawienia próbek
		Rodzaj pomiaru		Wymiar
Numer pomiaru	3	Tryb pomiaru		Pomiar pełny (4-2-7-10-6-8-11-1-5-3-9)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowo-obrotowy
		Czas pomiaru		175 s



Rys. 97. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 podczas pomiar 3 w serii 1  
Fig. 97. Settings of sample set made from aluminium EN AW-6082 during measurement 3 in series 1



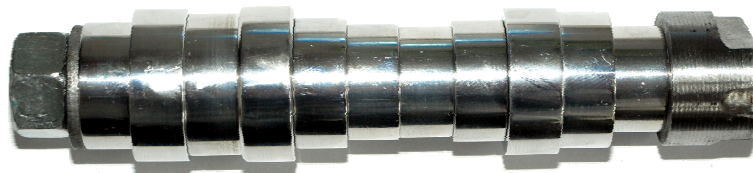
Rys. 98. Wykres zmiany wymiaru dla różnych średnic próbek z podanymi wartościami zmierzonymi (system pomiarowy Video-Check® -IP 250 firmy Werth) i wyznaczonymi (Image-Pro® Plus 5.1) dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082  
Fig. 98. The plot of change of dimension for different samples diameter with given measured values (measurement system Video-Check® -IP 250 produced by Werth) and calculated values (Image-Pro® Plus 5.1) for samples made from aluminium EN AW-6082

## Analiza wyników pomiarów

Podczas pomiaru nr 3 dokonano oceny wymiaru zestawu próbek ustawionego w kolejności 4-2-7-10-6-8-11-1-5-3-9. Ocena przeprowadzona była w trybie pełnego pomiaru w czasie stu siedemdziesięciu pięciu sekund, przy ruchu postępowo-obrotowym. Rezultaty pomiaru wymiaru przedstawiono na rysunku (rys. 98 (□139)). Uzyskane wartości zmiany wymiaru różnią się od prezentowanych wcześniej. Wyraźnie widoczny jest skokowy charakter kolejnych wartości, co wynikało z losowego ustawienia próbek. Pomimo takiego ustawienia, dla lepszej czytelności wykresu, wyniki uszeregowano względem kolejnych próbek od najmniejszej średnicy do największej. Zastosowany inny typ ruchu (postępowo-obrotowy) nie miał wpływu na uzyskane wyniki pomiarów. Oznacza to, że ocena wymiaru może być przeprowadzana również dla przedmiotów poruszających się ruchem złożonym.

### Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 (seria 1, pomiar 5)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	1		Aluminium EN AW-6082	Kolejność ustawienia próbek
Numer pomiaru	5	Rodzaj pomiaru		SGP
		Tryb pomiaru		Pomiar "od-do" (10-8-11-6-3-2-4-9)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowo-obrotowy
		Czas pomiaru		140 s



Rys. 99. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 podczas pomiar 5 w serii 1  
Fig. 99. Settings of sample set made from aluminium EN AW-6082 during measurement 5 in series 1

Tab. 38. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

Tab. 38. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from aluminium EN AW-6082 by Image-Pro® Plus 5.1 software

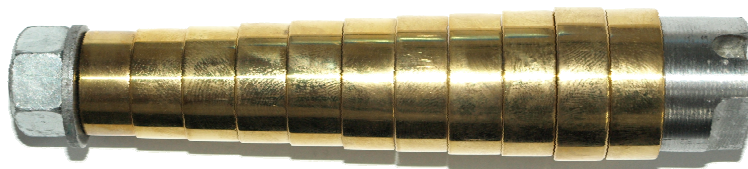
Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (uśredniona wartość z 8 pojedynczych obrazów)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 3535 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	47	17	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	266,16	134,69	133,58
	Długość obrazu [mm]	9,45	6,78	6,01
	Szerokość obrazu [mm]	6,38	4,9	4,69
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,21	0,2	0,2
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	263103	134100	133019
	Marginacja [j. umowna]	0,34	0,34	0,32

#### Analiza wyników pomiarów

Podczas pomiaru nr 5 dokonano oceny struktury geometrycznej powierzchni zestawu próbek ustawionego w kolejności 5-10-8-11-6-3-2-4-9-7-1. Jako, że był to pomiar "od-do", ocenie poddano jedynie wybrane próbki. W tym przypadku był to osiem próbek ustawionych w kolejności 10-8-11-6-3-2-4-9. Wyniki pomiarów parametrów geometrycznych i fotometrycznych wyznaczonych z zarejestrowanych obrazów światła rozproszonego za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1 przedstawiono w tabelicy 38 □ 140. Zmiana liczby ocenianych próbek nie spowodowała wyraźnego zmniejszenia wartości ww. parametrów. Standardowo wartości uśrednione z obrazów statycznych (w tym przypadku było to osiem obrazów) były wyższe niż te uzyskane z pojedynczej klatki video i z obrazu wynikowego otrzymanego z oprogramowania RegiStax. Pomiar w trybie "od-do" charakteryzował się tym, że oceniane były tylko wybrane próbki, nie był więc to pomiar pełny. Pomimo tego można stwierdzić, że jego przydatność w ocenie prowadzonej w np. warunkach przemysłowych może duża, zwłaszcza, że charakteryzuje się krótszym czasem. W omawianym przypadku zastosowanie takiego trybu pomiaru skróciło czas oceny o trzydzieści pięć sekund w porównaniu do pomiaru pełnego.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N (seria 2, pomiar 1)

Opis pomiaru		Material	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	2	Mosiądz EN CW612N	Kolejność ustawienia próbek	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11
			Rodzaj pomiaru	SGP, wymiar
Numer pomiaru	1		Tryb pomiaru	Pomiar pełny (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11)
			Rodzaj ruchu powierzchni	Ruch postępowy
			Czas pomiaru	175 s

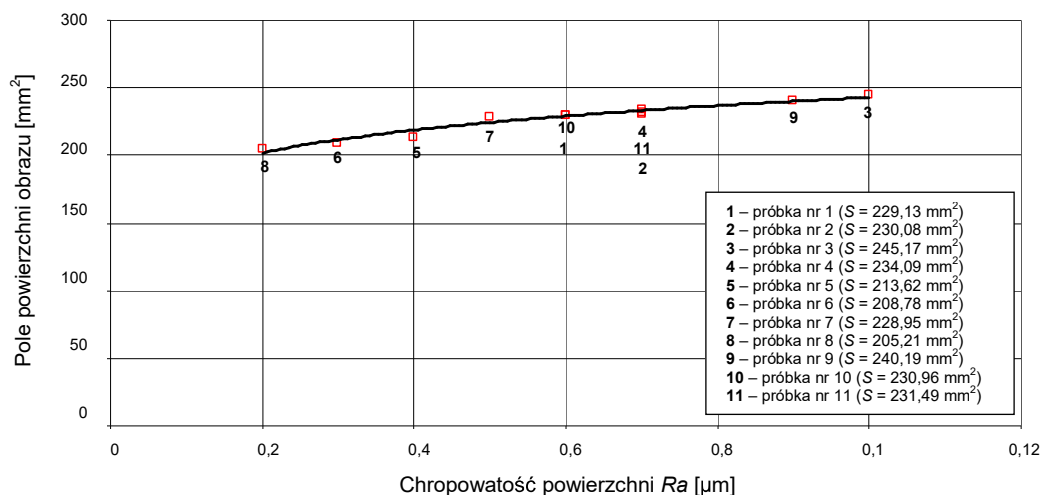


Rys. 100. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N podczas pomiar 1 w serii 2  
Fig. 100. Settings of sample set made from brass EN CW612N during measurement 1 in series 2

Tab. 39. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

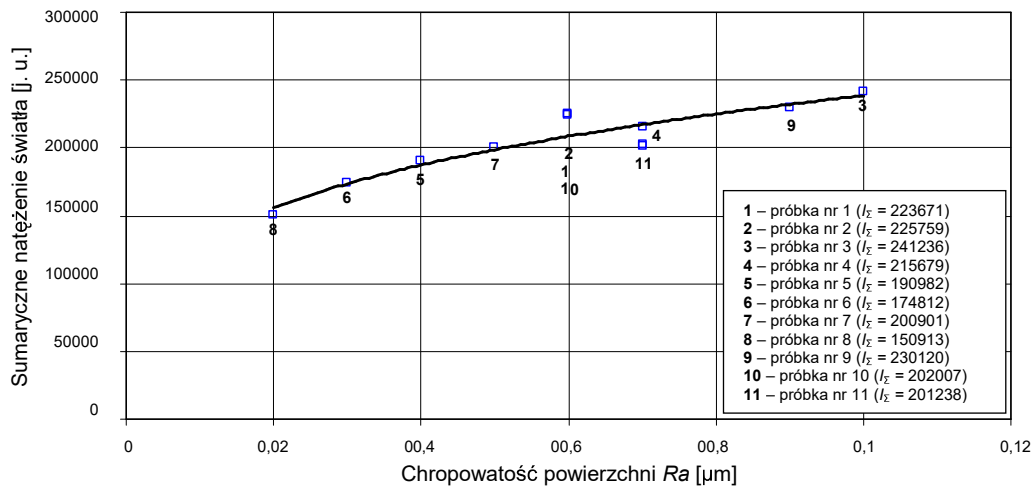
Tab. 39. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from brass EN CW612N by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (uśredniona wartość z 11 pojedynczych obrazów)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 4020 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	41	28	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	227,06	110,36	109,26
	Długość obrazu [mm]	8,06	3,98	3,71
	Szerokość obrazu [mm]	5,05	2,55	2,4
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,22	0,2	0,2
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	205210	104359	100019
	Marginacja [j. umowna]	0,33	0,34	0,33



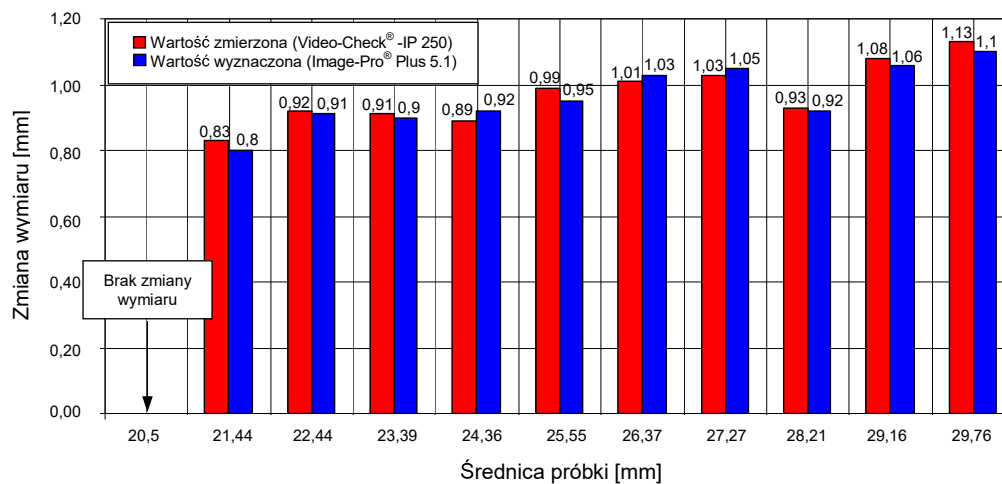
Rys. 101. Zależność pola powierzchni obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni Ra dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N

Fig. 101. The dependence of area of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness Ra for samples made from brass EN CW612N



Rys. 102. Zależność sumarycznego natężenia światła obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni  $R_a$  dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N

Fig. 102. The dependence of IOD (Integrated Optical Density) of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness  $R_a$  for samples made from brass EN CW612N



Rys. 103. Wykres zmiany wymiaru dla różnych średnic próbek z podanymi wartościami zmierzonymi (system pomiarowy Video-Check® -IP 250 firmy Werth) i wyznaczonymi (Image-Pro® Plus 5.1) dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N

Fig. 103. The plot of change of dimension for different samples diameter with given measured values (measurement system Video-Check® -IP 250 produced by Werth) and calculated values (Image-Pro® Plus 5.1) for samples made from brass EN CW612N

#### Analiza wyników pomiarów

W drugiej serii badań ocenie poddawano próbki wykonane z mosiądzu EN CW612N. Podobnie jak w pierwszej serii badań pierwszy pomiar wykonywany był dla SGP i wymiaru, przy ustawieniu próbek od najmniejszej średnicy do największej. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczonych za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1 nie odbiegały od wartości uzyskanych wcześniej dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082. Wyniki pomiarów ww. parametrów dla obrazów światła rozproszonego rejestrowanych w stanie statycznym przedstawiono na rysunkach 101 (□141) i 102 (□142). Wartości parametrów miały tendencję rosnącą i zależały głównie od chropowatości powierzchni poszczególnych próbek. Na rysunku 103 (□142) przedstawiono natomiast wyniki oceny wymiaru. Również i tutaj, podobnie jak dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082, różnica pomiędzy wynikami otrzymanymi z pomiarów przeprowadzonych systemem Video-Check® -IP 250 firmy Werth i metodą przetwarzania obrazu była niewielka. Mieściła się ona w przedziale  $\pm 0,03$  mm. Pomiary zostały przeprowadzone w trybie pełnym przy ruchu postępowym. Czas pomiaru wynosił sto siedemdziesiąt pięć sekund.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N (seria 2, pomiar 2)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	2	Mosiądz EN CW612N	Kolejność ustawienia próbek	1-9-10-2-8-6-3-5-7-4-11
			Rodzaj pomiaru	SGP
Numer pomiaru	2		Tryb pomiaru	Pomiar pojedynczy (7)
			Rodzaj ruchu powierzchni	Ruch obrotowy
			Czas pomiaru	20 s



Rys. 104. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N podczas pomiar 2 w serii 2  
Fig. 104. Settings of sample set made from brass EN CW612N during measurement 2 in series 2

Tab. 40. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

Tab. 40. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from brass EN CW612N by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 505 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	42	23	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	228,95	110,01	109,19
	Długość obrazu [mm]	8,51	3,91	3,67
	Szerokość obrazu [mm]	5,3	2,49	2,45
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,23	0,22	0,21
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	200901	104317	100047
	Marginacja [j. umowna]	0,38	0,34	0,34

## Analiza wyników pomiarów

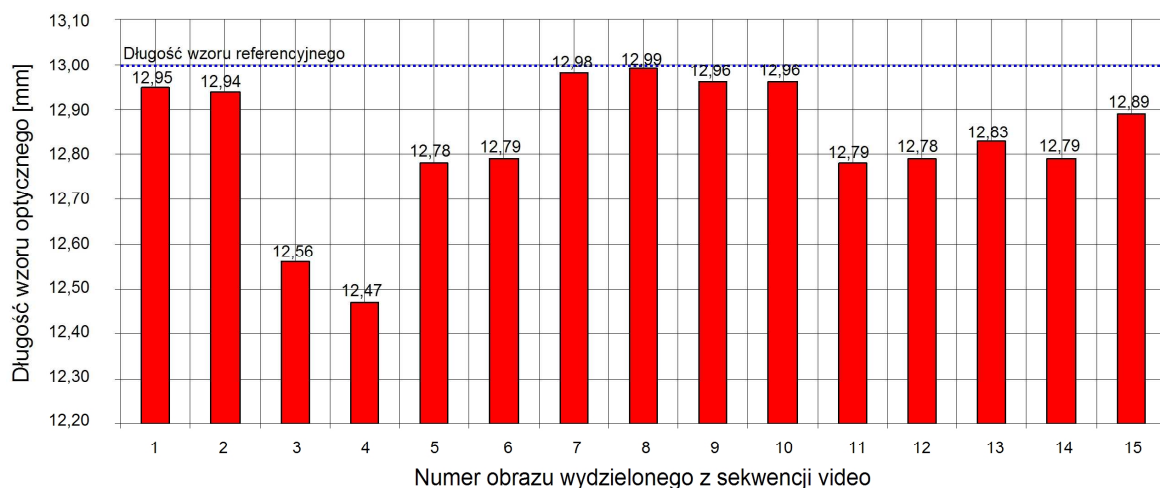
Drugim pomiarem w drugiej serii był pomiar struktury geometrycznej powierzchni prowadzony nietypowo, bo dla pojedynczej powierzchni. Początkowo próbki ustawiono w kolejności 1-9-10-2-8-6-3-5-7-4-11, a następnie wybrano do pomiaru jedną z nich. Ocenę przeprowadzono dla próbki nr 7, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabelicy 40 (143). Jak widać czas pomiaru był niewielki i wynosił dwadzieścia sekund. Pomimo tak krótkiego czasu uzyskane wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych pozostały na tym samym poziomie, co w poprzednio przeprowadzonych pomiarach. Świadczy to o podobnych wartościach parametru chropowatości powierzchni  $R_a$  oraz o podobnych właściwościach refleksyjnych ocenianych powierzchni wykańczanych przez polerowanie. Pomiary przeprowadzono podczas ruchu obrotowego badanej próbki.

### Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N (seria 2, pomiar 4)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	2	Mosiądz EN CW612N	Kolejność ustawienia próbek	1-4-8-7-2-5-10-11-6-9-3
			Rodzaj pomiaru	Kształt
Tryb pomiaru	Pomiar pojedynczy (4)			
Numer pomiaru	4		Rodzaj ruchu powierzchni	Ruch obrotowy
			Czas pomiaru	60 s



Rys. 105. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N podczas pomiar 4 w serii 2  
Fig. 105. Settings of sample set made made brass EN CW612N during measurement 4 in series 2



Rys. 106. Wykres zależności numeru obrazu wydzielonego z sekwencji video od długości wzoru optycznego światła strukturalnego w kształcie pojedynczej linii pionowej (wysokość wzoru referencyjnego wynosiła 13 mm) rzutowanego na powierzchnię próbki wykonanej z mosiądzu EN CW612N  
Fig. 106. The dependence of number of the image extracted from video sequence on the length of structured light pattern in a form of single vertical line (height of references pattern was 13 mm), which was projected on surface of sample made from brass EN CW612N

#### Analiza wyników pomiarów

Kolejnym pomiarem wykonywanym na próbkach mosiężnych w serii drugiej był pomiar kształtu. Ogólnie tego typu pomiary wykonywane są w celu oceny odchyłki kształtu (np. złego zamocowania przedmiotu obrotowego) lub detekcji zniekształceń i wad powierzchni. W niniejszym przypadku ocena sprowadzała się do określenia wartości odchyłki kształtu. Próbkę ustawiono w kolejności 1-4-8-7-2-5-10-11-6-9-3, a do pomiaru wybrano powierzchnię próbki nr 4. Powierzchnię oświetlano wzorem optycznym światła strukturalnego w formie pojedynczej linii pionowej o wysokości  $h = 13$  mm. Dla czasu pomiaru wynoszącego sześćdziesiąt sekund zarejestrowano sekwencje video o złożoną z tysiąca pięciuset piętnastu klatek. Z tej liczby wybrano do analizy piętnaście kolejnych klatek. Pomiar wysokości wzoru światła strukturalnego prowadzono w oprogramowaniu Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 106 (□144). Przerwywania linia koloru niebieskiego odpowiada długości referencyjnego wzoru optycznego, natomiast pionowe kolumny koloru czerwonego odpowiadają długości (wysokości) wzorów optycznych na obrazach wydzielonych z sekwencji video. Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że różnica wartości pomiędzy wzorem referencyjnym, a kolejnymi analizowanymi klatkami mieściła się w przedziale od 0,01 do 0,53 mm. Można, zatem powiedzieć, że dla takiej ilości analizowanych klatek wystąpiła odchyłka kształtu. Być może była ona spowodowana złym zamocowaniem próbek na trzpieniu lub złym zamocowaniem zestawu próbek w kłach wrzeciona zespołu napędowego ZN2 oraz konika.



## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N (seria 2, pomiar 5)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	2	Mosiądz EN CW612N	Kolejność ustawienia próbek	1-11-4-2-3-10-8-6-5-7-9
			Rodzaj pomiaru	SGP
Tryb pomiaru	Pomiar pojedynczy (4)			
Numer pomiaru	5		Rodzaj ruchu powierzchni	Ruch postępowo- obrotowy
			Czas pomiaru	20 s



Rys. 107. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N podczas pomiar 5 w serii 2  
Fig. 107. Settings of sample set made made brass EN CW612N during measurement 5 in series 2

Tab. 41. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z mosiądzu EN CW612N za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

Tab. 41. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from brass EN CW612N by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 505 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	35	22	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	234,09	113,98	110,56
	Długość obrazu [mm]	8,38	3,99	3,45
	Szerokość obrazu [mm]	5,19	2,68	2,41
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,24	0,21	0,23
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	215679	105989	102457
	Marginacja [j. umowna]	0,34	0,33	0,33

## Analiza wyników pomiarów

Ostatnim pomiarem przeprowadzonym w serii drugiej, był pomiar SGP dla pojedynczej próbki. Był on podobny do przedstawionego już wcześniej, różnił się jedynie zastosowanym rodzajem ruchu. W tym przypadku był to ruch postępowo-obrotowy. Podobnie jak wcześniej próbki ustawiono najpierw w kolejności 1-11-4-2-3-10-8-6-5-7-9, a następnie do pomiaru wybrano powierzchni próbki nr 4. Dla czasu pomiaru wynoszącego dwadzieścia sekund rejestrowano sekwencje video, z których po analizie w oprogramowaniu Image-Pro® Plus 5.1 uzyskiwano wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych. Wartości te podano w tabelicy 41 (□145). Inny rodzaj zastosowanego ruchu powierzchni nie miał zasadniczego wpływu na uzyskane wartości parametrów.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 (seria 3, pomiar 1)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	3	Żeliwo EN GJL 150	Kolejność ustawienia próbek	1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11
			Rodzaj pomiaru	SGP
Numer pomiaru	1		Tryb pomiaru	Pomiar pełny (1-2-3-4-5-6-7-8-9-10-11)
			Rodzaj ruchu powierzchni	Ruch postępowy
			Czas pomiaru	175 s

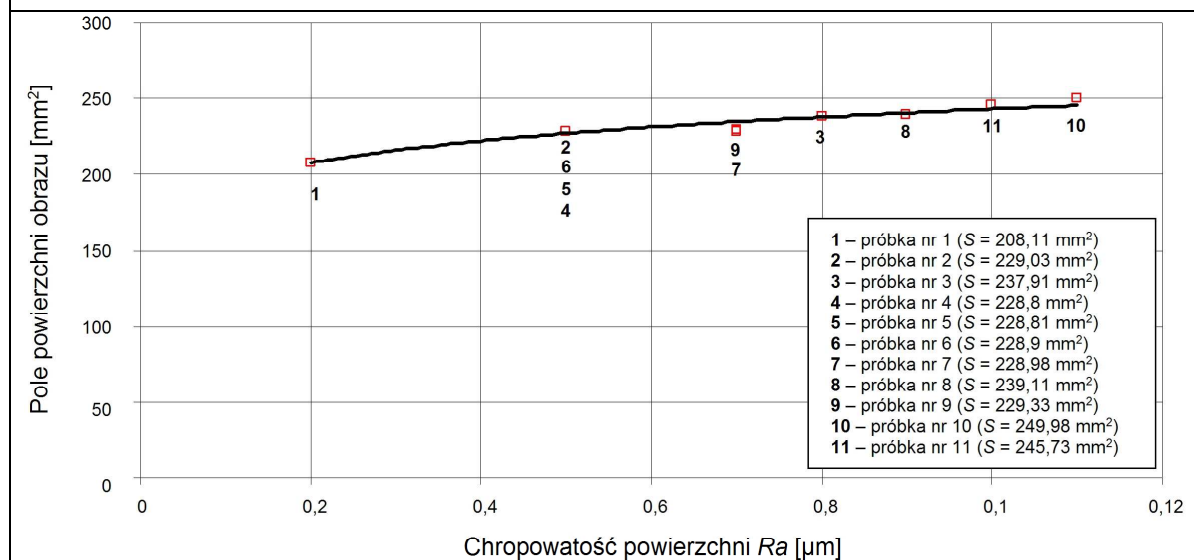


Rys. 108. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 podczas pomiar 1 w serii 3  
Fig. 108. Settings of sample set made made from cast iron EN GJL 150 during measurement 1 in series 3

Tab. 42. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

Tab. 42. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from gray cast iron EN GJL 150 by Image-Pro® Plus 5.1 software

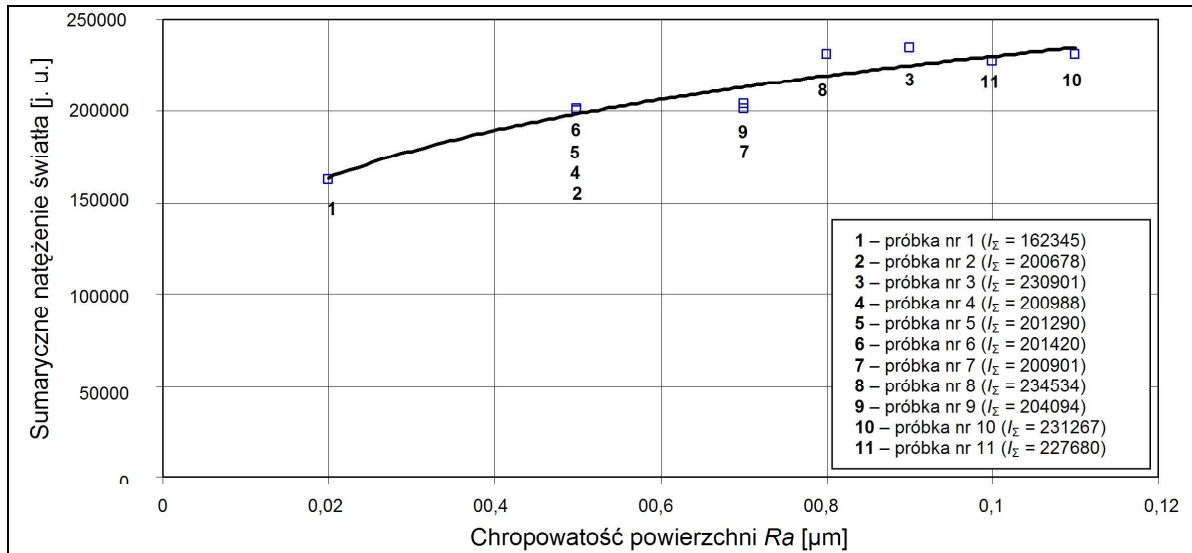
Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (uśredniona wartość z 11 pojedynczych obrazów)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 4420 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	40	28	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	232,24	112,98	109,39
	Długość obrazu [mm]	8,27	4,09	4,01
	Szerokość obrazu [mm]	5,32	3,41	3,34
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,21	0,23	0,24
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	208736	113463	103099
	Marginacja [j. umowna]	0,32	0,32	0,3



Rys. 109. Zależność pola powierzchni obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni  $R_a$  dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150

Fig. 109. The dependence of area of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness  $R_a$  for samples from gray cast iron EN GJL 150

(verte→)



Rys. 110. Zależność sumarycznego natężenia światła obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowanego statycznie od chropowatości powierzchni  $R_a$  dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150

Fig. 110. The dependence of IOD (Integrated Optical Density) of image of angular distribution of the scattered light intensity acquired in static conditions on the surface roughness  $R_a$  for samples made from gray cast iron EN GJL 150

#### Analiza wyników pomiarów

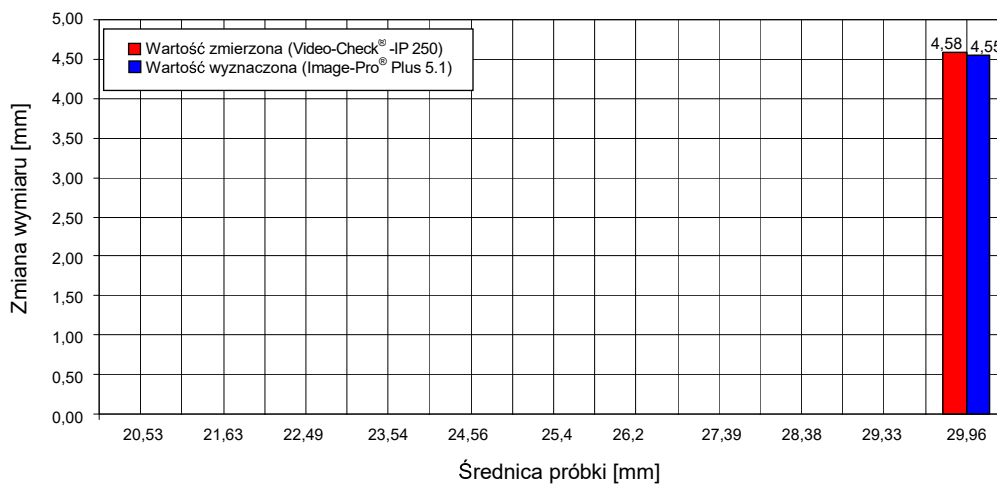
W trzeciej serii pomiarom poddano próbki wykonane z żeliwa EN GJL 150. W pomiarze nr 1 dokonano oceny struktury geometrycznej powierzchni, przy ustawieniach próbek w kolejności od najmniejszej średnicy do największej. Proces rejestracji obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego i ich analizy był taki sam, jak podczas poprzednio prezentowanych pomiarów. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych przedstawiono w tabelicy 42 (145). Nie odbiegły one od wartości uzyskanych już wcześniej dla próbek wykonanych z aluminium EN AW-6082 i mosiądzu EN CW612N. Było to wynikiem zastosowania tego samego procesu obróbki wykańczającej. Na wykresach pokazanych na rysunku 109 (146) i rysunku 110 (147) przedstawiono odpowiednio zależność pola powierzchni obrazu skatometrycznego od chropowatości powierzchni oraz sumarycznego natężenia światła od chropowatości powierzchni. Uzyskane charakterystyki w obu przypadkach miały tendencje wzrostowe. Wraz ze wzrostem chropowatości powierzchni wzrastał parametr geometryczny lub fotometryczny. Pomiar został dokonany przy ruchu postępowym, a jego czas wynosił sto siedemdziesiąt pięć sekund.

### Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 (seria 3, pomiar 3)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	3		Żeliwo EN GJL 150	Kolejność ustawienia próbek
Numer pomiaru	3	Rodzaj pomiaru		Wymiar
		Tryb pomiaru		Pomiar pojedynczy (11)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowo-obrotowy
		Czas pomiaru		20 s



Rys. 111. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 podczas pomiar 3 w serii 3  
Fig. 111. Settings of sample set made from cast iron EN GJL 150 during measurement 3 in series 3



Rys. 112. Wykres zależności zmiany wymiaru od średnicy próbki dla wartości zmierzonych (system pomiarowy Video-Check® -IP 250 firmy Werth) i wartości wyznaczonych (Image-Pro® Plus 5.1) dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150  
Fig. 112. The dependence of change of dimension on sample diameter for measured value (measurement system Video-Check® -IP 250 produced by Werth) and calculated value (Image-Pro® Plus 5.1) for samples made from gray cast iron EN GJL 150

#### Analiza wyników pomiarów

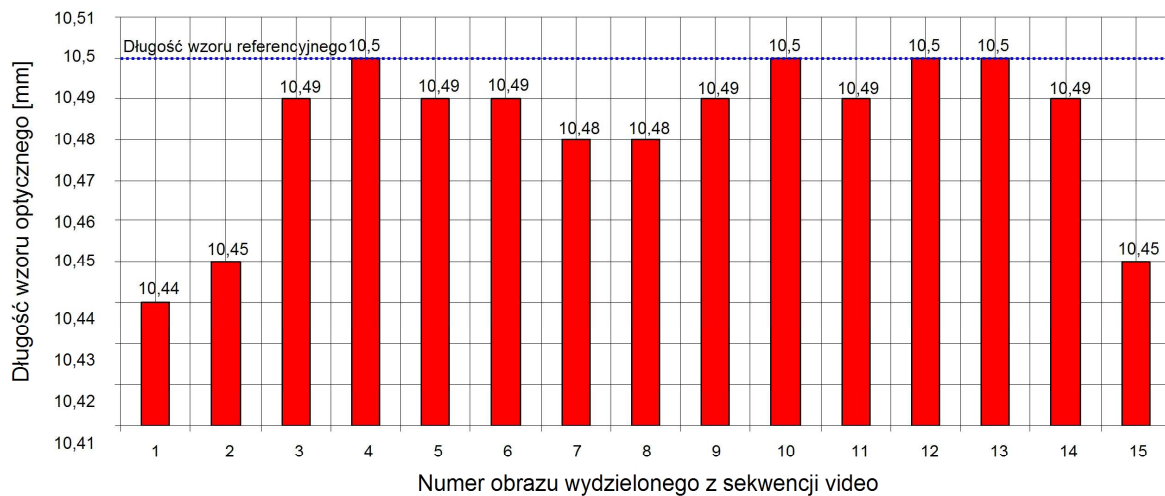
Pomiarem nr 3 w trzeciej serii badań był pomiar wymiaru, przeprowadzony nietypowo, bo jedynie dla pojedynczej próbki. Początkowo próbki ustawiono w kolejności 5-1-2-6-11-9-7-10-4-3-8, a następnie wybrano do pomiaru próbkę nr 11. Pomiaru dokonano przy ruchu postępowo-obrotowym w czasie dwudziestu sekund. Wartości zmiany wymiaru uzyskane dla pojedynczego pomiaru przedstawiono na rysunku 112 (□148). Wynika z nich, że błąd pomiaru wynosił jedynie 0,03 mm. Czy taki pojedynczy pomiar wymiaru ma znaczenie praktyczne i może być przeprowadzany w warunkach laboratoryjnych lub produkcyjnych? Wydaje się, że tak, choć może on dotyczyć tylko szczególnych przypadków np. pomiaru precyzyjnie wykonanych części maszyn o niewielkich wymiarach, wybranych fragmentów urządzeń oraz narzędzi o wysokiej jakości.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 (seria 3, pomiar 4)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	3		Żeliwo EN GJL 150	Kolejność ustawienia próbek
Numer pomiaru	4	Rodzaj pomiaru		Kształt
		Tryb pomiaru		Pomiar pojedynczy (2)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowy
		Czas pomiaru		20 s



Rys. 113. Ustawienie zestawu próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 podczas pomiar 4 w serii 3  
Fig. 113. Settings of sample set made from cast iron EN GJL 150 during measurement 4 in series 3



Rys. 114. Wykres zależności numeru obrazu wydzielonego z sekwencji video od długości wzoru optycznego światła strukturalnego w kształcie zbioru linii poziomych (długość wzoru referencyjnego wynosiła 10,5 mm), rzutowanego na powierzchnię próbki wykonanej z żeliwa EN GJL 150

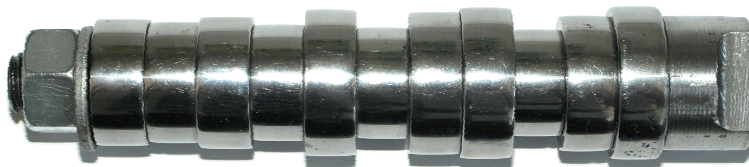
Fig. 114. The dependence of number of the image extracted from video sequence on the length of structured light pattern in a form of multiline (length of references pattern was 10,5 mm), which was projected on surface of samples made from gray cast iron EN GJL 150

## Analiza wyników pomiarów

Pojedynczy typ pomiaru zastosowano również przy ocenie kształtu powierzchni próbki wykonanej z żeliwa EN GJL 150 (seria 3, pomiar 4). Zestaw próbek ustawiono w kolejności 11-2-6-5-8-3-1-10-9-7-4, a następnie wybrano do pomiaru próbkę nr 2. Powierzchnię oświetlano wzorem optycznym światła strukturalnego w formie zbioru linii pionowych o wysokości  $h = 11$  mm. Podczas ruchu postępowego zarejestrowano dwudziestosekundową sekwencję video. Po rozdzieleniu materiału video na pojedyncze klatki, do analizy wybrano 15 klatek. Wyniki pomiarów długości (wysokości) wzorów optycznych (czerwone kolumny), względem długości obrazu referencyjnego (przerywana niebieska linia) przedstawiono na rysunku 114 (□149). Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów można stwierdzić, że największe odchyłki kształtu wystąpiły dla pierwszego, drugiego i piętnastego obrazu poddanego analizie. Błąd wynosił odpowiednio 0,06 mm, 0,05 mm i 0,05 mm. Mogło to wynikać z faktu przechodzenia w momencie rejestracji wzoru optycznego na kolejną powierzchnię próbki. Pozostałe wyniki cechuje mniejszy błąd, wynoszący od 0,01 do 0,02 mm. W tym przypadku można stwierdzić, że próbki zamocowane były poprawnie na trzpieniu.

## Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych ze stali EN C45 (seria 4, pomiar 2)

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	4		Stal EN C45	Kolejność ustawienia próbek
		Rodzaj pomiaru		SGP, wymiar
Numer pomiaru	2	Tryb pomiaru		Pomiar "od-do" (8-10-1-7-11)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch postępowy
		Czas pomiaru		80 s

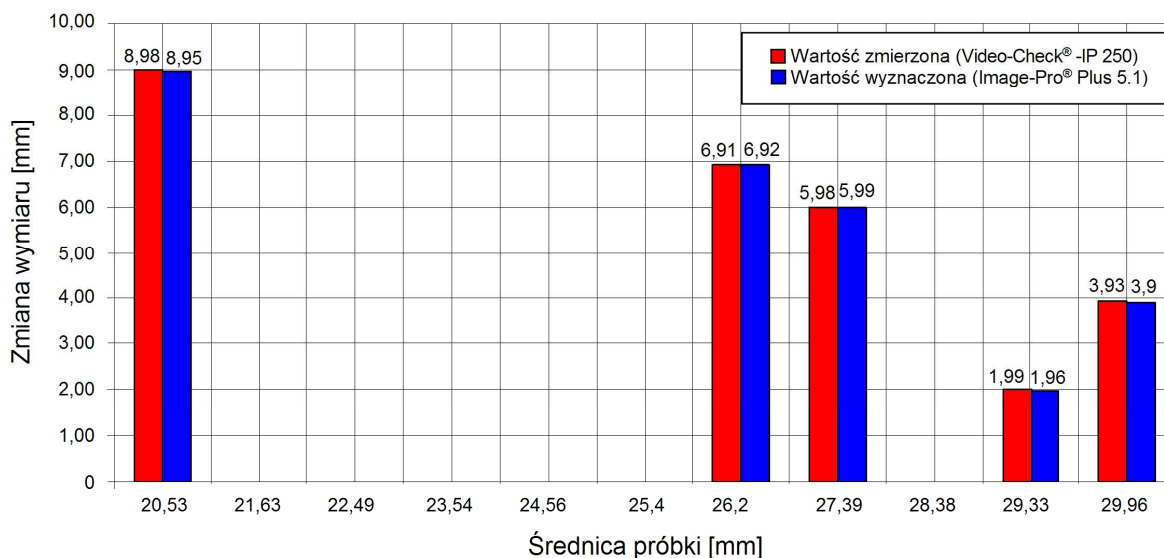


Rys. 115. Ustawienie zestawu próbek wykonanych ze stali EN C45 podczas pomiar 2 w serii 4  
Fig. 115. Settings of sample set made from steel EN C45 during measurement 2 in series 4

Tab. 43. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych ze stali EN C45 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

Tab. 43. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from steel EN C45 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (uśredniona wartość z 5 pojedynczych obrazów)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 2020 pojedynczych klatek)
–	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	46	16	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	220,35	118,77	111,27
	Długość obrazu [mm]	8,14	4,19	4,1
	Szerokość obrazu [mm]	4,99	3,25	3,08
Parametry fotometryczne	Jednorodności optyczna [j. umowna]	0,21	0,23	0,21
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	200695	115768	102167
	Marginacja [j. umowna]	0,31	0,3	0,3



Rys. 116. Wykres zależności zmiany wymiaru od średnicy próbki dla wartości zmierzonych (system pomiarowy Video-Check® -IP 250 firmy Werth) i wartości wyznaczonych (Image-Pro® Plus 5.1) dla próbek wykonanych ze stali EN C45

Fig. 116. The dependence of change of dimension on sample diameter for measured value (measurement system Video-Check® -IP 250 produced by Werth) and calculated value (Image-Pro® Plus 5.1) for samples made from steel EN C45

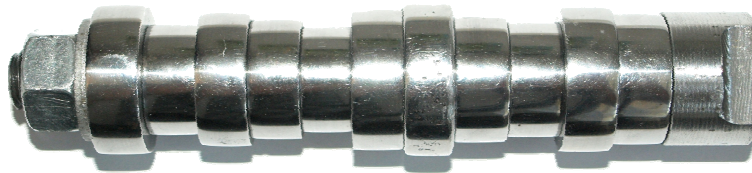
## Analiza wyników pomiarów

W ostatniej serii badań ocenie poddawano próbki wykonane ze stali EN C45. Pomiar nr 3 w tej serii był pomiar struktury geometrycznej powierzchni i wymiaru dla próbek ustawionych w kolejności 5-4-6-3-9-2-8-10-1-7-11. Pomiaru dokonywano w trybie „od-do”, dlatego do oceny wybrano tylko część próbek. Były one ustawione w kolejności 8-10-1-7-11. Czas pomiaru wynosił osiemdziesiąt sekund, przy ruchu postępowym. Wyniki pomiarów parametrów geometrycznych i fotometrycznych przedstawiono w tabelicy 43 (□150). Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że uzyskane wartości są zbliżone do uzyskanych wcześniej dla innych materiałów. Widoczne są duże wartości parametrów dla uśrednionych obrazów

statycznych i mniejsze o około pięćdziesiąt procent dla pojedynczej klatki wydzielonej z sekwencji video i obrazu wynikowego uzyskanego z oprogramowania RegiStax. Dla tej samej kolejności ustawienia próbek tzn. 8-10-1-7-11 dokonano oceny wymiaru. Jej wyniki zostały przedstawione na rysunku 116 (□150). Jak widać otrzymane wyniki, uzyskane za pomocą systemu Video-Check® -IP 250 oraz wyznaczone przez oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1, charakteryzują się dość niewielką różnicą wnoszącą od ±0,03 do ±0,01 mm.

**Rezultaty pomiarów dla próbek wykonanych ze stali EN C45 (seria 4, pomiar 3)**

Opis pomiaru		Materiał	Warunki pomiaru	
Numer serii pomiarów	4		Stal EN C45	Kolejność ustawienia próbek
		Rodzaj pomiaru		SGP
Numer pomiaru	3	Tryb pomiaru		Pomiar pojedynczy (11)
		Rodzaj ruchu powierzchni		Ruch obrotowy
		Czas pomiaru		20 s



Rys. 117. Ustawienie zestawu próbek wykonanych ze stali EN C45 podczas pomiar 3 w serii 4  
 Fig. 117. Settings of sample set made from steel EN C45 during measurement 3 in series 4

Tab. 44. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych ze stali EN C45 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 44. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from steel EN C45 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Grupa parametrów	Nazwa parametru	Obraz statyczny (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (pojedyncza klatka)	Obraz ruchomy (uśredniona wartość z 505 pojedynczych klatek)
-	Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	51	24	1
Parametry geometryczne	Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	231,08	111,38	109,18
	Długość obrazu [mm]	8,94	4,35	4,02
	Szerokość obrazu [mm]	5,67	3,32	3,03
Parametry fotometryczne	Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,26	0,24	0,23
	Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	229829	109899	100098
	Marginacja [j. umowna]	0,35	0,31	0,33

**Analiza wyników pomiarów**

Dla próbek wykonanych ze stali EN C45 przeprowadzono również pojedynczy pomiar struktury geometrycznej powierzchni. Zestaw próbek ustawiony był w kolejności 10-2-7-4-1-8-11-5-3-9-6. Do oceny SGP wybrano próbkę nr 11. Pomiar dokonywany był w czasie dwudziestu sekund, podczas którego próbka znajdowała się w ruchu obrotowym. Uzyskane wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych przedstawiono w tabelicy 44 (□150). Są one podobnie, jak w poprzednich przypadkach bardzo zbliżone.

Tab. 45. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek z aluminium EN AW-6082 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 45. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from aluminium EN AW-6082 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Parametr	Obraz statyczny – pojedyncze klatki											Obraz ruchomy – pojedyncza klatka	Obraz ruchomy – uśredniony obraz z 4419 klatek	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			Wartość średnia
Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	47	53	44	36	55	48	40	41	51	51	55	47	19	1
Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	498,56	356,87	300,32	298,23	229,57	241,34	238,11	235,47	209,33	216,66	271,08	281,41	136,23	134,78
Długość obrazu [mm]	14,2	12,34	11,25	10,91	8,44	8,54	8,51	8,49	7,55	7,66	8,89	9,7	6,78	6,05
Szerokość obrazu [mm]	11,27	9,51	8,03	7,65	5,22	5,31	5,3	5,29	4,22	4,66	6,44	6,62	4,95	4,71
Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,25	0,23	0,23	0,21	0,21	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,22	0,21	0,21	0,2
Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	509097	386678	335689	300988	201290	229820	220901	220721	189094	192007	249829	276010	134879	133189
Marginacja [j. umowna]	0,37	0,37	0,37	0,37	0,34	0,35	0,33	0,33	0,32	0,32	0,36	0,34	0,35	0,32



Tab. 46. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek z mosiądzu EN CW612N za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 46. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from brass EN CW612N by Image-Pro® Plus 5.1 software

Parametr	Obraz statyczny – pojedyncze klatki											Obraz ruchomy – pojedyncza klatka	Obraz ruchomy – uśredniony obraz z 4419 klatek	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			Wartość średnia
Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	41	43	37	35	45	41	42	42	37	43	52	41	28	1
Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	229,13	230,08	245,17	234,09	213,62	208,78	228,95	205,21	240,19	230,96	231,49	227,06	110,36	109,26
Długość obrazu [mm]	8,27	8,36	8,65	8,38	7,57	7,24	8,51	7,02	8,55	8,1	8,11	8,06	3,98	3,71
Szerokość obrazu [mm]	5,17	5,21	5,43	5,19	4,61	4,11	5,3	3,76	5,34	5,66	5,78	5,05	2,55	2,4
Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,21	0,23	0,24	0,24	0,2	0,22	0,23	0,21	0,23	0,25	0,2	0,22	0,2	0,2
Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	223671	225759	241236	215679	190982	174812	200901	150913	230120	202007	201238	205210	104359	100019
Marginacja [j. umowna]	0,3	0,31	0,34	0,34	0,34	0,36	0,38	0,32	0,34	0,32	0,34	0,33	0,34	0,33

Tab. 47. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych z żeliwa EN GJL 150 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 47. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from gray cast iron EN GJL 150 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Parametr	Obraz statyczny – pojedyncze klatki											Obraz ruchomy – pojedyncza klatka	Obraz ruchomy – uśredniony obraz z 4419 klatek	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			Wartość średnia
Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	30	33	45	39	50	34	46	49	41	37	35	40	28	1
Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	208,11	229,03	237,91	228,8	228,81	228,9	228,98	239,11	229,33	249,98	245,73	232,24	112,98	109,39
Długość obrazu [mm]	7,47	8,54	8,61	8,61	8,44	8,54	7,87	8,54	7,91	8,97	8,6	8,37	4,09	4,01
Szerokość obrazu [mm]	4,12	5,21	5,43	5,35	5,22	5,31	5,13	5,29	5,52	6,63	5,41	5,32	3,41	3,34
Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,2	0,2	0,19	0,22	0,2	0,25	0,22	0,21	0,19	0,23	0,24	0,21	0,23	0,24
Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	162345	200678	230901	200988	201290	201420	200901	234534	204094	231267	227680	208736	113463	103099
Marginacja [j. umowna]	0,3	0,31	0,34	0,3	0,3	0,31	0,36	0,32	0,31	0,35	0,33	0,32	0,32	0,3

Tab. 48. Wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych obrazów światła rozproszonego wyznaczone dla próbek wykonanych ze stali EN C45 za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1  
 Tab. 48. The values of geometric and photometric parameters for images of the scattered light calculated for samples made from steel EN C45 by Image-Pro® Plus 5.1 software

Parametr	Obraz statyczny – pojedyncze klatki											Obraz ruchomy – pojedyncza klatka	Obraz ruchomy – uśredniony obraz z 4419 klatek	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			Wartość średnia
Liczba rozpoznanych obiektów w obrazie	45	47	47	44	43	42	45	39	48	48	51	45	24	1
Pole powierzchni obrazu [mm <sup>2</sup> ]	229,91	208,87	208,32	208,23	208,57	208,34	213,47	208,4	208,31	218,91	231,08	213,85	111,38	109,18
Długość obrazu [mm]	8,38	7,34	7,25	7,2	7,24	7,21	7,58	7,29	7,25	8,54	8,94	7,65	4,35	4,02
Szerokość obrazu [mm]	5,27	4,1	4,03	4,15	4,12	4,15	4,59	4,19	4,12	5,23	5,67	4,55	3,32	3,03
Jednorodność optyczna [j. umowna]	0,21	0,25	0,27	0,25	0,23	0,26	0,21	0,21	0,22	0,2	0,26	0,23	0,24	0,23
Sumaryczne natężenie światła [j. umowna]	209980	170098	177451	170268	176534	178921	190091	172345	177564	201230	229829	186755	109899	100098
Marginacja [j. umowna]	0,31	0,32	0,34	0,39	0,32	0,33	0,3	0,31	0,37	0,3	0,35	0,33	0,31	0,33

## Podsumowanie wyników badań doświadczalnych

Przeprowadzone badania doświadczalne, których wybrane wyniki wraz z analizami przedstawiono powyżej, można podsumować następującymi wnioskami.

### OCENA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI (CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI)

- Stwierdzono, że największe wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych uzyskiwano dla obrazów światła rozproszonego rejestrowanych w sposób statyczny. Dla obrazów ruchomych wartości tych parametrów były średnio o 50% niższe.
- Zakres uzyskanych wartości parametrów geometrycznych dla badanych próbek był następujący:
  - dla obrazu statycznego (pole powierzchni obrazu od 220,35 do 281,41 mm<sup>2</sup>, długość obrazu od 8,14 do 9,7 mm, szerokość obrazu od 4,99 do 6,62 mm),
  - dla pojedynczej klatki obrazu ruchomego (pole powierzchni obrazu od 110,01 do 136,23 mm<sup>2</sup>, długość obrazu od 3,91 do 6,78 mm, szerokość obrazu od 2,49 do 4,95 mm),
  - dla obrazu wynikowego uzyskanego poprzez uśrednienie klatek z obrazu ruchomego (pole powierzchni obrazu od 109,18 do 134,78 mm<sup>2</sup>, długość obrazu od 3,45 do 6,05 mm, szerokość obrazu 3,03 do 4,71 mm).
- Zakres uzyskanych wartości parametrów fotometrycznych dla badanych próbek był następujący:
  - dla obrazu statycznego (sumaryczne natężenie światła od 200695 do 229829, jednorodność optyczna od 0,21 do 0,26, marginacja od 0,31 do 0,35 (wartości podawane w jednostkach umownych)),
  - dla pojedynczej klatki obrazu ruchomego (sumaryczne natężenie światła od 104317 do 134879, jednorodność optyczna od 0,2 do 0,24, marginacja od 0,3 do 0,35),
  - dla obrazu wynikowego uzyskanego poprzez uśrednienie klatek z obrazu ruchomego (sumaryczne natężenie światła od 100019 do 133189, jednorodność optyczna od 0,2 do 0,24, marginacja od 0,3 do 0,34).
- Dla dwóch parametrów fotometrycznych – jednorodności optycznej i marginacji zaobserwowano niewielkie zmiany wartości, pomimo oceny dokonywanej dla różnych materiałów próbek i różnych ich ustawień. Zakresy zmian dla trzech rodzajów analizowanych obrazów były następujące:
  - jednorodność optyczna od 0,01 do 0,03 (wartości podawane w jednostkach umownych),
  - marginacja od 0,01 do 0,04.
- Wybrane parametry geometryczne (pole powierzchni obrazu światła rozproszonego) i fotometryczne (sumaryczne natężenie światła jasnych obszarów obrazu światła rozproszonego) korelowano z parametrem chropowatości powierzchni  $R_a$ . Uzyskane zależności w postaci wykresów miały charakter wzrostowy, co oznaczało, że wraz ze wzrostem wartości chropowatości powierzchni wzrastały wartości ww. parametrów.
- Ocena SGP, prowadzona za pomocą wykorzystywanego stanowiska badawczego, może być przeprowadzana dla powierzchni elementów o niskiej chropowatości powierzchni opisanej parametrem  $R_a$  w zakresie od 0,02  $\mu\text{m}$  do 1  $\mu\text{m}$ . Tego typu powierzchniami mogą być precyzyjne obrobione, m.in. przez polerowanie, części maszyn, urządzeń i aparatury pomiarowej.

### OCENA WYMIARU

- Ocena wymiaru w zakresie 20,5 ÷ 30 ±0,2 mm prowadzona za pomocą metody śledzenia obiektów, wykazała dużą użyteczność takiej formy kontroli. Do zalet metody można zaliczyć: łatwy i wygodny sposób konfiguracji komend w makroinstrukcji *SpotTracking* wykorzystywanej w procesie śledzenia, szeroki wybór opcji śledzenia, krótki czas przetwarzania sekwencji video, dobry sposób wizualizacji wyników pomiarów.
- Stwierdzono, że błąd metody był niewielki rzędu 1 – 1,3%. Różnica w wartościach zmiany wymiaru (uzyskanych za pomocą systemu Video-Check<sup>®</sup> -IP 250 i wyznaczonych przez oprogramowanie Image-Pro<sup>®</sup> Plus 5.1) była niewielka i mieściła się w zakresie od ±0,01 do ±0,03 mm.

### ANALIZA KSZTAŁTU

- Zastosowana metoda oceny kształtu polegająca na prostej analizie geometrycznej charakteryzowała się niewielkim błędem pomiaru wynoszący do 0,01 do 0,5 mm.
- Z kilku typów zastosowanych wzorów optycznych najlepsze wyniki osiągnęto dla wzorów zawierających struktury pionowe (pojedyncza linia, zbiór linii). Taki dobór kształtów wzorów podyktowany był m.in. ich odpowiednimi wymiarami na badanej powierzchni oraz znacznie lepszą detekcją zniekształceń i wad powierzchni niż innego typu wzory (np. o składowych poziomych).

# 6

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

---



Analiza literatury z zakresu tematu niniejszej pracy pozwoliła na sformułowanie hipotezy badawczej dotyczącej jednoczesnej aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni oraz wymiaru i kształtu przedmiotu obrabianego znajdującego się w ruchu. Dotychczas rozwiązanie problemu aktywnej kontroli wielu parametrów jednocześnie (np. chropowatości powierzchni, wymiaru, kształtu) nie zostało przedstawione w sposób zadowalający. Zaproponowana w pracy zintegrowana metoda optyczna łącząca metody triangulacji i skaterometrii laserowej z technikami nakładania obrazów i śledzenia obiektów w obrazach ruchomych może stanowić jedno z rozwiązań tego problemu.

Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na stwierdzenie, iż wybrane metody optyczne oraz techniki przetwarzania i analizy obrazu mogą być wykorzystane w opracowanej zintegrowanej metodzie służącej do jednoczesnej aktywnej kontroli SGP, wymiaru i kształtu. W ramach badań wstępnych sprawdzono metodę triangulacji laserowej (ocena wymiaru), metodę światła strukturalnego wykorzystującą projekcję wzorów optycznych (ocena kształtu) oraz metodę skaterometrii laserowej (ocena nierówności powierzchni). Wymienione metody testowano przy różnych ustawieniach i konfiguracji aparatury pomiarowej, przeprowadzając ocenę na powierzchniach wykonanych z różnych materiałów i obrobionych różnymi technikami obróbkowymi. Sprawdzono także możliwość wykorzystania metod przetwarzania i analizy obrazu, jako technik wspomagających optyczne metody pomiarowe. Z grupy tych metod analizowano metodę śledzenia obiektów (ocena wymiaru) oraz metodę nakładania obrazów (ocena nierówności powierzchni).

Pozytywne wyniki uzyskane podczas badań wstępnych stanowiły podstawę do prowadzenia dalszych prac. Badania właściwe wiążące się z opracowaniem zintegrowanej metody optycznej, zaprojektowaniem i zbudowaniem stanowiska pomiarowego oraz przeprowadzeniem pomiarów SGP i wymiaru zakończyły się również pozytywnie. Wszystkie uzyskane w pracy wyniki potwierdzają postawioną hipotezę badawczą i przemawiają za jej uznaniem. Wykazują one, że odpowiednio dobrana grupa metod optycznych oraz technik przetwarzania i analizy obrazu pozwala na jednoczesną ocenę SGP i wymiaru w sposób aktywny podczas ruchu badanego przedmiotu.

## 6.1. Wnioski poznawcze

Realizacja wytyczonego zakresu prac pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków o charakterze poznawczym:

- Możliwa jest integracja wybranych metod optycznych z grupy metod triangulacyjnych oraz rozpraszania światła z technikami przetwarzania i analizy obrazów w celu jednoczesnej oceny SGP i wymiaru przedmiotu obrabianego będącego w ruchu.
- Opracowana zintegrowana metoda optyczna wykazuje się dużą uniwersalnością. Oznacza to, iż po pewnej modyfikacji może być wykorzystana również w innych zastosowaniach. Możliwa jest także jej implementacja w urządzeniach pomiarowych (optoelektroniczne głowice pomiarowe) przeznaczonych do aktywnej kontroli prowadzonej w warunkach przemysłowych.
- Zaproponowany sposób przetwarzania sygnału optycznego wykorzystujący techniki przetwarzania i analizy obrazu jest bardziej zaawansowany od typowych sposobów stosowanych w niektórych rozwiązaniach komercyjnych. Pozwala on nie tylko na uzyskanie ilościowych charakterystyk sygnału optycznego, ale także umożliwia na ich podstawie ocenę wymiaru i kształtu powierzchni przedmiotu oraz daje możliwość skorelowania tych charakterystyk z wybranymi parametrami chropowatości powierzchni. Na podstawie zarejestrowanego obrazu można również dokonywać wielokryterialnych ocen i analiz szeregu innych dodatkowych informacji o badanej powierzchni wraz z ich odpowiednią wizualizacją. Dzięki temu interpretacja otrzymanych wyników może być bardziej poprawna i pełna.
- Prowadzenie pomiarów wymaga odpowiedniej konfiguracji stanowiska pomiarowego i kalibracji jego elementów optoelektronicznych. Stwierdzono, iż najlepszym rozwiązaniem dla pomiaru SGP jest prostopadłe oświetlenie powierzchni i prostopadła detekcja rozproszonej wiązki światła laserowego. Taki sposób oświetlenia przedmiotu i rejestracji światła rozproszonego pozwala na uniknięcie niekorzystnych zjawisk towarzyszących rozpraszaniu światła przez powierzchnie nierówne w postaci samozacienień i odbić wielokrotnych.

## 6.2. Wnioski użytkowe (praktyczne)

Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków o charakterze użytkowych:

- Implementacja zintegrowanej metody optycznej w stanowisku pomiarowym wykorzystywanym w niniejszej pracy może stanowić punkt wyjścia do konstrukcji bardziej zaawansowanego systemu pomiarowego. Docelowo może być to małogabarytowa optoelektroniczna głowica pomiarowa z systemem komputerowym podobna pod względem konstrukcyjnym do istniejących obecnie rozwiązań komercyjnych.
- Zintegrowana metoda optyczna może być stosowana do oceny precyzyjnych elementów maszynowych o niskiej chropowatości powierzchni opisanej parametrem  $Ra$  w zakresie od  $0,02 \mu\text{m}$  do  $1 \mu\text{m}$ .

## 6.3. Wnioski dotyczące dalszych badań

Pozytywne wyniki przeprowadzonych badań przedstawionych w niniejszej pracy skłaniają do kontynuowania prac z tego zakresu. Przewidywane dalsze kierunki badań to:

- Sprawdzenie innych sposobów i algorytmów przetwarzania i analizy obrazów ruchomych.
- Przeanalizowanie możliwości wykorzystania innych niż stosowane wzorów światła strukturalnego generowanych przez optyczne elementy dyfrakcyjne do oceny kształtu powierzchni.
- Poszerzenie zakresu pomiarowego chropowatości powierzchni.
- Udoskonalenie systemu akwizycji obrazu. Zastosowanie kamer TV z detektorami matrycowymi CCD o większej czułości i rozdzielczości rejestrowanego obrazu.
- Wykorzystanie jako źródła lasera półprzewodnikowego o innej długości fali światła  $\lambda$  lub diody elektroluminescencyjnej.
- Rozpoczęcie prac projektowych nad konstrukcją optoelektronicznej głowicy pomiarowej (wykorzystując oprogramowanie CAD/CAM/CAE).



# 7

BIBLIOGRAFIA

---



## BIBLIOGRAFIA

- [ABI1999] ABIDI B. R., SARI-SARRAF H., GODDART Jr. J. S., HUNT M. A.: Facet Model and Mathematical Morphology for Surface Characterization. Proceedings of the SPIE Conference on Intelligent Robots and Computer Vision XVIII: Algorithms, Techniques, and Active Vision, Vol. **3837**, 1999, □334–344.
- [ADA2008] ADAMCZAK S.: Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu, falistość i chropowatość. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [AND2006] ANDERSEN M., de BOER J.: Goniophotometry and Assessment of Bidirectional Photometric Properties of Complex Fenestration Systems. Energy and Buildings, Vol. **38**, 2006, □836–848.
- [ANG2001] ANGELSKY O. V., MAKSIMYAK P. P., REED S., RYUKHTIN V. V.: Optical Control of Monocrystalline Films. Optical Engineering, Vol. **40**, No. 10, 2001, □2227–2233.
- [BAU1997] BAUMGART J. W., TRUCKENBRODT H.: Testing of Turned Surfaces. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Göteborg, Sweden, 1997.
- [BAU1998] BAUMGART J. W., TRUCKENBRODT H.: Scatterometry of Honed Surfaces. Optical Engineering, Vol. **37**, No. 5, 1998, □1435–1441.
- [BEC1963] BECKMANN P., SPIZZICHINO A.: The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces. Pergamon Press, Oxford, 1963.
- [BEC1967] BECKMANN P.: Scattering of Light by Rough Surfaces. Progress in Optics, **VI**, [WOLF E. Ed.], North-Holland, Amsterdam, 1967, □53–69.
- [BEN1996] BENAYARD-CHERIF F., WOLFSON W.: Optical Sensor Inspects Parts with 3-D Imaging. Laser Focus World, Vol. **32**, No. 11, 1996, □225–230. [online] [http://www.laserfocusworld.com/display\\_article/29666/12/none/none/Dept/Optical-sensor-inspects-parts-with-3-D-imaging](http://www.laserfocusworld.com/display_article/29666/12/none/none/Dept/Optical-sensor-inspects-parts-with-3-D-imaging)
- [BEN1961] BENNETT H. E., PORTEUS J. O.: Relation Between Surface Roughness and Specular Reflectance at Normal Incidence. Journal of the Optical Society of America, Vol. **51**, No. 2, 1961, □123–129.
- [BEN1989] BENNETT J. M., MATTSSON L.: Introduction to Surface Roughness and Scattering. Optical Society of America, Washington, D. C., 1989.
- [BER1995] BERTANI D., CETICA M., MELOZZI M., PEZATTI L.: High-Resolution Optical Topography Applied to Ancient Painting Diagnostics. Optical Engineering, Vol. **34**, No. 4, 1995, □1219–1225.
- [BER2004] BERREVOETS C.: Processing Webcam Images with RegiStax. Sky & Telescope, Vol. **107**, No. 4, 2004, □130–135.
- [BHA2009] BHANDARKAR S. M., LUO X.: Integrated Detection and Tracking of Multiple Faces using Particle Filtering and Optical Flow-Based Elastic Matching. Computer Vision and Image Understanding, Vol. **113**, 2009, □708–725.
- [BIE2001] BIELECKI Z., ROGALSKI A.: Detekcja sygnałów optycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2001.
- [BIE2009] BIESZCZAD G., SOSNOWSKI T., ORŻANOWSKI T., KASTEK M.: Metoda śledzenia obiektów w obrazach termowizyjnych z procedurą adaptacyjnego aktualizowania modelu obiektu. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Vol. **55**, Nr 5, 2009, □292–296.
- [BIL1980] BIL T., KARPIŃSKI T., KLIM M., ŁUKIANOWICZ Cz., ŁUKIANOWICZ T.: Urządzenie do pomiaru oceny struktury geometrycznej powierzchni płaskich. Mechanik, Nr **12**, 1980, □680–681.
- [BJU1997] BJUGGREN M., KRUMMENACHER L., MATTSSON L.: Characterization of Engineering Surfaces by Infrared Scattering. Optical Engineering, Vol. **36**, No. 3, 1997, □874–882.
- [BLA2002] BLACK J., ELLIS T. J.: Multi Camera Image Measurement and Correspondence. Measurement, Vol. **32**, 2002, □61–71.
- [BLA2006] BLACK J., ELLIS T. J.: Multi Camera Image Tracking. Image and Vision Computing, Vol. **24**, 2006, □1256–1267.

- [BLA2004] BLAIS F.: Review of 20 Years of Range Sensor Development. *Journal of Electronic Imaging*, Vol. **13**, No. 1, 2004, □231–240.
- [BLE1988] BLESSING G. V., EITZEN D. G.: Surface Roughness Sensed by Ultrasound. *Proceedings of Conference “Metrology and Properties of Engineering Surfaces”* [STOUT K. J., VORBURGER K. J. Eds.]. Kogan Page, London, 1988, □143–157.
- [BLU2006] BLUNT R. T.: White Light Interferometry – A Production Worthy Technique for Measuring Surface Roughness on Semiconductor Wafers. *Proceedings of the CS MANTECH Conference*, 2006, British Columbia, Canada, □59–62.
- [BOH2001] BOHDANOWICZ J.: Dyfrakcyjne elementy optyczne. *Systemy alarmowe*, Nr **3**, 2001, □17–26.
- [BOV2000] BOVIK A. C.: *Handbook of Image and Video Processing (Communications, Networking and Multimedia)*. Academic Press, London, 2000.
- [BOY1970] BOYLE W. S., SMITH G. E.: Charge Coupled Semiconductor Devices. *Bell System Technical Journal*, April, 1970, □587.
- [BRA2000] BRADLEY C.: Automated Surface Roughness Measurement. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. **16**, 2000, □668–674.
- [BRO1983] BRODMANN R., HUEBNER G., RAU N., STAIGER W.: Surface Quality Inspection in Rocker Arm Manufacturing Using an Optical Roughness Measuring Device. *Institute of Industrial Production Engineering*, Vol. **7**, No. 3, 1983, □126–128.
- [BRO1984-1] BRODMANN R.: Optical Measurement of Surface Roughness in Manufacturing. *Automobiltech Z*, Vol. **86**, No. 11, 1984, □521–525.
- [BRO1984-2] BRODMANN R., RODENSTOCK R., GAST G., GERSTORFER O., THURN G.: An Optical Instrument for Measuring Surface Roughness in Production Control. *Annals of the CIRP*, Vol. **33**, No. 1, 1984.
- [BRO1984-3] BRODMANN R., GERSTORFER O., PAISDZIOR H.: Optische Rauheitsmessung in der Praxis. *Werkstatt und Betrieb*, Vol. **117**, No. 11, 1984, □669–672.
- [BRO1985] BRODMANN R., GERSTORFER O., THURN G.: Optical Roughness Measuring Instrument for Fine Machined Surfaces. *Optical Engineering*, Vol. **24**, No. 3, 1985, □408–413.
- [BRO1986-1] BRODMANN R.: Roughness Form and Waviness Measurement by Means of Light Scattering. *Precession Engineering*, Vol. **8**, No. 4, 1986, □221–226.
- [BRO1986-2] BRODMANN R., THURN G.: Roughness Measurement of Ground, Turned and Shot-Peened Surfaces by the Light Scattering Method. *Wear* Vol. **109**, No. 3, 1986, □1–13.
- [BRO1986-3] BRODMANN R., PAISDZIOR H., RAU H., HUEBNER G.: Rauheit und Welligkeit feinbearbeiteter Oberflächen optisch messen. *Werkstatt und Betrieb*, Vol. **119**, No. 10, 1986, □849–852.
- [CHA1993-1] CHABROS W., STAROŃSKI L. R.: Scatterometer and Scatteroscope for Testing Optical Surfaces. *Proceedings SPIE* Vol. **1991**, 1993, □163–172.
- [CHA1993-2] CHABROS W., STAROŃSKI L. R.: Skaterometria nierówności powierzchni. *Biuletyn Informacyjny Optyka* Nr **1-2**, Instytut Optyki Stosowanej, Warszawa, 1993, □9–24.
- [CHA1996] CHABROS W.: *Skateroskop – zasada działania, budowa, obsługa*. Instytut Optyki Stosowanej, Warszawa, 1996.
- [CHE2000] CHEN F., BROWN G. W., SONG M.: Overview of Three-Dimensional Shape Measurement Using Optical Methods. *Optical Engineering*, Vol. **39**, No. 1, 2000, □10–22.
- [CHI2001] CHINH K. L.: Least Squares Multi-Point Matching for DEM with Consideration of Correlated Neighbouring Pixels and Terrain Height Differences. *Geodezja i Kartografia*, Nr **50**, 2001, Z. 1, □45–56.
- [CHI2007] CHIOU Y-C., LEE R-T., YAU C-L. : A Novel Method of Composite Electroplating on Lap in Lapping Process. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. **47**, 2007, □361–367
- [CHK1998] CHKHALO N. I., KIRPOTIN A. N., KRUGLAYAKOV E. P., SEMENOV E. P.: Reflectometer for Precision Tests of Optical Components in the Ultrasoft X-Ray Range. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, Vol. **405**, 1998, □393–395.

- [CIE1988] CIELO P.: Optical Techniques for Industrial Inspection. Academic Press, Inc., London, 1988.
- [CLO1998] CLOUD G.: Optical Methods of Engineering Analysis. Cambridge University Press, 1998.
- [COK1995] COKER S. A., SHIN Y. C.: In-Process Control of Surface Roughness with Tool Wear via Ultrasonic Sensing. Proceedings of the American Control Conference, Vol. **3**, 1995, □1717–1721.
- [COK1996] COKER S. A., SHIN Y. C.: In-Process Control of Surface Roughness Due to Tool Wear Using a New Ultrasonic System. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. **36**, No. 3, 1996, □411–422.
- [COU1996] COULOMB J. M., BRUSQUE C.: Surface Reflection Properties – The LCPC Gonio-Reflectometer – Performance and Survey Possibilities. Bull Lab Ponts et Chaussées, Vol. **204**, 1996, □25–35.
- [CUR1995] CURLESS B., LEVOY M.: Better Optical Triangulation Through Spacetime Analysis. Proceedings of the 5<sup>th</sup> IEEE Conference on Computer Vision "ICCV 1995", 1995, □987-994.
- [DAN2001] DANA K. J.: BRDF/BTF Measurement Device. Proceeding of 8<sup>th</sup> IEEE International Conference on Computer Vision "ICCV 2001", Vol. **2**, 2001, □460–466. [online] <http://www.ece.rutgers.edu/~kdana/research/iccv01.pdf>
- [DAV1954] DAVIES H.: The Reflection of Electromagnetic Waves from a Rough Surface. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, Vol. **101**, Part IV, 1954, □201–214.
- [DAV2002] DAVIDSON D. A.: Microfinishing and Surface Textures. Metal Finishing, Vol. **10**, No. 7, 2002, □10–12.
- [DES1996] DESCOUR R. M., HARDING K. G., SVETKOFF D. J.: Three-Dimensional and Unconventional Imaging for Industrial Inspection and Metrology. Proceedings SPIE, Vol. **2599**, 1996, □206–216.
- [DEU1973] DEUTSCHKE S. I., WU S. M., STRALKOWSKI C. M.: A New Irregular Surface Measuring System. International Journal of Machine Tools Design and Research, Vol. **13**, 1973, □29–42.
- [DEU1978] DEUTSCHKE W., EISSLER W.: A New Sensor for Measuring the Surface Roughness In-Process on a Grinding Machine. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Conference on Automated Inspection & Product Control, Nottingham, UK, 1978, □19–30.
- [DIG2003] Di GIROLAMO L.: Generalizing the Definition of the Bi-Directional Reflectance Distribution Function. Remote Sensing of Environment, Vol. **88**, 2003, □479–482.
- [DIN2002] DING J., XU L.: Light Scattering Characteristics of Small Ice Circular Cylinders in Visible, 1.38  $\mu\text{m}$ , and Some Infrared Wavelengths. Optical Engineering, Vol. **41**, No. 9, 2002, □2252–2266.
- [DJO1997] DJORDJEVIC B. B., GREEN Jr. R. E.: Non-Contact Ultrasonic Techniques for Process Control of Composite Fabrication. Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics, Vol. **2** No. 11, 1997. [online] <http://www.ndt.net/article/aero1197/green/green.htm>
- [DOB1984] DOBOSZ M.: Optyczne metody pomiaru chropowatości – metody rozpraszania światła. Mechanik, Nr **10**, 1984, □529–532.
- [DOE2003] DOEBELIN E. O.: Measurement Systems: Application and Design. McGraw Hill, New York, 2003.
- [DUP2007] DUPAREÉ A.: Light Scattering Techniques for the Inspection of Microcomponents and Microstructures [in] Optical Inspection of Microsystems (OSTEN W. Ed.), CRC Press, New York, 2007.
- [EDE1972-1] EDENHOLM B., WESTBERG J.: Glansmätning – I. En metod för att bestämma ytenskaper. Verkstäderna Vol. **68**, No. 2, 1972, □87–91.
- [EDE1972-2] EDENHOLM B., WESTBERG J.: Glansmätning – II. En metod för att bestämma ytenskaper. Verkstäderna Vol. **68**, No. 3, 1972, □123–125.
- [ERS2007] ERSOY O. K.: Diffraction, Fourier Optics and Imaging, (Wiley series in Pure and Applied Optics, SALEH B. E. A. Ed.), John Willey & Sons, Inc., New York, 2007.

- [FAN1991] FAN K. C., CHAO Y. H.: In-process Dimensional Control of the Workpiece During Turning. *Precision Engineering*, Vol. **13**, 1991, □27.
- [FIG2003] FIGUEROA J. F., EVERETT H. R.: Distance Measuring and Proximity Sensors [in] *The Mechatronics Handbook* (BISHOP R. H. Ed.). CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [FON2000] FONTANI D., FRANCINI F., LONGOBARDI G., SANSONI P.: Optical Control of Surface Finish. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. **32**, 2000, □459–472.
- [FON2001] FONTANI D., FRANCINI F., LONGOBARDI G., SANSONI P.: Control of Crankshaft Finish by Scattering Technique. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. **35**, 2001, □387–396.
- [FRA2000] FRANKOWSKI G., REIßNER H.: Fast Optical Measurements of Motor Cylinder Combustion Chamber Volume with Digital Stripe Projection Based on Micromirrors. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej*, Nr **53**, Z. 33, 2000, □61–69.
- [FUR2003] FURUTANI K., HIEU N. T., OHGURO N., NAKAMURA T.: Automatic Compensation for Grinding Wheel Wear by Pressure based In-Process Measurement in Wet Grinding. *Precision Engineering*, Vol. **27**, 2003, □9–13.
- [GAB1988-1] GABRINI J. L., ALBRECHT J.: Surface Profilometry Based on Fringe Capacitance Measurements. *Transactions of ASME* 192, Vol. **107**, 1988 □192–200.
- [GAB1988-2] GABRINI J., JORGENSEN J.E., DOWNS R.A., KOH S-P.: Fringe-Field Capacitive Profilometry. *Surface Topography*, Vol. **1**, 1988, □99–110.
- [GAB1992] GABRINI J., KOH S-P., JORGENSEN J. E., RAMULU M.: Surface Profile Measurement During Turning Using Fringe-Field Capacitive Profilometry. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. **14**, No. 2, 1992, □234–243.
- [GAL2000] GALINSKI G., SKARBEK W.: Śledzenie ruchu obiektów przy użyciu transformacji RSVD i algorytmu OJA-RLS. *Materiały konferencyjne Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej Systemy i Technologie w Multimedialnej Telekomunikacji STM 2000*, Łódź, 2000, □173–180.
- [GER2005] GERMAN A., JENKIN M.R., LESPERANCE Y.: Entropy-Based Image Merging. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Canadian Conference on Computer and Robot Vision "CRV'05"*, 2005, □81–86. [online] <http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/CRV.2005.38>
- [GIE2006] GIESKO T.: Wykrywanie wycieków cieczy z wykorzystaniem triangulacji laserowej. *Problemy Eksploatacji*, Nr **2**, 2006, □91–97.
- [GON1995] GONZÁLEZ F., SAIZ J. M., VALLE P. J., MORENO F.: Scattering from Particulate Metallic Surfaces: Effect of Surface Particle Density. *Optical Engineering*, Vol. **34**, No. 4, 1995, □1200–1207.
- [GON2002] GONZALES R. C., WOODS R. E.: *Digital Image Processing (2<sup>nd</sup> Edition)*. Prentice Hall, 2002.
- [GRA2009] GRANDY D., KOSHY P., KLOCKE F.: Pneumatic Non-Contact Roughness Assessment of Moving Surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. **58**, 2009, □515–518.
- [GRA1952] GRANEK M., WUNSCH H. L.: Application of Pneumatic Gauging to the Measurement of Surface Finish. *Machinery*, Vol. **81**, 1952, □701–707.
- [GRE2004] GREBE W.: Up to the New Horizons. *Inspect*, Vol. **2**, 2004, □54–55.
- [GUT2003] GUT P., CHMIELEWSKI L., KUKOŁOWICZ P.F., DĄBROWSKI A.: Nakładanie obrazów – precyzyjna ocena jakości radioterapii bez określania odpowiedniości punktów na obrazie symulacyjnym i portalowym. *Materiały IV Symposium Naukowego Techniki Przetwarzania Obrazu "TPO 2003" – Referaty i komunikaty*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2003, □154–161.
- [HAM1979] HAMOUDA A. M.: A Precise Pneumatic Co-axial Jet Gauging System for Surface Roughness Measurements. *Precision Engineering*, Vol. **1**, 1979, □95–100.
- [HAN2003] HANE K., SASAKI M.: Optical Sensors and Their Applications [in] *Opto-Mechatronic System Handbook: Techniques and Applications* (CHO H. Ed.). CRC Press, Boca Raton, 2003.
- [HAN2007] HANSMANN S.: Lasers and Coherent Light Sources: Semiconductor Lasers [in] *Springer Handbook of Lasers and Optics* (TRÄGER F. Ed.). Springer, New York, 2007.

- [HAR2007] HARIHARAN P.: Basics of Interferometry (2<sup>nd</sup> Edition). Academic Press, London, 2007.
- [HAS1995-1] HASSEBROOK L., DALEY R. C.: Structured Light Illumination Technique (SLIT). Department of Electrical Engineering, University of Kentucky, EE Technical Report, CSP-95-005, **95**(5), 1995.
- [HAS1995-2] HASSEBROOK L., DALEY R. C.: Structured Light Illumination Technique (SLIT). Department of Electrical Engineering, University of Kentucky. [online] <http://www.engr.uky.edu/~lgh/3dDA/machine1995.htm>
- [HAT2008] HATHI N.P., JANSEN R. A., WINDHORST R. A., COHEN S. H., KEEL W. C., CORBIN M. R., RYAN JR. R. E.: Surface Brightness Profiles of Composite Images of Compact Galaxies at  $z \sim 4-6$  in the Hubble Ultra Deep. The Astronomical Journal, Vol. **135**, 2008, □156–166.
- [HEI1993] HEINTZE M., SCHMID P. E., LEVY F., WEISS P., GUY R.: Characterization of Poly-Crystalline and Amorphous Silicon Films by Angle-Resolved Light Scattering. Journal of Physics D – Applied Physics, Vol. **26**, No. 2, 1993, □271–280.
- [HER2007] HERMERSCHMIDT A., KRÜGER S.: DIFFRACTIVE OPTICS: Diffractive Elements Generate Complex Light Patterns. Laser Focus World. [online] <http://www.laserfocusworld.com/displayarticle/279856/12/none/none/Feat/Diffractive-Optics:-Diffractive-elements-generate-complex-light-pattern.html>
- [HER2005] HEROLD V., von SALDERN C., SCHONER J.: Shape and Roughness Measurement of Aspherical Lenses with an ARS-Sensor. Joint International IMEKO TC1+TC7 Symposium, Ilmenau, Germany, 2005. (CD-ROM). [online] [http://www.visquanet.de/portals/visqua/.../704\\_herold\\_uni\\_jena.pdf](http://www.visquanet.de/portals/visqua/.../704_herold_uni_jena.pdf)
- [HER2002] HERTZSCH A., KRÖGER K., TRUCKENBRODT H.: Microtopographic Analysis of Turned Surfaces by Model-Based Scatterometry. Precision Engineering, Vol. **26**, 2002, □306–313.
- [HOL1981] HOLEJKO K.: Precyzyjne elektroniczne pomiary odległości i kątów. WNT, Warszawa, 1981.
- [HOM2006] HOMMELWERKE (HOMMEL-ETAMIC): Hommel Waveline Microsystem: Flexible Surface Roughness Measuring Systems for Highest Demand. General Catalogue 2006.
- [HUA2003] HUANG P. S., ZHANG C., CHIANG F-P.: High-Speed 3-D Shape Measurement Based on Digital Fringe Projection Optical Engineering, Vol. **42**, No. 1, 2003, □163–168.
- [HUA2008] HUANG K., WANG L., TAN T., MAYBANK S.: A Real-Time Object Detecting and Tracking System for Outdoor Night Surveillance. Pattern Recognition, Vol. **41**, 2008, □432–444.
- [HUN1946] HUNTER R. S.: A Glossmeter for Smoothness Comparisons of Machine-Finished Surfaces. Journal of Optical Society of America, Vol. **36**, 1946, □178–181.
- [IAQ2004] IAQUINTA J., FOUILLOUX A.: Modeling of Light Scattering by Rough Surfaces with Relevance to Pavements Monitoring Sensors. Optics and Lasers in Engineering, Vol. **41**, 2004, □687–702.
- [ICH1999] ICHIKAWA H.: Research Trends and Future View of Diffractive Optics Field. O plus E, No. **234**, 1999, □511–519.
- [ISA1993] ISAEV U., AKAEV A.: Optical Inspection of Defects. Experimental Techniques, Vol. **17**, No. 3, 1993, □19–21.
- [JAB1983] JABŁOŃSKI R.: Laserowe pomiary długości i kąta. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1983.
- [JAC1992] JACOBSON R. D., WILSON S. R., AL-JUMAILY G. A., McNEIL J. R., BENNETT J. M., MATTSON L.: Microstructure Characterisation by Angle-Resolved Scatter and Comparison to Measurements Made by Other Techniques. Applied Optics, Vol. **31**, No. 10, 1992, □1426–1435.
- [JAK1991] JAKUBIEC W., MALINOWSKI J.: Metrologia wielkości geometrycznych. Wyd. IV. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [JAN1989] JANEZKO D. J.: Power Spectrum Standard for Surface Roughness: Part I. Proceedings SPIE, Vol. **1165**, 1989, □175–182.

- [JAR1997] JARKIEWICZ A., NOWICKI B.: Aktywna kontrola chropowatości z zastosowaniem metody pojemnościowej (FFC). Materiały Konferencyjne VII Konferencji Naukowo-Technicznej "Metrologia w Technikach Wytwarzania". Oficyna Wydawnicza Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1997, □53–62.
- [JAR2000] JARKIEWICZ A., NOWICKI B.: Wieloparametrowe monitorowanie procesu szlifowania. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Nr 5, 2000, □21–26.
- [JEN2002] JENSEN H. W., BUHLER J.: A Rapid Hierarchical Rendering Technique for Translucent Materials. ACM Transactions on Graphics, Vol. 21, No. 3, 2002, □576–581.
- [JIN2001] JIN G. C., BAO N.-K.: Surface Detection and 3D Profilometry for Microstructure Using Optical Metrology. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 36, 2001, □1–9.
- [JON2007] JONSSON J. C., BRANDÉN H.: Obtaining the Bidirectional Transmittance Distribution Function of Isotropically Scattering Materials Using an Integrating Sphere. Optics Communications, Vol. 277, 2007, □228–236.
- [JOZ2006] JÓŹWICKI R.: Podstawy inżynierii fotonicznej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006.
- [JUU2005] JUUTI M., van VEEN B., PEIPONEN K. E., KETOLAINEN J., SILVENNOINEN: Optical and Digital Signal Processing in Inspection of Pharmaceutical Tablet Surfaces. Proceedings of the Finnish Signal Processing Symposium "FINSIG'05", 2005.
- [JUZ2006] JUZA M., MARIK K., ROJICEK J., STLUKA P.: 3D Template-Based Single Camera Multiple Object Tracking. Proceedings of the 11<sup>th</sup> Computer Vision Winter Workshop 2006, CHUM O., FRANC V. (Eds.), Telč, Czech Republic, □1–6.
- [KAP2006-1] KAPŁONEK W.: Ocena topografii arkuszy ściernych z wykorzystaniem światła strukturalnego i komputerowej analizy obrazu. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Nr 5, 2006, □38–40.
- [KAP2006-2] KAPŁONEK W.: Analiza koncepcji jednoczesnego pomiaru nierówności powierzchni i wymiaru geometrycznego z wykorzystaniem metod optycznych. Materiały konferencyjne VII Konferencji Naukowo-Technicznej "Wytwarzanie Elementów Maszyn ze Stopów Metali o Specjalnych Właściwościach". Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Nr 227, seria: Mechanika, z. 66, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2006, □113–121.
- [KAP2007-1] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.: Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni będących w ruchu. Przegląd Mechaniczny Nr 9S, 2007, □119–124.
- [KAP2008-1] KAPŁONEK W.: Zastosowanie metody nakładania obrazów do oceny mikronierówności powierzchni w ruchu. Advances In Materials Science, Vol. 8, No. 2(16), 2008, □20–27.
- [KAP2008-4] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni w ruchu z zastosowaniem skaterometrii laserowej i metody nakładania obrazów. Przegląd Elektrotechniczny, R. 84, Nr 5, 2008, □155–160.
- [KAP2008-5] KAPŁONEK W., ŻURAWSKI Ł.: Ocena mikronierówności powierzchni frezowanych z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych i komputerowej analizy obrazu. Advances In Materials Science, Vol. 8, No. 2(16), 2008, □36–43.
- [KAP2009-1] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.: Kontrola wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrobionych z wykorzystaniem metody śledzenia ruchu obiektów. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Vol. 55, Nr 4, 2009, □251–254.
- [KAP2009-2] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.: Analiza zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazach skaterometrycznych przetworzonych metodą nakładania obrazów. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Vol. 55, Nr 4, 2009, □232–235.
- [KAP2009-3] KAPŁONEK W., TOMKOWSKI R.: Analiza topografii dyfrakcyjnych elementów optycznych z wykorzystaniem interferometrii światła białego. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Vol. 55, Nr 4, 2009, □272–275.
- [KAP2009-4] KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.: Assessment of Surface Roughness in Movement by Image Stacking. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces (Pawlus P., Blunt L., Rosen B.-G., Thomas T., Wieczorowski M., Zahouani H. Eds.), Publications Rzeszów University of Technology, 2009, □295–299.



- [KAL1985] KALISZER H., FLETCHER H., ADAMS J.: In-process Measurement of Surface Roughness During Plunge Grinding. Proceedings of the International Conference "Metrology and Properties of Engineering Surfaces", Leicester, UK, 1985.
- [KAR2000] KARABACAK T., ZHAO Y., STOWE M., QUAYLE B., WANG G-C., LU T-M.: Large-Angle In-Plane Light Scattering From Rough Surfaces. Applied Optics, Vol. **39**, No. 25, 2000, □4658–4668.
- [KAR1977] KARPIŃSKI T., ŁUKIANOWICZ Cz.: Surface Roughness Measurement by Photometric Method. Annals of the CIRP, Vol. **26**, No. 1, 1977, □371–374.
- [KAR1995] KARPIŃSKI T., KOCHANIEWICZ P., KOCHANIEWICZ T.: Zależność między mikrogeometrią powierzchni i parametrami światła rozproszonego przy pomiarach fotometrycznych. Metrologia i Systemy Pomiarowe, T. **II**, Z. **I**, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 1995, □93–104.
- [KAR1998] KARPIŃSKI T., ŁUKIANOWICZ Cz., ŁUKIANOWICZ T.: Méthodes d'estimation de la rugosité des surfaces superpolies par lumière diffusée. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego politechniki Koszalińskiej, Nr. **22**, 1998, □105–116.
- [KAR1999] KARPIŃSKI T., ŁUKIANOWICZ Cz., ŁUKIANOWICZ T.: Skomputeryzowane stanowisko do pomiaru i analizy profilu powierzchni. Materiały Konferencyjne VIII Konferencji Naukowo-Technicznej "Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn". Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin, 1999, □251–258.
- [KAR2000] KARPIŃSKI T., ŁUKIANOWICZ Cz., ŁUKIANOWICZ T.: Skomputeryzowane stanowisko do pomiaru i analizy profilu powierzchni. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Nr **5**, 2000, □27–30.
- [KAS1992] KASSING R.: Investigation on the SFM – Tip to Surface Interaction. Proceedings of Symposium Scanning Microscopy, Berlin, 1992, □11–31.
- [KEN1998] KENNEDY W. P.: The Basics of Triangulation Sensors. Sensors Online, Vol. **5**, 1998. [online] <http://www.sensormag.com/articles/0598/tri0598/main.shtml>
- [KER2002] KERESKES Á., LÖRINCZ E., RAMANUJAM P. S., HVILSTED S.: Light Scattering of thin Azobenzene Side-Chain Polyester Layers. Optics Communications, Vol. **206**, 2002, □57–65.
- [KIM1990] KIM J. M., DAINY J. C., FRIBERG A. T., SANT A. J.: Experimental Study of Enhanced Backscattering from One and Two Dimensional Random Rough Surfaces. Journal of the Optical Society of America A – Optics Image Science and Vision, Vol. **7**, 1990, □569–577.
- [KIR1997] KIRAN M. B., RAMAOORTHY B., RADHAKRISHNAN V.: Evaluation of Surface Roughness by Vision System. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference "Metrology and Properties of Engineering Surfaces", Gothenburg, Sweden, 1997, □288–293.
- [KLA2007] KLANČNIK S., BALIČ J., PLANINŠIČ P.: Obstacle Detection with Active Laser Triangulation. Journal of Advances in Production Engineering & Management, Vol. **2** (2007), □79–90.
- [KNO1994] KNOTTS M. E., O'DONNELL K. A.: Measurements of Light Scattering by a Series of Conducting Surfaces with One Dimensional Roughness. Journal of the Optical Society of America A – Optics Image Science and Vision, Vol. **11**, 1994, □697–710.
- [KOC1991] KOCHANIEWICZ T., ŁUKIANOWICZ Cz., Ocena mikronierówności powierzchni na podstawie parametrów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Mechanik, Nr **3**, 1991, □107–109.
- [KOC2001] KOCHANIEWICZ T.: Zastosowanie metody reflektometrii laserowej do oceny mikrogeometrii powierzchni przemieszczających się. Rozprawa doktorska, Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2001.
- [KOD1999] KODATE K.: Utilization of Diffraction Optical Element in Optical Information Processing. O plus E, No. **234**, 1999, □528–535.
- [KON1955] KONDASZEWSKI W. W.: Automatyczna kontrola wymiarów podczas obróbki. Państwowe Wydawnictwa Techniczne, Warszawa, 1955.
- [KON1969] KÖNIG W.: Glanz und seine Messung. Plaste und Kautschuk, Vol. **5**, 1969, □366–379.
- [KOU1994] KOUKOULAS A. A., JORDAN B. D.: Understanding Gloss Anisotropy in Machine-Made Papers. Journal of Pulp and Paper Science, Vol. **20**, No. 2, 1994, □55–60.

- [KOW2000] KOWARSCHIK R., KÜHMSTEDT P., GERBER J., SCHREIBER W., NOTI G.: Adaptive Optical Three-Dimensional Measurement with Structured Light. *Optical Engineering*, Vol. **39**, No. 1, 2000, □150–158.
- [KRO2001] KROPATSCH W., BISCHOF H.: *Digital Image Analysis: Selected Techniques and Applications*. Springer, Berlin, 2001.
- [KRY2006] KRYSICKI W., BARTOS J., DYCZKA W., KRÓLIKOWSKA K., WASILEWSKI M.: *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, część 2. Statystyka matematyczna*. PWN, Warszawa, 2006.
- [KUJ1999] KUJAWSKI A., SZCZEPAŃSKI P.: *Lasery - podstawy fizyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
- [KUL2004] KULAK A.: Laserowy system pomiarowy w kontroli jakości produkcji. *Problemy Eksploatacji*, Nr **2**, 2004, □83–90.
- [KUO2002] KUO H. C., WU L. J.: An Image Tracking System for Welded Seams Using Fuzzy Logic. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. **120**, No. 1, 2002, □169–185.
- [LAM1998] LAMELA H., GARCIA E., De La ESCALARA A., SALICHS M. A.: New Laser Triangulation Processor for Mobile Robot Applications: Preliminary Results. *Proceedings of the Conference on Intelligent Components for Vehicles "ICV'98"*. Proceedings volume from the IFAC Workshop. Kidlington, UK: Elsevier Scientific, 1998, □59–64.
- [LAR2001] LARENA A., MILLÁN F., CERDÚ M., PINTO G.: Surface Roughness Characterisation of Multilayer Polymer Films for Graphic Art Application. *Applied Surface Science*, Vol. **174**, 2001, □217–224.
- [LEE2007] LEE H.-S., KIM D.: Robust Face Tracking by Integration of Two Separate Trackers: Skin Color and Facial Shape. *Pattern Recognition*, Vol. **40**, 2007, □3225–3235.
- [LEH2006] LEHMANN G.: Kappa Sigma Clipping. *The Insight Journal*, July-December 2006. [online] <http://insight-journal.org>
- [LIE2005] LIENG-CHIA C., CHUI-CHEN L., MING-JUN L.: Development Of Full-Field Micro Surface Profilometer Using Digital Fringe Projection. *Proceedings of the Conference Exploring Innovation in Education and Research*, Tainan, Taiwan, 2005.
- [LIS1996] LISWITH M. L., BAWOLEK E. J., HIRLEMAN E. D.: Modelling of Light Scattering by Submicrometer Spherical Particle on Silicon and Oxidized Silicon Particles. *Optical Engineering*, Vol. **35**, No. 3, 1996, □858–869.
- [LOD2001] LODHA G. S., RAGHU VANSHI V. K., MODI M. H., TRIPATHI P., VERMA A., NANDEDKAR R. V.: X-Ray Multilayer Optics: Growth and Characterization. *Vacuum*, Vol. **60**, 2001, □385–388.
- [LOH1976] LOHMEYER S.: Glanzmeßung, Teli I, II. *Metalloberfläche*, Vol. **12**, 1976 – *Metalloberfläche*, Vol. **1**, 1977.
- [LOH1977] LOHMEYER S.: Glanzmeßgeräte, Teli III. *Metalloberfläche*, Vol. **2**, 1977, □74–80.
- [LON1975] LONARDO P. M.: Theoretical Determination of the Reflection Curves and Introduction of a New Method for Measuring Surface Gloss. *Annals of the CIRP*, Vol. **20**, No. 1, 1975, □491–496.
- [LOM2003] LOMBARDO V., MARZULLI T., PAPPALLETTERE C., SFORZA P.: A Time-of-Scan Laser Triangulation Technique for Distance Measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. **39**, 2003, □247–254.
- [ŁUK1989-1] ŁUKIANOWICZ Cz.: Możliwości oceny mikronierówności powierzchni na podstawie kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. *Materiały Sympozjum "Metrologia'89"*. Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1989, □275–282.
- [ŁUK1989-2] ŁUKIANOWICZ Cz.: Zastosowanie fotoelektrycznych przyrządów półprzewodnikowych ze sprzężeniem ładunkowym do reflektometrycznych pomiarów nierówności powierzchni. *Prace Naukowe Instytutu Metrologii Elektrycznej Politechniki Wrocławskiej*, Nr **33**, Seria: Konferencje, Nr 15, Wrocław, 1989, □146–151.
- [ŁUK1991-1] ŁUKIANOWICZ Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni na podstawie kąтового natężenia światła rozproszonego. *Materiały konferencyjne Konferencji "Metrologiczne problemy w technikach wytwarzania"*. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej w Koszalinie, Koszalin, 1991, □149–160.

- [ŁUK1991-2] ŁUKIANOWICZ Cz.: Optyczne metody oceny mikrogeometrii powierzchni wykorzystujące kątowy rozkład natężenia światła rozproszonego. *Mechanik*, Nr **5-6**, 1991, □179–182, 184.
- [ŁUK1994] ŁUKIANOWICZ Cz.: Optyczno-elektroniczny system kontrolno-pomiarowy do oceny mikrogeometrii powierzchni w ruchu. Materiały Konferencyjne V Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn". Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 1994, □143–148.
- [ŁUK1997] ŁUKIANOWICZ Cz.: Detekcja światła rozproszonego w skaterometrii nierówności powierzchni. Materiały konferencyjne VII Konferencji Naukowo-Technicznej "Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn". Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria: *Mechanika*, Nr **63**, T. II, Kielce, 1997, □63–70.
- [ŁUK2000] ŁUKIANOWICZ Cz., KARPIŃSKI T.: Scatterometry of Machined Surfaces. XVI IMEKO World Congress, Vol. **VIII**, Vienna, 2000, □181–185.
- [ŁUK2001] ŁUKIANOWICZ Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [ŁUK2004] ŁUKIANOWICZ Cz., KAPŁONEK W.: Analiza możliwości aktywnych pomiarów metodą optyczną nierówności powierzchni wałów obrabianych ściernie. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego, Nr **36**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2004, □293–300.
- [MAI1991] MAINGUY S., OLIVIER M., JOSSE M., GUIDON M.: Description and Calibration of a Fully Automated Infrared Scatterometer. *Proceedings SPIE*, Vol. **1530**, 1991, □269–282.
- [MAR2008] MARTINEZ B., BINEFA X.: Piecewise Affine Kernel Tracking for Non-Planar Targets. *Pattern Recognition*, Vol. **41**, 2008, □3682–3691
- [MAS2005] MASI C. G.: Dynamic Structured Light Measures Shapes. *Vision Systems Design*, Vol. **3**, No. 6, 2005.
- [MAS2001] MASSIG J. H.: Deformation Measurement on Specular Surfaces by Simple Means. *Optical Engineering*, Vol. **40**, No. 10, 2001, □2315–2318.
- [MAT1998] MATTISON P., DOMBROWSKI M., LORENZ J., DAVIS K., MANN H., JOHNSON P., FOOS B.: The Hand-Held Directional Reflectometer: An Angular Imaging Device to Measure BRDF and HDR in Real Time. *Proceedings SPIE*, Vol. **3426**, 1998, □240–251.
- [MCK2006] MCKERROW P. J., KRISTIANSEN B. E.: Classifying Surface Roughness with CTFM Ultrasonic Sensing. *IEEE Sensors Journal*, Vol. **6**, No. 5, 2006, □1267–1279. [online] <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=7361>
- [MEN2009] MENZIES I., KOSHY P.: In-Process Detection of Surface Porosity in Machined Castings. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. **49**, 2009, □530–535.
- [MIN2005] MINTON R. B.: Lunar and Planetary Photography with Inexpensive Webcams. *Journal of the Association of Lunar & Planetary Observers: The Strolling Astronomer*, Vol. **47**, No. 1, 2005, □28–30.
- [MIR2005] MIRCHIN N., PELED A., BAAL-ZEDAKA I., MARGOLIN R., ZAGON M., LAPSKER I., VERDYAN A., AZOULAY J.: Photodeposited Diffractive Optical Elements of Computer Generated Masks. *Applied Surface Science*, Vol. **248**, 2005, 509–513.
- [MIT1997] MITSUI K., KOIKE M., TSUKAMOTO H., YAJIMA M.: Development of a New Displacement-Measuring Ultrasonic Sensor Based on Astigmatic Focus Error Detection-Measuring Principle and its Demonstration. *Precision Engineering*, Vol. **20**, 1997, □93.
- [MON1995] MONK D. W., GALE R.: The Digital Micromirror Device for Projection. *Microelectronic Engineering*, Vol. **27**, 1995, □489–493.
- [MOR1995] MORIN V., ANGONGA A., SABATER J., ENRI D., Le NEST J. F.: CTP Develops a Method of Measuring Gloss On-Line. *Paper Technology*, Vol. **36**, No. 2, 1995, □37–45
- [MOT2005] MOTAMEDI M. E. (Ed.): *MOEMS – Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*. SPIE Press, Bellingham, 2005.
- [MUL2001] MÜLLER T., KUMPE R., GERBER H. A., SCHMOLKE R., PASSEK F., WAGNER P.: Techniques for Analysing Nanotopography on Polished Silicon Wafers. *Microelectronic Engineering*, Vol. **56**, 2001, □123–127.

- [NAR2007] NARUNIEC J., SKARBEEK W., RAMA A.: Face Detection and Tracking in Dynamic Background of Street. Proceedings of the International Conference on Signal Processing and Multimedia Applications, SIGMAP 2007, Spain, 2007, □28–31.
- [NG2003] NG T.W., SIN H. K.: Hard Disk Wobble Detection Using Optical Triangulation And Time-Delay Integrated Imaging. Optical Engineering, Vol. **42**, No. 4, 2003, □935–938.
- [NIC1970] NICODEMUS F. E.: Reflectance Nomenclature and Directional Reflectance and Emissivity. Applied Optics, Vol. **9**, 1970, □1474–1475.
- [NIE2006] NIETO-VESPERINAS M.: Scattering and Diffraction in Physical Optics (2<sup>nd</sup> Edition). World Scientific Pub Co Inc., 2006.
- [NIS1995] NISSANOV J., OZTURK C. KOZIŃSKA D.: Brain Surface Scanning Using Structured Light. Proceedings SPIE, Vol. **2598**, Videometrics IV, [EI-HAKIM S.F. Ed.], 1995, □334–341.
- [NOW1997] NOWAK J., PIETRASZKIEWICZ K., ZAJĄC M.: Dyfrakcyjne elementy odwzorowujące. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, 1997.
- [NOW1986] NOWICKI B.: Surface Roughness Measurements with New Contact Methods. International Journal Machine Tool Design and Research, Vol. **26**, No. 1, 1986, □61–68.
- [NOW1988] NOWICKI B., JARKIEWICZ A.: The In-Process Surface Roughness Measurement Using Fringe Field Capacitive (FFC) method. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. **38**, No. 5, 1998, □725–732. [online] <http://www.ingentaconnect.com/els/08906955/1998/00000038/00000005/art00124>
- [NOW1990] NOWICKI B.: Aktywne pomiary chropowatości powierzchni. Materiały Sympozjum: "Makro i mikro geometria powierzchni". Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 1990, □48–52.
- [NOW1991] NOWICKI B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1991.
- [NOW1993] NOWICKI B.: Aktywne pomiary chropowatości powierzchni. Mechanik, Nr **1**, 1993, □29–32.
- [NOW1994] NOWICKI B., JARKIEWICZ A.: Badania elektrycznych metod pomiaru chropowatości. Materiały konferencyjne V Krajowej Konferencji Naukowo-Technicznej "Metrologia w Procesach Wytwarzania". Wydawnictwo Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków, 1994, □161–166.
- [OCZ2003] OCZOŚ K. E., LIUBIMOV V.: Struktura geometryczna powierzchni – podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- [OGI1991] OGILVY J. A.: Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces. Adam Hilger, Bristol, Philadelphia, New York, 1991.
- [ONE2000] O'NEIL E.: Dedicated, Automatic Tire Sidewall Inspection. Rubber World Magazine, No. **5**, 2000.
- [OSH2004] O'SHEA D. C., SULESKI T. J., KATHMAN A. D. K., PRATHER D. W.: Diffractive Optics: Design, Fabrication and Test. SPIE Publications, Washington, 2004.
- [OZI2004] OZISK D.: Post-earthquake Damage Assessment Using Satellite and Aerial Video Imagery. MSc Thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, Netherland, 2004.
- [PAS2006-1] PASTORIUS W., SNOW M.: Better Inspection: Less Scrap. Machine Design. [online] <http://machinedesign.com/ContentItem/59183/BetterinspectionLessScrap.aspx>
- [PAS2006-2] PASTORIUS W., SNOW M.: Laser Line Sensors Enhance Rubber Manufacturing. Industrial Equipment News. [online] <http://www.ien.com/article/laser-line-sensors/113209>
- [PAT2005] PATORSKI K., KUJAWIŃSKA M., SAŁBUT L.: Interferometria laserowa z automatyczną analizą obrazu (K. Patorski Red.). Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.

- [PAW2004] PAWLUS P.: Slope Calculation of Gaussian and Stratified Surface Topographies. Proceedings of the X<sup>th</sup> International Colloquium on Surfaces, Chemnitz, Germany, 2000, □426-433.
- [PAW2005-1] PAWLUS P.: Topografia powierzchni – pomiary, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.
- [PAW2005-2] PAWLUS P.: An Analysis of Slope of Surface Topography. Metrology and Measurement Systems, Vol. **12**, No. 3, 2005, □295-313.
- [PEN1956] PENROSE R.: On Best Approximation Solution of Linear Matrix Equations [in] Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, Vol. **52**, 1956, □17–19.
- [PER1996] PERRSON U.: Measurement of Surface Roughness Using Infrared Scattering. Measurement, Vol. **18**, No. 2, 1996, □109–116.
- [PES2009] PESSOLES X., TOURNIER C.: Automatic Polishing Process of Plastic Injection Molds on a 5-axis Milling Center. Journal of Materials Processing Technology, Vol. **209**, 2009, □3665–3673.
- [PLA1998] PLASCHKE M., J. RÖMER J., KIM J. I.: Alignment of In Situ AFM Images Using Microstructured Reference Points. Ultramicroscopy, Vol. **75**, 1998, □77–83.
- [PRI2007] PRIVETT G.: Creating and Enhancing Digital Astro Images (Patrick Moore's Practical Astronomy Series), Springer, 2007, □51–55.
- [QUI2003] QUIROGA J. A., MARTÍNEZ-ANTÓN J. C., GÓMEZ-PEDRERO J. A.: Structured Light-Based NDT Techniques of Interest in the Aerospace Industry. Insight - Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, Vol. **45**, No. 4, 2003.
- [RAB2007] RABINOWITZ P., SUN C.: High Resolution Image Stacking in Geophysical Seismic Data Processing. Geophysical Research Abstracts, Vol. **9**, 2007.
- [RAD1995] RADHAKRISHNAN V., ACHUTAN N., VERGHESE S., SANTOSHKUMAR R.: A New Approach to the Measurement of Surface Roughness Using the Pulse-Jet Capacitance Method. Proceedings of the Conference "Electronic Technology Directions to the Year 2000", 1995, □294–300.
- [RAI2000] RAIMONDI M. T., PIETRABISSA R.: The In-Vivo Wear Performance of Prosthetic Femoral Heads with Titanium Nitride Coating. Biomaterials, Vol. **21**, 2000, □907-913.
- [RAO2003] RAO B. C., RAJ B.: Study of Engineering Surfaces Using Laser-Scattering Techniques. Sādhanā, Vol. **28**, Parts 3 & 4, June/August 2003, □739–761.
- [RAT2003] RATAJCZYK E., DOBOSZ M.: Optyczne metody pomiaru chropowatości – mikroskopia interferencyjna. Mechanik, Nr **7**, 1983, □425–428.
- [RAT2005] RATAJCZYK E. Współrzędnościowa technika pomiarowa. Wydawnictwo WPW, Warszawa, 2005, □117–125.
- [RAU2004] RAUWENDAAL R.: Rendering General BSDFs and BSSDFs. [online] [http://graphics.cs.ucdavis.edu/~bcbudge/ecs298\\_2004/General\\_BSDFs\\_BSSDFs.ppt](http://graphics.cs.ucdavis.edu/~bcbudge/ecs298_2004/General_BSDFs_BSSDFs.ppt)
- [REE2005] REED T.E. (Ed.): Digital Image Sequence Processing: Compression and Analysis. CRC Press, New York, 2005.
- [RIB2006] RIBNICK E., ATEV S., MASOUD O., PAPANIKOLOPOULOS N., VOYLES R.: Real-Time Detection of Camera Tampering. IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance AVSS 2006, Sydney, Australia, 2006.
- [RIN2002] RINDER T., ROTHE H.: Modelling of an ARS Sensor System in Spatial and Time Domain. Proceedings SPIE, Vol. **4780**, 2002, □115–125.
- [RIS1981] RISKO D.: Quick, Non-destructive Method for Measuring Surface Finish Using Capacitance. Carbide and Tool Journal, No. **2**, 1981.
- [RON1998] RÖNNOW D.: Interface Roughness Statistics of Thin Films from Angle-Resolved Light Scattered at Three Wavelengths. Optical Engineering, Vol. **37**, No. 2, 1998, □696–704.
- [ROS2003] ROSETE-AGUILAR M., RODRÍGUEZ-HERRERA O. G., BRUCE N. C.: Optical Design of a Scatterometer with an Ellipsoidal Mirror. Optical Engineering, Vol. **42**, No. 6, 2003, □1772–1777.
- [RUS2002] RUSS J. C.: The Image Processing Handbook (4<sup>th</sup> Edition). CRC Press, Boca Raton, 2002.
- [RUS2005] RUSS J. C.: The Image Processing Cookbook 6.0. Reindeer Graphics, 2005, [online] <http://www.reindeergraphics.com>

- [RUT2008] RUT J., SZWEDZIAK K., TUKIENDORF M.: Zastosowanie aplikacji komputerowej Trace od oceny identyfikacji obiektów ruchomych. *Inżynieria Rolnicza* Nr 2 (100), 2008, □233–237.
- [SAA2007] SAARINEN J., ROSSI M.: Current Trends of Fabrication Technologies of DOE's and New Applications. Heptagon. [online]  
[www.heptagon.fi/downloads/Trends%20of%20Fabrication%20Technologies%202003.pdf](http://www.heptagon.fi/downloads/Trends%20of%20Fabrication%20Technologies%202003.pdf)
- [SAD2009] SADIQ A., SHUNMUGAN M. S.: Investigation into Magnetorheological Abrasive Honing (MRAH). *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 49, 2009, □554–560.
- [SAJ1998] SAJAN M. R., TAY C. J., SHANG H. M., ASUNDI A.: TDI Imaging – A Tool for Profilometry and Automated Visual Inspection. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 29, 1998, □403–411.
- [SAL2007] SALEH B. E. A., TEICH M. C.: *Fundamentals of Photonics* (2<sup>nd</sup> Edition), (Wiley series in Pure and Applied Optics, SALEH B. E. A., Ed.), John Wiley & Sons, Inc., New York, 2007.
- [SAT2009] SATO M., KAMEYAMA T., NONAMI T.: Copper Polishing with a Polishing Pad Incorporating Abrasive Grains and a Chelating Resin. *Precision Engineering*, Vol. 33, 2009, □167–174.
- [SCH1936] SCHMALTZ G.: *Technische Oberflächenkunde*. Springer-Verlag, Berlin, 1936.
- [SCO1994] SCOTT A., SUNG J., YUNG C.: In-Process Monitoring of Surface Roughness Utilising Ultrasound. *Proceedings of the ASME International Conference Manufacturing and Engineering*, 1994, □145–154.
- [SHE1988] SHERRINGTON I., SMITH E. H.: *Modern Measurement Techniques in Surface Metrology: Part 1; Stylus Instruments, Electron Microscopy and Non-Optical Comparators*. *Wear*, Vol. 125, 1988, □271–288.
- [SHE2008] SHEN S., LIU Y.: Efficient Multiple Faces Tracking Based on Relevance Vector Machine and Boosting Learning. *Journal of Visual Communication and Image Recognition*, Vol. 19, 2008, □382–391.
- [SHI2006] SHIKVAKUMARA P., HEMANTHA Kumar G., GURU D. S., NAGABHUSHAN P.: Sliding Window Based Approach for Document Image Mosaicing. *Image and Vision Computing*, Vol. 24, 2006, □94–100.
- [SHI1987] SHIRAISHI M.: A Consideration of Surface Roughness Measurement by Optical Method. *Journal of Engineering for Industry – Transaction ASME*, Vol. 109, 1987, □100–105.
- [SHI1998] SHIRAISHI M., YASUI A.: In-Process Measurement of Dimensional Error for Stepped Workpiece Profile. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120, 1998, □202.
- [SHI2002] SHIRAISHI M., YAMAGIWA T. ITO A.: Practical Dimensional Error Control and Surface Roughness Inspection in Turning. *Proceedings of the ASME Mechanical Engineering Congress and Exposition, New Orleans, USA, 2002*, □45–51.
- [SIH1990] SIHORI R. S. KOTHİYAL M. P.: *Optical Components, Systems, and Measurement Techniques*. CRC Press, London, 1990, □399–408.
- [SIL2004] SILVENNOINEN K., MYLLER K., PEIPONEN K. -E., SALAMI J. PÄÄKKÖNEN E. J.: Diffractive Optical Sensor for Gloss Differences of Injection Molded Plastic Products. *Sensors and Actuators A*, Vol. 112, 2004, □74–79.
- [SIL2008] SILVENNOINEN R., VETTERL V., HANSON S., TUONONEN H., SILVENNOINEN M., MYLLER K., CVRCEK L., VANEK J., PRACHAR P.: Sensing of Human Plasma Fibrinogen on Polished, Chemically Etched and Carbon Treated Titanium Surfaces by Diffractive Optical Element Based Sensor. *Optics Express*, Vol. 16, 2008, □10130–10140.
- [SIU2002] SIU X., CHEN W.: Fourier Transform Profilometry: A Review. *Optical and Lasers in Engineering*, Vol. 35, 2002, □263–284.
- [SKY2002-1] SKYDAN O. A., LALOR M. J. BURTON D. R.: Technique for Phase Measurement and Surface Reconstruction by Use of Colored Structured Light. *Applied Optics*, Vol. 41, No. 29, 2002, □6104–6117.

- [SKY2002-2] SKYDAN O. A., LALOR M. J. BURTON D. R.: Technique for Surface Reconstruction Using Colored Fringe Patterns. Proceedings of SPIE, Vol. **4777** (Interferometry XI: Techniques and Analysis, CREATH K., SCHMIT J. Eds.), 2002, □39–47.
- [SKY2005] SKYDAN O. A., LALOR M. J. BURTON D. R.: Using Coloured Structured Light in 3-D Surface Measurements. Optics and Lasers Engineering, Vol. **43**, No. 7, 2005. □801–814.
- [SMI2003] SMITH S. W.: The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Publishing, 2003, □432–436
- [SOI2002] SOIFER V. A. (Ed.): Methods for Computer Design of Diffractive Optical Elements (Wiley series in Lasers and Applications). John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002.
- [STA2007] STAHN R., STARK T., STOPP A.: Laser Scanner-Based Navigation and Motion Planning for Truck-Trailer Combinations. Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics "AIM2007", 2007.
- [STE1989] STETSON P. B.: The Techniques of Least Squares and Stellar Photometry with CCDs. Proceeding of V Advanced School of Astrophysics, University of São Paulo, 1989, □51.
- [STO2006] STORCH B.: Zjawiska przykrawędziowe i monitorowanie chropowatości powierzchni po obróbce jednostrzowej. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2006.
- [STO1990] STOVER J. C.: Optical Scattering: Measurement and Analysis. McGraw-Hill, Inc., New York, 1990.
- [STO2007] STOVER J. C., HARVEY J. E.: Limitations of Rayleigh Rice Perturbation Theory for Describing Surface Scatter. Proceedings of the SPIE, Vol. **6672** (Advanced Characterization Techniques for Optics, Semiconductors, and Nanotechnologies III, DUPARÉE A., SINGH B., GU Z.-H. Eds.), 2007, □66720B–66720B-9.
- [SUK2006] SUKAMANA D. D., IHARA I.: Surface Roughness Characterization Through the Use of Diffuse Component of Scattered Air-Coupled Ultrasound. Japanese Journal of Applied Physics, Vol. **45**, 2006, □4534–4540.
- [SUK2004] SUKUMAR S. R.: Curvature Variation as Measure of Shape Information. MSc Thesis, University of Tennessee, Knoxville, USA, 2004, □8–21.
- [SUN2006] SUN J., ZHANG G., WEI Z., ZHOU F.: Large 3D Free Surface Measurement Using a Mobile Coded Light-Based Stereo Vision System. Sensors and Actuators A, Vol. **132**, 2006, □460–471.
- [TAD1991] TADEUSIEWICZ R., FLASIŃSKI M.: Rozpoznawanie obrazów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1991.
- [TAD1997] TADEUSIEWICZ R., KOROHODA P.: Komputerowa analiza i przetwarzanie obrazu. Wydawnictwo Fundacji Postępu Telekomunikacji, Kraków, 1997.
- [TAI2004] TAI J. C., TSENG S. T., LIN C. P., SONG K. T.: Real-Time Image Tracking for Automatic Traffic Monitoring and Enforcement Applications. Image and Vision Computing, Vol. **22**, No. 6, 2004, □485–501.
- [TAM2006] TAMULEVICIUS S., JANUSAS G., GUOBIENE A., PALEVICIUS A., OSTASEVICIUS V., ANDRULEVICIUS M.: Optical Characterization of Diffractive Optical Elements Replicated in Polymers. Journal of Micro / Nanolithography, MEMS, and MOEMS, Vol. **5**, 013004, 2006.
- [TAY2003] TAY C. J., Quan C.: A Parametric Study on Surface Roughness Evaluation of Semi-Conductor Wafers by Laser Scattering. Optik, Vol. **114**, No. 1, 2003, □1–6.
- [TAY2005] TAYLOR HOBSON LTD.: Talysurf CCI 6000 – The World's Highest Resolution Automated Optical 3D Profiler. Brochure, Leicester, 2005.
- [THO1997] THOMAS T. R.: Trends in Surface Roughness. Proceeding of the 7<sup>th</sup> International Conference "Metrology and Properties of Engineering Surfaces", Göteborg, Sweden 1997.
- [THO1999] THOMAS T. R.: Rough Surfaces (2<sup>nd</sup> Edition). Imperial College Press, London 1999.
- [THW1982] THWAITE E. G., PULLOCK M. J.: The Extension of Optical Angular Scattering Techniques of the Measurement of Intermediate Scale Roughness. Annals of the CIRP, Vol. **3**, No. 1, 1982, □463–465.

- [TSA2005] TSAI M-J., HUNG C-C.: Development of a High-Precision Surface Metrology System Using Structured Light Projection. *Measurement*, Vol. **38**, 2005, □236–247
- [TYK1997] TYKA A.: Ocena fotometrycznej metody odbiciowej w badaniach struktury geometrycznej powierzchni obrobionej. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, seria Mechanika*, Nr **63**, 1997, □111–118.
- [TYK2004] TYKA A.: Ocena błędów wyznaczenia wartości niektórych parametrów chropowatości szlifowanych powierzchni, w pomiarze reflektometrycznym. *Materiały konferencyjne XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2004, □377–384.
- [TYK2008] TYKA A., GÓRALCZYK A.: Możliwości wyznaczania przestrzennych charakterystyk SGP w reflektometrycznych pomiarach rozproszeniowych. *Proceedings of the VIII<sup>th</sup> International Scientific Conference “Coordinate Measuring Technique”*. Wydawnictwo Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, Bielsko-Biała, 2008, □182–188.
- [UCH1979] UCHIDA S., SATO H., O-HORI M.: Two Dimensional Measurement of Surface Roughness by the Light Sectioning Method. *Annals of the CIRP*, Vol. **28**, No. 1, 1979, □419–423.
- [UMB2005] UмбаUGH S. E.: *Computer Imaging: Digital Image Analysis and Processing*. CRC Press, London, 2005
- [VAC2005] VACHARANUKUL K., MEKID S.: In-Process Dimensional Inspection Sensors. *Measurement*, Vol. **38**, 2005, □204–218.
- [VAI2001] VAIDEHI V., CHITRA N., CHOKKALINGAM M., KRISHNAN C. N.: Neural Network Aided Kalman Filtering for Multitarget Tracking Applications. *Computers and Electrical Engineering*, Vol. **27**, 2001, □217–228.
- [VAL2000] VALLIANT J. G., FOLEY M. P., BENNETT J. M.: Instrument for On-Line Monitoring of Surface Roughness of Machined Surfaces. *Optical Engineering*, Vol. **39**, No. 12, 2000, □3247–3254.
- [VAS1974] VASHIST S. K., RADHAKRISHNAN V.: Surface Studies with a Gloss Meter. *Tribology International*, Vol. **7**, No. 2, 1974, □70–76.
- [VAS1975] VASHIST S. K., RADHAKRISHNAN V.: Gloss Meter for Surface Evaluation. *Journal Institution of Engineering (India)*, Vol. **55**, Part ME3, 1975, □144–148.
- [VIG2003] VIGNOLA J., LALONDE J.-F., BERGEVIN R.: Progressive Human Skeleton Fitting. *Proceedings of the 16<sup>th</sup> Vision Interface Conference*, Halifax, Canada, 2003, □35–42.
- [WAG1967] WAGER J. G.: Surface Effects in Pneumatic Gauging. *International Journal of Machine Tools Design and Research*, Vol. **7**, 1967, □1–14.
- [WAN1997] WANG H., MI H.: Inspection of Diamond Turning Process by the Combination of Light Scattering and Angular Deflection Techniques: A Proposed Method. *Optical Engineering*, Vol. **36**, No. 9, 1997, □2536–2544.
- [WAN1987] WANG S., HSU K. B.: The Study of Pneumatic Gauging to Surface Roughness Measurement. *Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers*, Vol. **8**, 1987, □347–363.
- [WAN2000] WANG S. H., CHENGGEN Q., TAY C. J., SHANG H. M.: Surface Roughness Measurement the Submicrometer Range Using Laser Scattering. *Optical Engineering*, Vol. **39**, No. 6, 2000, □1597–1601.
- [WAN2003] WANG S., TIAN Y., TAY C. J., QUAN C.: Development of a Laser-Scattering-Based Probe for On-Line Measurement of Surface Roughness. *Applied Optics*, Vol. **42**, 2003, □1318–1324.
- [WAN1998] WANG W., WONG P. L., LUO J. B., ZHANG Z. A.: New Optical Technique for Roughness Measurement on Moving Surface. *Tribology International*, Vol. **31**, No. 5, 1998, □281.
- [WEI2005-1] WEI Z., ZHOU F., ZHANG G.: 3D Coordinates Measurement Based on Structured Light Sensor. *Sensors and Actuators A*, Vol. **120**, 2005, □527–535.
- [WEI2005-2] WEI Z., ZHANG G.: Inspecting Verticality of Cylindrical Workpieces via Multi-Vision Sensors based on Structured Light. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. **43**, 2005, □1167–1178.
- [WER1978] WERYYS W.: *Kontrola czynna*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1978.



- [WES1967] WESTBERG J.: Development of Objective Methods for Judging the Quality of Ground and Polished Surfaces in Production. Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol. **182**, Part 3K, 1967-1968, □260–273.
- [WES1974] WESTBERG J.: The Two-Aperture Glossmeter - A New Method of Assessing the Visual Quality of Surfaces and Coatings. S.M.E. Paper, No. **FC74-649**, 1974, □17.
- [WHI1994-1] WHITEHOUSE D. J.: Handbook of Surface Metrology. Institute Of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1994.
- [WHI1994-2] WHITEHOUSE D. J., BOWEN D. K., VENKATESH V. C., LONARDO P., BRON C. A.: Gloss and Surface Topography. Annals of the CIRP, Vol. **43**, No. 2, 1994, □541–549.
- [WHI1996] WHITEHOUSE D. J.: Optical Methods in Surface Metrology. SPIE Milestones Series Volume MS 129 [THOMPSON B. J. Ed.]. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, Washington, 1996.
- [WHI2003] WHITEHOUSE D. J.: Handbook of Surface and Nanometrology. Institute Of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2003.
- [WIE2003] WIECZOROWSKI M., CELLARY A., CHAJDA J.: Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni, czyli o chropowatości i nie tylko. Oficyna Wydawnicza Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2003.
- [WIL2005] WILEY K. B., CHAMBERS S.: Long Exposure Webcams and Image Stacking Techniques. The Art and Science of CCD Astronomy (2<sup>nd</sup> Edition, RATLEDGE D., Ed.), 2005. Wiley K.: How Image Stacking Works, [online] <http://www.cs.unm.edu/~kwiley/astroPhotography/imageStacking.html>
- [WIL2005] WILSON A.: System Embeds Laser, Camera, and Computer. Vision Systems Design, Vol. **10**, No. 7, 2005.
- [WIL2007] WILSON A.: Machine Vision Targets Semiconductor Inspection. Vision Systems Design, Vol. **12**, No. 7, 2007.
- [WIL2008] WILSON A.: Reading the Shapes. Vision Systems Design, Vol. **13**, No. 3, 2008.
- [WIN2001] WINDECKER R., FLEISHER M., KÖRNER K., TIZIANI H. J.: Testing Micro Devices with Fringe Projection and White-Light Interferometry. Optics and Lasers in Engineering, Vol. **36**, 2001, □141–154.
- [WOJ1994] WOJNAR L., MAJOREK W.: Komputerowa analiza obrazu. Fotobit Design, Kraków, 1994.
- [WOJ2002] WOJNAR L., KURZYDŁOWSKI K. J., SZALA J.: Praktyka analizy obrazu. Polskie Towarzystwo Stereologiczne, Kraków 2002.
- [WOL1997] WOLFSON W., GORDON S. J.: Three-Dimensional Vision Technology Offers Real-Time Inspection Capability. Sensor Review, Vol. **17**, No. 4, 1997, □299–303.
- [WON1999] WONG P. L., LEE K. Y.: In-Process Roughness Measurement on Moving Surfaces. Optics & Laser Technology, Vol. **31**, 1999, □543–548.
- [WOO1991] WOOLLEY R. W.: Pneumatic Method for Making Fast, High Resolution, Non-contacting Measurement of Surface Topography. Proceedings SPIE, Vol. **1573**, 1991, □205–215.
- [WOZ1996] WOŹNICKI J.: Podstawowe techniki przetwarzania obrazu. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1996.
- [WRO2001] WRÓBEL Z., KOPROWSKI L.: Przetwarzanie obrazów w programie Matlab. Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2001.
- [WRO2004] WRÓBEL Z., KOPROWSKI L.: Praktyka przetwarzania obrazów w programie Matlab. Wydawnictwo EXIT, Warszawa, 2004.
- [YAN1986] YANAGI K., MEDEA T. TSUKUDA T.: A Practical Method of Optical Measurement for the Minute Surface Roughness of Machined Parts. Wear, Vol. **109**, 1986.
- [YIL2006] YILMAZ A., JAVED O., SHAH M.: Object Tracking: A Survey. ACM Computing Surveys, Vol. **38**, No. 4, 2006, □1–45.
- [YOU1998] YOUNG I. T., GERBRANDS J. J.: van VLIET L. J.: Image Processing Fundamentals. Delft University of Technology, Delft, 1998. [online] <http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip.html>

- [YUE2007] YUE H., SHAO C., ZHAO Y., CHEN X.: Study on Moving Pedestrian Tracking Based on Video Sequences. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, Vol. **7**, 2007, □47–51.
- [ZEN1999] ZENG L., YUAN F., SONG D., ZHANG R.: A Two-Beam Laser Triangulation for Measuring the Position of a Moving Object. *Optics and Lasers in Engineering* Vol. **31**, 1999, □445–453.
- [ZHA2002] ZHANG L., CURLESS B., SEITZ S. M.: Rapid Shape Acquisition Using Color Structured Light and Multi-Pass Dynamic Programming. *Proceedings of 1<sup>st</sup> IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, 2002, □24–36.
- [ZHA2005] ZHANG G., HE J., LI X.: 3D Vision Inspection for Internal Surface based on Circle Structured Light. *Sensors and Actuators A*, Vol. **122**, 2005, □68–75.
- [ZHA2004] ZHANG S., HUANG P.: High-Resolution, Real-Time Dynamic 3-D Shape Acquisition. *Proceedings of the IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Workshop (CVPRW'04)*, Vol. **3**, No. 3, 2004, □28–37.
- [ZHO1989] ZHAO Y. W., WEBSTER J.: An In-Process Roughness Measuring System for Adaptive Control of Plunge Grinding. *Surface Topography*, Vol. **2**, 1989, □247–261.
- [ZIB2007] ZIBETTI S., MÉNARD B., NESTOR D. B., QUIDER A. M., RAO S. M., TURNSHEK D. A.: Optical Properties and Spatial Distribution of MGII Absorbers from SDSS Image Stacking. *The Astrophysical Journal*, Vol. **658**, 2007, □161–184.
- [ZIE2004] ZIĘTEK B.: *Optoelektronika*. Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2004.
- [ZIE2008] ZIĘTEK B.: *Lasery*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2008.
- [ZUR1995] ZURBUCHEN T., BOCHSLER P., SCHOLZE F.: Reflection of Ultraviolet Light at 121.6 nm from Rough Surfaces. *Optical Engineering*, Vol. **34**, No. 5, 1995, □1303–1315.

## WYKAZ NORM

- [N72/53131] PN-72/M-53131:1972. Warsztatowe środki miernicze. Suwmiarka dwustronna z głębokościomierzem z zewnętrznymi szczękami krawędziowymi, z zaciskiem i z noniusem 0,05 mm.
- [N74/57025] PN-74/M-57025:1974. Otwory rozwiercane w stali i żeliwie. Średnice wiertel i rozwiertaków.
- [N85/46/1] ANSI B.46.1:1985. Surface Roughness.
- [N87/04250] PN-87/M-04250:1987. Warstwa wierzchnia. Terminologia.
- [N88/1134/1] BS.1134-1:1988. Assessment of Surface Texture. Methods and Instrumentation.
- [N89/58902] PN-89/M-58902:1989. Narzędzia do skrawania metali. Rozwiertaki, wykańczaki maszynowe do otworów walcowych.
- [N05/2387-05] ASTM Standard E2387-05:2005. Standard Practice for Goniometric Optical Scatter Measurements.
- [N94/2813] DIN EN ISO 2813:1994. Paints and Varnishes – Determination of Specular Gloss of Non-Metallic Paint Films at 20 Degrees, 60 Degrees and 85 Degrees.
- [N97/8741] JSA JIS Z 8741:1997. Specular Glossiness – Method of Measurement.
- [N97/2457-97] ASTM Standard D2457-97:1997. Standard Test Method for Specular Gloss of Plastic Films and Solid Plastics.
- [N98/11562] PN-EN ISO 11562:1998. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni. Metoda profilowa. Charakterystyki metrologiczne filtrów z korekcją fazy.
- [N99/4287] PN-EN ISO 4287:1999. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [N05/15902] PN-EN ISO 15902:2005. Optyka i przyrządy optyczne. Optyka dyfrakcyjna. Słownik.
- [N05/573-3] PN-EN 573-3:2005. Aluminium i stopy aluminium. Skład chemiczny i rodzaje wyrobów przerobionych plastycznie. Część 3: Skład chemiczny.
- [N08/523-89] ASTM Standard D523-89:2008. Standard Test Method for Specular Gloss.

## ZASTOSOWANIE METOD OPTYCZNYCH DO AKTYWNEJ KONTROLI STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI I WYMIARU PRZEDMIOTU OBRABIANEGO

### STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono najważniejsze zagadnienia związane z aktywnymi pomiarami powierzchni części maszyn i urządzeń znajdujących się w ruchu metodami optycznymi. Wśród rozpatrywanych zagadnień szczególną uwagę zwrócono na nierozwiązany w sposób zadowalający problem jednoczesnej aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni i wymiaru przedmiotu obrabianego podczas jego ruchu. Zaproponowano rozwiązanie tego problemu w postaci zintegrowanej metody optycznej łączącej różne optyczne metody pomiarowe z technikami przetwarzania i analizy obrazu.

W pierwszej części pracy obejmującej rozdziały 1-4 przedstawiono w sposób ogólny zagadnienia związane ze strukturą geometryczną powierzchni i metodami jej kontroli. Omówiono podstawowe definicje dotyczące warstwy wierzchniej, powierzchni rzeczywistej oraz elementów SGP. Scharakteryzowano proces kontroli aktywnej oraz przedstawiono różne jego warianty. Dodatkowo przeanalizowano cechy systemów kontrolno-pomiarowych realizujących kontrolę aktywną. Następnie dokonano krótkiego przeglądu wybranych metod pomiaru SGP i wymiaru takich jak: stykowe, elektryczne, pneumatyczne, ultradźwiękowe. W nieco szerszym zakresie przedstawiono metody optyczne, szczególnie te z grupy metod triangulacyjnych (triangulacja laserowa, światło strukturalne) i skaterometrycznych (skaterometria i reflektometria laserowa). Opisano również niektóre techniki przetwarzania i analizy obrazu z uwzględnieniem metody śledzenia obiektów oraz metody nakładania obrazów. Tę część pracy zakończono analizą podstaw teoretycznych dotyczących integrowanych metod optycznych. Obejmowała ona m.in. sposób wyznaczania wymiaru na podstawie zależności trygonometrycznych, przegląd różnych konfiguracji układów triangulacyjnych, charakterystykę modelu powierzchni zwierciadlanej i kryterium Rayleigha oraz rozpraszanie światła na powierzchniach chropowatych.

Druga część pracy obejmująca rozdział 5 poświęcona została eksperymentalnemu sprawdzeniu zaproponowanej zintegrowanej metody optycznej. Opisano badania rozpoznawcze, których głównym celem było przeanalizowanie wybranych metod optycznych z grupy triangulacyjnych i skaterometrycznych pod kątem możliwości ich wykorzystania do aktywnej kontroli SGP i wymiaru. W dalszej kolejności przedstawiono opis badań właściwych. Realizowano je w celu eksperymentalnego zweryfikowania opracowanej metody wraz ze wstępnym określeniem jej podstawowych właściwości metrologicznych oraz zakresu zastosowań. Na wstępie rozpatrzono kilka wariantów układów optycznych do realizacji zintegrowanej metody optycznej. Na podstawie jednego z wybranych wariantów zaprojektowano i wykonano stanowisko pomiarowe, którego dokładny opis również zamieszczono w tej części pracy. Badania prowadzono na specjalnie przygotowanych zestawach próbek w kształcie pierścieni o zewnętrznych powierzchniach polerowanych. Próbki oświetlano wiązką światła, którego źródłem był laser półprzewodnikowy. Rejestrację obrazów przedstawiających światło rozproszone, przemieszczenie plamki laserowej lub zniekształcenie wzoru optycznego światła strukturalnego dokonywano za pomocą kolorowych kamer TV wyposażonych w matrycowe detektory CCD. Uzyskane dane pomiarowe w postaci pojedynczych obrazów oraz sekwencji video przesyłano do komputera. Korzystając z odpowiedniego oprogramowania komputerowego dokonywano przetworzenia i analizy zarejestrowanych obrazów.

Końcowa część pracy zawiera najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych badań i analiz. Wnioski o charakterze ogólnym uzupełnione zostały wnioskami poznawczymi i użytkowymi. Przedstawiono także kierunki dalszych prac, które będą realizowane w przyszłości z tego zakresu.

**Słowa kluczowe:** ocena struktury geometrycznej powierzchni, kontrola wymiaru, kontrola aktywna, metody optyczne, techniki przetwarzania i analizy obrazu, ruch powierzchni

## USING OPTICAL METHODS FOR THE IN-PROCESS CONTROL OF GEOMETRICAL STRUCTURE OF SURFACE AND DIMENSION OF MACHINED PART

### SUMMARY

This work presents main issues covering the in-process measurement of machine parts being in movement, performed by optical methods. Amongst considered issues, an unresolved problem of the simultaneous in-process control of the geometrical structure of surface and dimension of machined object in movement, has been found. Solving this problem in the form of the integrated optical method combining different optical measuring methods and image processing and analyses techniques are proposed.

In the first part of the work including Chapters 1 - 4 into the general way issues associated with the GSS and methods of control are presented. Basic definitions concerning surface layer, real surface as well as GSS elements are discussed. The in-process control was characterised and different variants of this type of control presented. The main features of measurement systems for in-process control were analysed additionally. Next the short brief review of some of the methods, which are used in measurement of GSS and dimension e.g. stylus, electric, pneumatic and ultrasonic was performed. The author in more detail presented optical methods, particularly these from the group of triangulation methods (laser triangulation, structured light using projection of pattern) and scatterometric methods (laser scatterometry and laser reflectometry). Some of the image processing and analysis techniques, considering object tracking and image stacking are described also. The analyses of theoretical bases relating to the integrated optical methods finish this part of the work. In the analysis, a method of measure of the dimension in a base of trigonometrically dependences, review of various configurations of triangulation setups, characteristics of surface facet model and Rayleigh Criterion, as well as the light scattering from rough surfaces, have been considered.

In the second part of the work, including Chapter 5, experimental verification of the proposed integrated optical method has been widely described. First the preliminary investigations are shown. The main goal of these investigations was the analysis of selected optical methods from the group of triangulation and scatterometry for verifying the possibilities of using them for in-process control of GSS and dimension. Next the proper investigations are described in detail. They were realized for the experimental verifying purpose of propose method with the preliminary determining of the basic metrological proprieties as well as finding the range of possible applications. Before the carrying out of experiments few variants of optical setups for realization of integrated optical method were considered. On the basis of one of selected variants a measuring setup was designed and constructed. It has been described in detail in this part of the work as well. The investigation was carried out on special prepared samples in a form of rings with polished external surfaces. All surfaces were illuminated by light beam with a semiconductor laser as a source of light. Acquisitions of images representing: angular distribution of scattered light intensity, shift of laser spot and distorted of the structured light pattern were done by a color TV cameras equipped with CCD matrix detectors. Obtained measuring data in the form of single images and the video sequences were transferred into a computer. The images were processed and analysed using the suitable computer software.

In the final part of the work the main general conclusions following from presented analyses and investigations are given. The general conclusions were replenished by cognitive and utilitarian conclusions. The main directions to future works from this field are also introduced.

**Keywords:** assessment of geometrical structure of surface, control of dimension, in-process control, optical methods, image processing and analysis techniques, surface movement

## INFORMACJE O AUTORZE



Mgr inż. Wojciech Kapłonek urodził się 1 stycznia 1976 roku w Koszalinie. W latach 1997-2003 studiował na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn o specjalności Inżynierskie Zastosowania Komputerów. W 2003 roku uzyskał dyplom magistra inżyniera mechanika. W latach 2003-2007 był słuchaczem studiów doktoranckich prowadzonych na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. W latach 2004-2005 w ramach programu Leonardo da Vinci uczestniczył w projekcie "Micro-Handler" realizowanym na Wydziale Mechatroniki koncernu Sartorius AG w Göttingen w Niemczech. Od września 2007 roku pracuje w Zakładzie Metrologii i Jakości Politechniki Koszalińskiej. Jego zainteresowania naukowe obejmują pomiary struktury geometrycznej powierzchni metodami stykowymi i optycznymi, a także zastosowanie technik obrazowania cyfrowego oraz przetwarzania i analizy obrazów do oceny powierzchni obrobionych. Jest autorem i współautorem 22 publikacji naukowych. Uczestniczył w 2 międzynarodowych i 13 krajowych konferencjach naukowych, gdzie wygłaszał referaty.

## WYKAZ PUBLIKACJI NAUKOWYCH

### PRACE OPUBLIKOWANE W CZASOPISMACH NAUKOWO-TECHNICZNYCH INDEKSOWANYCH PRZEZ THOMSON REUTERS WEB OF SCIENCE® (LISTA FILADELFIJSKA)

- [KAP2008-1] **KAPŁONEK W.**, ŁUKIANOWICZ Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni w ruchu z zastosowaniem skaterometrii laserowej i metody nakładania obrazów. Przegląd Elektrotechniczny, R. **84**, Nr 5, 2008, □155–160.

### PRACE OPUBLIKOWANE W WYDAWNICTWACH MONOGRAFICZNYCH W JĘZYKU POLSKIM

- [KAP2009-7] **KAPŁONEK W.**, TOMKOWSKI R.: Zastosowanie systemu pomiarowego Talysurf CLI 2000 do analizy topografii powierzchni narzędzi ściernych [w] Współczesne problemy obróbki ścierniej (Plichta J. Red.). Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr **167**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, □225–234.
- [KAP2009-8] **KAPŁONEK W.**, ŁUKIANOWICZ Cz.: Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny nierówności powierzchni mikrowygładzanych foliami mikrościernymi [w] Współczesne problemy obróbki ścierniej (Plichta J. Red.). Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr **167**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, □455–464.
- [KAP2009-9] **KAPŁONEK W.**, ŁUKIANOWICZ Cz.: Wykrywanie wad powierzchni obrobionych z wykorzystaniem skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu [w] Współczesne problemy obróbki ścierniej (Plichta J. Red.). Monografia Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej Nr **167**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2009, □465–474.

### PRACE OPUBLIKOWANE W CZASOPISMACH NAUKOWYCH I NAUKOWO- TECHNICZNYCH O ZASIĘGU KRAJOWYM

- [KAP2006-1] **KAPŁONEK W.**: Ocena topografii arkuszy ściernych z wykorzystaniem światła strukturalnego i komputerowej analizy obrazu. Pomiary, Automatyka, Kontrola, Nr **5**, 2006, □38–40.
- [KAP2007-1] **KAPŁONEK W.**, ŁUKIANOWICZ Cz.: Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni będących w ruchu. Przegląd Mechaniczny Nr **9S**, 2007, □119–124.

- [KAP2008-3] **KAPŁONEK W.:** Zastosowanie metody nakładania obrazów do oceny mikronierówności powierzchni w ruchu. *Advances In Materials Science*, Vol. **8**, No. 2(16), 2008, □20–27.
- [KAP2008-4] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni regenerowanych przez napawanie laserowe i plazmowe. *Advances In Materials Science*, Vol. **8**, No. 2(16), 2008, □28–35.
- [KAP2008-5] **KAPŁONEK W., ŻURAWSKI Ł.:** Ocena mikronierówności powierzchni frezowanych z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych i komputerowej analizy obrazu. *Advances In Materials Science*, Vol. **8**, No. 2(16), 2008, □36–43.
- [KAP2009-1] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Kontrola wymiarów zewnętrznych przedmiotów obrobionych z wykorzystaniem metody śledzenia ruchu obiektów. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Vol. **55**, Nr 4, 2009, □251–254.
- [KAP2009-2] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Analiza zakresu dynamicznego sygnału zawartego w obrazach skaterometrycznych przetworzonych metodą nakładania obrazów. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Vol. **55**, Nr 4, 2009, □232–235.
- [KAP2009-3] **KAPŁONEK W., TOMKOWSKI R.:** Analiza topografii dyfrakcyjnych elementów optycznych z wykorzystaniem interferometrii światła białego. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, Vol. **55**, Nr 4, 2009, □272–275.

PRACE OPUBLIKOWANE W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH  
(KONFERENCJE MIĘDZYNARODOWE)

- [KAP2007-2] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Laser Scatterometry Used for the Assessment of Microfinished Shafts. *Proceedings of the IV. International Congress on Precision Machining ICPM 2007* (Adamczak S., Stępień K. Eds.), Vol. **1**, Section: Design & Testing II, Publications Kielce University of Technology, 2007, □291–296.
- [KAP2009-4] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Assessment of Surface Roughness in Movement by Image Stacking. *Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces* (Pawlus P., Blunt L., Rosen B.-G., Thomas T., Wieczorowski M., Zahouani H. Eds.), Publications Rzeszów University of Technology, 2009, □295–299.
- [KAP2009-5] **KAPŁONEK W., ŁUKIANOWICZ Cz.:** Assessment of Surface Roughness of Microfinished Plastics Surfaces by Laser Scatterometry. *Proceedings of the V. International Congress on Precision Machining ICPM 2009*. (w druku)

PRACE OPUBLIKOWANE W MATERIAŁACH KONFERENCYJNYCH  
(KONFERENCJE KRAJOWE)

- [ŁUK2004] ŁUKIANOWICZ Cz., **KAPŁONEK W.:** Analiza możliwości aktywnych pomiarów metodą optyczną nierówności powierzchni wałków obrabianych ściernie. *Materiały konferencyjne XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej. Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego*, Nr **36**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2004, □293–300.
- [KAP2006-2] **KAPŁONEK W.:** Analiza koncepcji jednoczesnego pomiaru nierówności powierzchni i wymiaru geometrycznego z wykorzystaniem metod optycznych. *Materiały konferencyjne VII Konferencji Naukowo-Technicznej "Wytwarzanie Elementów Maszyn ze Stopów Metali o Specjalnych Właściwościach"*. *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, Nr **227**, seria: Mechanika, z. 66, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2006, □113–121.
- [KAP2006-3] **KAPŁONEK W.:** Optoelektroniczna głowica pomiarowa przeznaczona do jednoczesnej oceny nierówności powierzchni i wymiaru geometrycznego. *Materiały konferencyjne I Konferencji Naukowej "Doktoranci Dla Gospodarki"*. *Zeszyty Naukowe Wydziału Mechanicznego*, Nr **39**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2006, □33–39.

- [KAP2006-4] **KAPŁONEK W.**, KAPŁONEK S.: Wirtualne laboratorium metrologiczne. Materiały konferencyjne II Krajowej Konferencji Naukowej "Nowe technologie w kształceniu na odległość", (Królikowski T., Susłow W., Bałasz B. Red.) Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2006, 105–108
- [KAP2007-3] **KAPŁONEK W.**, WIERZBICKI M.: Klasyfikacja powierzchni obrabianych na podstawie obrazów optycznych światła rozproszonego. Materiały konferencyjne IV Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (Figiel M., Kukiełka L. Red.). Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2007, 31–41.
- [KAP2008-2] **KAPŁONEK W.**, ZIÓŁKOWSKI P.: Zastosowanie metody śledzenia ruchu obiektów do kontroli wymiarów powierzchni obrabianych. Materiały konferencyjne V Konferencji Studentów i Młodych Pracowników Nauki Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej oraz I Ogólnopolskiej Konferencji Studenckich Kół Naukowych Uczelni Technicznych (Figiel M., Kukiełka L. Red.). Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008, 82–95.
- [KAP2009-6] **KAPŁONEK W.**, ŁUKIANOWICZ Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni obrabianych na podstawie obrazu światła rozproszonego. Materiały konferencyjne XIII Krajowej i IV Międzynarodowej Konferencji "Metrologia w Technikach Wytwarzania". Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2009. (w druku)