

POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY
KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI

dr inż. Wojciech Kapłonek

Autoreferat

Załącznik do wniosku o przeprowadzenie postępowania
habilitacyjnego w dziedzinie Nauk Technicznych
w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn

Koszalin, 07.11.2017

Spis treści

1. CHARAKTERYSTYKA HABILITANTA.....	3
1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe.....	3
1.2. Przebieg pracy zawodowej.....	3
2. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO	4
2.1. Syntetyczny opis osiągnięć naukowych zawartych w monografii.....	4
2.2. Znaczenie naukowe i uytylitarne osiągnięcia.....	7
3. OPIS OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH W ZAKRESIE TEORETYCZNYCH I DOŚWIADCZALNYCH PODSTAW ZASTOSOWANIA OPTYCZNYCH METOD POMIAROWYCH WYKORZYSTUJĄCYCH ANALIZĘ ŚWIATŁA ROZPROSZONEGO W OCENIE STANU POWIERZCHNI PRZEDMIOTÓW I NARZĘDZI ŚCIERNYCH W PROCESACH OBRÓBKI ŚCIERNEJ	8
3.1. Metodyka oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych	8
3.2. Podstawy teoretyczne metody pomiarowej przeznaczonej do oceny powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych.....	14
3.3. Stanowiska badawcze przeznaczone do realizacji oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych.....	25
3.4. Metodyka oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu	30
3.5. Metodyka oceny stanu powierzchni metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych po procesach mikrowygładzania FTS	34
3.6. Metodyka oceny defektów powierzchni obrobionych ściernie.....	40
3.7. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów żelaza	43
3.8. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów niklu i tytanu.....	49
3.9. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania materiałów ceramicznych.....	55
3.10. Metodyka oceny stanu powierzchni nowoczesnych ściernych materiał nasypowych.....	59
4. CHARAKTERYSTYKA DOROBKU NAUKOWEGO W ODNIESIENIU DO OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH, DYDAKTYCZNYCH I ORGANIZACYJNYCH	66
4.1. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć naukowo-badawczych	66
4.2. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć dydaktycznych.....	68
4.3. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć organizacyjnych.....	69

1. Charakterystyka habilitanta

1.1. Uzyskane stopnie i tytuły naukowe

- **2010 – stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn** uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej. Tytuł rozprawy: *”Zastosowanie metod optycznych do aktywnej kontroli struktury geometrycznej powierzchni i wymiaru przedmiotu obrabianego”*, promotor: dr hab. inż. Czesław Łukianowicz, recenzenci: prof. dr inż. Tadeusz Karpiński (Politechnika Koszalińska), dr hab. inż. Paweł Pawlus (Politechnika Rzeszowska). Rozprawa doktorska **obroniona z wyróżnieniem**.
- **2003 – tytuł zawodowy magistra inżyniera kierunku Mechanika i Budowa Maszyn** uzyskany na Wydziale Mechanicznym Politechniki Koszalińskiej, kierunek: Mechanika i Budowa Maszyn, specjalność: Inżynierskie Zastosowania Komputerów. Tytuł pracy: *”Teoretyczne i użytkowe podstawy kompresji i przetwarzania sygnałów dźwiękowych”*, promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak.

1.2. Przebieg pracy zawodowej

01.10.2010 – do teraz	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji. Praca na stanowisku adiunkta w Zespole Badawczo-Dydaktycznym Metrologii i Jakości.
10.03.2010 – 30.09.2010	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji. Praca na stanowisku asystenta w Zakładzie Metrologii i Jakości.
01.01.2010 – 09.03.2010	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji. Praca na stanowisku instruktora w Zakładzie Metrologii i Jakości.
01.10.2008 – 31.12.2009	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji. Praca na stanowisku starszego technika w Zakładzie Metrologii i Jakości.
01.10.2007 – 30.09.2008	Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji. Praca na stanowisku asystenta w Zakładzie Metrologii i Jakości.

2. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie, wynikające z artykułu 16. ustęp 2. ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniu naukowym i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.), wskazuję monografię:

Kapłonek W. (2017). *Teoretyczne i doświadczalne podstawy zastosowania optycznych metod pomiarowych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w ocenie stanu powierzchni przedmiotów i narzędzi ściernych w procesach obróbki ściernej*. Monografia WM PKosz., **327**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, ISSN 0239-7129, ISBN 978-83-7365-460-0.

Wskazana autorska monografia uzyskała pozytywne recenzje wydawnicze dr. hab. inż. Jacka Reintera, profesora nadzwyczajnego Politechniki Wrocławskiej, oraz dr. hab. inż. Andrzeja Kawalca, profesora nadzwyczajnego Politechniki Rzeszowskiej. Zawiera ona ogółem 281 stron druku zwartego, w tym 38 tabel, 74 rysunki oraz obszerny wykaz literatury zawierający 730 pozycji (w tym 34 autorskie i współautorskie pozycje literaturowe).

2.1. Syntetyczny opis osiągnięć naukowych zawartych w monografii

1. Opracowanie **koncepcji oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych** w zakresie nierówności powierzchni oraz wykrywania i analizowania ich niespecyficznych elementów, powstających w czasie procesu obróbkowego z zastosowaniem metody optycznej wykorzystującej obrazowanie i analizę światła rozproszonego, wspomaganej wybranymi technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego.
2. Opracowanie **podstaw teoretycznych metody pomiarowej przeznaczonej do oceny powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych**. Wytypowanie odpowiedniej metody pomiarowej, przeanalizowanie jej właściwości metrologicznych oraz możliwości aplikacyjnych w odniesieniu do oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych. Przeanalizowanie możliwości integracji z innymi metodami pomiarowymi lub technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego oraz sprawdzenie możliwości prowadzenia oceny podczas ruchu badanej powierzchni.
3. Zaprojektowanie i zestawienie **stanowisk badawczych do realizacji oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych**. Opracowanie koncepcji stanowisk badawczych oraz przyjęcie założeń do ich technicznej realizacji. Zaprojektowanie konfiguracji, dobranie elementów składowych i ich zestawienie. Doświadczalne zweryfikowanie poprawności realizowanych procedur pomiarowych.

W odniesieniu do **zastosowania metodyki w aplikacjach dotyczących oceny powierzchni przedmiotów obrobionych** można wyróżnić następujące osiągnięcia:

4. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu**. Doświadczalne zweryfikowanie poprawności metodyki podczas oceny stanu powierzchni próbek płaskich (stal C45, pomiar w stanie statycznym) i walcowych (stal NC6, pomiar w ruchu) realizowanej na zestawionym stanowisku badawczym będącym komponentem eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowego do aktywnej kontroli SGP. Opracowanie procedur akwizycji i przetwarzania danych za pomocą programu

pomiarowego opracowanego w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1 firmy Keyence. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów chropowatości dla ocenianych powierzchni na podstawie analizy obrazów rozkładu natężenia światła rozproszonego.

5. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych po procesach mikrowygładzania FTS**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni próbek walcowych (stal C45, mosiądz CW612N, Ertalon[®] 4.6, Ertalon[®] 66 SA, Ertalon[®] LFX, Ertalon[®] 6 SA, Ertalyte[®], Ertacetal[®] C, Tarflen[®] i Tarnamid T-27) realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dla ocenianych powierzchni oraz przeprowadzenie analiz densytometrycznych na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Dokonanie korelacji parametrów uzyskanych z analizy obrazu z parametrami chropowatości powierzchni.
6. Opracowanie **metodyki oceny defektów powierzchni obrobionych ściernie**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni próbek pierścieniowych (aluminium AW6082, mosiądz CW612N, żeliwo GJL150 oraz stal C45 i St5) analizowanych w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości zbioru wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dla ocenianych powierzchni na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Porównanie uzyskanych rezultatów z danymi uzyskanymi metodą referencyjną (profilometria stykowa).

W odniesieniu do **zastosowania metodyki w aplikacjach dotyczących oceny powierzchni narzędzi ściernych** można wyróżnić następujące osiągnięcia:

7. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów żelaza**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni ściernicy ceramicznej 1-35×20×10SG/F46K7VTO, zalepionej materiałem obrabianym (stal 100Cr6) po procesie szlifowania wewnętrznego otworów w pierścieniu łożyskowym, realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dla ocenianych powierzchni ściernicy na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Porównanie uzyskanych rezultatów z danymi uzyskanymi metodą referencyjną (profilometria optyczna). Wyznaczenie stopnia zalepienia narzędzia ściernego na podstawie procentowego udziału obszarów zalepionych w analizowanych obszarach powierzchni.
8. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów niklu i tytanu**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni ściernic ceramicznych 1-35×10×10SG/F46G10VTO (impregnowanych i nie impregnowanych substancjami antyadhezyjnymi), zalepionych materiałem obrabianym (stop Titanium Grade 2[®]) po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych pierścieni łożyskowych, realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych oraz przeprowadzenie analiz densytometrycznych dla ocenianych powierzchni ściernic na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Określenie najkorzystniejszej do zastosowania (w kontekście przeprowadzonych prac badawczych) substancji impregnujących oraz zweryfikowanie poprawności jej wprowadzenia w strukturę narzędzia ściernego.

9. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania materiałów ceramicznych**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni ściernic z ziarnami diamentowymi 1-35×5×20D75SV4 i 1-35×5×20D126SV4, zalepionych materiałem obrabianym po precyzyjnym szlifowaniu płytek ceramicznych, realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dla ocenianych powierzchni ściernic na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Porównanie uzyskanych rezultatów z danymi uzyskanymi metodą referencyjną (profilometria stykowa).

10. Opracowanie **metodyki oceny stanu powierzchni nowoczesnych ściernych materiałów nasypowych**. Doświadczalne zweryfikowanie metodyki podczas oceny stanu powierzchni jednowarstwowych dysków z ziarnami ściernymi Trizact™ realizowanej w stanie statycznym na zestawionym stanowisku badawczym. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dla ocenianych powierzchni dysków na podstawie zarejestrowanych obrazów cyfrowych rozkładu natężenia światła rozproszonego. Wyznaczenie wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych, porównanie uzyskanych rezultatów z danymi uzyskanymi dla narzędzi ściernych o zbliżonych właściwościach powierzchni czynnych.

2.2. Znaczenie naukowe i użyteczne osiągnięcia

- Zagadnienia dotyczące oceny stanu powierzchni przedmiotu obrabianego i narzędzia ściernego są szeroko reprezentowane w literaturze światowej. Stosunkowo szeroki zakres problemów obejmujących różne aspekty takiej oceny pokazuje, iż zagadnienia te są ważne i wciąż aktualne zwłaszcza na styku obszarów technologii obróbki ściernej i techniki pomiarowej. W stosunku do tej ostatniej należy zaznaczyć, iż w omawianych zagadnieniach dominującą rolę odgrywają metody optyczne, ze szczególnym uwzględnieniem metod wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła. Metody te, wsparte technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, stanowią nową jakość w podejściu do oceny i analizy stanu powierzchni przedmiotów obrabianych i narzędzi ściernych.
- Wiele z zagadnień poruszonych w niniejszej monografii ma charakter poznawczy w zakresie aplikacyjnego wykorzystania zjawiska rozpraszania światła m.in.:
 - w ocenie stanu powierzchni obrabianych (w zakresie nierówności powierzchni oraz wykrywania i analizowania ich niespecyficznych elementów) wykonanych z metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych po procesach obróbki ściernej,
 - w ocenie stanu powierzchni narzędzi ściernych (w zakresie detekcji i analizy intensywności jej zalepiania wiórami materiału obrabianego) po procesach szlifowania materiałów konwencjonalnych (stal 100Cr6) i nowoczesnych materiałów trudno skrawalnych (stop Titanium Grade 2[®]).
- W pracy przedstawiono i zweryfikowano doświadczalnie przydatność wielu szeroko stosowanych metod pomiarowych, takich jak, m.in. metody mechaniczne, optyczne i wybrane metody mikroskopii elektronowej. Największą uwagę skupiono jednak na metodach optycznych wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła. W zastosowaniach tych wykorzystano również w nowatorski sposób jedną z metod przetwarzania obrazów ruchomych. Głównym jednak atutem pracy jest zaproponowana metodyka. Cechuje się ona dużą uniwersalnością, a przez zastosowanie struktury modułowej, umożliwia dopasowanie do danej aplikacji związanej z oceną stanu powierzchni przedmiotu obrabianego i narzędzia ściernego.
- Praca posiada również aspekt praktyczny – daje podstawy do przeanalizowania możliwości zastosowania wybranych metod optycznych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w aplikacjach przeznaczonych do oceny stanu powierzchni w procesach obróbki ściernej. Może być więc wykorzystana jako źródło szeregu informacji o charakterystyce, właściwościach metrologicznych i możliwościach integracji optycznych metod rozpraszania światła oraz technik przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego w przedstawionym zakresie. Może również dostarczyć wielu praktycznych informacji dotyczących projektowania różnego rodzaju eksperymentalnych układów pomiarowych stosowanych w wymienionych aplikacjach.

3. Opis osiągnięć naukowo-badawczych w zakresie teoretycznych i doświadczalnych podstaw zastosowania optycznych metod pomiarowych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w ocenie stanu powierzchni przedmiotów i narzędzi ściernych w procesach obróbki ścierniej

Poniżej dokonano syntetycznego przeglądu wybranych prac badawczych zawartych we wskazanym osiągnięciu naukowym, tj. monografii pt.: *Teoretyczne i doświadczalne podstawy zastosowania optycznych metod pomiarowych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w ocenie stanu powierzchni przedmiotów i narzędzi ściernych w procesach obróbki ścierniej*.

3.1. Metodyka oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych

Wprowadzanie

Prawidłowe przeprowadzenie oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych związane jest z przyjęciem odpowiedniej metodyki. Kompleksowość takiej oceny wymusza rozbudowanie metodyki i poszerzenie jej o szereg działań (kroków), takich jak m.in. precyzyjne pomiary przeprowadzane różnymi metodami (konwencjonalnymi i dedykowanymi) lub zaawansowana wielokryterialna analiza uzyskanych danych pomiarowych w różnych środowiskach programowych. Podejście to jest uzasadnione w przypadku badań naukowych obejmujących np. szereg prac eksperymentalnych prowadzonych w warunkach laboratoryjnych. Liczba kroków metodyki, szczególnie podczas oceny przeprowadzanej w warunkach przemysłowych, jest zazwyczaj zredukowana do najbardziej niezbędnych (kluczowych), zapewniających utrzymanie żądanej jakości procesu kontroli. Opracowując metodykę należy zapewnić jej odpowiednie cechy, takie jak, m.in.:

- możliwość określenia danych kroków metodyki i kolejności ich wykonywania;
- zapewnienie dużej elastyczności przez zmianę kolejności wykonywania kroków, dodania lub usunięcia danego kroku lub wykonywania równolegle kilku kroków;
- zapewnienie metodyce uniwersalności – sprzyja to jej zastosowaniu w innych aplikacjach – bezpośrednio lub po drobnej adaptacji i rekonfiguracji kroków.

Założenia do opracowania metodyki

W przypadku opracowywania metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych dokonano pewnych założeń, które w przedstawiono, odpowiednio, w tabelach 1 i 2. Założenia zostały szczegółowo sprecyzowane – osobno dla każdego z analizowanych rodzajów powierzchni. Każda z nich zawiera zbiór analizowanych cech, proponowaną charakterystykę pomiarów oraz proponowane metody i techniki pomiarowe, rozpatrywane z punktu widzenia pomiarów laboratoryjnych i przemysłowych.

W przypadku oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych w procesach obróbki ścierniej, najważniejszymi analizowanymi cechami powinny być: chropowatość, kształt oraz możliwość detekcji drobnych wad i zanieczyszczeń powierzchni. Natomiast w przypadku oceny stanu powierzchni narzędzi obróbkowych po procesach obróbki ścierniej takimi cechami będą: makro- i mikrostruktura zalepień materiałem obrabianym, jej wymiary geometryczne i właściwości fotometryczne. Niezależnie od rodzaju analizowanej powierzchni pomiary ww. cech powinny odbywać się w sposób bezstykowy,

przy zachowaniu dużej czułości, dokładności i wysokiej powtarzalności uzyskiwanych wyników, także podczas ruchu ocenianej powierzchni. Preferowanymi metodami pomiarowymi do zastosowań w ocenie stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych, są metody z grup: mechanicznych, optycznych, mikroskopii z sondą skanującą i mikroskopii elektronowej. Powinny być one wspomagane wybranymi technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego.

Tab. 1. Założenia do opracowania metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych w procesach obróbki ścierniej

Lp.	Oceniane cechy powierzchni przedmiotu obrobionego ścierniej	PL	PP
1.	Chropowatość powierzchni	Tak	Tak
	Kształt powierzchni	Tak	Nie
	Drobne wady	Tak	Tak
	Zanieczyszczenia	Opcjonalnie	Opcjonalnie
Charakterystyka pomiarów		PL	PP
2.	Pomiar bezstykowy	Tak	Tak
	Wysoka czułość	Tak	Tak
	Wysoka dokładność i powtarzalność pomiaru	Tak	Tak ¹⁾
	Stosunkowo krótki czas pomiaru	Tak	Tak
	Możliwość wykonywanie pomiaru w ruchu	Opcjonalnie	Tak
Proponowane metody i techniki pomiarowe		PL	PP
3.	Mechaniczne	Tak	Nie
	Optyczne	Tak	Tak
	Mikroskopii z sondą skanującą	Tak	Nie
	Mikroskopii elektronowej	Tak	Nie
	Komputerowe techniki przetwarzania i analizy obrazu	Tak	Tak

PL – pomiary prowadzone w warunkach laboratoryjnych, PP – pomiary prowadzone w warunkach przemysłowych, ¹⁾ w ustalonym zakresie pomiarowym

Tab. 2. Założenia do opracowania metodyki oceny stanu powierzchni narzędzi obróbkowych w procesach obróbki ścierniej

Lp.	Oceniane cechy powierzchni narzędzia obróbkowego	PL	PP
1.	Makrostruktura zalepień	Tak	Nie
	Mikrostruktura zalepień	Tak	Nie
	Wymiary geometryczne obszaru zalepionego	Tak	Tak
	Cechy fotometryczne obszaru zalepionego	Tak	Tak
Charakterystyka pomiarów		PL	PP
2.	Pomiar bezstykowy	Tak	Tak
	Wysoka czułość	Tak	Tak
	Wysoka dokładność i powtarzalność pomiaru	Tak	Tak ¹⁾
	Stosunkowo krótki czas pomiaru	Tak	Tak
	Możliwość wykonywanie pomiaru w ruchu	Opcjonalnie	Tak
Proponowane metody i techniki pomiarowe		PL	PP
3.	Mechaniczne	Tak	Nie
	Optyczne	Tak	Tak
	Mikroskopii z sondą skanującą	Opcjonalnie	Nie
	Mikroskopii elektronowej	Tak	Nie
	Komputerowe techniki przetwarzania i analizy obrazu	Tak	Tak

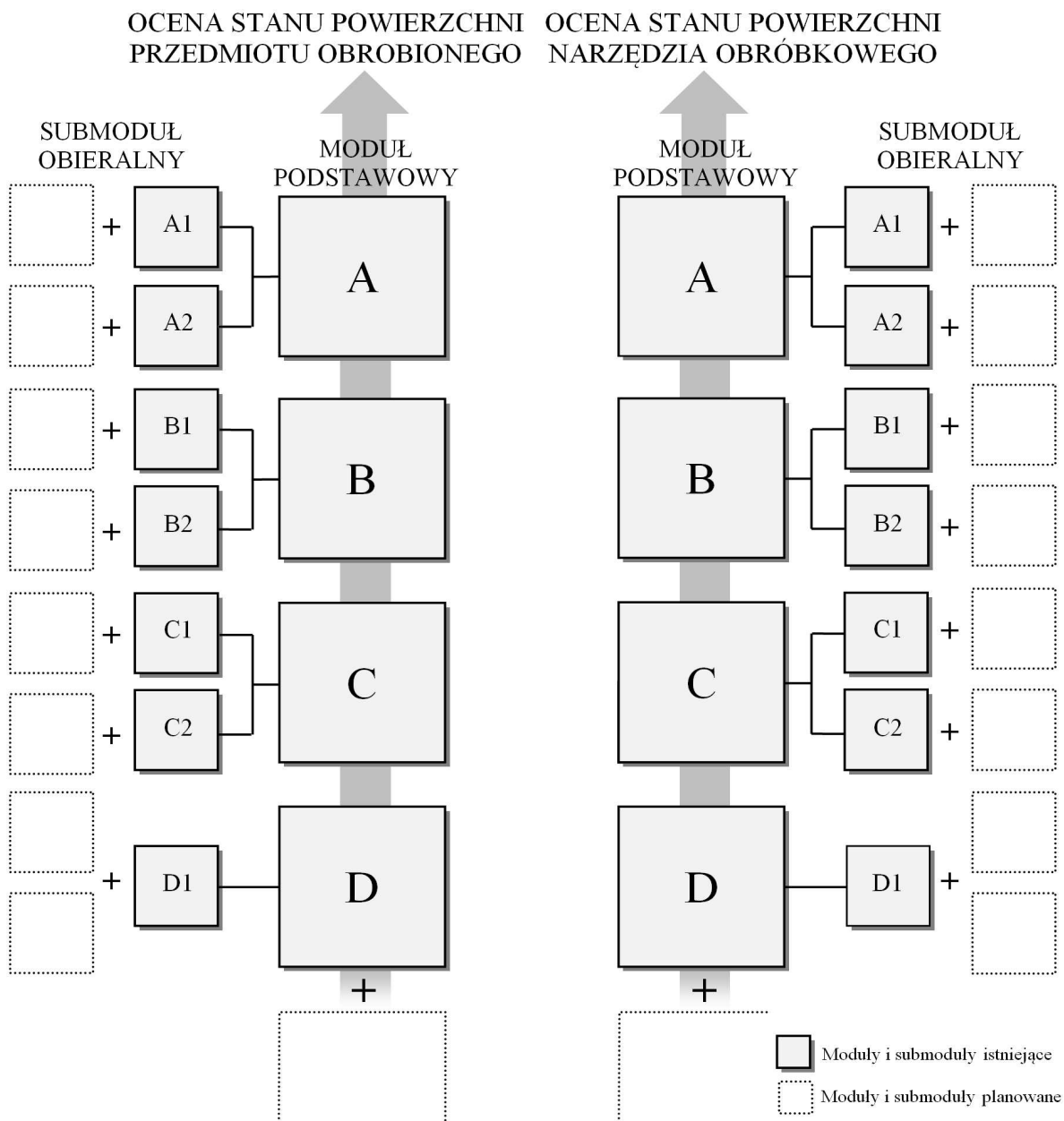
PL – pomiary prowadzone w warunkach laboratoryjnych, PP – pomiary prowadzone w warunkach przemysłowych,¹⁾ w ustalonym zakresie pomiarowym

Modułowa metodyka oceny

Przedstawione powyżej założenia, po dokładnym przeanalizowaniu, posłużyły do opracowania metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych, w zakresie nierówności powierzchni oraz wykrywania i analizowania ich niespecyficznych elementów, powstających w czasie prowadzenia procesu obróbkowego, z zastosowaniem jednej z metod

optycznych, wykorzystującej obrazowanie i analizę światła rozproszonego (metody różniczkowej), wspomaganej wybranymi technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego.

Autor przyjął, iż proponowana metodyka powinna posiadać uniwersalny charakter i integrować możliwości oceny obu rodzajów powierzchni. W tym celu dogodnym rozwiązaniem powinna być jej modułowa struktura, która w zależności od rodzaju ocenianej powierzchni, cechowała by się dużą elastycznością i rozbudowanymi możliwościami konfiguracyjnymi. Szeroki zakres możliwych do zastosowania referencyjnych metod pomiarowych oraz technik przetwarzania i analizy obrazu sprzyjałby dostosowaniu ich do specyfiki danego rodzaju powierzchni i oczekiwanych rezultatów prowadzonej oceny. Na rysunku 1 przedstawiono w postaci schematu blokowego modułową koncepcję metodyki, w tabeli 3 zestawiono i scharakteryzowano proponowane moduły, natomiast w tabeli 4 podano konfiguracje modułów metodyki pod aplikacje laboratoryjne i przemysłowe.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie koncepcji metodyki oceny stanu powierzchni przedmiot obrabianego i powierzchni narzędzia obróbkowego

Tab. 3. Zestawienie proponowanych modułów metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotu obrabionego i powierzchni narzędzia obróbkowego

M	Nazwa	sM	Realizowane funkcje	PPO		PNO	
				PL	PP	PL	PP
A	Moduł obrazowania i akwizycji cech mikro i makro	A1	Obrazowanie powierzchni w makro skali (AC, K) ¹⁾	Nie	Nie	Tak	Nie
		A2	Obrazowanie powierzchni w mikro skali (MS, MK, ME) ¹⁾	Tak	Nie	Tak	Nie
B	Moduł obrazowania i analizy światła rozproszonego	B1	Akwizycja i przetwarzanie obrazów światła rozproszonego (analiza wstępna) (AC, K) ¹⁾	Tak	Tak	Tak	Tak
		B2	Analiza obrazów światła rozproszonego (analiza właściwa)	Tak ²⁾	Tak ²⁾	Tak ²⁾	Tak ²⁾
C	Moduł analizy topografii powierzchni	C1	Rejestracja topografii powierzchni (PS, PO, MI, MRO) ¹⁾	Tak ³⁾	Nie	Tak ⁴⁾	Nie
		C2	Analiza i wizualizacja danych uzyskanych z pomiaru topografii powierzchni	Tak	Nie	Tak	Nie
D	Moduł interpretacji wyników	D1	Interpretacja uzyskanych wyników	Tak	Tak	Tak	Tak

M – moduł podstawowy, sM – obieralny submoduł, AC – aparat cyfrowy, K – kamera z detektorem CCD, MS – mikroskop świetlny, MK – mikroskop konfokalny, ME – elektronowy mikroskop skaningowy, PS – profilometr stykowy, PO – profilometr optyczny, MI – mikroskop interferencyjny, MRO – mikroskop różnicowania ogniskowego, PPO – ocena stanu powierzchni przedmiotu obrabionego, PNO – ocena stanu powierzchni narzędzia obróbkowego, PL – pomiary prowadzone w warunkach laboratoryjnych, PP – pomiary prowadzone w warunkach przemysłowych, ¹⁾ przykładowa aparatura obserwacyjno-pomiarowa, ²⁾ z wykorzystaniem technik przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego (statycznego lub ruchomego), ³⁾ pomiar metodami stykowymi lub optycznymi, ⁴⁾ pomiar wyłącznie metodami optycznymi

Tab. 4. Przykładowe konfiguracje modułów metodyki pod aplikacje laboratoryjne i przemysłowe

Specyfika zastosowania metodyki	Konfiguracja modułów metodyki	
	PPO	PNO
Metodyka w aplikacjach laboratoryjnych	A2(ME)+B1(AC)+B2+C1(PS)+C2+D1	A1(K)+A2(MK, ME)+ B1(K)+B2+C1(PO)+ C2+D1
	B1(K)+B2+C1(PS, MI, MRO)+C2+D1	A1(AC)+A2(ME)+ B1(AC)+B2+C1(PO, MRO)+ C2+D1
Metodyka w aplikacjach przemysłowych	B1(K)+B2+D1	B1(K)+B2+D1

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotów obrabianych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych:

- właściwa ocena stanu powierzchni przedmiotów obrabianych i powierzchni narzędzi ściernych wymaga przyjęcia odpowiedniej metodyki. Musi być ona na tyle rozbudowana i posiadać odpowiednie cechy, aby zapewnić kompleksowość oceny i stosowalność w szeregu aplikacji o charakterze laboratoryjnym lub przemysłowym;
- metodyka oceny stanu powierzchni przedmiotów obrabianych i powierzchni narzędzi ściernych wymaga przyjęcia odpowiednio sprecyzowanych założeń odnośnie m.in. analizowanych cech, takich jak, np. chropowatość, kształt, detekcja drobnych wady i zanieczyszczeń powierzchni, makro- i mikrostruktura zalepień materiałem obrabianym, jej wymiary geometryczne i właściwości fotometryczne – osobno dla każdego z analizowanych rodzajów powierzchni (tab. 1-2);
- analiza ww. założeń pozwoliła na opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni przedmiotów obrabianych i powierzchni narzędzi ściernych, w zakresie nierówności powierzchni oraz wykrywania i analizowania ich niespecyficznych elementów, powstających w czasie prowadzenia procesu obróbkowego (rys. 1). Jako główną metodę służącą do przeprowadzania ww. oceny wybrano jedną z metod wykorzystujących obrazowanie i analizę światła rozproszonego – metodę różniczkową, wspomaganą wybranymi technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego;
- w celu zapewnienia możliwości oceny obu ww. rodzajów powierzchni metodyka posiada modułową strukturę (tab. 3), która w zależności od rodzaju ocenianej powierzchni, cechuje się dużą elastycznością i rozbudowanymi możliwościami konfiguracyjnymi (tab. 4). Pozwala to dostosować ją do danej aplikacji niezależnie od tego czy jest ona ukierunkowana na precyzyjną ocenę laboratoryjną czy szybką ocenę prowadzoną w warunkach przemysłowych.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2011). *Medição da dispersão da luz do laser usada para impedir empastamento no rebolo*. Máquinas e Metais, **47**(544), 104–117.
2. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz., Nadolny K. (2012). *Methodology of the Assessment of the Abrasive Tool's Active Surface using Laser Scatterometry*. T. Can. Soc. Mech. Eng., **36**(1), 49–66.
3. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2013). *The Diagnostics of Abrasive Tools after Internal Cylindrical Grinding of Hard-to-Cut Materials by Means of a Laser Technique using Imaging and Analysis of Scattered Light*. Arab. J. Sci. Eng., **38**(4), 953–970.
4. **Kapłonek W.** (2017). *Teoretyczne i doświadczalne podstawy zastosowania optycznych metod pomiarowych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w ocenie stanu powierzchni przedmiotów i narzędzi ściernych w procesach obróbki ściernej*. Monografia WM PKosz., **327**, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin.

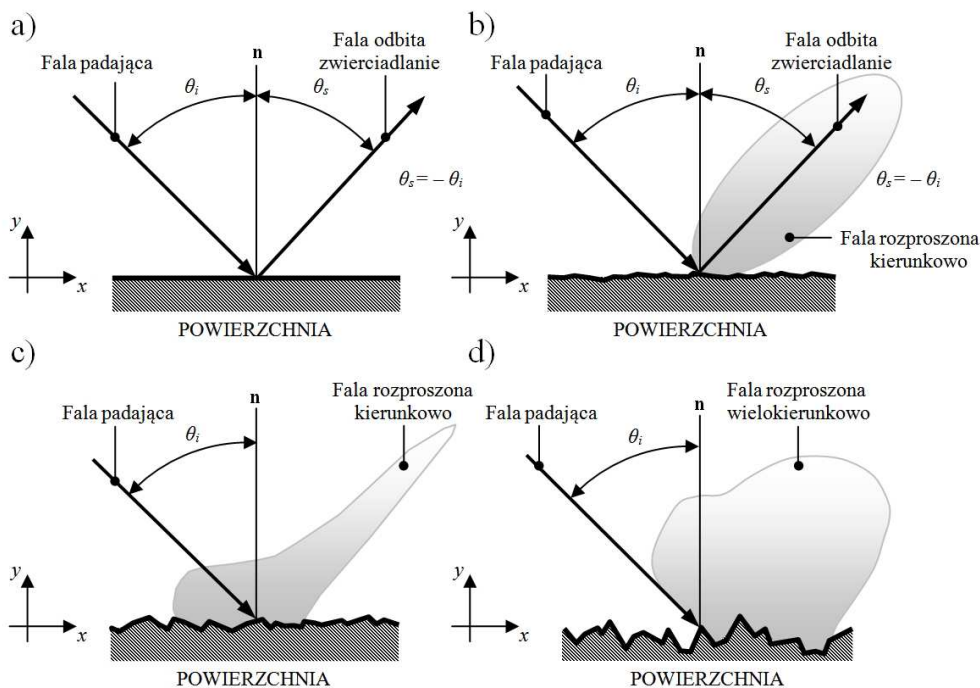
3.2. Podstawy teoretyczne metody pomiarowej przeznaczonej do oceny powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych

Zjawisko rozpraszania światła

Zjawisko rozpraszania światła towarzyszy propagacji światła we wszystkich ośrodkach materialnych. Uwidacznia się ono w takim oddziaływaniu materii ośrodka i fali świetlnej, które powoduje, że część energii światła propaguje w innych kierunkach niż kierunek fali padającej. Oddziaływanie to jest skomplikowanym procesem elektrodynamicznym, który polega na pochłanianiu energii fali pierwotnej przez nieobojętne elektrycznie cząstki ośrodka materialnego. Proces absorpcji energii fali świetlnej wywołuje wymuszone drgania cząstek, co prowadzi do generowania i reemisji przez te cząstki fal wtórnych.

Główną przyczyną warunkującą zajście zjawiska rozpraszania światła są niejednorodności ośrodka optycznego, powodujące zmiany lokalnych kierunków propagacji światła. Mogą mieć one różny charakter i występować we wnętrzu ośrodka lub na granicy dwóch ośrodków optycznych. Źródłem wewnętrznych niejednorodności mogą być m.in. lokalne fluktuacje gęstości, niejednorodność i anizotropia materiału.

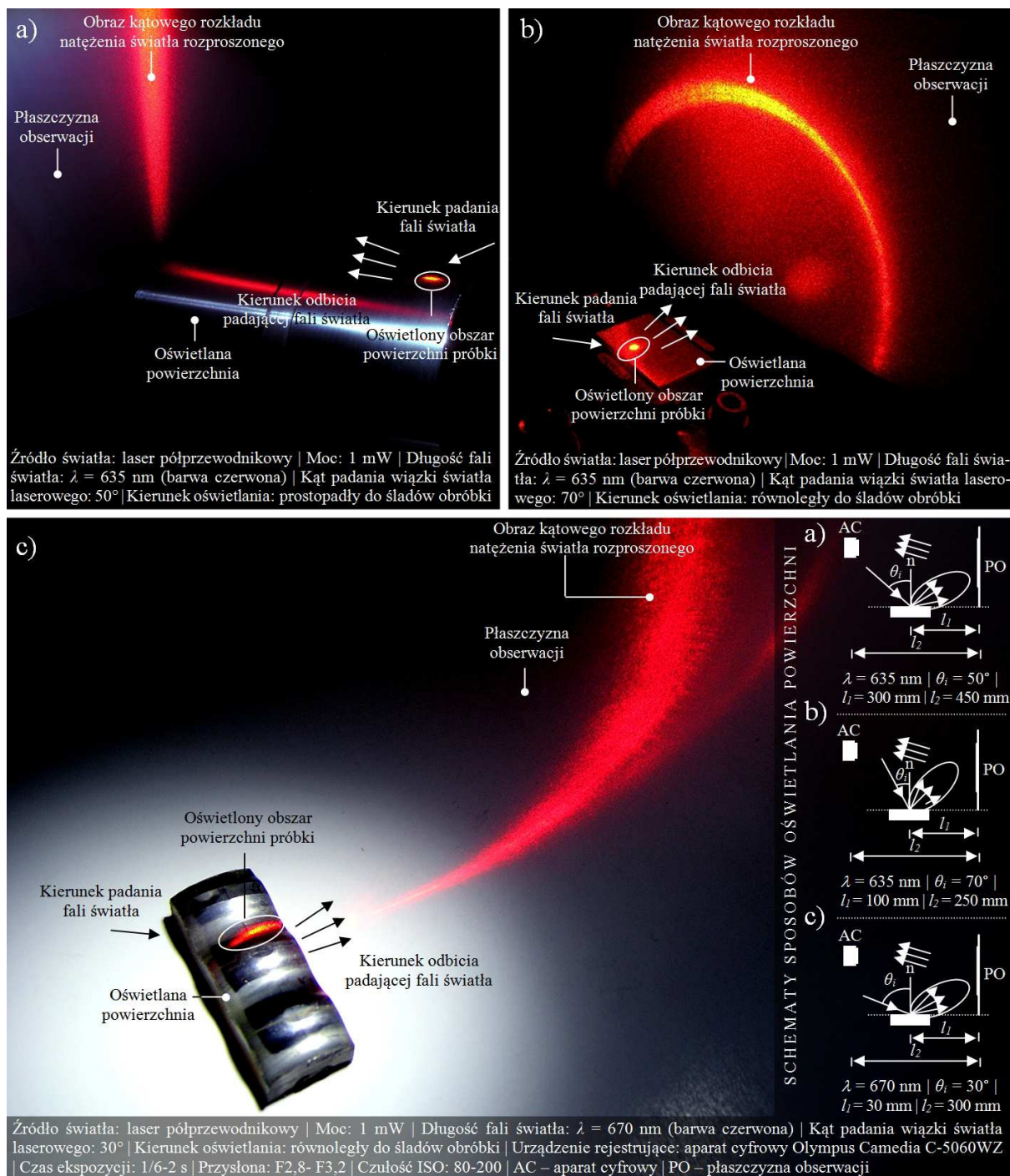
Odbicie fali od powierzchni nierównej może przybierać postać odbicia zwierciadlanego oraz rozpraszania kierunkowego lub wielokierunkowego, w zależności od dominującej składowej (zwierciadlanej lub rozproszeniowej), co schematycznie przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Odbicie padającej fali światła od powierzchni: a) idealnie gładkiej; b) o niewielkiej chropowatości (powierzchnia gładka lub supergładka); c) o średniej chropowatości; d) bardzo chropowatej

Pierwszy rodzaj odbicia (rys. 2a) występuje, gdy powierzchnia jest płaska, idealnie gładka i optycznie jednorodna. Fala padająca jest odbijana od takiej powierzchni zgodnie z prawem odbicia światła. Kąt odbicia równy jest kątowi padania, natomiast fala padająca i odbita oraz normalna do powierzchni nominalnej leżą w jednej płaszczyźnie. W wyniku odbicia nie zmienia się długość fali, a energia emitowana jest w jednym kierunku. Odbicie kierunkowe zbliżone do zwierciadlanego (rys. 2b) zachodzi, gdy na powierzchni występują nierówności, których wymiary porównywalne są z długością fali. Część energii zostaje odbita zgodnie z prawem odbicia, część zaś ulega rozproszeniu kierunkowemu. Odbicie

rozproszeniowe (dyfuzyjne) może posiadać charakter kierunkowy (rys. 2c) lub wielokierunkowy (rys. 2d). Pierwszy przypadek zachodzi, gdy nierówności są nieznacznie większe od długości fali światła. Cała energia światła odbitego ulega wtedy rozproszeniu w jednym określonym kierunku. Drugi przypadek zachodzi natomiast wtedy, gdy nierówności są dużo większe od długości fali światła. Cała energia światła odbitego ulega wówczas rozproszeniu w wielu kierunkach. Na rysunku 3, przedstawiono przykłady niektórych rodzajów odbić światła od powierzchni technicznych. Wszystkie z tych powierzchni były oświetlane wiązką światła o długości fali $\lambda = 635\text{-}670\text{ nm}$, generowaną przez laser półprzewodnikowy o mocy 1 mW, dla kątów padania z zakresu $30^\circ\text{-}70^\circ$.



Rys. 3. Odbicie wiązki światła laserowego od powierzchni: a) elementu walcowego o powierzchni mikro-wygładzanej FTS ($Ra = 0,33\ \mu\text{m}$); b) wzorca porównawczego chropowatości o powierzchni frezowanej ($Ra = 22\ \mu\text{m}$); c) fragmentu powierzchni po procesie walcowania gwintów ($Ra = 4,04\ \mu\text{m}$)

Teorie, modele i metody analizy rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne

Opis zjawiska rozpraszania światła, jak również zjawisk towarzyszących, nie byłby możliwy bez szeregu prac teoretycznych prowadzonych na przestrzeni ponad stu lat. W tym czasie powstało wiele teorii umożliwiających zgłębienie natury światła, w tym zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne. Wraz z opracowywaniem nowych oraz modyfikacją i poszerzaniem opisu matematycznego istniejących teorii ugruntował się ich podział na: teorię Rayleigha-Rice'a (R-R), teorię Beckmanna-Kirchhoffa (B-K) i teorię Torrance'a-Sparrowa (T-S). Dwie pierwsze opierają się na zasadach optyki fizycznej, natomiast teoria Torrance'a-Sparrowa na zasadach optyki geometrycznej. Ostatnia z teorii stała się podstawą do opracowania modeli rozpraszania światła, wykorzystywanych praktycznie. Jednym z takich modeli jest model powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł stosowany w ocenie nierówności powierzchni. W tabeli 5 dokonano syntetycznego przeglądu podstawowych własności teorii związanych z rozpraszaniem światła.

Tab. 5. Ogólna charakterystyka podstawowych teorii rozpraszania światła

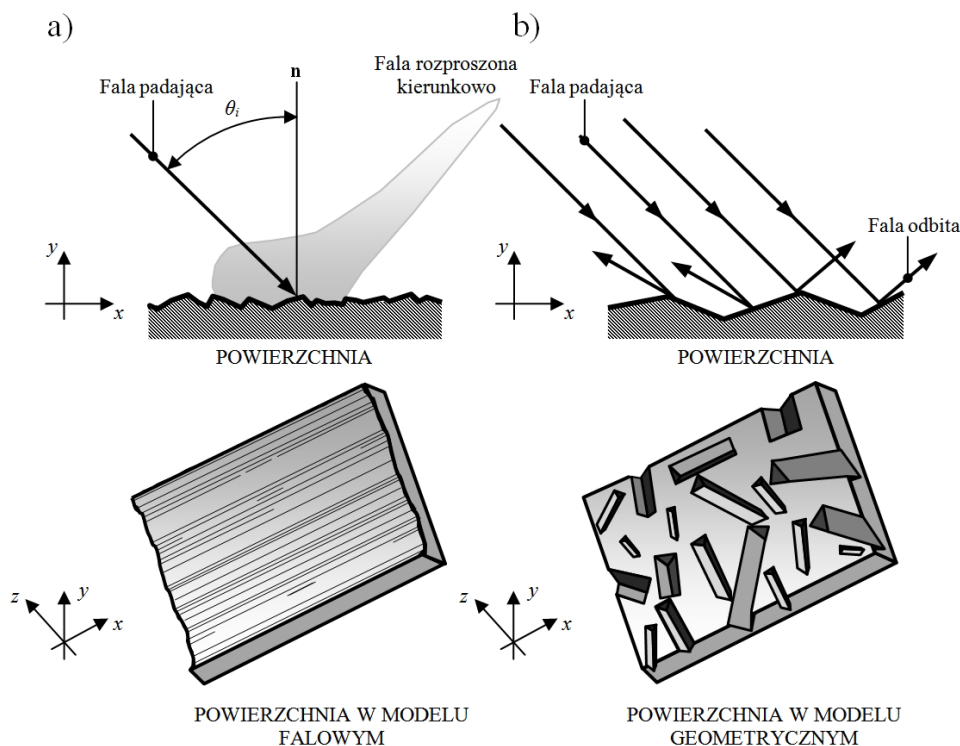
Teoria		Beckmanna-Kirchhoffa	Zburzeń	Torrance'a-Sparrowa	
Oparta na zasadach		Optyki fizycznej	Optyki fizycznej	Optyki geometrycznej	
Model		Beckmanna i Spizzichino (1963)	Rayleigha-Rice'a (1951)	Powierzchni zbudowanej z mikrozwierciadeł (1967)	
Wymagane warunki		Aproksymacja płaszczyzny stycznej	Niewielka chropowatość powierzchni ¹⁾	Powierzchnia, jako zbiór miniaturowych zwierciadeł	
Możliwość implementacji numerycznej		Tak	Tak	Tak	
Model	Wykorzystuje	Dyfrakcję	Tak	Tak	Nie
		Polaryzację	Tak	Tak	Tak
		Anizotropię	Tak	Tak	Tak
	Uwzględnia	Samozacienienia	Możliwe	Nie	Tak
		Rozpraszanie wielokrotne	Nie	Nie	Możliwe
		Odbicia od powierzchni przezroczystych	Nie	Nie	Możliwe
Powierzchnia	Typ	Dielektryczna, przewodząca	Tak	Tak	Tak
	Element	Chropowatość	Wysoka ¹⁾	Niewielka ¹⁾	Niska/Wysoka ¹⁾

¹⁾ w stosunku do długości fali światła λ

Model powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł wykorzystujący zasady optyki geometrycznej

Analiza zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie chropowate dokonywana jest metodami optyki fizycznej lub geometrycznej. Szczegółowe rozpatrywanie zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne możliwe jest przy wykorzystaniu zasad optyki fizycznej, w której światło traktowane jest jako zbiór fal elektromagnetycznych o różnej długości. Do matematycznego opisu takich fal stosuje się równania wektorowe opracowane przez szkockiego matematyka i fizyka J. C. Maxwella. Na tych zasadach oparte zostały dwie fundamentalne teorie dotyczące rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne – teoria dyfrakcji G. R. Kirchohoffa i teoria zaburzeń Lorda Rayleigha. W latach sześćdziesiątych XX w. dokonano ich ponownej redefinicji, czego wynikiem było opracowanie teorii Beckmanna-Kirchhoffa (B-K) i teorii Rayleigha-Rice'a (R-R).

Zastosowanie w analizie zjawiska rozpraszania światła przez powierzchnie nierówne modelu falowego pozwala na uzyskanie wielu istotnych informacji zarówno o samym zjawisku, jak również wpływie ukształtowania powierzchni na jego przebieg. Analiza z wykorzystaniem takiego modelu jest stosunkowo skomplikowana, co oznacza, iż z punktu widzenia zastosowań praktycznych, jej wykorzystanie jest mocno ograniczone. Jeżeli adaptacja modelu falowego do danych zastosowań praktycznych nie jest możliwa, stosuje się pewne uproszczenia. W tym celu model falowy zastępowany bywa modelem promieniowym. Przyjmuje się w nim, iż długość fali światła dąży do zera. W modelu tym powierzchnię nierówną traktuje się jako zespół połączonych, odpowiednio zorientowanych, płaskich miniaturowych zwierciadeł. Model takiej powierzchni, określany jest w j. angielskim, terminem *mirror facet model*. Angielskie słowo *facet* oznacza, w tym przypadku, fasetę, czyli szlifowaną powierzchnię kamienia szlachetnego – co trafnie opisuje charakter takiej powierzchni. Na rysunku 4 w sposób schematyczny przedstawiono porównanie falowego modelu rozpraszania światła i modelu powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł.



Rys. 4. Schematyczne przedstawienie powierzchni w modelu: a) falowym wykorzystującym zasady optyki fizycznej; b) modelu powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł wykorzystującym zasady optyki geometrycznej

Model powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł zaproponowany został w połowie lat sześćdziesiątych XX w. przez K. E. Torrance'a i E. M. Sparrowa. Jak już wspomniano wcześniej, jego przydatność do wnikliwego opisu zjawiska rozpraszania światła jest niewielka. Jednakże jest on niezwykle użyteczny w wielu zastosowaniach praktycznych, gdzie dopuszcza się znaczne uproszczenia. Na tym modelu oparte są m.in. niektóre metody rozpraszania światła stosowane do oceny chropowatości powierzchni elementów kształtowanych w wysokowydajnych procesach obróbkowych prowadzonych w warunkach produkcyjnych.

Metody różniczkowe

Metody różniczkowe (goniofotometryczne) należą do metod rozpraszania światła. Są to metody analizy powierzchniowej, w niektórych publikacjach określane, jako metody polowe. Pozwalają one, na podstawie analizy kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego, na ocenę nierówności powierzchni w stosunkowo szerokim zakresie pomiarowym, wynoszącym od 0,0001 μm do $> 1 \mu\text{m}$, a także na detekcję różnego rodzaju defektów (rysy, pęknięcia) oraz wyznaczenie wielu charakterystycznych cech powierzchni (anizotropia, wartości kątów pochylenia zboczy nierówności).

Pomiar kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego, przy odpowiednim oświetleniu niektórych powierzchni, może być dokonywany w wybranej płaszczyźnie. Jeżeli jest on przeprowadzany w płaszczyźnie padania, to natężenie światła rozproszonego będzie funkcją jednej zmiennej (np. kąta rozproszenia θ_d). Graficzny obraz tej funkcji nazywa się krzywą kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego lub indykatryś rozproszenia. Służy ona m.in. do określania jednego z ważnych parametrów fotometrycznych, wykorzystywanych do oceny nierówności powierzchni – szerokości połówkowej.

Rozkład natężenia światła rozproszonego można wyznaczać także w przestrzeni. W tym przypadku stosowana jest funkcja opisująca dwukierunkową zdolność odbijania światła przez powierzchnię nierówną określona akronimem BRDF lub BSDF (ang. *Bidirectional Scatter Distribution Function*). Definiuje się jako stosunek luminancji energetycznej, w określonym kierunku rozproszenia, do mocy promienistej padającej na jednostkę powierzchni. Funkcja BRDF wyznaczana jest z zależności:

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

przy czym

$$L_e = \frac{dP}{S_0 d\Omega \cos \theta_d},$$

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;

λ – długość fali światła;

θ_i – kąt padania;

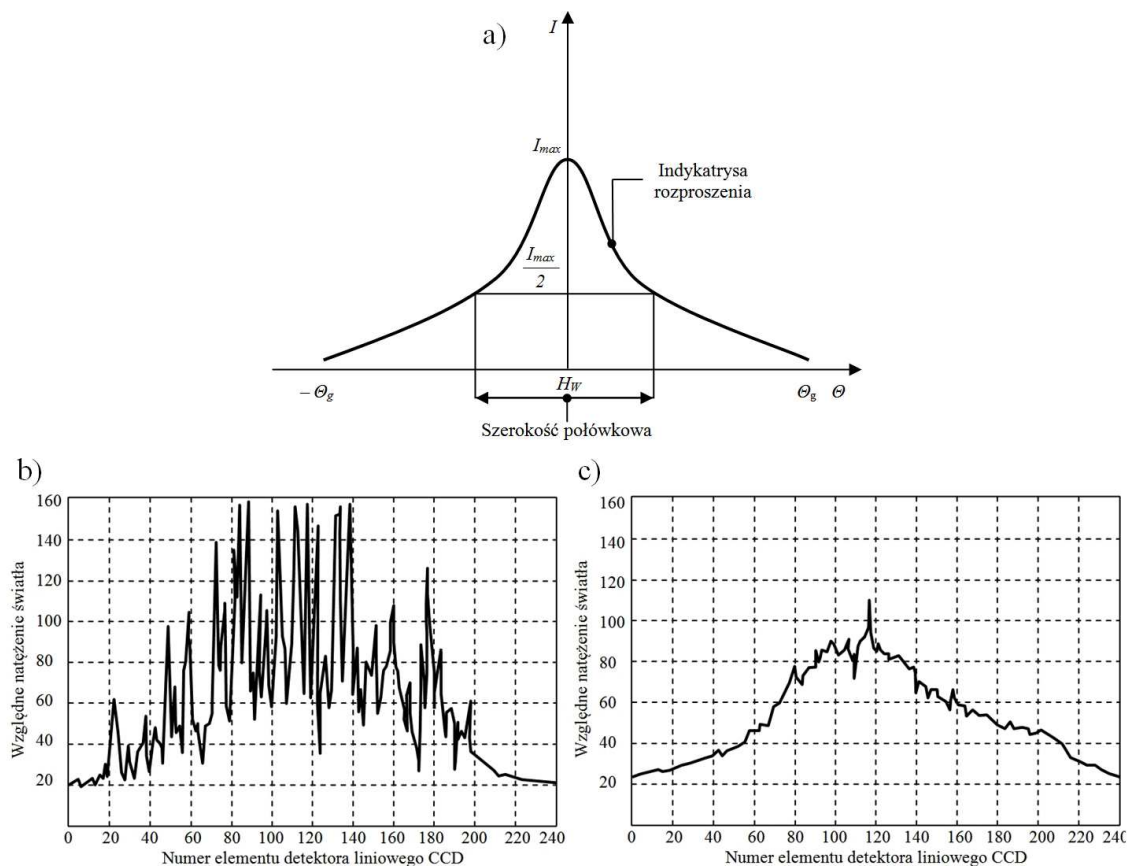
θ_d – kąt rozproszenia;

Q – bezwymiarowy czynnik, zależny od azymutalnego kąta rozproszenia ϕ , uwzględniający także stan polaryzacji światła padającego i optyczne właściwości powierzchni odbijającej;

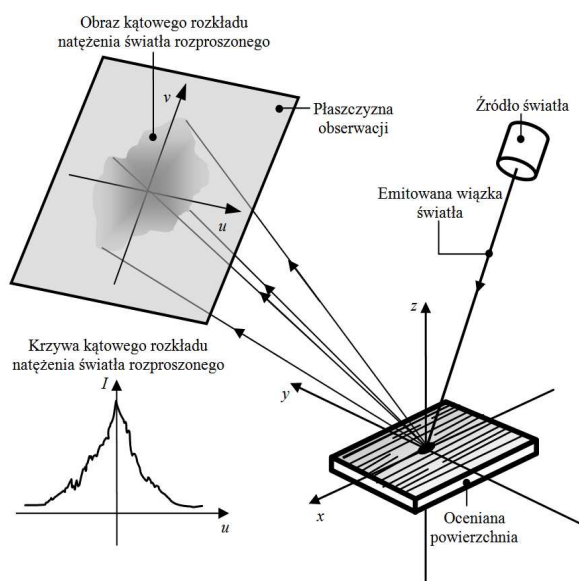
$S(f_x, f_y)$ – dwuwymiarowa funkcja gęstości widmowej mocy nierówności powierzchni odbijającej;

f_x, f_y – częstości przestrzenne nierówności powierzchni.

Na rysunku 5 przedstawiono graficzną interpretację szerokości półkowej H_w indyktrysy rozproszenia oraz przykładowe indyktrysy rozproszenia zarejestrowane dla powierzchni szlifowanych.



Rys. 5. Indykatrysa rozproszenia: a) graficzna interpretacja szerokości półkowej H_w indyktrysy rozproszenia; b) indyktrysa rozproszenia uzyskana z pojedynczego pomiaru szlifowanej powierzchni obwodowej wałka ($Ra = 0,4 \mu\text{m}$), wykonanego ze stali 40H, w warunkach statycznych; c) indyktrysa uzyskana z pojedynczego pomiaru szlifowanej powierzchni obwodowej wałka ($Ra = 0,4 \mu\text{m}$), wykonanego ze stali 40H, podczas jego obrotu (prędkość liniowa powierzchni $v_c = 300 \text{ mm/s}$)



Rys. 6. Rozkład natężenia światła przez powierzchnię nierówną

Analizy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego omówione powyżej mogą być przeprowadzane również na podstawie zarejestrowanego obrazu cyfrowego takiego rozkładu.

Założmy, że w płaszczyźnie obserwacji rejestrujemy obraz takiego rozkładu 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. Funkcję tę mogą charakteryzować różne parametry geometrycznej fotometrycznej. Przy czym, parametry geometryczne będą odnosić się do tych 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 , a także 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 binaryzacji z zadany progami, a następnie dokonuje się oceny parametrów geometrycznych i fotometrycznych. Operacje te wykonywane są w odpowiednim oprogramowaniu do przetwarzania i analizy obrazów cyfrowych.

Jednym z ważniejszych parametrów geometrycznych jest pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego. 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. Uogólniona postać wyrażona jest zależnością:

$$An = \iint du dv.$$

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 binaryzacji są różne od zera:

$$An = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_n(i, j),$$

gdzie:

i, j – współrzędne odpowiadających sobie elementów obrazów: (i – numer wiersza, j – numer kolumny),

$I(i, j)$ – natężenie skali szarości.

Ważnym parametrem fotometrycznym jest sumaryczne natężenie światła I_Σ (jasnych obszarów) obrazu kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego. Uogólniona postać wyrażona jest zależnością:

$$I_\Sigma = \iint_S I(u, v) du dv.$$

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

$$I_\Sigma = \sum_{i, j \in An} I(i, j),$$

gdzie:

i, j – współrzędne odpowiadających sobie elementów obrazów: (i – numer wiersza, j – numer kolumny);

$I(i, j)$ – natężenie skali szarości;

An – pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego.

Powyższe parametry są parametrami ogólnymi i mogą być zastosowane do oceny rozkładu natężenia światła rozproszonego o dowolnej postaci. W przypadku oceny rozkładów wykazujących pewne cechy charakterystyczne można zastosować inne parametry geometryczne i fotometryczne. Mogą być to m.in. parametry oferowane przez stosowane w takiej ocenie oprogramowanie komputerowe. Przykładem mogą być tu wybrane parametry dostępne w specjalistycznym oprogramowaniu do przetwarzania i analizy obrazów cyfrowych Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc., których charakterystykę podano w tabeli 6.

Tab. 6. Charakterystyka wybranych parametrów geo- i fotometrycznych dostępnych w oprogramowaniu do przetwarzania i analizy obrazów cyfrowych Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc.

Grupa parametrów	Parametr	Symbol	Jednostka	Interpretacja
Geometryczne	Pole powierzchni	A_n	piksel ¹⁾	Miara przyporządkowująca danej figurze nieujemną liczbę charakteryzującą jej rozmiar.
	Obwód	P	piksel ¹⁾	Długość krzywej stanowiącej zarys danej figury płaskiej.
	Średnica Fereta (max.)	F_{max}	piksel ¹⁾	Najdłuższa odległość między skrajnymi punktami zarysu figury obiektu w obrazie.
	Średnica Fereta (min.)	F_{min}	piksel ¹⁾	Najkrótsza odległość między skrajnymi punktami zarysu figury obiektu w obrazie.
	Długość	l	piksel ¹⁾	Średnica Fereta wzdłuż dłuższej osi analizowanego obiektu w obrazie.
	Szerokość (wysokość)	h	piksel ¹⁾	Średnica Fereta wzdłuż krótszej osi analizowanego obiektu w obrazie.
Fotometryczne	Niejednorodność optyczna obrazu	SF	j. u.	Parametr służy do określania liczby pikseli, dla których wartość luminacji jest większa o 10%, w stosunku do średniej luminacji analizowanego obiektu w obrazie.
	Sumaryczne natężenie światła	I_{Σ}	j. u.	Parametr informuje o sumarycznej jasności światła w wydzielonym obszarze analizowanego obrazu.
	Marginacja	M	j. u.	Parametr informuje o rozkładzie jasności poszczególnych obiektów w obrazie na odcinku pomiędzy centrum a krawędzią analizowanego obrazu.

¹⁾ wartość podana w pikselach, w celu lepszej interpretacji rezultatów pomiarów, może być przeliczona na wartość podaną w mm lub mm²

Metody różniczkowe charakteryzują się stosunkowo szerokim zakresem pomiarowym. Stał się on wyznacznikiem podziału tej grupy metod rozpraszania światła na metody stosowane w zakresie niewielkich oraz dużych wysokości nierówności powierzchni. W pierwszej grupie znalazły się metody wykorzystywane do dokładnej oceny cech geometrycznych precyzyjnie ukształtowanych powierzchni gładkich i supergładkich, charakteryzujących się bardzo małymi nierównościami powierzchni w zakresie od 0,0001 μm do ok. 0,01 μm. W drugiej grupie znalazły się metody wykorzystywane do oceny powierzchni komponentów elektronicznych, elementów aparatury badawczej oraz części maszyn, kształtowanych z wykorzystaniem nowoczesnych wysokowydajnych technologii obróbkowych i narzędzi ściernych, charakteryzujących się znacznie wyższymi nierównościami powierzchni w zakresie 0,01 μm do 1 μm lub w niektórych przypadkach powyżej 1 μm. Ogólną charakterystykę tej obu odmian metod różniczkowych podano w tabelach 7 i 8.

Tab. 7. Ogólna charakterystyka metod różniczkowych stosowanych w zakresie niewielkich wysokości nierówności powierzchni

Podstawy teoretyczne	Teoria	Zaburzeń	
	Model	Rayleigha-Rice'a (1951)	
	Wykorzystywane zasady	Optyki fizycznej	
	Powstanie metod	Lata siedemdziesiąte XX w.	
Właściwości metody	Pomiar bezstykowy	Tak	
	Zakres pomiarowy, μm	0,0001-0,01 , 0,002-0,2	
	Czułość	Wysoka	
	Niepewność pomiarów	Do 5% wartości wielkości mierzonej	
	Czas przeprowadzenia oceny	Od kilku ms do kilku s	
	Wielkości mierzone charakteryzujące światło odbite	BRDF lub rozkład natężenia światła rozproszonego	
	Oceniane parametry	σ , Rq , Sm , $S(fx, fy)$	
Realizacja techniczna	Eksperymentalne (badawcze)	Czujniki	Nie
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (laboratoryjne)	Czujniki	Nie
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (laboratoryjne)	Czujniki	Nie
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (przemysłowe)	Czujniki	Nie
		Systemy pom.	Tak
Zastosowania	Kontrola jakości powierzchni gładkich i supergładkich (np. elementy optyczne, podłoża krzemowe układów półprzewodnikowych, precyzyjnie obrabione powierzchni części maszyn), kontrola powierzchni nośników magnetycznych, ocena właściwości cienkich warstw, zastosowania w kosmetyce i kosmetologii.		

Tab. 8. Ogólna charakterystyka metod różniczkowych stosowanych w zakresie dużych wysokości nierówności powierzchni

Podstawy teoretyczne	Teoria	Torrance'a-Sparrowa	
	Model	Powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł (1967)	
	Wykorzystywane zasady	Optyki geometrycznej	
	Powstanie metod	Lata osiemdziesiąte XX w.	
Właściwości metody	Pomiar bezstykowy	Tak	
	Zakres pomiarowy, μm	0,01-1	
	Czułość	Wysoka	
	Niepewność pomiarów	W zakresie 10-15% wartości wielkości mierzonej	
	Czas przeprowadzenia oceny	Od kilku ms do kilku s	
	Wielkości mierzone charakteryzujące światło odbite	Rozkład natężenia światła rozproszonego, S_N	
	Oceniane parametry	σ , Rq , Ra , Δq , $p(\gamma)$	
Realizacja techniczna	Eksperymentalne (badawcze)	Czujniki	Tak
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (laboratoryjne)	Czujniki	Tak
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (laboratoryjne)	Czujniki	Tak
		Systemy pom.	Tak
	Pomiarowe (przemysłowe)	Czujniki	Tak
		Systemy pom.	Tak
Zastosowania	Kontrola jakości (prowadzona także w sposób aktywny) powierzchni precyzyjnie obrabianych części maszyn (np. wały korbowe, przekładnie zębate, tłoki), urządzeń, aparatury pomiarowej i medycznej. Ocena stanu czynnej powierzchni narzędzi ściernych po procesach obróbkowych.		

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące podstaw teoretycznych metody pomiarowej przeznaczonej do oceny powierzchni przedmiotów obrobionych i powierzchni narzędzi ściernych:

- zjawisko rozpraszania światła jest jednym z podstawowych zjawisk optycznych o fundamentalnym znaczeniu w wielu współczesnych dziedzinach nauki i techniki. Zachodzi ono na skutek oddziaływania pomiędzy niejednorodnościami optycznymi ośrodka materialnego (np. lokalnymi fluktuacjami gęstości, niejednorodności i anizotropii materiału) a padającą na niego falą świetlną;
- odbicie fali światła od powierzchni nierównej może przybierać postać odbicia zwierciadlanego oraz rozpraszania kierunkowego lub wielokierunkowego, w zależności od dominującej składowej (zwierciadlanej lub rozproszeniowej) (rys. 2-3);
- podstawowymi teoriami rozpraszania światła są: teoria Rayleigha-Rice'a (R-R), teoria Beckmanna-Kirchhoffa (B-K) i teoria Torrance'a-Sparrowa (T-S). Dwie pierwsze teorie wykorzystują zasady optyki fizycznej, natomiast teoria Torrance'a-Sparrowa oparta jest na zasadach optyki geometrycznej;
- teoria Torrance'a-Sparrowa (T-S) (tab. 5) stała się podstawą do opracowania modeli rozpraszania światła, wykorzystywanych w zastosowaniach praktycznych. Jednym z takich modeli jest model powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł stosowany w ocenie nierówności powierzchni;
- model powierzchni zbudowanej z miniaturowych zwierciadeł (rys. 4) wykorzystują metody różniczkowe (goniometriczne). Umożliwiają one ocenę nierówności powierzchni na podstawie analizy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego (rys. 5-6). Analiza taka może być przeprowadzana m.in. na podstawie zarejestrowanego obrazu cyfrowego takiego rozkładu, dla którego mogą być wyznaczone, charakteryzujące go, wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych (tab. 6);
- ze względu na stosunkowo dużą czułość metod różniczkowych można je wykorzystać do oceny powierzchni w zakresie niewielkich ($Ra = 0,0001-0,01 \mu\text{m}$) i dużych ($Ra = 0,01-1 \mu\text{m}$) wysokości nierówności. W pierwszym przypadku (tab. 7) ocena dotyczy powierzchni gładkich i supergładkich (np. elementy optyczne), w drugim przypadku (tab. 8) precyzyjnie obrobionych powierzchni części maszyn (np. wały korbowe, tłoki), urządzeń, aparatury pomiarowej i medycznej. Dodatkowo metody te można wykorzystać także do oceny czynnych powierzchni narzędzi ściernych realizowanej m.in. pod kątem wykrywania i analizowania ich zalepień materiałem obrabianym.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz. (2010). *Ocena mikronierówności powierzchni obrobionych na podstawie obrazu światła rozproszonego*. Pomiary Automatyka Kontrola, **56**(1), 28–29.
2. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz., Nadolny K. (2011). *Dispersão da luz do laser na avaliação da rugosidade superficial de microacabamentos*. Máquinas e Metais, **47**(548), 96–109.
3. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz., Nadolny K. (2012). *Methodology of the Assessment of the Abrasive Tool's Active Surface using Laser Scatterometry*. T. Can. Soc. Mech. Eng., **36**(1), 49–66
4. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2013). *The Diagnostics of Abrasive Tools after Internal Cylindrical Grinding of Hard-to-Cut Materials by Means of a Laser Technique using Imaging and Analysis of Scattered Light*. Arab. J. Sci. Eng., **38**(4), 953–970.
5. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Łukianowicz Cz., Tomkowski R. (2014). *Laserowa metoda aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni wykorzystująca obrazowanie i analizę światła rozproszonego*. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego N N505 486940. WM PKosz., Koszalin.

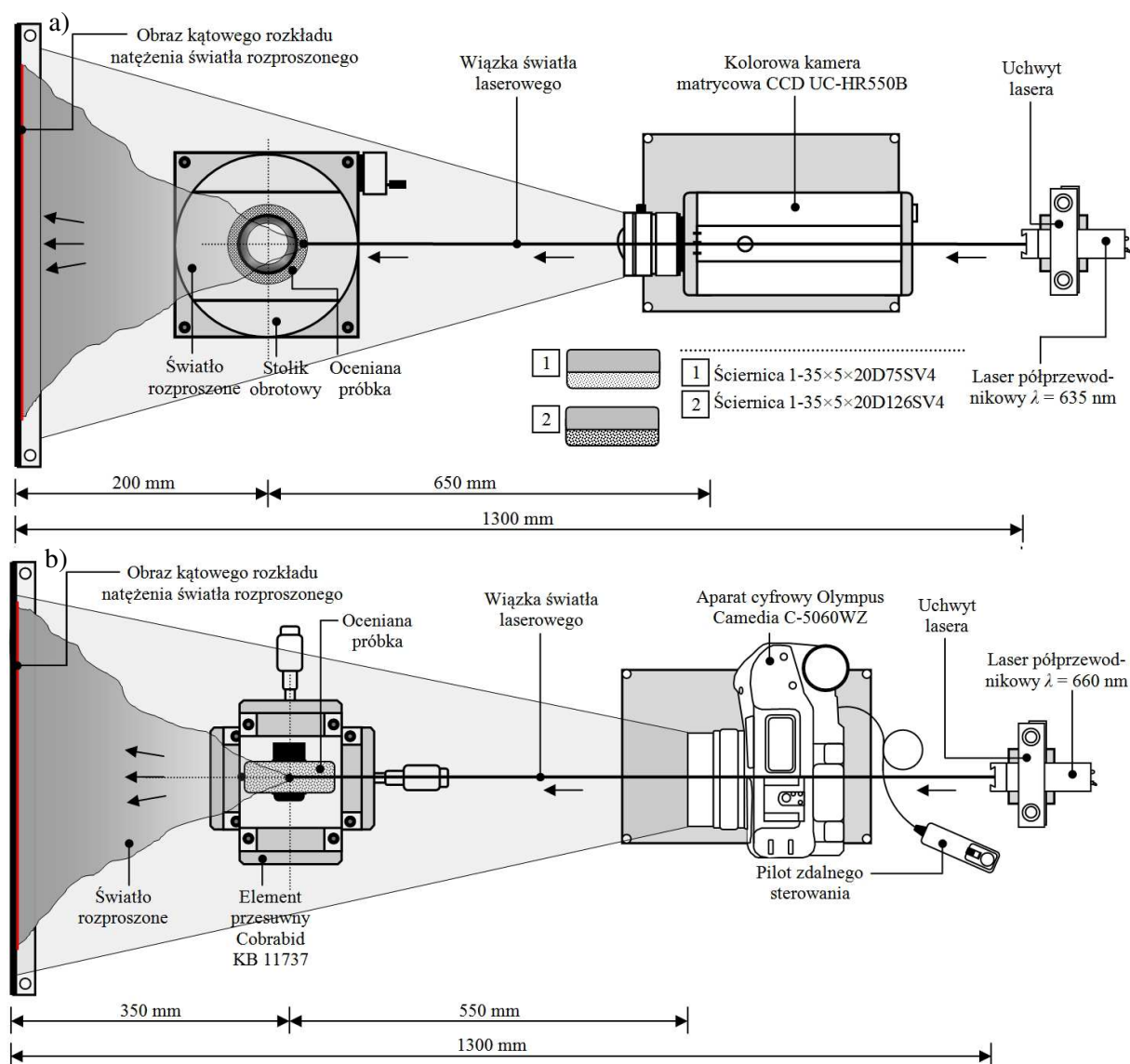
3.3. Stanowiska badawcze przeznaczone do realizacji oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych

Niezwykle ważnym elementem każdego procesu oceny stanu powierzchni jest techniczna realizacja metody pomiarowej. Najczęściej wiąże się to z zaprojektowaniem, przygotowaniem i zestawieniem odpowiedniego stanowiska badawczego. Głównymi elementami takiego stanowiska są zazwyczaj układy służące do generowania i formowania obrazu, jego rejestracji oraz przetwarzania i analizy. Specyfika zastosowanej, w przypadku oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych, metody różniczkowej nie zawsze pozwala na wykorzystanie układów komercyjnych z uwagi na ich szereg ograniczeń. Wymusiło to konieczność przygotowania dedykowanych stanowisk badawczych we własnym zakresie. Szereg z takich autorskich stanowisk zostało przedstawionych w niniejszej monografii, a charakterystykę ich najważniejszych układów podano w tabeli 9.

Tab. 9. Charakterystyka układów stosowanych w stanowiskach badawczych przeznaczonych do oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych metodą różniczkową

Lp.	Nazwa układu	Element układu	Zastosowany komponent
1.	Układ do generowania i formowania obrazów światła rozproszonego	Źródło światła	Laser półprzewodnikowy CPS180 (Thorlabs) ($\lambda = 635 \text{ nm}$) CPS182 (Thorlabs) ($\lambda = 635 \text{ nm}$) SNF 635 (Coherent) ($\lambda = 635 \text{ nm}$) SNF 660 (Coherent) ($\lambda = 670 \text{ nm}$)
2.	Układ do rejestracji obrazów światła rozproszonego	Detektor obrazu	Cyfrowy aparat fotograficzny Camedia C-5060WZ (Olympus) Kamera TV z matrycowym przetwornikiem CCD UC-HR550B (kolorowa) typ 3713 (COHU) (monochromatyczna)
3.	Układ do przetwarzania i analizy cyfrowych obrazów światła rozproszonego	Oprogramowanie komputerowe	CV-H3N (Keyence) ImageJ (W. Rasband) Image Pro [®] -Plus (Media Cybernetics) RegiStax (C. Berrevoets)

Stanowiska badawcze oparto na stosunkowo prostej konstrukcji oraz ogólnie dostępnych na rynku komponentach mechanicznych, optycznych i optoelektronicznych. Konfiguracja wszystkich wykorzystywanych stanowisk była identyczna, posiadały one również identyczne układy, w których (w zależności od danej aplikacji) zmieniano zastosowane komponenty oraz uchwyty na analizowane próbki. Zmianie uległy również odległości bazowe między źródłem światła a oświetlonym wiązką laserową obszarem powierzchni i płaszczyzną obserwacji oraz między obiektywem aparatu cyfrowego/kamery a płaszczyzną obserwacji. Na rysunkach 7 przedstawiono schematycznie przykłady dwóch takich stanowisk przeznaczonych do akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Pierwsze z nich (rys. 7a) wykorzystywane było w ocenie stanu powierzchni ściernic z ziarnami diamentowymi 1-35×5×20D75SV4 i 1-35×5×20D126SV4 zalepionych materiałem obrobionym po procesach szlifowania materiałów ceramicznych, natomiast drugie (rys. 7b) w ocenie stanu powierzchni ściernic 1-35×10×10 SG/F46G10VTO impregnowanych substancjami antyadhezyjnymi po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®].

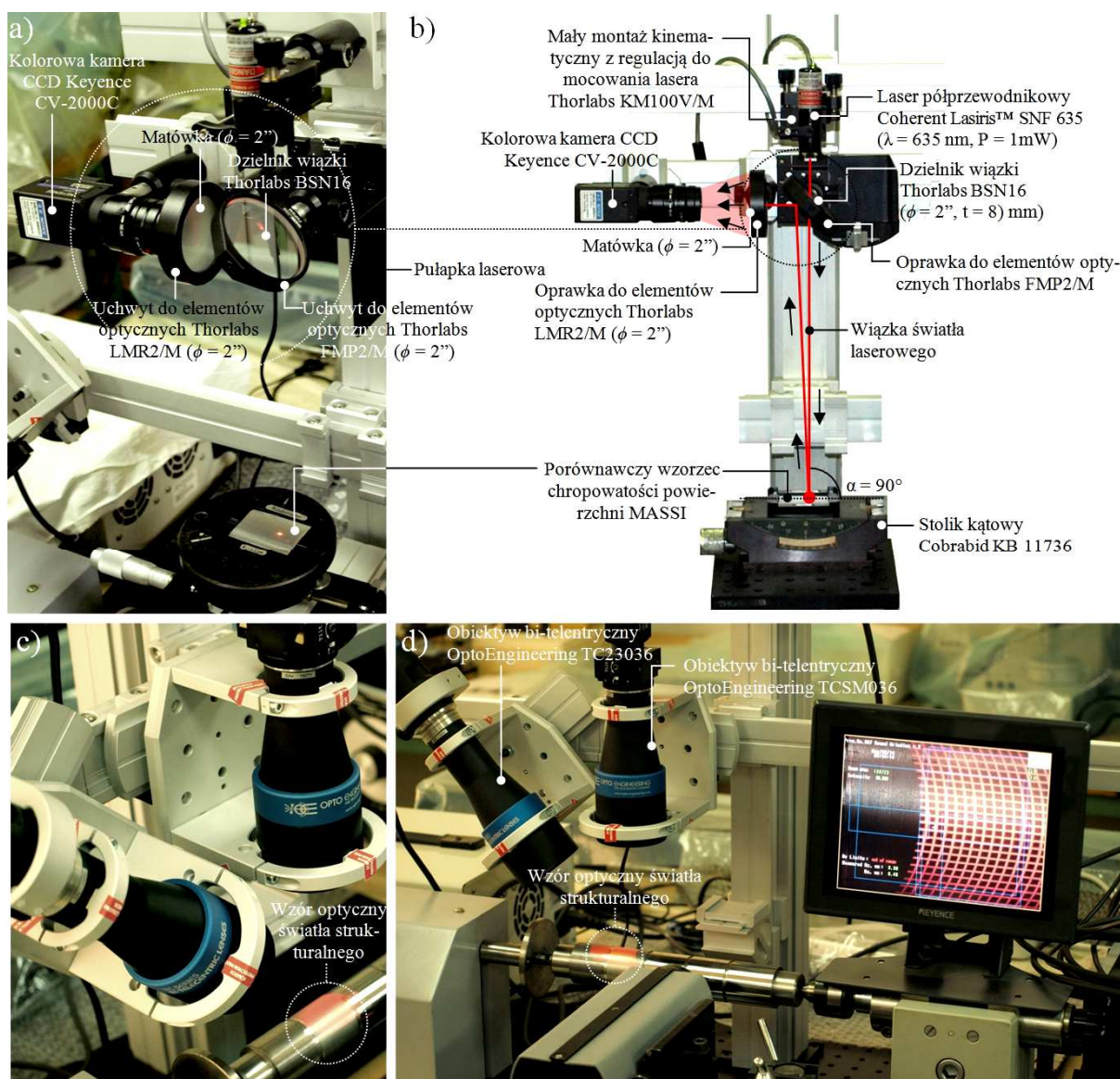


Rys. 7. Schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do akwizycji obrazów kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego: a) z powierzchni ściernic z ziarnem diamentowym po procesach szlifowania materiałów ceramicznych; b) ściernic impregnowanych substancjami antyadhezyjnymi po procesie szlifowania materiałów trudno skrawalnych

Oprócz opisanych powyżej stanowisk badawczych zaprojektowano i wykonano znacznie bardziej zaawansowany hybrydowy system pomiarowy. Został on opracowany jako platforma służąca do realizacji zadań pomiarowych o charakterze laboratoryjnym i przemysłowym, w tym do oceny:

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

System wykorzystywał dwa zasadnicze moduły: moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych oraz moduł obrotu badanego przedmiotu. Pierwszy z tych modułów, stanowiący kluczowy element systemu, umożliwiał przeprowadzanie szerokiego zakresu prac badawczych w odniesieniu do pomiarów chropowatości i kształtu powierzchni. Planowaniu eksperymentów sprzyjała konstrukcja systemu pomiarowego umożliwiająca jego szybką rekonfigurację na potrzeby prowadzenia danych zadań pomiarowych, przy czym można było je realizować zarówno w stanie statycznym jak i w ruchu. Na rysunku 8 przedstawiono szczegóły konstrukcyjne toru optycznego do oceny chropowatości powierzchni oraz toru optycznego do oceny kształtu powierzchni.

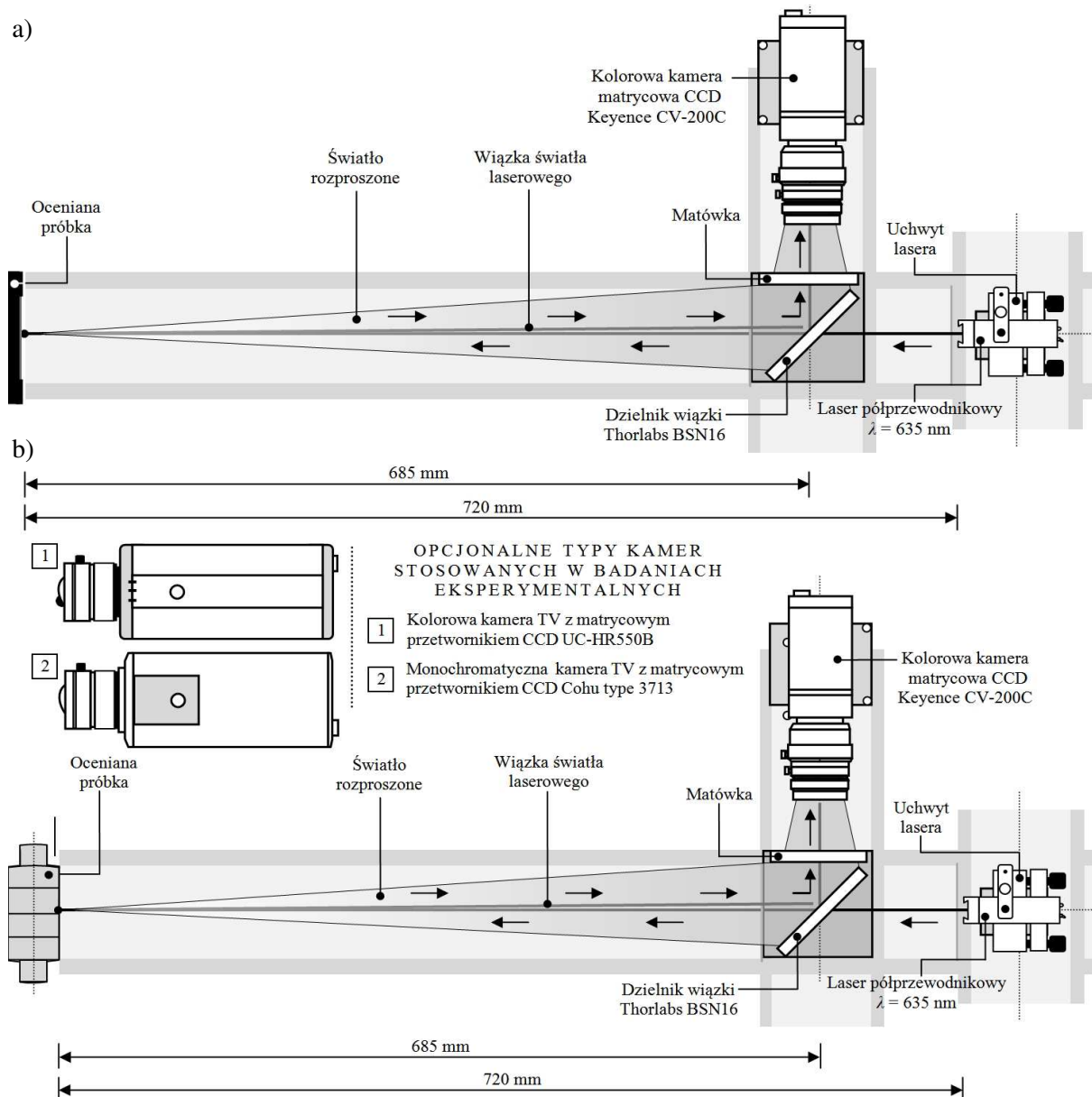


Rys. 8. Eksperymentalny hybrydowy system pomiarowy do aktywnej kontroli SGP i kształtu powierzchni przedmiotów obrobionych w stanie statycznym i w ruchu: a) zbliżenie na elementy toru optycznego do oceny chropowatości powierzchni; b) główne elementy toru do oceny nierówności powierzchni; c) zbliżenie na elementy toru optycznego do oceny kształtu powierzchni; d) widok ogólny toru optycznego do oceny kształtu powierzchni

Moduł pomiaru i akwizycji danych pomiarowych posiadał dwa oddzielne toru optyczne. Pierwszy z nich przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni wyposażony został w laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 635 firmy Coherent (USA) ($\lambda = 635 \text{ nm}$, 1 mW) oraz kamerę wysokiej rozdzielczości CCD CV-200C firmy Keyence (Japonia) (wielkość matrycy CCD: $1/1,8''$, rozdzielczość obrazu 1600×1200 pikseli). Drugi tor optyczny do analizy kształtu powierzchni wyposażony został w LED-owy projektor światła strukturalnego z systemem adjustacji kątowej Scheimpfluga LTPRSM3W/R ze stałogniskowym obiektywem bi-telecentrycznym TC23036 firmy Opto Engineering (Włochy) oraz kamerą wysokiej rozdzielczości CV-200C firmy Keyence ze stałogniskowym obiektywem bi-telecentrycznym z systemem adjustacji Scheimpfluga TCSM036 firmy Opto Engineering. Oba toru pracowały na wspólnej platformie wykorzystującej zintegrowany system wizyjny serii CV-3000 firmy Keyence z automatycznym przetwarzaniem i analizą obrazów. System umożliwiał ocenę SGP

elementów ukształtowanych typowymi technologiami obróbkowymi (np. szlifowanie, toczenie, frezowanie, struganie), charakteryzujących się wysokościami nierówności w zakresie od 0,8 do 25 μm (parametr R_z) oraz od 0,07 do 3,7 μm (parametr R_a). Ocena kształtu powierzchni mogła odbywać się z wykorzystaniem wzorów optycznych światła strukturalnego w zakresie od ok. 0,5 do 2 mm.

W aplikacjach zaprezentowanych w monografii, a dotyczących oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu, nie wykorzystano w całości opisanego powyżej systemu hybrydowego, a jedynie jeden z jego torów optycznych przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni metodą różniczkową. Na rysunku 9 przedstawiono schematycznie ten tor w wariantach służących do statycznej oceny stanu porównawczych wzorców chropowatości powierzchni (rys. 9a) i stanu powierzchni szlifowanych walcowych próbek stalowych (rys. 9b) podczas ruchu.



Rys. 9. Schemat stanowiska badawczego przeznaczonego do akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego: a) podczas oceny powierzchni w stanie statycznym (wzorec porównawczy chropowatości powierzchni); b) podczas oceny powierzchni znajdującej się w ruchu (stalowa próbka walcowa po procesie szlifowania)

Hybrydowy system pomiarowy do aktywnej kontroli SGP i kształtu powierzchni przedmiotów obrobionych w stanie statycznym i w ruchu jest jednym z kilku systemów pomiarowych opracowanych na przestrzeni kilkunastu lat na Politechnice Koszalińskiej. Dokładny opis tych systemów podano w monografii, natomiast w tabeli 10 dokonano ich ogólnej charakterystyki. Autor jako główny wykonawca uczestniczył w procesie projektowania i wykonaniu dwóch ostatnich z wymienionych w tabeli 10 systemów.

Tab. 10. Ogólna charakterystyka systemów pomiarowych wykorzystujących metody różniczkowe opracowanych na Politechnice Koszalińskiej

Nazwa systemu	Metoda pomiarowa	Pomiar	Oceniane parametry	Zakres pomiarowy
Optoelektroniczny system pomiarowy do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu (2001)	Metoda różniczkowa	N	S_N , ²⁾ Ra	0,01-1 μm ³⁾
		K+F	$z(x_k)$	do 500 μm
Optoelektroniczny system pomiarowy do bezstykowej oceny mikronierówności powierzchni w ruchu (2002) ¹⁾	Metoda różniczkowa	N	S_N , ²⁾ Ra	0,01-1 μm ³⁾
Zintegrowany system pomiarowy do oceny SGP i kształtu powierzchni podczas ruchu (2010)	Metoda różniczkowa	N	An ²⁾ , I_Σ ²⁾ , Ra	0,02 -1 μm
	Triangulacja laserowa	W	l , h	10-250 mm
	Światło strukturalne	K	l	do 2 mm
Eksperymentalny hybrydowy system pomiarowy do aktywnej kontroli SGP (2014)	Metoda różniczkowa	N	An ²⁾ , I_Σ ²⁾ , Rz , Ra	0,07-3 μm ³⁾ 0,8-25 μm ⁴⁾
	Światło strukturalne	K	l	0,5-2 mm

¹⁾ modyfikacja systemu pomiarowego przeznaczona do oceny nierówności powierzchni w sposób aktywny, ²⁾ na podstawie oceny niniejszego parametru wyznacza się parametr nierówności powierzchni, ³⁾ dotyczy parametru chropowatości powierzchni Ra , ⁴⁾ dotyczy parametru chropowatości powierzchni parametru Rz , N – pomiar nierówności powierzchni, K+F – pomiar kształtu i falistości powierzchni, K – pomiar kształtu powierzchni, W – pomiar wymiaru, S_N – unormowana wariancja kątów rozproszenia, An – pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego, I_Σ – sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego, $z(x_k)$ – wysokość profilu odwzorowującego kształt i falistość powierzchni w wybranym punkcie $x_k = k dx$.

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące stanowisk badawczych przeznaczonych do realizacji oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych i stanu powierzchni narzędzi obróbkowych:

- ważnym elementem każdego procesu oceny stanu powierzchni jest techniczna realizacja metody pomiarowej z wykorzystaniem zestawionego stanowiska badawczego. W ramach prac przedstawionych w niniejszej monografii autor zaprojektował i wykonał szereg takich stanowisk (rys. 7) przeznaczonych pod dane aplikacje związane z oceną stanu powierzchni przedmiotów obrobionych

i narzędzi obróbkowych. Stanowiska charakteryzowały się doбором odpowiednich układów i komponentów (tab. 9) zapewniających poprawną realizację procesu oceny;

- niezależnie od zestawionych stanowisk badawczych na potrzeby prowadzonych prac autor zaprojektował i wykonał dwa systemy pomiarowe tj. zintegrowany system pomiarowy do oceny SGP i kształtu powierzchni podczas ruchu oraz eksperymentalny hybrydowy system pomiarowy do aktywnej kontroli SGP (rys. 8). Tor optyczny ostatniego z wymienionych systemów został wykorzystany do oceny stanu powierzchni przedmiotów obrobionych w stanie statycznym (rys. 9a) i w ruchu (rys. 9b) – prace te szczegółowo omówiono w monografii.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz. (2013). *Aktywne pomiary struktury geometrycznej powierzchni metodą optyczną*. Pomiary Automatyka Kontrola, **59**(4), 300–303.
2. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Łukianowicz Cz., Tomkowski R. (2014). *Laserowa metoda aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrobionych powierzchni wykorzystująca obrazowanie i analizę światła rozproszonego*. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego N N505 486940. WM PKosz., Koszalin.
3. **Kapłonek W.**, Sutowski P. (2014). *Dobór modeli matematycznych do analizy parametrów chropowatości powierzchni w skaterometrycznych pomiarach wzorców porównawczych*. Pomiary Automatyka Kontrola, **60**(10), 904–908.
4. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Łukianowicz Cz. (2014). *Zastosowanie systemu zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej do pomiarów i analiz rozpraszania światła na powierzchniach porównawczych wzorców chropowatości*. Mechanik, **87**(8-9), 146–155. (CD-ROM).
5. Łukianowicz Cz., **Kapłonek W.** (2014). *Laserowe metody oceny struktury geometrycznej powierzchni*. Stal Metale i Nowe Technologie, 7-8, 26–27.
6. **Kapłonek W.** (2015). *Conceptions of Optical Systems for Multi-parametric In-process Inspection of the Surface Texture and Dimension*. Journal of Optics, **44**(1), 77–84.
7. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2015). *Laser Methods based on an Analysis of Scattered Light for Automated, In-process Inspection of Machined Surfaces: A Review*. Optik, **126**(20), 2764–2770.
8. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Nadolny K. (2015). *Zastosowanie hybrydowego systemu pomiarowego wykorzystującego obrazowanie i analizę światła rozproszonego do oceny stanu powierzchni szlifowanych*. Inżynieria Maszyn, **20**(1), 89–103.

3.4. Metodyka oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu

Nowym trendem w procesie oceny stanu badanej powierzchni jest wprowadzanie systemów hybrydowych, łączących w ramach jednej platformy możliwości np. bezstykowej oceny metodami rozpraszania światła z obrazowaniem i akwizycją strefy pomiaru metodami widzenia maszynowego oraz przetwarzaniem i analizą uzyskanych danych technikami komputerowymi. Jeden z takich eksperymentalnych systemów hybrydowych opracowano w 2014 r. na Politechnice Koszalińskiej. W celu potwierdzenia możliwości zastosowania elementów tego systemu w ocenie stanu powierzchni przedmiotów obrobionych ściernie przeprowadzono badania eksperymentalne. Przeznaczono do nich zestaw sześciu próbek płaskich, w postaci porównawczych wzorców chropowatości powierzchni, wyprodukowanych przez firmę Massi (Niemcy). Parametry procesu szlifowania oraz uzyskane metodą profilometryczną (profilometr stykowym Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke) wartości parametru R_z i R_a podano w tabeli 11.

Tab. 11. Wartości wybranych parametrów procesu szlifowania próbek płaskich wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

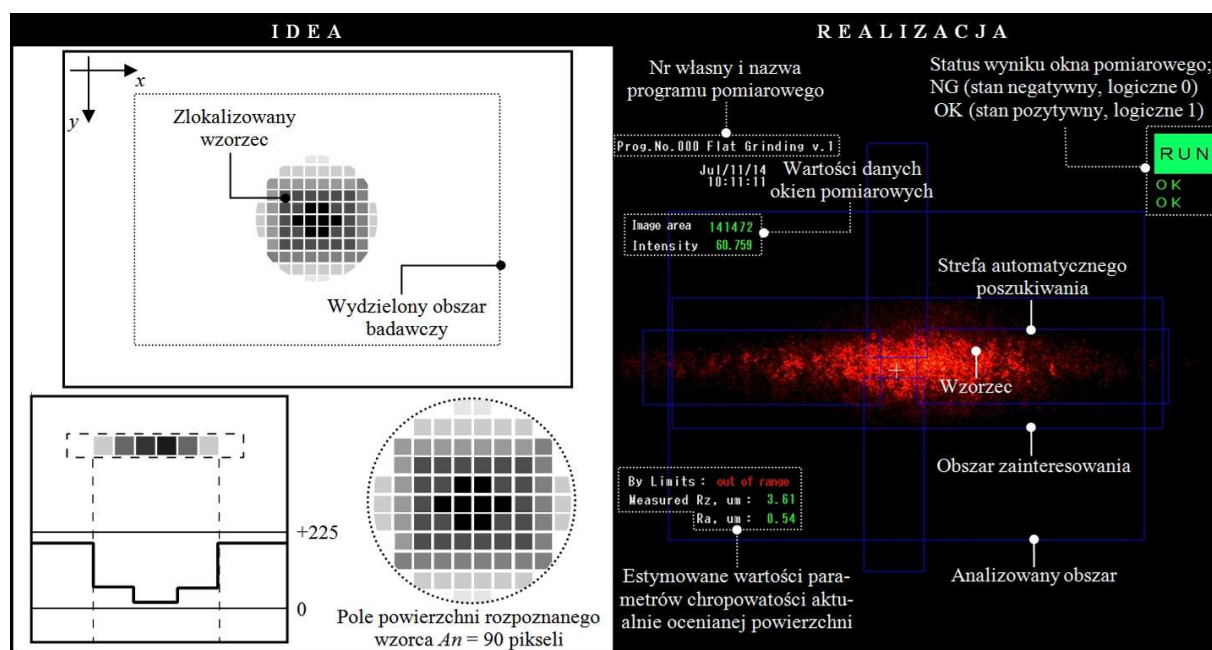
Nr próbki	Parametry obróbki				Parametry SGP			
	Prędkość obwodowa		Posuw f , m/min	Głębokość szlifowania a_e , mm	Rz , μm	σ	Ra , μm	σ
	ściernicy v_s , m/s	przedmiotu v_p , m/min						
1.	21	13	0,7	0,0025	0,82	0,02	0,07	0,05
2.	32	17	1,2	0,005	1,33	0,03	0,18	0,04
3.	32	17	1,7	0,01	2,61	0,01	0,37	0,05
4.	32	17	2,5	0,01	4,87	0,01	0,65	0,05
5.	32	31	5,2	0,02	14,50	0,20	1,98	0,30
6.	32	31	6,5	0,02	24,80	0,20	3,71	0,10

W celu rejestracji obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystano tor optyczny przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni metodą różniczkową, będący komponentem eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowego do aktywnej kontroli SGP. W skład toru wchodził laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 635 firmy Coherent (USA) ($\lambda = 635$ nm, 1 mW) emitujący wiązkę światła skierowaną pod kątem 90° na powierzchnię ocenianej próbki i tworzącą na niej plamkę o średnicy 1 mm. Odbite lub rozproszone z powierzchni światło powracało do układu optycznego, gdzie kierowane dzielnikiem wiązki trafiały na matówkę tworząc obraz, rejestrowany przez kamerę CCD – CV-200C firmy Keyence. Był on następnie przesyłany do kontrolera systemu wizyjnego gdzie poddawany był przetwarzaniu i analizie. Na podstawie wielokryterialnej oceny cech obrazu, związanych z pomiarem natężenia światła I , autorski program pomiarowy Flat Grinding 1.0 dokonywał ciągłej estymacji parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rz . Na rysunku 10 przedstawiono algorytm przetwarzania i analizy obrazu wykorzystywany w badaniach eksperymentalnych, natomiast w tabeli 12 zestawiono uzyskane wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych wraz z ich korelacją z parametrami SGP.

Rezultaty uzyskane z analizy obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego pozwalają na stwierdzenie, iż wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych mieszczą się w określonych limitach (tab. 12). W odniesieniu do uzyskanych wartości parametrów SGP można ogólnie stwierdzić, iż były one niższe od nominalnych średnio o 5,37% (dla parametru Rz) i 9,31% (dla parametru Ra). Oznacza to, iż zastosowany algorytm, nie działał do końca poprawnie. Przyczyną tego były m.in. zmiany natężenia światła, wynikające z lokalnych zmian warunków oświetlenia, wprowadzające silne zakłócenia w procesie pomiarowym. Tym niemniej uzyskane wartości należy uznać za poprawne, mieszczące się w zakresie błędów przyjętych dla przemysłowych systemów pomiarowych mierzonej.

Pozytywne rezultaty badań eksperymentalnych uzyskanych podczas statycznej oceny parametrów SGP szlifowanych próbek płaskich, pozwoliły na przeprowadzenie prób oceny takich parametrów w stanie dynamicznym. W tym celu rozszerzono zakres prac o pomiary wykonywane podczas ruchu powierzchni ocenianych próbek. W badaniach wykorzystano dwie próbki walcowe o średnicy zewnętrznej

$d_z = 40$ mm i długości $l = 165$ mm. Powierzchnia próbki nr 1 posiadała pięć segmentów o długości $l = 33$ mm, natomiast powierzchnia próbki nr 2 dwa segmenty o długości $l = 80$ mm. Wszystkie powierzchnie próbek poddano szlifowaniu ściernicą 1-350×50×12738A80KVBE na szlifierce uniwersalnej RUP 28P wyprodukowanej przez ZM Tarnów (Polska).



Rys. 10. Schemat algorytmu przetwarzania i analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego realizowany przez autorski program pomiarowy opracowany w środowisku programistycznym CV-H3N 2.1 firmy Keyence

Tab. 12. Wartości parametrów geo- i fotometrycznych uzyskane z analizy obrazu wraz z ich korelacją z parametrami chropowatości powierzchni dla szlifowanych próbek płaskich wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Nr próbki	Pole powierzchni A_n , piksele		Natężenie światła I , j. u.		Parametry SGP			
	Max.	Min.	Max.	Min.	Rz , μm	σ	Ra , μm	σ
1.	271000	265000	113	109	0,75	0,01	0,05	0,02
2.	214000	205000	90	87	1,94	0,01	0,25	0,03
3.	162000	158000	71	68	2,30	0,07	0,31	0,01
4.	120000	110000	58	55	3,61	0,09	0,54	0,09
5.	44000	38000	29	26	10,53	0,05	1,79	0,03
6.	28000	24000	24	21	23,71	0,10	2,84	0,02

Podobnie, jak w przypadku szlifowanych próbek płaskich, do rejestracji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystano tor optyczny przeznaczony do oceny chropowatości powierzchni metodą różniczkową. Uzyskane wyniki analizy obrazu, w postaci wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych wraz z ich korelacją z parametrami SGP, dla zestawiono w tabeli 13.

Tab. 13. Parametry geo- i fotometryczne uzyskane z analizy obrazu wraz z ich korelacją z parametrami chropowatości powierzchni dla szlifowanych próbek walcowych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

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

¹⁾ pomiar mikroskopem interferencyjnym światła białego Talysurf CCI6000 firmy Taylor-Hobson (W. Brytania), ²⁾ prędkość obrotowa przedmiotu $n_p = 600$ obr./min

Uzyskane rezultaty pozwalają na stwierdzenie, iż wartości parametrów SGP jedynie częściowo odpowiadają wartościom nominalnym (tab. 13). Dla próbki nr 1 wartości parametru Rz, ocenianego w stanie statycznym, były średnio o 2% wyższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu wzrastały do ponad 19%. Dla tej samej próbki wartości parametru Ra, ocenianego w stanie statycznym, były o ponad 37% niższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu były niższe ponad o 26%. Dla próbki nr 2 rejestrowano dużo wyższe wartości parametrów. Były one dla parametru Rz, ocenianego w stanie statycznym, o ponad 200% wyższe niż nominalne, natomiast podczas oceny w ruchu wzrastały do ponad 350%. Dla parametru Ra były one na podobnym poziomie, odpowiednio ponad 160% wyższe od nominalnych (dla oceny statycznej) i ponad 300% (dla oceny w ruchu). Jak stwierdzono wcześniej, uzyskane wyniki tylko częściowo można uznać za poprawne. Tym niemniej zostały one zamieszczone celowo, aby przedstawić realne problemy występujące podczas oceny wybranych parametrów analizowanych powierzchni metodami rozpraszania światła i widzenia maszynowego.

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni metali i ich stopów po procesach szlifowania w stanie statycznym i w ruchu:

- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu powierzchni przedmiotów po procesie szlifowania niezależnie od ich kształtu;
- opracowana metodyka z powodzeniem może być wykorzystywana w pomiarach realizowanych dla powierzchni przedmiotów znajdujących się w stanie statycznym i w ruchu;
- powyższe właściwości umożliwiają zastosowanie metodyki w szerokim spektrum aplikacji przemysłowych oraz dedykowanych aplikacjach o charakterze laboratoryjnym;
- wymienionym zastosowaniom sprzyja również dość wąski zestaw wykorzystywanych modułów B1(K)+B2+D1 (tab.3), co oznacza, iż w tej konfiguracji metodyka będzie mogła być głównie wykorzystywana w zadaniach pomiarowych związanych z kontrolą jakości;
- w prowadzonych pracach badawczych wykorzystano jeden z torów optycznych eksperymentalnego hybrydowego systemu pomiarowego do aktywnej kontroli SGP. Umożliwił on ocenę powierzchni płaskich i walcowych w stosunkowo szerokim zakresie parametrów SGP (R_z od 0,8 do $> 30 \mu\text{m}$, R_a od 0,05 do $> 5 \mu\text{m}$), przy czym zakres ten odpowiadał zakresom stosowanym w komercyjnych systemach przemysłowej kontroli aktywnej.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Łukianowicz Cz., Tomkowski R. (2014). *Laserowa metoda aktywnej kontroli struktury geometrycznej precyzyjnie obrabianych powierzchni wykorzystująca obrazowanie i analizę światła rozproszonego*. Raport końcowy z realizacji projektu badawczego własnego N N505 486940. WM PKosz., Koszalin.
2. **Kapłonek W.**, Sutowski P. Łukianowicz Cz. (2014). *Zastosowanie systemu zautomatyzowanej inspekcji wizyjnej do pomiarów i analiz rozpraszania światła na powierzchniach porównawczych wzorców chropowatości*. *Mechanik*, **87**(8-9), 146–155. (CD-ROM).
3. Sutowski P., **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2015). *Empiryczna estymacja chropowatości powierzchni oraz składowych siły szlifowania i sygnału emisji akustycznej w procesie szlifowania powierzchni płaskich*. *Inżynieria Maszyn*, **20**(1), 65–77.
4. **Kapłonek W.**, Sutowski P., Nadolny K. (2015). *Zastosowanie hybrydowego systemu pomiarowego wykorzystującego obrazowanie i analizę światła rozproszonego do oceny stanu powierzchni szlifowanych*. *Inżynieria Maszyn*, **20**(1), 89–103.

3.5. Metodyka oceny stanu powierzchni metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych po procesach mikrowygładzania FTS

Jedną z szeroko wykorzystywanych obecnie nowoczesnych obróbek wykończeniowych jest mikrowygładzanie powierzchni. Obróbka ta została pierwotnie opracowana w latach osiemdziesiątych XX w. do precyzyjnego kształtowania powierzchni talerzy dysków twardych. Obecnie jest ona wykorzystywana do obróbki powierzchni o niewielkich wysokościach nierówności, wykonanych z metalu (np. aluminium, miedź, stal) i innych materiałów niemetalowych (np. szkło, ceramika, tworzywa sztuczne, guma). Wymienione powierzchnie poddawane są często kontroli pozwalającej ocenić ich jakość (na podstawie pomiaru wybranych parametrów SGP). Specyfika procesu produkcyjnego, narzuca niekiedy wysokie wymagania w stosunku do sposobu oceny i wykorzystywanej w tej ocenie aparatury pomiarowej. Stąd też duże znaczenie w tego typu ocenie mają metody optyczne, w tym metody rozpraszania światła.

W celu potwierdzenia możliwości zastosowania jednej z takich metod – metody różniczkowej, wykorzystującej pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, przeprowadzono badania eksperymentalne. Do badań przeznaczono dziesięć próbek walcowych o średnicy zewnętrznej $d_z = 55$ mm i długości $l = 100$ mm. Próbki posiadały dwie powierzchnie obrobione, przy czym jedna była szlifowana, a druga mikrowygładzana.

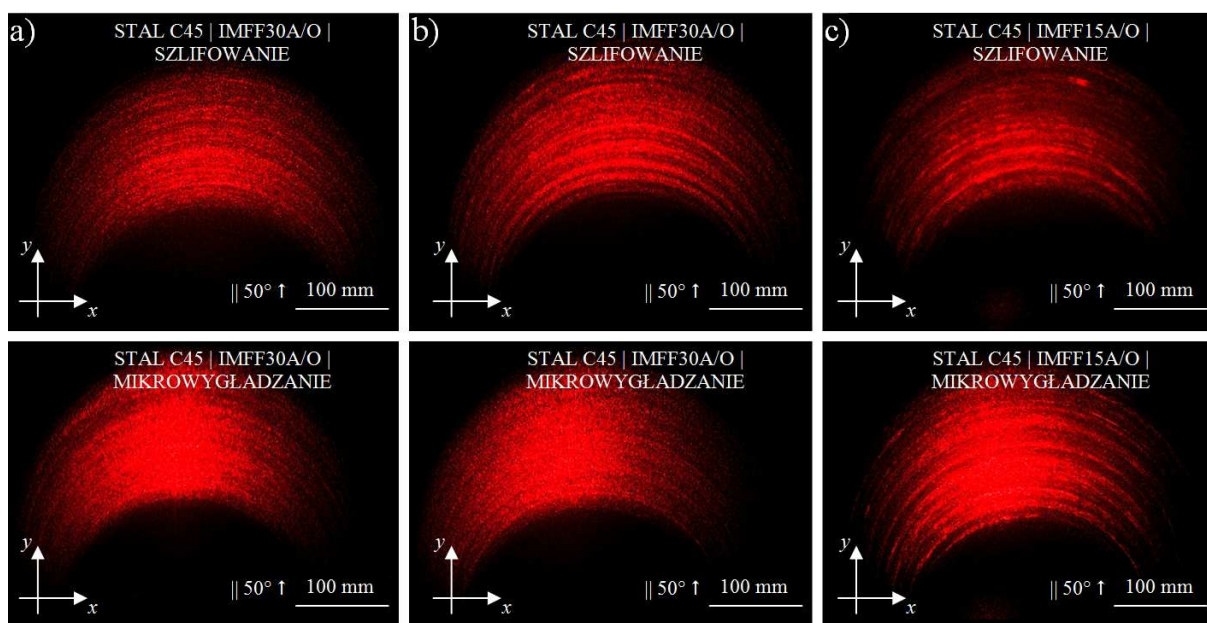
Przed przystąpieniem do procesu mikrowygładzania obie powierzchnie poddano szlifowaniu ściernicą TIA300×40×12799A60K8V na uniwersalnej szlifierce do wałków typu M1420 wyprodukowanej przez Wuxi Yiji Grinding Machine Manufacturing Co., Ltd. (Chiny). Obróbkę ścierną prowadzono z wykorzystaniem tokarki uniwersalnej typu CU500 wyprodukowanej przez ZMM (Bułgaria) z zamontowaną w gnieździe narzędziowym imaka nożowego laboratoryjną głowicą do mikrowygładzania foliowymi taśmami ściernymi (FTS) powierzchni GM-1. Podczas procesu wykorzystano dwa typy taśm mikrościernych wyprodukowanych przez firmę 3M (USA) o oznaczeniach IMFF30A/O oraz IMFF15A/O. Parametry SGP dwustrefowych próbek walcowych po procesie szlifowania i mikrowygładzania FTS podano w tabeli 14.

Tab. 14. Wartości parametrów procesu szlifowania dwustrefowych próbek walcowych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Nr próbki	Materiał	Twardość Rockwella HRC	Parametr SGP po procesie szlifowania		Parametr SGP po procesie mikrowygładzania FTS	
			$Ra, \mu\text{m}$	σ	$Ra, \mu\text{m}$	σ
1.	Stal C45	44	0,52 ²⁾	0,02	0,18 ²⁾	0,01
2.	Stal C45	40	1,04 ¹⁾	0,01	0,67 ¹⁾	0,03
3.	Stal C45	40	0,47 ²⁾	0,01	0,33 ²⁾	0,01
4.	Stal C45	36	1,23 ¹⁾	0,01	1,07 ¹⁾	0,01
5.	Stal C45	15	0,34 ²⁾	0,01	0,13 ²⁾	0,03
6.	Stal C45	15	0,89 ¹⁾	0,06	0,56 ¹⁾	0,11
7.	Stal C45	15	1,46 ¹⁾	0,04	1,39 ¹⁾	0,04
8.	Stal C45	15	0,51 ¹⁾	0,03	0,39 ¹⁾	0,03
9.	Stal C45	15	0,57 ¹⁾	0,05	0,45 ¹⁾	0,03
10.	Mosiądz CW612N	–	0,61 ¹⁾	0,04	0,58 ¹⁾	0,05

¹⁾⁻²⁾ pomiar profilometrem stykowym (odpowiednio) Hommel-Tester T2000 i T8000 firmy Hommelwerke (średnia z 10 pomiarów)

W celu rejestracji obrazów kątego rozkładu natężenia światła rozproszonego zestawiono stanowisko badawcze, w którego w skład wchodził laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs, Inc. o mocy 1 mW, zamocowany w uchwycie. Laser emitował w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali $\lambda = 635$ nm (barwa czerwona), rzutowaną na powierzchnię ocenianej próbki pod kątem padania 50° . Oceniane próbki umieszczano na obrotowym stoliku i ustawiano tak, aby ślady obróbki były prostopadłe, a po obrocie o 90° , równoległe do płaszczyzny padania światła na powierzchnię. Obraz rejestrowano z dziesięciu wybranych obszarów znajdujących się na powierzchni obu stref (szlifowanej i mikrowygładzonej). Do akwizycji wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Camedia C-5060WZ firmy Olympus (Japonia) zamocowany na antywibracyjnej platformie i sterowany zdalnie przewodowym pilotem RM-UC1. Przykładowe obrazy kątego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane podczas oświetlania ocenianych próbek w sposób równoległy do śladów obróbki przedstawiono na rysunku 11.



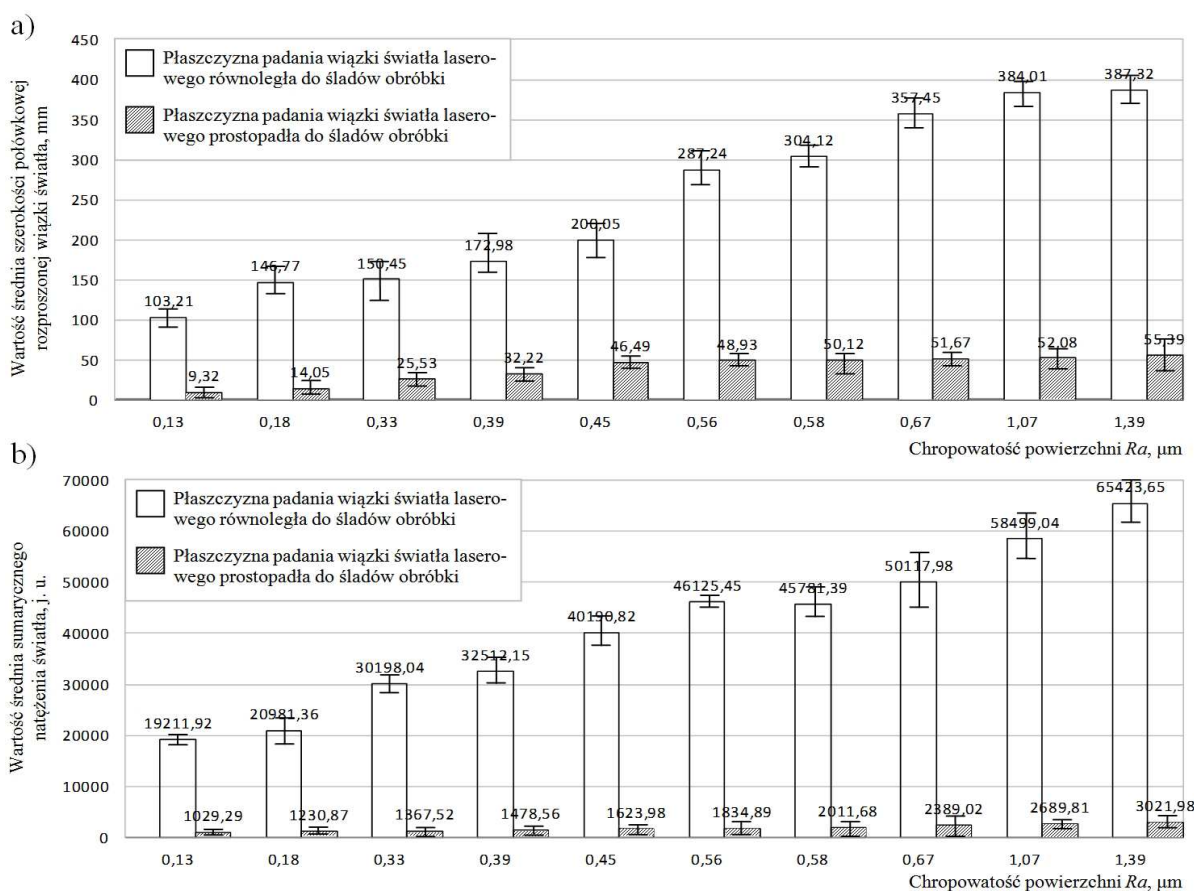
Rys. 11. Obrazy kątego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm, skierowanej równoległe do śladów obróbki pod kątem padania 50° , od powierzchni szlifowanej (obraz górny) i mikrowygładzonej (obraz dolny): a) próbki nr 1 (stal C45); b) próbki nr 2 (stal C45); c) próbki nr 8 (stal C45)

Wszystkie zarejestrowane obrazy kątego rozkładu natężenia światła rozproszonego, analizowano za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Głównym celem analiz było określenie wartości wybranych parametrów charakteryzujących oceniane obrazy. Procedura stosowana podczas analizy polegała na wstępnym przetworzeniu obrazów (korekcja tonalna, kadrowanie), a następnie obliczeniu liczby obiektów znajdujących się w obrazach (po wcześniejszym zadeklarowaniu istotnych parametrów). Proces obliczenia liczby obiektów realizowany był w trybie automatycznym przez narzędzie Count/Size. Na podstawie uzyskanych danych o liczbie obiektów oprogramowanie wyznaczyło średnie wartości wskazanych parametrów. W tym przypadku były to dwa parametry fotometryczne – szerokość połówkowa rozproszonej wiązki światła H_w i sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu kątego rozkładu natężenia światła rozproszonego I_Σ .

Na rysunku 12 zestawiono, w formie wykresów słupkowych, średnie wartości uzyskanych parametrów fotometrycznych. Analiza wykresów pozwoliła na stwierdzenie, iż niezależnie od rozpatrywanego parametru, ich wartość zwiększa się w miarę wzrostu parametru chropowatości powierzchni (w tym przypadku Ra). Wartości zarejestrowane dla szerokości połówkowej rozproszonej wiązki światła H_w , gdy płaszczyzna padania wiązki była równoległa do osi próbek i śladów obróbki, były średnio o ok. 87% wyższe od tych zarejestrowanych, gdy płaszczyzna padania wiązki światła

laserowego była prostopadła do osi próbek i śladów obróbki. Wartości drugiego z analizowanych parametrów – sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_{Σ} przedstawiały się podobnie. Gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była równoległa do osi próbek i śladów obróbki rejestrowano wyższe, średnio o 95%, wartości, niż w przypadku, gdy płaszczyzna padania wiązki była prostopadła do osi próbek i śladów obróbki.

Z zestawienia powyższych wartości wynika, iż bardziej korzystny był równoległy sposób oświetlenia powierzchni ocenianych próbek walcowych. Sposób ten zapewniał uzyskanie wyższych wartości natężenia światła I w rejestrowanych obrazach kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego bez konieczności stosowania dodatkowych procedur przetwarzania wstępnego. Uniknięcie stosowania takich procedur pozwala na uzyskanie dużo wyższej efektywności wykonywanych analiz, m.in. w przypadku oceny, odbywającej się w rzeczywistych warunkach produkcyjnych.



Rys. 12. Zależności wybranych parametrów fotometrycznych i parametru chropowatości w postaci wykresów słupkowych, uzyskane dla mikrowygładzonych powierzchni ocenianych próbek walcowych, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była równoległa i prostopadła do osi próbek i śladów obróbki: a) zależność wartości średnich szerokości połówkowej rozproszonej wiązki światła od chropowatości powierzchni (opisanej parametrem R_a); b) zależność wartości średniego sumarycznego natężenia światła od chropowatości powierzchni (opisanej parametrem R_a)

Foliowe taśmy ściernie mogą być niezwykle użyteczne nie tylko w obróbce wykończeniowej powierzchni wykonanych z metali i ich stopów, ale także np. powierzchni wykonanych z tworzyw sztucznych. Znajdują one szerokie zastosowanie m.in. w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym i maszynowym. Wiele komponentów z tworzyw sztucznych wykorzystuje się także w różnego rodzaju aparaturze kontrolno-pomiarowej, medycznej i elektroenergetycznej.

W celu stwierdzenia przydatności metody różniczkowej, wspomaganej technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, do oceny wybranych parametrów charakteryzujących SGP elementów wykonanych z tworzyw sztucznych przeprowadzono badania eksperymentalne o podobnym do przedstawionych wcześniej charakterze. Do badań przeznaczono osiem próbek walcowych w formie wałków o średnicy zewnętrznej $d_z = 60$ mm i długości $l = 62$ mm. Obróbkę prowadzono, podobnie jak podczas opisanych wcześniej badań eksperymentalnych. Parametry SGP uzyskane za pomocą profilometru stykowego Hommel-Tester T2000 firmy Hommelwerke dla próbek walcowych z tworzyw sztucznych po procesie szlifowania i mikrowygładzania FTS podano w tabeli 15.

Tab. 15. Charakterystyka próbek walcowych wykonanych z tworzyw sztucznych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

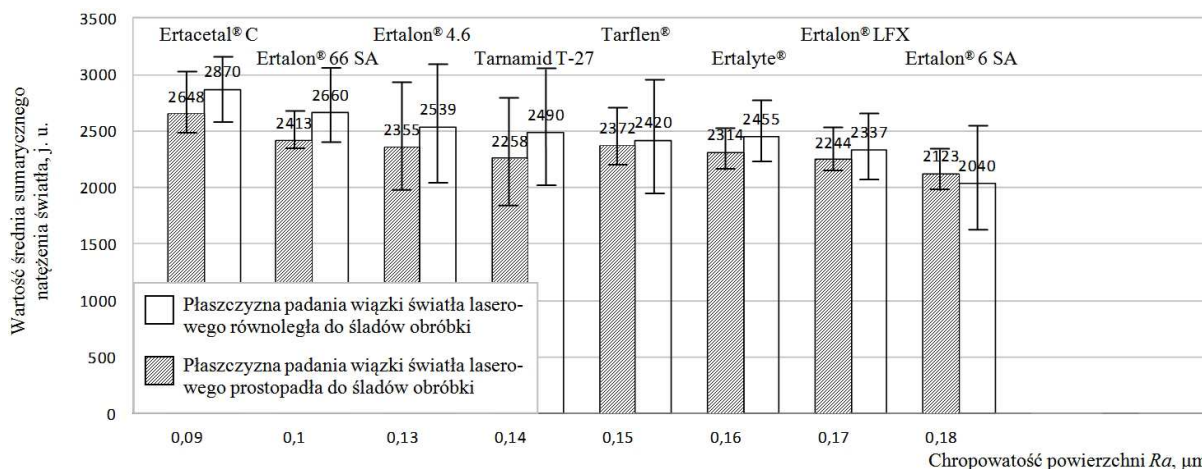
Nr próbki	Nazwa handlowa	Nazwa chemiczna	Parametr SGP po procesie szlifowania		Parametr SGP po procesie mikrowygładzania FTS	
			$Ra, \mu\text{m}$	σ	$Ra, \mu\text{m}$	σ
1.	Ertalon® 4.6 (Stanyl®)	Poliamid (Nylon)	0,36	0,04	0,13	0,01
2.	Ertalon® 66 SA (Boramid 6.6)	Poliamid (Nylon)	0,68	0,01	0,1	0,01
3.	Ertalon® LFX (Boramid 6-G.S.O.)	Poliamid samosmarowny (Nylon)	0,87	0,06	0,17	0,02
4.	Ertalon® 6 SA (Boramid 6-E)	Poliamid 6 (Nylon)	0,70	0,01	0,18	0,01
5.	Ertalyte®	Politereftalan etylenu	1,10	0,04	0,16	0,02
6.	Ertacetal® C	Poliacetal	0,73	0,08	0,09	0,05
7.	Tarflen® (Teflon®)	Polimer fluorowęgłowy	0,59	0,04	0,15	0,02
8.	Tarnamid T-27	Poliamid (Nylon)	0,65	0,08	0,14	0,03

Akwizycja, przetwarzania i analiza obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana była w identyczny sposób jak dla szlifowanych i mikrowygładzanych powierzchni wykonanych z metali i ich stopów w opisanych wcześniej pracach badawczych.

Na rysunku 13 zestawiono, średnie wartości sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_Σ uzyskane dla wszystkich analizowanych próbek wraz z odpowiadającymi im wartościami chropowatości powierzchni (opisanymi parametrem Ra). Na wykresie podano wartości I_Σ uzyskane podczas oświetlania powierzchni próbek, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była prostopadła i równoległa do osi próbek i śladów obróbki.

Analiza wartości sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_Σ (rys. 13), pozwala na stwierdzenie, iż niezależnie od sposobu oświetlania powierzchni malały one wraz ze wzrostem wartości chropowatości. Gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była równoległa do osi próbek i śladów obróbki rejestrowano wyższe, średnio o 8%, wartości, niż w przypadku, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była prostopadła do osi

próbek i śladów obróbki. W porównaniu do wcześniej uzyskanych rezultatów (rys. 12) można stwierdzić, iż także w tym przypadku oświetlenie równoległe okazało się znacznie bardziej korzystne niż oświetlenie prostopadłe.



Rys.13. Zależność wartości średnich sumarycznego natężenia światła od chropowatości powierzchni (opisanej parametrem R_a) dla ocenianych próbek walcowych, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była prostopadła i równoległa do osi próbek i śladów obróbki

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni metali i ich stopów oraz tworzyw sztucznych po procesach mikrowygładzania FTS:

- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu powierzchni przedmiotów po procesie szlifowania i mikrowygładzania FTS, niezależnie od materiałów z jakich wykonano analizowane powierzchnie próbek i niezależnie od tego czy oceniane powierzchnie znajdowały się w stanie statycznym czy w ruchu;
- w ocenie powierzchni mikrowygładzanych metali i ich stopów zastosowano stosunkowo szeroki zestaw modułów A1(AC)+B1(AC)+B2+C1 (PS)+C2+D1 (tab.3), co oznacza, iż w tej konfiguracji metodyka będzie mogła być wykorzystywana w pracach laboratoryjnych o charakterze badawczym. Dla próbek z tworzyw sztucznych zredukowano zestaw modułów B1(AC)+B2+D1 (tab.3), tworząc metodykę ukierunkowaną głównie na kontrolę jakości, choć z elementami bardziej zaawansowanej analizy badawczej;
- do przetwarzania i analizy obrazów światła rozproszonego wykorzystano specjalistyczne oprogramowanie komputerowe Image-Pro® Plus 5.1. Pozwoliło ono na wyznaczenie wybranych parametrów geo- i fotometrycznych charakteryzujących oceniane obrazy. Dobór danych funkcji oprogramowania wykorzystywanych podczas wstępnej i właściwej analizy obrazu (moduły B1+B2) (tab.3), powinien być podyktowany jej spodziewanymi efektami.

Publikacje

1. Łukianowicz Cz., **Kapłonek W.** (2004). *Analiza możliwości aktywnych pomiarów metodą optyczną nierówności powierzchni wałków obrabianych ściernie*. Mat. konf. XXVII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej 2004 – Zeszyty Naukowe WM PKosz., **36**, 293–300.
2. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz. (2007). *Laser Scatterometry Used for the Assessment of Microfinished Shafts*. Proc. IV. Int. Congress on Precision Machining ICPM 2007 (Adamczak S., Stępień K., Eds.), 291–296.

3. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz. (2010). *Laser Scatterometry and Image Analysis Used for the Assessment of Sur-face Roughness of Microfinished Cylindrical Elements Made of Plastics*. Measurement Automation and Monitoring, **56**(4), 330–333.
4. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2011). *Medição da dispersão da luz do laser usada para impedir empastamento no rebolo*. Máquinas e Metais, **47**(544), 104–117.

3.6. Metodyka oceny defektów powierzchni obrabianych ściernie

Ocena stanu powierzchni przedmiotów obrabianych ściernie kojarzona jest najczęściej z pomiarem i analizą wybranych elementów SGP, takich jak m.in. chropowatość powierzchni. Tym niemniej w wielu przypadkach ukształtowana ściernie powierzchnia może zawierać również tzw. elementy niespecyficzne – wady, zwane także skazami. Pomimo iż występują one na znikomej części powierzchni przedmiotu obrabianego, w istotny sposób wpływają na jego cechy użytkowe i eksploatacyjne.

W celu potwierdzenia możliwości detekcji i analizy wad powierzchni po procesach obróbki ściernie metodą różniczkową, wykorzystującą pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, przeprowadzono badania eksperymentalne. Wykorzystano w nich pięć próbek walcowych w formie pierścieni o średnicy zewnętrznej $d_z = 20$ mm, średnicy wewnętrznej $d_w = 14$ mm i wysokości $z = 10$ mm. Wybrane parametry obróbki oraz uzyskane metodą profilometryczną (profilometru stykowego Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke) wartości parametrów SGP dla analizowanych próbek podano w tabeli 16.

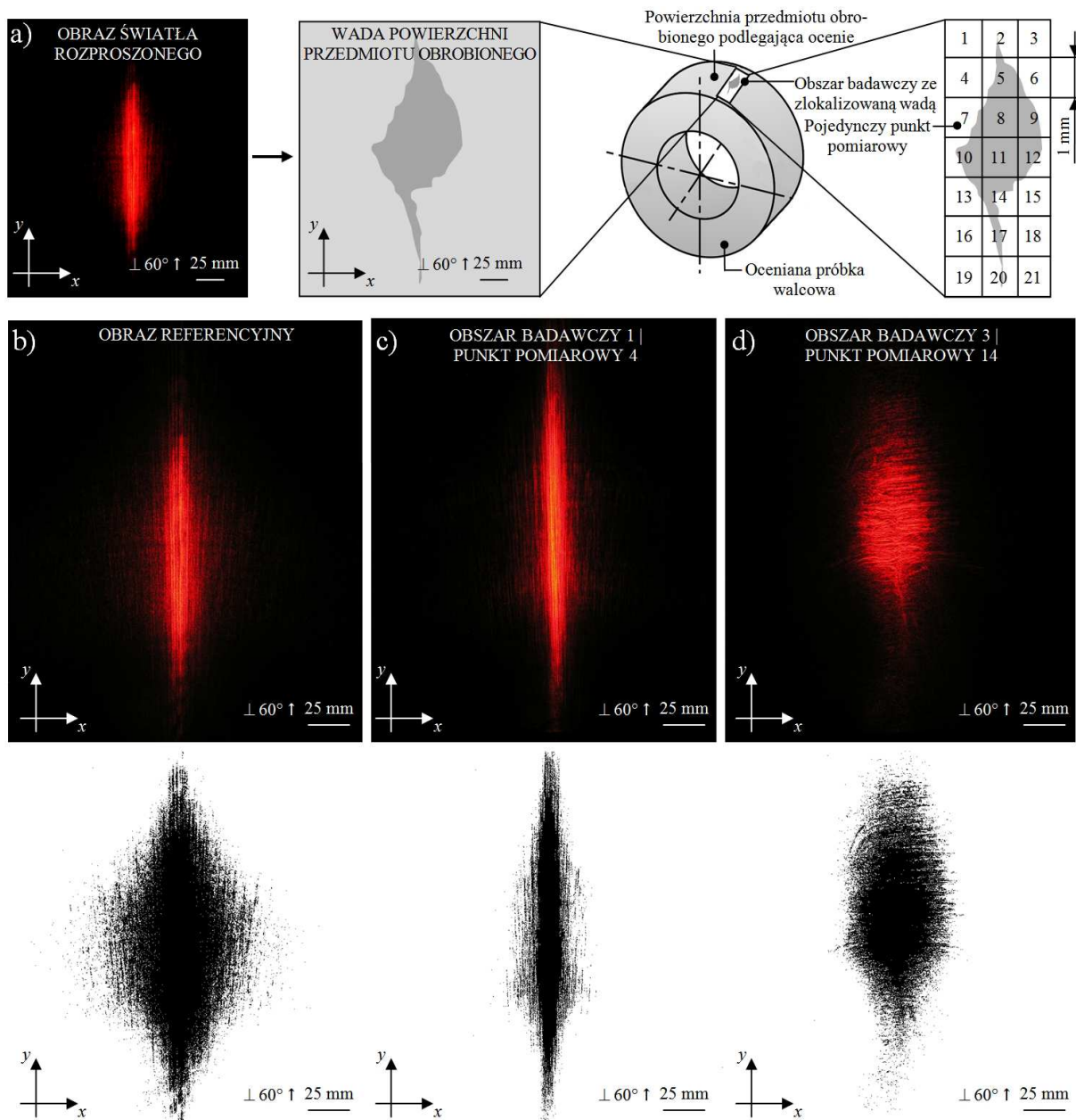
Tab. 16. Ogólna charakterystyka, parametry obróbki i wybrane parametry SGP próbek walcowych wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Nr próbki	Materiał	Obróbka zgrubna	Obróbka wykończeniowa	Parametry SGP			
				Ra, μm	Rp, μm	Rt, μm	Rz, μm
1.	Aluminium AW6082	Toczenie	Szlifowanie + polerowanie	0,06	0,15	0,76	0,4
2.	Mosiądz CW612N	Toczenie	Szlifowanie	1,28	3,48	15,6	7,93
3.	Żeliwo GJL150	Toczenie	Szlifowanie + polerowanie	0,05	0,12	0,94	0,41
4.	Stal C45	Toczenie	Polerowanie	0,45	1,5	2,95	2,95
5.	Stal St5	Toczenie	Szlifowanie	1,48	4,23	9,75	7,04

Po przeprowadzonej obróbce powierzchni próbek sprawdzono wizualnie, co pozwoliło stwierdzić, iż wykonano je poprawnie i nie zawierają one widocznych wad. Po kilkunastomiesięcznej eksploatacji w warunkach warsztatowych na powierzchni próbek ujawniły się liczne wady w postaci różnego rodzaju rys, wżerów, rozwarstwień i plam.

Obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego rejestrowano korzystając z zestawionego stanowiska pomiarowego. Powierzchnie próbek oświetlano wiązką światła o długości fali $\lambda = 635$ nm emitowaną w sposób ciągły przez laser półprzewodnikowy CPS182 firmy Thorlabs, Inc. o mocy 4,5 mW. Wiązka skierowana była na ocenianą powierzchnię pod kątem padania 60° . Wykrytą wadę oświetlano w taki sposób, aby linia po linii zarejestrować maksymalnie wiele obrazów kąтового rozkładu

natężenia światła rozproszonego, odpowiadających każdemu jej fragmentowi. Rejestrację obrazów prowadzono w dwóch seriach. W pierwszej serii płaszczyzna padania była prostopadła, natomiast w drugiej równoległa do osi próbek oraz śladów obróbki. Liczba obrazów była zależna od liczby wykrytych wad. Dodatkowo, jako referencyjny, rejestrowano także obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dla powierzchni próbki walcowej nieposiadającej wad. Zarejestrowane obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Obrazy (rzeczywiste i po procesie binaryzacji) kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm, skierowanej prostopadle do śladów obróbki pod kątem padania 60° , od powierzchni próbki nr 4: a) metodyka pomiarów; b) obraz referencyjny; c) obraz defektu w postaci rysy (wymiary: $3416 \times 150 \mu\text{m}$); d) obraz defektu w postaci wżeru (wymiary: $523 \times 612 \mu\text{m}$)

Wszystkie obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego analizowano za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Głównym celem analiz było

określenie wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych ocenianych obrazów, przy czym zastosowano zbiór parametrów, które wykorzystywane były już we wcześniejszych badaniach eksperymentalnych. Przykładowe rezultaty parametrycznej analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dla powierzchni próbki nr 4 przedstawiono w tabeli 17. W podobny sposób dokonano analizy dla pozostałych powierzchni próbek, niezależnie od rodzaju wykrytych wad.

Tab. 17. Przykładowe wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych wyznaczone dla powierzchni próbki polerowanej nr 4 wykonanej ze stali C45 ($Ra = 0,15 \mu\text{m}$) za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1

Grupa parametrów	Parametr	Symbol	Wartość średnia			Jednostka
			1 ¹⁾	2 ²⁾	3 ³⁾	
–	Liczba obiektów w obrazie	–	394	136	212	–
Geometryczne	Pole powierzchni	An	898,86	427,02	835,69	mm ²
	Obwód	P	509,61	512,89	478,22	mm
	Średnica Fereta (max.)	F_{max}	217,83	377,11	213,40	mm
	Średnica Fereta (min.)	F_{min}	91,09	83,20	102,84	mm
	Długość	l	104,19	66,83	103,23	mm
	Wysokość	h	192,40	220,52	181,42	mm
Fotometryczne	Niejednorodność optyczna obrazu	SF	0,09	0,03	0,05	j. u.
	Sumaryczne natężenie światła	I_{Σ}	11900	10951	11064	j. u.
	Marginacja	M	0,44	0,44	0,44	j. u.

¹⁾ powierzchnia referencyjna pozbawiona wad, ²⁾ powierzchnia z defektem w postaci rysy, ³⁾ powierzchnia z defektem w postaci wżeru, j.u. – jednostka umowna

Z przeprowadzonych eksperymentów wynika, iż wystąpienie na ocenianych powierzchniach wad powodowało zaburzenie obrazu światła rozproszonego. Przykładowo, dla jednego z parametrów geometrycznych – pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego An , odchyłki wartości podane procentowo dla danej wady wynosiły odpowiednio: rowek i rysa – od ok. 20 do 30%, wżer – od 5 do 15% oraz rozwarstwienie od – 5 do 20%. Dla plam, jako wad głównie o charakterze wizualnym, rejestrowano stosunkowo niewielkie odchyłki wynoszące do ok. 2-3%. Powyższe wartości należy traktować orientacyjnie, gdyż odnoszą się one jedynie do analizowanego zestawu próbek, który został dobrany w celu przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny defektów powierzchni obrobionych ściernie:

- w opracowanej metodyce oceny defektów powierzchni obrobionych ściernie wykorzystano szeroki zestaw modułów B1(AC)+B2+C1(PS)+C2+ D1 (tab. 3), przy czym sama metodyka cechowała się dużą użytecznością, co może stanowić ciekawą alternatywę dla innych sposobów oceny, zwłaszcza w zakresie prac prowadzonych w warunkach laboratoryjnych;
- zaproponowana metodyka może być uzupełniona o inne moduły związane np. z obrazowaniem i akwizycją cech mikro i makro analizowanych powierzchni. Może również stanowić punkt wyjścia do opracowania sposobu oceny wad powierzchni w warunkach produkcyjnych;
- zastosowanie metody różniczkowej pozwala na bezstykową ocenę wad oraz skuteczne ich wykrywanie w stosunkowo krótkim czasie. Wsparcie tej metody technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego daje szerokie możliwości detekcyjne dostosowane do określonych wymagań (np. w obszarze badawczym lub pomiarach przemysłowych);
- dużym atutem metody różniczkowej jest także możliwość jej integracji z innymi technikami pomiarowymi. Jest to szczególnie ważna cecha w kontekście przeprowadzania szybkiej oceny powierzchni w warunkach przemysłowych. Już dzisiaj istnieje szereg rozwiązań łączących metody rozpraszania światła z metodami wizyjnymi, np. takimi jak m.in. widzenie maszynowe. Integracja ww. metod sprzyja utrzymaniu wysokich standardów w dziedzinie zapewniania i kontroli jakości.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Valíček J., Zeleňák M. (2012). *A Non-Contact Laser Method based on the Imaging and Analysis of Scattered Light used for Assessment of Surface Imperfections*. *Measurement Automation and Monitoring*, **58**(6), 554–558.

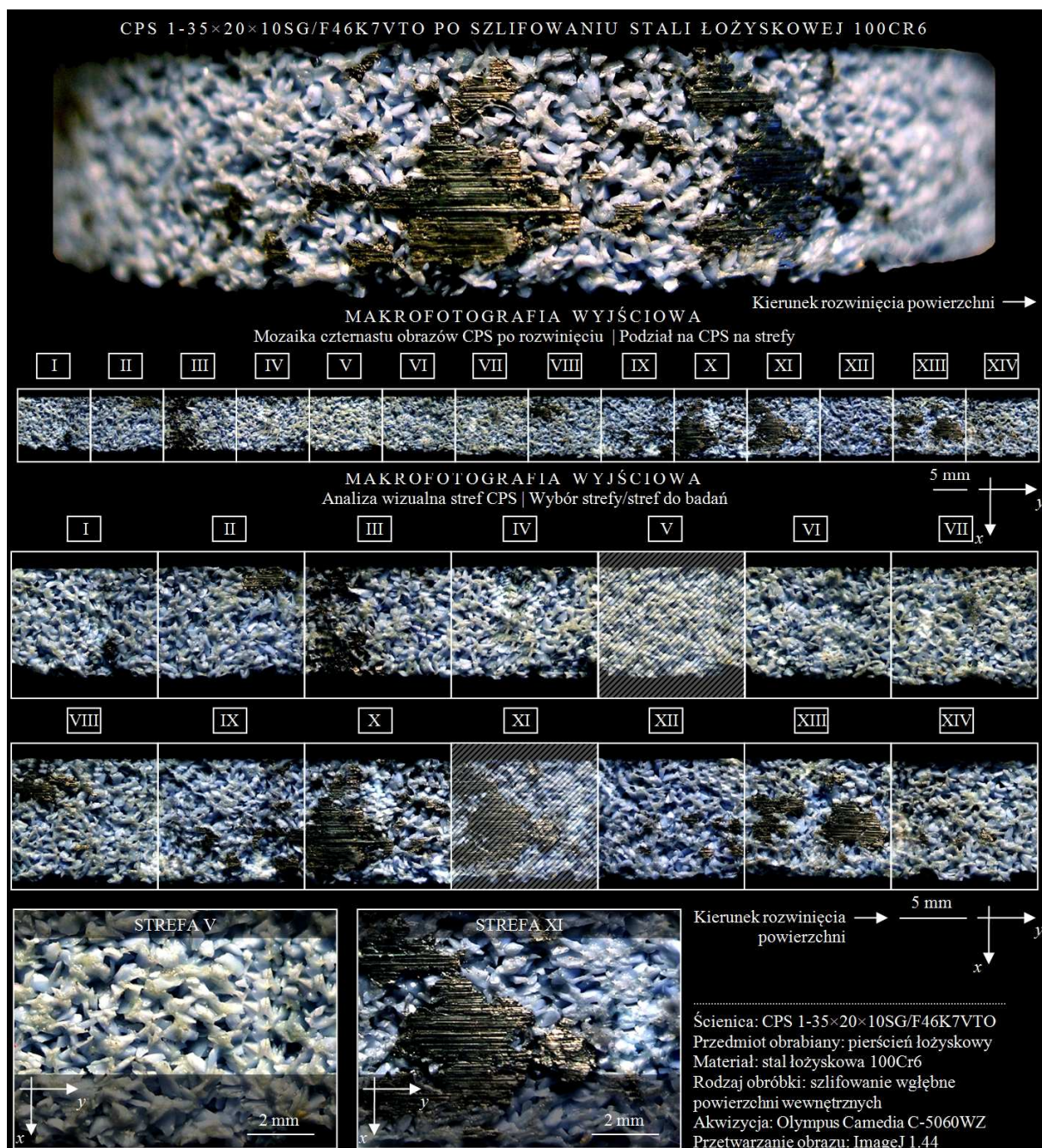
3.7. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów żelaza

We współczesnych zautomatyzowanych procesach wytwórczych stosuje się wysokowydajną obróbkę ścierną. W przypadku nowoczesnych odmian szlifowania stan CPS warunkuje poprawny przebieg procesu, a tym samym pozwala na uzyskanie określonych właściwości powierzchni przedmiotu obrobionego. Stan ten ulega szybkim zmianom wynikającym m.in. z występowania szeregu zjawisk towarzyszących prowadzonej obróbce ścierniej. Do szczególnie niepożądanych należy zjawisko zalepiania CPS materiałem obrabianym powstające na skutek wywołanego temperaturą przywierania wiórów materiału obrabianego do ziaren ściernych. Zalepienia powodują zmniejszenie zdolności skrawnej ściernicy, zwiększenie sił szlifowania i wzrost udziału tarcia w całym procesie. Wywołany tarcieciem znaczny wzrost temperatury w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym może się objawić defektami szlifierskimi powierzchni obrobionej, takimi jak np. przypalenia szlifierskie mikropęknięcia oraz niekorzystne eksploatacyjnie naprężenia ściskające. Stąd niezwykle istotną kwestią jest ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy której zadaniem jest odpowiednio wczesne wykrywanie zalepień i zapobieganie ich negatywnym skutkom, np. poprzez zmianę parametrów szlifowania lub przerwanie procesu i obciążenie ściernicy.

W celu przeanalizowania możliwości zastosowania metody różniczkowej, wykorzystującej pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego w aplikacjach związanych z oceną stopnia zalepiania CPS, wykonano badania eksperymentalne. Badaniom poddano ściernicę ceramiczną zbudowaną z ziaren mikrokrystalicznego korundu spiekane go o oznaczeniu technicznym 1-35×20×10SG/F4 6K7VTO po procesie szlifowania

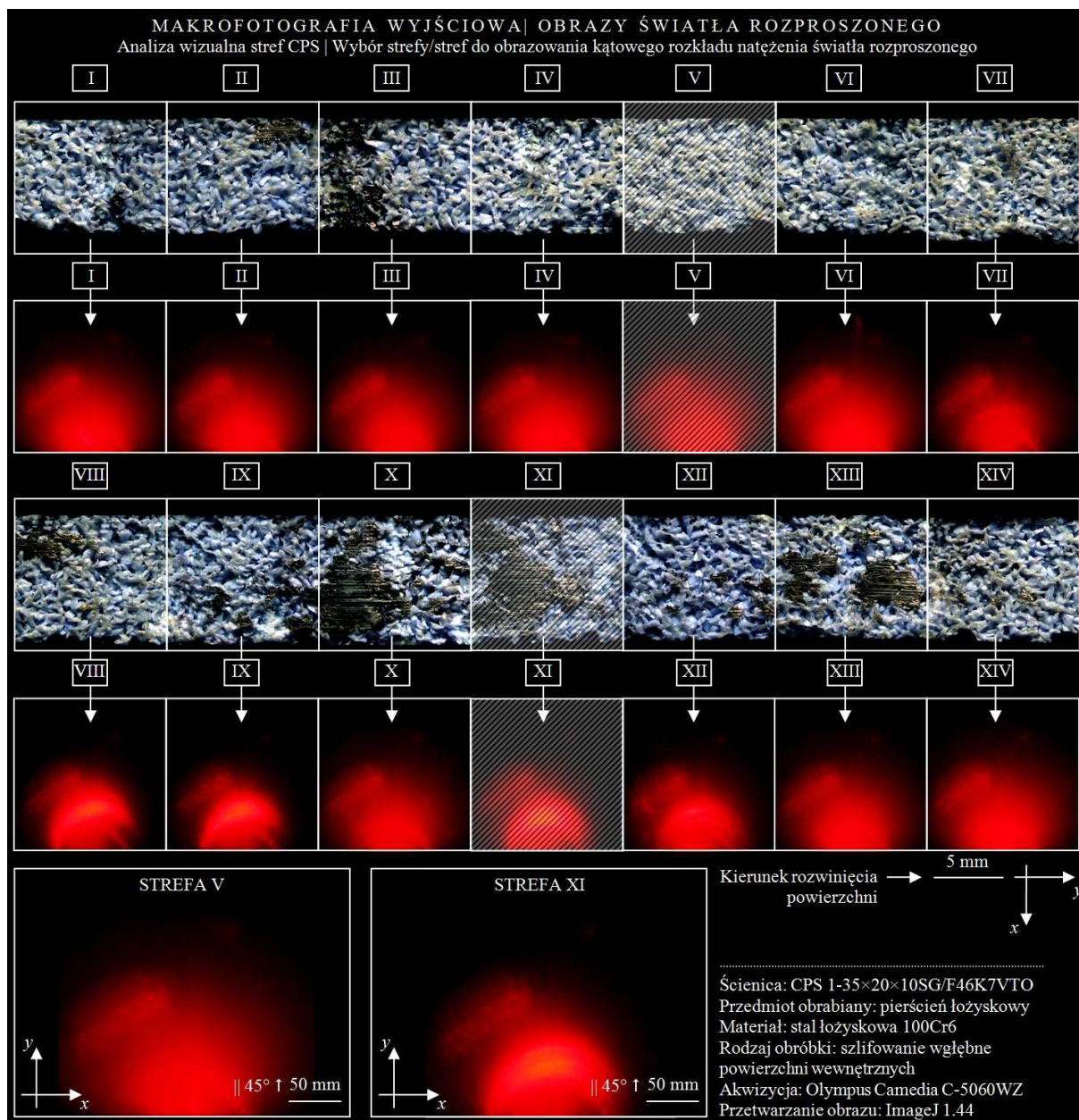
wgłębnych otworów w przedmiocie obrabianym, w postaci pierścienia łożyskowego o $d_w = 56$ mm i szerokości $l = 20$ mm, wykonanym ze stali łożyskowej 100Cr6.

Do przykładowej analizy wytypowano dwie strefy CPS: Strefę nr V i Strefę nr XI, odpowiednio, bez widocznych zalepień oraz rozległymi zalepieniami materiałem obrabianym. Akwizycja obrazów dokonywana była za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus. W celu uzyskania wyjściowej makrofotografii CPS po rozwinięciu zarejestrowano czternaście pojedynczych obrazów i dokonano ich odpowiedniego połączenia, co przedstawiono na rysunku 17. Makrofotografię CPS podzielono następnie na czternaście stref co umożliwiło precyzyjną ich analizę wizualną.



Rys. 17. Rezultaty akwizycji obrazów makroskopowych CPS 1-35×20×10SG/F46K7V po procesie szlifowania wgłębnych otworów w stali łożyskowej 100Cr6: makrofotografia wyjściowa (po rozwinięciu powierzchni) z podziałem na czternaście stref bez zalepień i z widocznymi zalepieniami oraz z wydzielonymi strefami (Strefa nr V i Strefa nr XI) poddanymi analizie wizualnej

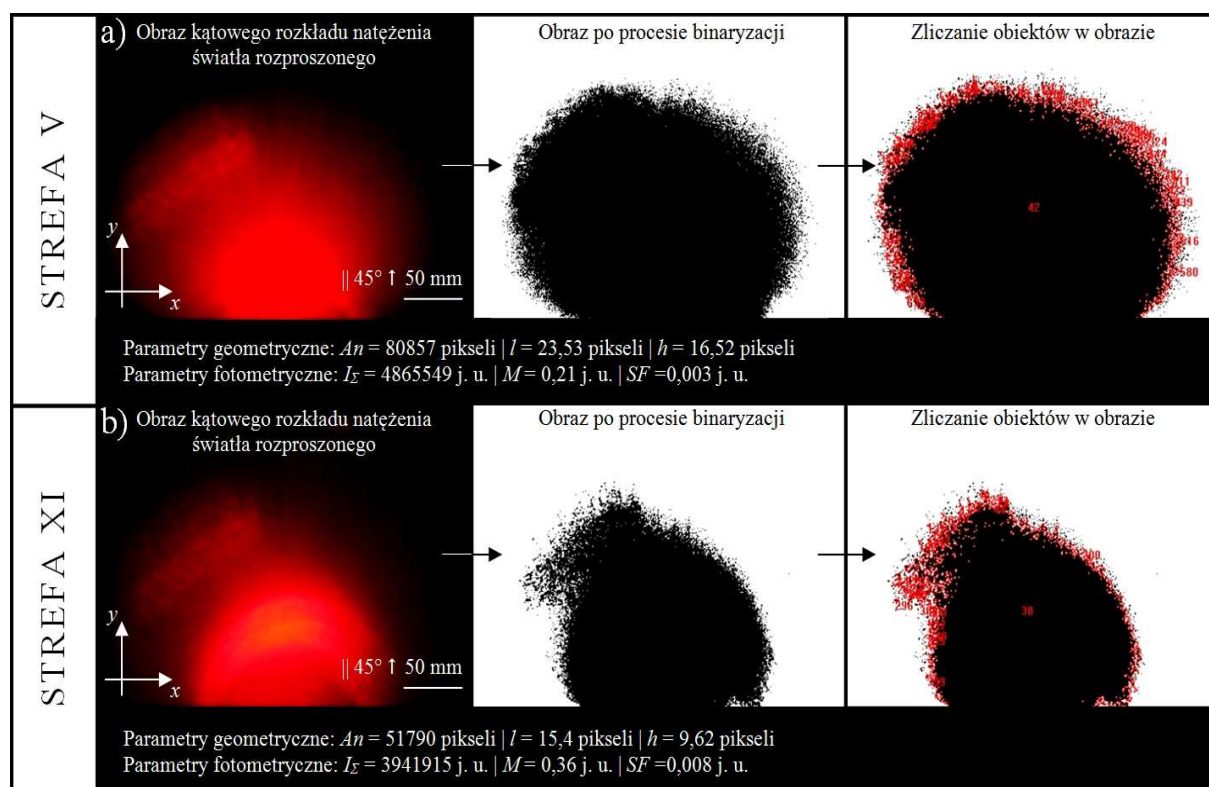
Wydzielone strefy, w sposób reprezentatywny charakteryzujące stan całej CPS 1-35×20×10SG/F46 K7VTO, poddano bardziej wnikliwej analizie, korzystając z możliwości elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL. W Strefie nr V obserwowano liczne mikrowióry materiału obrabianego. Ponadto CPS charakteryzowała się dużą otwartością struktury, co przekładało się na występowanie rozległych obszarów przestrzeni międzyziarnowych. Na drugiej z analizowanych stref CPS 1-35×20×10SG/F46K7VTO widoczne były rozległe zalepienia materiałem obrabianym. Zalepienia te obejmowały zarówno wierzchołki ziaren ściernych jak również przestrzenie międzyziarnowe.



Rys. 18. Rezultaty akwizycji obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego dla CPS 1-35×20×10 SG/F46K7V po procesie szlifowania węgłnego otworów w stali łożyskowej 100Cr6: makrofotografia wyjściowa z podziałem na czternaście stref bez zalepień i z widocznymi zalepieniami oraz korespondujące z nimi obrazy światła rozproszonego. Dla wydzielonych stref (Strefa nr V i Strefa nr XI) obrazy przedstawiono dodatkowo w powiększeniu (dół)

We wszystkich czternastu strefach, wolnych od zalepień i z widocznymi zalepieniami, CPS 1-35×20×10 SG/F46K7VTO dokonano akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. W obrębie danej strefy wyznaczano obszar, o wymiarach 5×5 mm, składający się z dwudziestu pięciu punktów pomiarowych. Średnica każdego z punktów wynosiła 1 mm. Każdy z punktów pomiarowych oświetlano wiązką światła o długości fali $\lambda = 635$ nm (barwa czerwona), emitowaną w sposób ciągły przez laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs, Inc., i skierowaną pod kątem padania 45° do nominalnej powierzchni ściernicy. Odbita i rozproszona przez powierzchnię wiązka tworzyła w płaszczyźnie obserwacji obraz światła rozproszonego. Płaszczyzną obserwacji był matowy ekran o wymiarach 300×300 mm z podziałką służącą do wstępnego szacowania wymiarów geometrycznych powstającego obrazu. Akwizycja dokonywana była za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-50 60WZ firmy Olympus, a jej rezultaty zestawiono na rysunku 18.

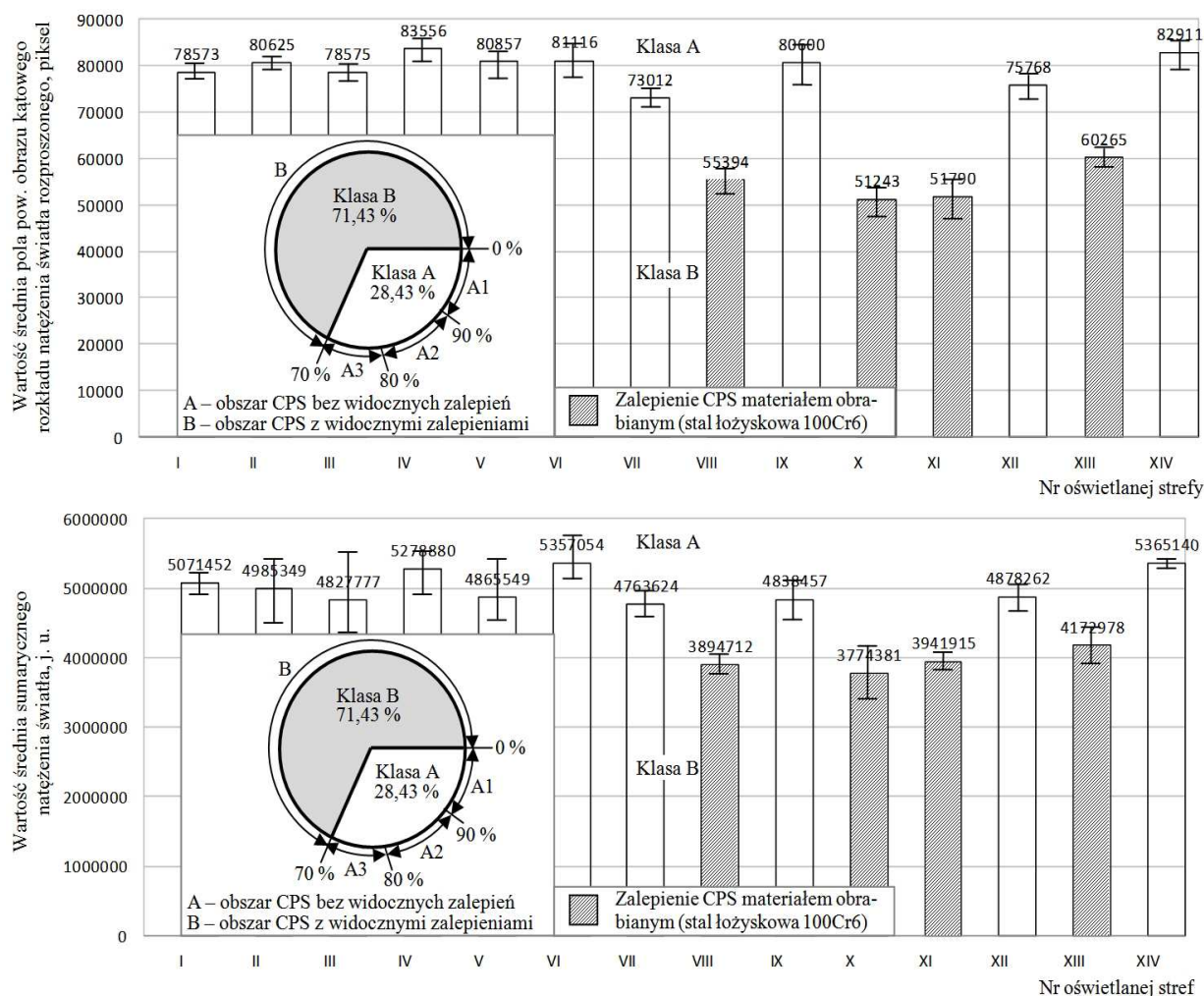
Wszystkie zarejestrowane obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego poddano przetwarzaniu i analizie w oprogramowaniu Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Przetwarzanie wstępne polegało m.in. na przeprowadzeniu korekcji tonalnej, wycentrowaniu rozkładów światła rozproszonego oraz ich odpowiednim wykadrowaniu. Tak przygotowane obrazy poddano analizie. Sprowadzała się ona do wyznaczenia wartości wybranych parametrów ocenianych obrazów z dwóch grup: geometrycznych i fotometrycznych. W grupie parametrów geometrycznych, jako główny stosowano pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego A_n , natomiast w grupie parametrów fotometrycznych – sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_z . Na rysunku 19 przedstawiono rezultaty analizy obrazów dla ocenianych stref CPS: Strefy nr V i Strefy nr XI (przekształcenia punktowe obrazów oraz wyznaczone wartości parametrów geo- i fotometrycznych).



Rys. 19. Rezultaty analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dla CPS 1-35×20×10SG/F46K7V po procesie szlifowania wglębnego otworów w stali łożyskowej 100Cr6: a) dla Strefy nr V bez widocznych zalepień materiałem obrabianym, b) dla Strefy nr XI z widocznymi zalepieniami materiałem obrabianym

W celu porównania wartości parametrów uzyskanych z analizy obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego z parametrami topografii powierzchni przeprowadzono pomiary referencyjne na wybranych fragmentach wszystkich stref ściernicy 1-35×20×10SG/F46K7VTO laserową głowicą LK-031 firmy Keyence (Japonia), zainstalowaną w multiprofilometrze Talysurf CLI 2000 firmy Taylor-Hobson. Za pomocą tego systemu pomiarowego wyznaczono wartości czterech wybranych parametrów SGP (*Sa*, *St*, *Sk*, *Sdr*). Analiza uzyskanych rezultatów wskazała, iż wartości otrzymanych parametrów SGP, zwłaszcza z grupy amplitudowych, były dla obu rozpatrywanych stref (Strefy nr V bez widocznych zalepień materiałem obrabianym i Strefy nr XI z widocznymi zalepieniami materiałem obrabianym) bardzo zbliżone. Wartości parametrów *Sk* i *Sdr* rejestrowane dla Strefy V były wyższe odpowiednio o 42,86% i 31,06% w stosunku do wartości uzyskanych dla Strefy XI, co wynikało z braku widocznych zalepień tej strefy CPS wiórami materiału obrabianego.

Ostatni etap prowadzonych badań przewidywał zestawienie uzyskanych rezultatów i ich końcową interpretację. Na rysunku 20 zestawiono, w postaci wykresów słupkowych, wartości średnie dwóch parametrów kluczowych – pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego A_n i sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_{Σ} , wyznaczonych dla wszystkich ocenianych stref CPS 1-35×20×10SG/F46K7VTO.



Rys. 20. Wartości średnie pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego (górną) i sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego (dół), uzyskane dla czternastu stref CPS 1-35×20×10SG/F46K7V po procesie szlifowania węgłnego otworów w stali łożyskowej 100Cr6

Z zestawionych wartości obliczono średnie dla parametrów kluczowych. Wynosiły one odpowiednio: $An_{sr} = 72448,73$ pikseli i $I_{\Sigma sr} = 4715395$ j. u i stanowiły odniesienie dla podziału wszystkich analizowanych stref na dwie klasy. W Klasie A znalazły się strefy o wysokich wartościach An i I_{Σ} , co oznaczało, że są one pozbawione zalepień materiałem obrabianym. Ściernice, dla których zarejestrowano takie wartości mogą być użytkowane pod pewnymi warunkami, określonymi w podklasach:

- Klasa A1: jeżeli $100\% > An_{sr} > 91\%$ i $100\% > I_{\Sigma sr} > 91\%$, to ściernica może być użytkowana w istniejących warunkach (bez zmiany parametrów obróbki) i oceniana zgodnie z przyjętą strategią pomiarową;
- Klasa A2: jeżeli $90\% > An_{sr} > 81\%$ i $90\% > I_{\Sigma sr} > 81\%$, to ściernica może być użytkowana w warunkach zmniejszonej wydajności obróbkowej (ze zmodyfikowanymi parametrami obróbki) i oceniana zgodnie z przyjętą strategią pomiarową;
- Klasa A3: jeżeli $80\% > An_{sr} > 70\%$ i $80\% > I_{\Sigma sr} > 70\%$, to ściernica może być użytkowana w warunkach zmniejszonej wydajności obróbkowej (ze zmodyfikowanymi parametrami obróbki) i oceniana ze zwiększoną (dwu- lub trzykrotnie) częstością, zgodnie z przyjętą strategią pomiarową.

Pod pojęciem strategii rozumie się w tym przypadku przyjęty plan odpowiednio zaplanowanej cyklicznej oceny stanu CPS skorelowany np. z liczbą przeszlifowanych przedmiotów lub czasem szlifowania.

Na wykresach kołowych, przedstawionych na rysunku 20, w Klasie B znalazły się strefy o niskich wartościach An lub I_{Σ} . Sugerowały one występowanie w analizowanych strefach CPS zalepień materiałem obrabianym. Ściernice, dla których zarejestrowano takie wartości nie mogą być dopuszczone do dalszego użytkowania i należy je poddać zabiegowi obciążania lub wymienić na nowe.

W rozpatrywanym przypadku procentowy udział wyników w poszczególnych klasach dla An i I_{Σ} przedstawiono na wykresach kołowych na rysunku 20. Analiza tych wykresów oraz uzyskanych wartości skłania do stwierdzenia, iż oceniana ściernica CPS 1-35×20×10SG/F46K7V może być zakwalifikowana do Klasy A3, gdyż była ona zalepiona w 28,43%, co stanowiło ok. 1/3 jej całkowitej powierzchni.

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów żelaza:

- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu zalepienia CPS materiałem obrabianym powstałym w procesie szlifowania stopów żelaza i stopów materiałów trudno skrawalnych;
- duża czułość zastosowanej metody optycznej pozwala na wykrywanie powstałych w procesie technologicznym zalepień materiałem obrabianym. Ich zlokalizowanie i właściwe rozpoznanie, a w następnej kolejności analiza, umożliwia uzyskanie szerokiego zakresu informacji o stanie badanej powierzchni narzędzia ściernego. Analiza uzyskanych rezultatów jest podstawą do wysunięcia odpowiednich wniosków i podjęcia decyzji dotyczących dalszej pracy narzędzia lub jego wymiany;
- ocena stopnia zlepienia CPS, w przedstawionej aplikacji, posiadała bardzo rozbudowany program badawczy. Wykorzystano w nim szeroki zakres modułów A1(AC)+A2(ME)+B1(AC)+B2+ C1(PO)+C2+D1 (tab.3), co oznacza, iż w tej konfiguracji metodyka będzie mogła być głównie wykorzystywana w pracach laboratoryjnych o charakterze badawczym;
- duża uniwersalność metodyki pozwala na jej zastosowanie zarówno w pracach badawczych, jak i w praktyce laboratoryjno-przemysłowej. Z punktu widzenia tej pierwszej liczba modułów powinna być jak największa (zastosowane moduły mogą zostać poszerzone o inne dodatkowe w zależności od charakteru i złożoności prowadzonych badań). W przypadku wykorzystania ww. metodyki w zastosowaniach praktycznych liczba modułów powinna być ograniczona do minimum i poszerzona o możliwości zastosowania programowych procedur zautomatyzowanej analizy obrazu cyfrowego.

Publikacje

1. Nadolny K., **Kapłonek W.** (2010). *Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu*. *Pomiary Automatyka Kontrola*, **56**(5), 491–494.
2. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2010). *Zastosowanie skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu do oceny czynnej powierzchni ściernic z mikrokryształicznego korundu spiekanego SG [w] Podstawy i technika obróbki ściernic (Gołąbczak A., Kruszyński B., Red.)*. Monografia WM PŁ, 153–164.
3. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2011). *Medição da dispersão da luz do laser usada para impedir empastamento no rebolo*. *Máquinas e Metais*, **47**(544), 104–117.
4. **Kapłonek W.**, Łukianowicz Cz., Nadolny K. (2012). *Methodology of the Assessment of the Abrasive Tool's Active Surface using Laser Scatterometry*. *T. Can. Soc. Mech. Eng.*, **36**(1), 49–66
5. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2013). *The Diagnostics of Abrasive Tools after Internal Cylindrical Grinding of Hard-to-Cut Materials by Means of a Laser Technique using Imaging and Analysis of Scattered Light*. *Arab. J. Sci. Eng.*, **38**(4), 953–970.
6. **Kapłonek W.**, Nadolny K. (2013). *Assessment of the Grinding Wheel Active Surface Condition using SEM and Image Analysis Techniques*. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, **35**(3), 207–215.

3.8. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów niklu i tytanu

Zalepianie czynnej powierzchni narzędzi ściernych wiórami materiału obrabianego oraz innymi produktami szlifowania, jest przyczyną licznych problemów, występujących we współczesnych procesach szlifowania prowadzonych z dużą wydajnością ubytkową. Jednym ze sposobów przeciwdziałania powstawaniu zalepień na CPS jest wprowadzenie oddziaływań chemicznych, mających na celu:

- obniżenie temperatury w strefie szlifowania;
- zmniejszenie tarcia pomiędzy materiałem ściernym i materiałem obrabianym;
- rozdzielenie powierzchni obrabianej od wiórów i powierzchni narzędzia na drodze jej utlenienia;
- trawienie powierzchni obrabianej w celu zmniejszenia oporów skrawania.

Realizacja powyższych celów, następuje m.in. przez:

- wprowadzenie do narzędzia ściernego różnego rodzaju wypełniaczy;
- impregnację narzędzia ściernego różnego rodzaju substancjami chemicznymi;
- stosowanie płynów obróbkowych o różnym stopniu aktywności chemicznej.

Jedną z podstawowych metod ingerencji w budowę narzędzi ściernych jest ich impregnowanie przez bezpośrednie wprowadzenie stopionego impregnatu w pory ściernicy. Zastosowanie impregnatu zmniejsza intensywność występowania zalepień CPS materiałem obrabianym, co korzystnie wpływa na wydłużenie okresu jej trwałości, oraz na jakość powierzchni obrobionej.

Sprawdzenie poprawności wprowadzenia substancji impregnujących na CPS oraz obróbki impregnowanymi narzędziami ściernymi wymaga użycia odpowiednich metod pomiarowych. Metodami takimi mogą być m.in. metody rozpraszania światła. W celu przeanalizowania możliwości zastosowania w ww. aplikacjach jednej z takich metod – metody różniczkowej, wykorzystującej pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, przeprowadzono badania eksperymentalne.

Badaniom poddano zestaw czterech ściernic, o oznaczeniu technicznym 1-35×10×10SG/F46G10VTO, zbudowanych z ziaren mikrokryształicznego korundu spiekanego SGTM i z ceramicznego spoiwa szklano

krystalicznego. Trzy ściernice poddano procesowi impregnacji, natomiast czwarta pozostała nieimpregnowana (referencyjna). Substancje impregnujące oraz rezultaty pomiaru masy ściernic przed i po procesie impregnacji w celu ustalenia procentowego przyrostu ich masy podano w tabeli 18.

Tab. 18. Przyrost masy ściernic po procesie impregnacji

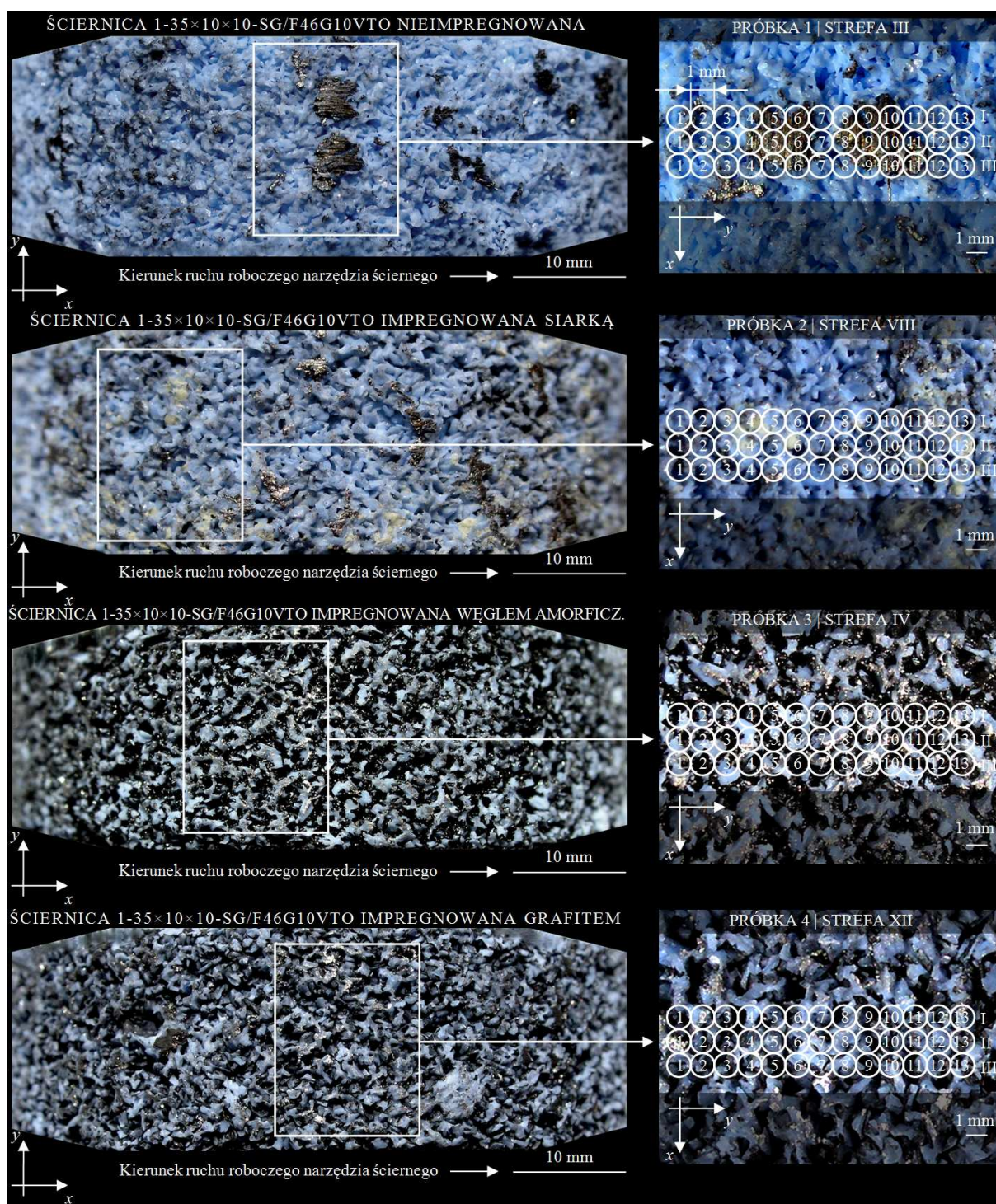
Lp.	Oznaczenie techniczne ściernicy i rodzaj impregnatu	Masa przed impregnacją, g	Masa po impregnacji, g	Przyrost masy, %
1.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: siarka	11,80	12,40	5,08
2.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: węgiel amorficzny	17,23	18,28	6,09
3.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: grafit	17,22	17,49	1,57

W celu sprawdzenia poprawności wprowadzenia substancji impregnujących w struktury, przeznaczonych do badań eksperymentalnych, narzędzi ściernych dokonano akwizycji obrazów mikroskopowych ich powierzchni. Akwizycja przeprowadzona została z wykorzystaniem elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-5500LV firmy JEOL. Wizualna analiza obrazów wykazała, iż wszystkie substancje impregnujące zostały prawidłowo wprowadzone w strukturę CPS.

Po procesie impregnacji ściernice wykorzystano do prowadzenia procesu obróbkowego. W tym przypadku było to szlifowanie prostoliniowo-zwrotne walcowych powierzchni wewnętrznych w postaci pierścieni o średnicy wewnętrznej $d_w = 56$ mm i szerokości $l = 20$ mm, wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®]. Rezultaty przeprowadzonego procesu szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych przedmiotów wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®] ściernicami 1-35×10×10SG/F46G10VTO impregnowanymi pierwiastkami niemetalicznymi przedstawiono na rysunku 21. Po lewej stronie zestawiono makrofotografie wybranych fragmentów CPS zarejestrowane cyfrowym aparatem fotograficznym Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Z obrazów wydzielono strefy o wymiarach 16,52×12,42 mm, które przedstawiono po prawej stronie rysunku 21. W strefach tych zaznaczono schematycznie rozmieszczenie punktów pomiarowych, w których dokonywano akwizycji obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego. Na każdej z analizowanych ściernic wyznaczono piętnaście stref, w każdej liczba punktów pomiarowych, rozmieszczonych w trzech rzędach (I-III), wynosiła trzydzieści dziewięć. Średnica punktu pomiarowego wynosiła 1 mm.

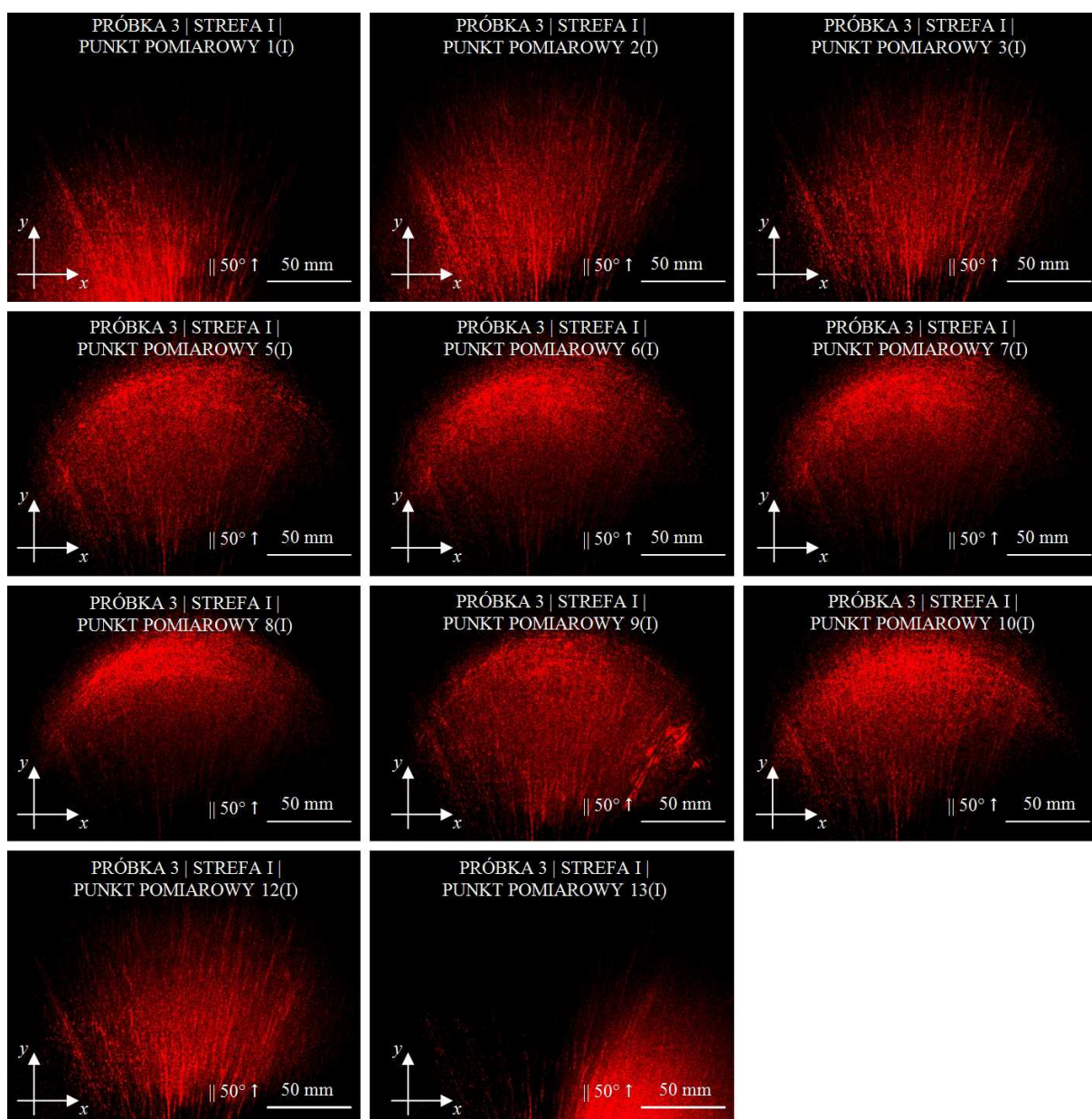
Akwizycja obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana był na stanowisku badawczym wyposażonym w laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 660 by Coherent, Inc., emitujący w sposób ciągły światła o długości fali $\lambda = 660$ nm (barwa czerwona), skierowaną na ocenianą powierzchnię pod kątem padania 50°. Odbita i rozproszona przez powierzchnię ściernicy wiązka tworzyła w płaszczyźnie obserwacji obraz światła rozproszonego. Jako płaszczyznę obserwacji zastosowano matowy ekran o wymiarach 300×300 mm z podziałką służącą do szacowania wymiarów geometrycznych powstającego obrazu. Na rysunku 22 przedstawiono sekwencję jedenastu obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego zarejestrowanych dla CPS 1-35×10×10SG/F46G10VTO, impregnowanej węglem amorficznym, podczas jednego przejścia wiązki światła laserowego przez Strefę I.

Uzyskane obrazy kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego analizowano za pomocą dwóch typów specjalistycznego oprogramowania komputerowego. ImageJ 1.47 wykorzystano do wstępnego przetworzenia obrazów (korekcji tonalnej, odpowiedniego pozycjonowania, zmiany wymiarów i rozdzielczości, kadrowania oraz binaryzacji), natomiast Image-Pro[®] Plus 5.1 do wyznaczania wartości wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych oraz przeprowadzania analizy statystycznej.



Rys. 21. Przykładowe makrofotografie CPS 1-35×10×10SG/F46G10VTO po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®] (od góry): nieimpregnowana, impregnowana siarką, węglem amorficznym i grafitem

W tabelach 19 i 20 zestawiono syntetyczne rezultaty analiz uzyskanych za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1. Wyniki w postaci zbioru wartości liczbowych zestawiono dla dwóch rozpatrywanych parametrów – pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego A_n i sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego I_Σ . Ze względu na stosunkowo dużą liczbę uzyskanych wyników, zostały one uśrednione zarówno na poziomie pojedynczego obszaru pomiarowego jak i wszystkich obszarów pomiarowych, wyznaczonych na całej czynnej powierzchni danej ściernicy.



Rys. 22. Obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 660$ nm, skierowanej równolegle pod kątem padania 50° do osi CPS 1-35 \times 10 \times 10SG/ F46G10VTO impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®]

W tabeli 19 przedstawiono rezultaty uzyskane dla uśrednionych wartości pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów światła rozproszonego An . Analiza tych wartości pozwala na stwierdzenie, iż najwyższe z nich rejestrowano dla ściernicy nieimpregnowanej ($An_{sr} = 1450220,5$ pikseli), natomiast ze ściernic impregnowanych najwyższą z nich uzyskano dla ściernicy impregnowanej siarką ($An_{sr} = 724264,86$ pikseli). Dla ściernic impregnowanych węglem amorficznym ($An_{sr} = 600256,76$ pikseli) i grafitem ($An_{sr} = 537512,7$ pikseli) rejestrowane wartości były odpowiednio o 18% i 26% mniejsze w stosunku do ściernicy nasiarczanej. Ogólnie można stwierdzić, iż impregnacja ściernic spowodowała średnio o ok. 60% uzyskanie mniejszych wartości An niż dla ściernicy nieimpregnowanej.

Podobnie kształtowały się wartości uzyskane dla drugiego z wykorzystywanych parametrów – sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, które zestawiono w tabeli 20. Najwyższą średnią wartość tego parametru uzyskano dla ściernicy

nieimpregnowanej ($I_{\Sigma sr} = 73964397,4$ j. u.). Pozostałe uzyskane wartości były mniejsze i wynosiły: ściernica po impregnacji siarką ($I_{\Sigma sr} = 34140620,27$ j. u.), węglem amorficznym ($I_{\Sigma sr} = 24276161,87$ j. u.) i grafitem ($I_{\Sigma sr} = 22014245,47$ j. u.). Procentowe zmniejszenie wartości $I_{\Sigma sr}$ dla ściernic impregnowanych w stosunku do ściernicy nieimpregnowanej (referencyjnej) wynosił średnio ponad 63%. Niezależnie od rozpatrywanego parametru, najmniejsze średnie tych wartości uzyskano dla ściernicy impregnowanej grafitem. Były one dla An_{sr} o 62,93%, a dla $I_{\Sigma sr}$ o 70,23% mniejsze niż dla nieimpregnowanej ściernicy referencyjnej. Oznacza to, iż dla analizowanego zestawu czterech ściernic 1-35×10×10SG/F46G10VTO najkorzystniejszą substancją impregnującą, z punktu widzenia prowadzonych badań doświadczalnych, okazał się grafit. Wprowadzenie w strukturę CPS tego niemetalicznego pierwiastka zapewniło zmniejszenie podatności narzędzia ściernego na występowanie wielu niekorzystnych zjawisk, w tym rozległych zalepień czynnych powierzchni materiałem obrabianym i innymi produktami procesu szlifowania, mających znaczący wpływ na przebieg i uzyskane efekty procesu obróbkowego.

Tab. 19. Wartości pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów światła rozproszonego wyznaczonych dla CPS 1-35×10×10SG/F46G10VTO po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2®

Lp.	Oznaczenie techniczne ściernicy i rodzaj impregnatu	$N_{sr}^{1)}$	An_{min} piksel	An_{max} piksel
1.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: nieimpregnowana	19576	1388176	1472990,5
2.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: siarka	14275	710128	752275,5
3.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: w. amorficzny	20460	585116	627087,5
4.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: grafit	17165	536328	538539,5

¹⁾ wartości wyznaczone dla średniej liczby rozpoznanych obiektów w analizowanych obrazach	An_{sr} piksel	σ
	1450220,5	23234,41
	724264,86	15722,10
	600256,76	34392,96
	537512,7	6012,07

Tab. 20. Wartości sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wyznaczonego dla CPS 1-35×10×10SG/F46G10VTO po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych wykonanych ze stopu Titanium Grade 2[®]

Lp.	Oznaczenie techniczne ściernicy i rodzaj impregnatu	$N_{sr}^{1)}$	$I_{\Sigma min}$, j. u.	$I_{\Sigma max}$, j. u.
1.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: nieimpregnowana	19576	70670600	75713252
2.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: siarka	14275	30001381	36872028
3.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: w. amorficzny	20460	21998367	26896248
4.	1-35×10×10SG/F46G10VTO Impregnat: grafit	17165	19367482	23789176

¹⁾ wartości wyznaczone dla średniej liczby rozpoznanych obiektów w analizowanych obrazach

$I_{\Sigma sr}$, j. u.	σ
73964397,4	4712082,72
34140620,27	2247432,94
24276161,87	1558849,97
22014245,47	1251458,99

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania stopów niklu i tytanu:

- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu CPS po procesach szlifowania, ze szczególnym uwzględnieniem nowoczesnych materiałów trudno skrawalnych, m.in. stopów na bazie niklu i tytanu;
- metodyka może być również wykorzystana do oceny poprawności wprowadzenia substancji impregnującej, w postaci m.in. siarki, węgla amorficznego, grafitu w strukturę CPS oraz oceny stanu impregnowanej CPS zalepionej materiałem obrabianym po procesach technologicznych;
- w badaniach eksperymentalnych wykorzystano szeroki zestaw modułów A1(AC)+A2(ME)+B1(AC)+B2+D1 (tab.3), co oznacza, iż w tej konfiguracji metodyka będzie mogła być głównie wykorzystywana w szerokim zakresie prac laboratoryjnych głównie o charakterze badawczym.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Wojtewicz M., Sienicki W. (2015). *Characterisation of Abrasive Tools Active Surface after the Impregnation Process by Modified ARS Method based on Imaging and Analysis of the Scattered Light*. Int. J. Machining and Machinability of Materials, **17**(5), 397–417.
2. Nadolny K., **Kapłonek W.**, Wojtewicz M., Sienicki W. (2013). *Effects of Sulfurization of Grinding Wheels on Internal Cylindrical Grinding of Titanium Grade 2[®]*. Indian J. Eng. Mater. S., **20**(2), 108–124.

3. Nadolny K., Rokosz, K. **Kapłonek W.**, Wienecke M., Heeg J. (2015). *Analiza SEM-EDS stanu czynnej powierzchni ściernicy impregnowanej węglem amorficznym po procesie szlifowania prostoliniowo-zwrotnego walcowych powierzchni wewnętrznych ze stopu Titanium Grade 2[®]*. Inżynieria Maszyn, **20**(1), 78–88.
4. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Sutowski P. (2016). *Zastosowanie technik mikroskopowych do weryfikacji poprawności wprowadzenia substancji impregnującej w strukturę ściernic z ziarnami SG[™] i SiCg*. Mechanik, **89**(8-9), 1070–1071. (CD-ROM).
5. Nadolny K., Sienicki W., Wojtewicz M., Rokosz K., **Kapłonek W.**, Wienecke M., Heeg J. (2016). *Analiza stanu czynnej powierzchni ściernic impregnowanych węglem amorficznym po procesie szlifowania stopu Titanium Grade 2[®] z użyciem mikroskopii elektronowej i spektroskopii rentgenowskiej (SEM-EDS)*. Mechanik, **89**(8-9), 1106–1107. (CD-ROM).
6. Nadolny K., Rokosz K., **Kapłonek W.**, Wienecke M., Heeg J. (2017). *SEM-EDS-based Analysis of the Amorphous Carbon-treated Grinding Wheel Active Surface after Reciprocal Internal Cylindrical Grinding of Titanium Grade 2[®] alloy*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., **90**(5), 2293–2308.

3.9. Metodyka oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania materiałów ceramicznych

Nowoczesny przemysł wytwórczy, a szczególnie takie jego branże jak maszynowa, medyczna, elektroniczna i optyczna, od wielu lat zainteresowany jest narzędziami z diamentowymi ziarnami ściernymi. Ze względu na swoje unikalne właściwości, takie jak, m.in. wysoka twardość, odporność na zużycie oraz wytrzymałość termiczna, jest on wykorzystywany do obróbki najbardziej wymagających materiałów, np. materiałów trudno skrawalnych. Obróbka ściernicami z ziarnami diamentowymi, podobnie jak innego typu narzędziami ściernymi, powoduje ryzyko powstawania zalepień ich powierzchni czynnych.

W celu przeanalizowania możliwości oceny stopnia zalepienia CPS z ziarnami diamentowymi, charakteryzującymi się małą wielkością ziaren i stosunkowo wysoką ich koncentracją z zastosowaniem metody różniczkowej, wykorzystującej pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wspomaganą technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego, przeprowadzono badania eksperymentalne. W badaniach wykorzystano dwie ściernice o oznaczeniu technicznym 1-35×5×20 D75SV4 i 1-35×5×20D126SV4, wyprodukowane w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w Krakowie. Były one stosowane do precyzyjnego szlifowania krawędzi bocznych kwadratowych płytek ceramicznych (szerokość krawędzi tnącej $l = 12,7$ mm, wysokość $h = 7,94$ mm) o oznaczeniu SNGN 120720 wyprodukowanych przez firmę Einess Canela (Hiszpania). Proces szlifowania realizowano na stanowisku badawczym wyposażonym w elektrowrzeciono typu EV-70/70-2WB firmy Fischer Spindle Group AG, (Szwajcaria) o mocy 5,2 kW i maksymalnej prędkości obrotowej 60 000 obr./min oraz siłownik piezoelektryczny do realizacji precyzyjnego dosuwu wglębnego. Umożliwił on osiągnięcie małych głębokości wnikania ziaren ściernych w materiał obrabiany.

Przed przystąpieniem do zasadniczej części badań z wykorzystaniem metody różniczkowej dokonano obrazowania fragmentów czynnych powierzchni obu ściernic za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego JSM-550LV firmy JEOL oraz rejestracji parametrów SGP profilometrem stykowym Hommel-Tester T8000 firmy Hommelwerke. Analiza uzyskanych danych obrazowych wykazała liczne złoże zużytego materiału poobróbkowego na obserwowanym fragmencie czynnej powierzchni obu ściernic, w postaci agregatów składających się z cienkich płytek i grudek krystalitów, w niektórych przypadkach o zdeformowanej powierzchni. Zastosowanie w procesie obróbkowym ściernic o drobnej (126) i średniej (75) wielkości ziaren diamentowych oraz precyzyjnego dosuwu wglębnego, pozwoliło na uzyskanie powierzchni charakteryzujących się niewielką wysokością nierówności powierzchni, co było

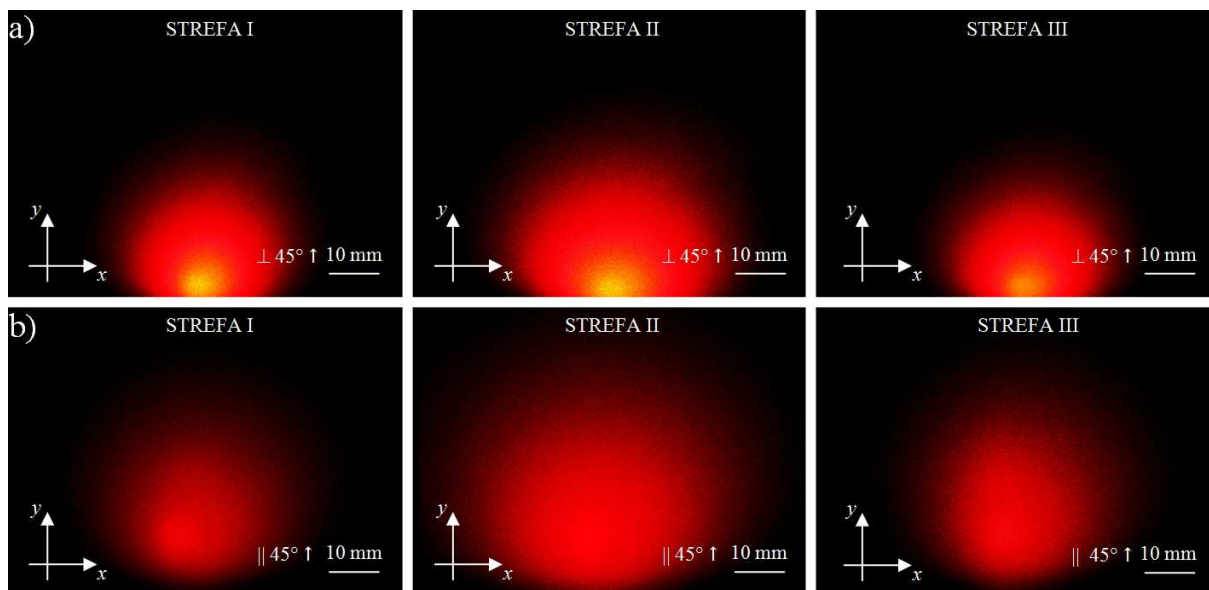
spowodowane intensywnym zalepianiem przestrzeni międzyziarnowych, które dla tego typu narzędzi posiadają stosunkowo małą objętość.

Do akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego wykorzystano stanowisko badawcze, w którego skład wchodził laser półprzewodnikowy CPS182 firmy Thorlabs, Inc. o mocy 4,5 mW, emitujący promieniowanie widzialne o długości fali $\lambda = 635$ nm (barwa czerwona). Wiązka światła laserowego skierowana była pod kątem padania 45° i oświetlała wybrany obszar powierzchni ściernicy. Odbita i rozproszona przez elementy powierzchni wiązka padała na płaszczyznę obserwacji, tworząc na niej obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Jako płaszczyznę obserwacji wykorzystano matowy ekran o wymiarach 300×300 mm z naniesioną podziałką, służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu.

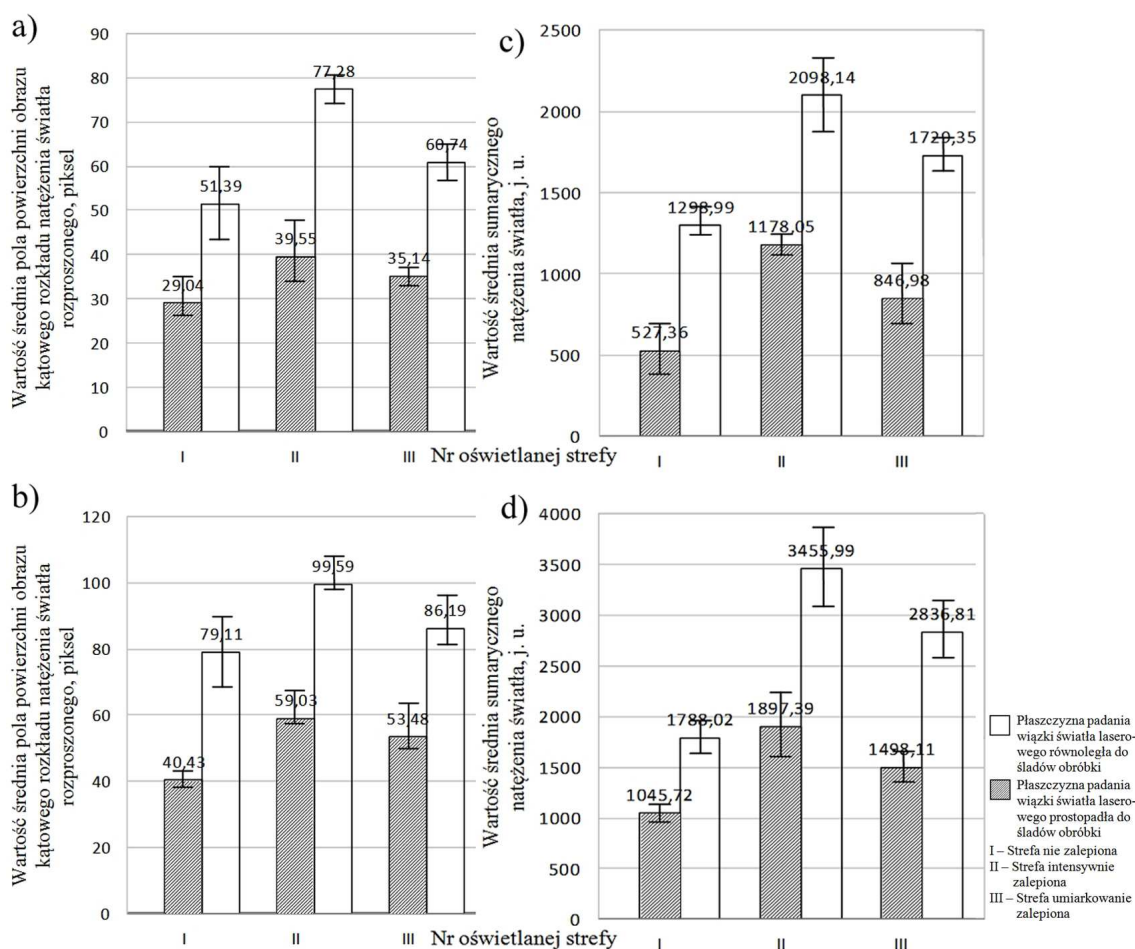
Akwizycja obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego dokonywana była dla trzech umownych stref obu ocenianych ściernic. Strefy te określały stopień ich zalepiania: I – nie zalepiona, II – intensywnie zalepiona, III – umiarkowanie zalepiona. Próbki ustawione obwodowo na stoliku obrotowym oświetlane były w sposób prostopadły i równoległy do ich osi. Każdorazowo dla wybranego fragmentu danej strefy, o wymiarach 10×10 mm, dokonywano rejestracji trzydziestu obrazów, stosując następujące parametry akwizycji: czas ekspozycji $t_{exp} = 1$ s, rozdzielczość obrazu 640×480 pikseli, format zapisu *.bmp. Obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, zarejestrowane dla trzech stref ściernicy z ziarnami diamentowymi 1-35 \times 5 \times 20D126 SV4 przedstawiono na rysunku 23.

Zarejestrowany zbiór obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego poddawano przetwarzaniu i analizie, korzystając z oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Po przeprowadzeniu przetwarzania wstępnego, obejmującego korekcję tonalną i odpowiednie wykadrowanie obrazu poddano binaryzacji. Proces ten realizowany był przez oprogramowanie w trybie automatycznym dla poziomu progów w zakresie od 41% do 44% (obrazy uzyskane podczas prostopadłego oświetlenia CPS) oraz poziomu progów od 27% do 42% (obrazy uzyskane podczas równoległego oświetlenia CPS). Następnie przystąpiono do analizy, polegającej na wyznaczeniu wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych. Stosowano, wykorzystywane już wcześniej, parametry: An – pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego, I_Σ – sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Wartości ww. parametrów dla analizowanych CPS z ziarnem diamentowym 1-35 \times 5 \times 20D126SV4 i 1-35 \times 5 \times 20D75 SV4 zestawiono w postaci wykresów słupkowych na rysunku 24.

Analiza średnich pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów światła rozproszonego (rys. 24a) dla ściernicy 1-35 \times 5 \times 20D126SV4 pozwoliła stwierdzić, iż wykazywały się one dla Strefy II (intensywnie zalepionej) najwyższymi wartościami, natomiast dla stref: I (nie zalepionej) i III (umiarkowanie zalepionej) wartościami niskimi i średnimi. Rejestrowane wartości uzależnione były od sposobu oświetlenia powierzchni. Wyższe wartości (bez względu na rodzaj analizowanej strefy) rejestrowano, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była równoległa do osi próbki ($An_{sr(\parallel)} = 63,13$ pikseli). Były one o ponad 45% większe od wartości uzyskanych, w przypadku, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była prostopadła do osi próbki ($An_{sr(\perp)} = 34,57$ pikseli). Podobną tendencję można było zaobserwować dla rezultatów otrzymanych dla ściernicy 1-35 \times 5 \times 20D75SV4. Charakteryzowała się ona średnią wielkością ziarna ściernego (75), co znacząco wpłynęło na wzrost wartości średnich pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów światła rozproszonego (rys. 24b). Wartości te były następujące: dla oświetlenia równoległego do osi próbki – $An_{sr(\parallel)} = 88,29$ pikseli, dla oświetlenia prostopadłego do osi próbki – $An_{sr(\perp)} = 50,98$ pikseli. W tym przypadku również sposób oświetlenia powierzchni próbki, gdy płaszczyzna padania wiązki światła laserowego była do niej równoległa, okazał się bardziej korzystny. W porównaniu do rezultatów uzyskanych dla ściernicy 1-35 \times 5 \times 20 D126SV4, wartości dla ściernicy 1-35 \times 5 \times 20D75SV4 były o ponad 30% wyższe. Analiza sumarycznego natężenia



Rys. 23. Obrazy kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 635$ nm, skierowanej: a) prostopadle; b) równolegle pod kątem padania 45° do osi CPS z ziarnami diamentowymi 1-35 \times 5 \times 20D126SV4



Rys. 24. Wartości średnie pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego uzyskane dla wybranej strefy (I – III) ocenianej ściernicy: a) 1-35 \times 5 \times 20D126 SV4; b) 1-35 \times 5 \times 20D75 SV4 (po lewej) oraz wartości średnie sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego uzyskane dla wybranej strefy (I – III) ocenianej ściernicy: c) 1-35 \times 5 \times 20D126SV4; d) 1-35 \times 5 \times 20D75SV4 (po prawej)

światła (jasnych obszarów) obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego (rys. 24c-d), pozwala na stwierdzenie, iż wartości tego parametru charakteryzowały się podobną tendencją, jak w przypadku wartości średnich pól powierzchni (jasnych obszarów) obrazów światła rozproszonego. Oświetlenie powierzchni w sposób równoległy do osi próbki okazało się bardziej korzystne. Wartość średnia natężenia światła ściernicy 1-35×5×20D126SV4 rejestrowana dla tego sposobu oświetlenia wynosiła $I_{\Sigma sr(\parallel)} = 1708,82$ j. u. (rys. 24c), natomiast dla oświetlenia prostopadłego do osi próbki wynosiła $I_{\Sigma sr(\perp)} = 850,79$ j. u. (rys. 24d). Dla ściernicy 1-35×5×20D75SV4 wartości te były wyższe o ok. 40%.

Uzyskane wartości obu parametrów, skorelowane z wizualną analizą obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego, pozwalają na stwierdzenie, iż istnieje wyraźna różnica pomiędzy trzema analizowanymi strefami obu CPC. Zalepienie powierzchni czynnej w obszarze Strefy II intensywnie zalepionej materiałem obrabianym, charakteryzuje się znacznie większym rozproszeniem światła w stosunku do obszaru Strefy III o umiarkowanym zalepieniu. Obszar Strefy I, niebiorący udziału w obróbce, charakteryzuje się wyraźnie mniejszym rozproszeniem światła.

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni ściernic po procesach szlifowania materiałów ceramicznych:

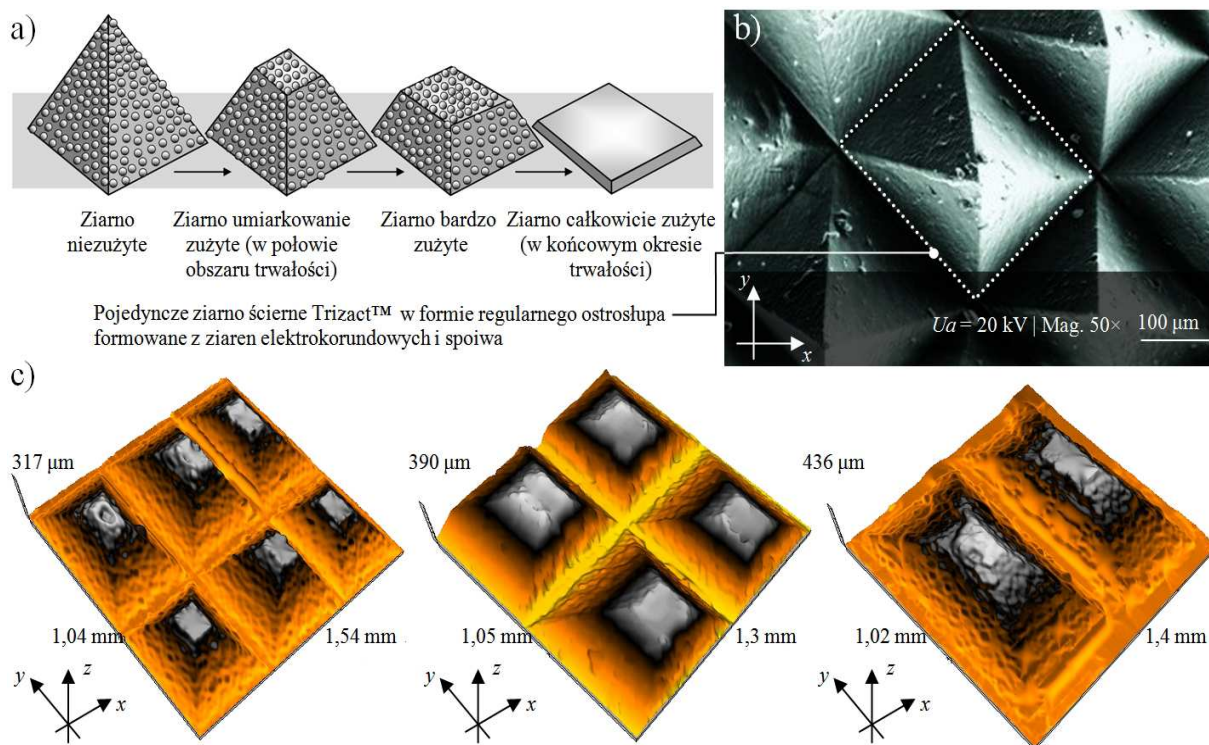
- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu CPS z ziarnami diamentowymi z zalepieniami materiałem obrabianym po procesie szlifowania z dużymi prędkościami obrotowymi;
- metoda różniczkowa charakteryzowała się wysoką czułością (w szerokim zakresie wysokości nierówności), która pozwalała wykrywać i analizować strukturę CPS w stanie wolnym od zalepień, umiarkowanie zalepioną oraz z intensywnie występującymi zalepieniami materiałem obrabianym;
- program badań eksperymentalnych zakładał wykorzystanie stosunkowo szerokiego zestawu modułów A2(ME)+B1(K)+B2+C1(PS)+C2+D1 (tab. 3), co ukierunkowywało metodykę głównie na prace laboratoryjnych o charakterze badawczym, lecz nie wykluczało typowych aplikacji pomiarowych, po wyłączeniu z niej submodułów A2, C1 i C2 (tab.3);
- do akwizycji obrazów kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego kamerę z matrycowym detektorem CCD. Było to alternatywne rozwiązanie w stosunku do aparatu cyfrowego. Pozwalało ono również na rejestrację sekwencji video. Analizowanie sekwencji kolejnych obrazów i ich uśrednianie, np. za pomocą procedur nakładania obrazów, może stanowić dodatkową zaletę metod optycznych stosowanych w szerokim zakresie kontroli aktywnej w warunkach przemysłowych;
- podobnie jak w przypadku wcześniej omówionych aplikacji, również w niniejszej korzystano z metod referencyjnych – profilometrii stykowej i elektronicznej mikroskopii skaningowej;
- w przypadku parametrycznej analizy ilościowej korzystano z dwóch parametrów kluczowych: pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego A_n i sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kąowego rozkładu natężenia światła rozproszonego I_{Σ} ;
- zastosowanie ww. parametrów pozwoliło na prawidłowe rozpoznanie poszczególnych stref CPS pod względem stopnia ich zalepienia materiałem obrabianym. Strefy te określono następująco: Strefa I – nie zalepiona, Strefa II – intensywnie zalepiona, Strefa III – umiarkowanie zalepiona.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Musiał W. (2010). *Detekcja i analiza zalepień powierzchni czynnej ściernic diamentowych z wykorzystaniem skaterometrii laserowej oraz komputerowej analizy obrazu* [w] Podstawy i technika obróbki ściernic (Gołąbczak A., Kruszyński B., Red.). Monografia WM PŁ, 205–216.

3.10. Metodyka oceny stanu powierzchni nowoczesnych ściernych materiał nasypowych

W wielu aplikacjach korzystne jest zastosowanie elementów o powierzchniach, co do których stawia się wyższe wymagania odnośnie określonych cech eksploatacyjnych lub użytkowych. Uzyskanie takich cech wiąże się z zastosowaniem w obróbce wykończeniowej innego rodzaju narzędzi ściernych niż wykorzystywane powszechnie ściernice. W tym przypadku stosowane są m.in. elastyczne narzędzia w formie dysków ściernych z nasypem z ziarnami ściernymi typu Trizact™. Są specyficzne ziarna ściernie produkowane przez firmę 3M z użyciem procesu tzw. mikroreplikacji, polegającej na formowaniu regularnych ostrosłupów ze zbioru elementarnych ziaren elektrokorundu i spoiwa. W rezultacie powstają aglomeraty ściernie, z których tworzone są jednorodne powierzchnie czynne narzędzi nasypowych o precyzyjnie określonej stereometrii. Sterowanie wielkością pojedynczych aglomeratów ściernych umożliwia tworzenie narzędzi o określonych właściwościach eksploatacyjnych i użytkowych. Technologia wytwarzania ziaren Trizact™ sprawia, iż charakteryzują się one specyficznym sposobem zużywania się w trakcie pracy. Sposób ten polega na odkrywaniu kolejnych warstw ziaren elementarnych aglomeratu, po wykruszaniu ich z warstwy poprzedzającej, co schematycznie przedstawiono na rysunku 25a.



Rys. 25. Ogólna charakterystyka ziaren ściernych typu Trizact™ firmy 3M: a) schemat ideowy przedstawiający kolejne fazy zużywania się ziarna typu Trizact™; b) obraz mikroskopowy SEM czynnej powierzchni narzędzia ściernego wykonanego z ziaren typu Trizact™ z wydzielonym pojedynczym ziarnem w formie regularnego ostrosłupa; c) topografie powierzchni dysku ściernego o ziarnistości (od lewej): A160 (P120), A65 (P280) i A16 (P1200)

Specyficzna forma zużywania się ziaren Trizact™ zapewnia ciągle odnawianie właściwości skrawnych narzędzi ściernych, przy jednoczesnym zachowaniu pełnej powtarzalności SGP obrabianej w okresie ich trwałości. Jednowarstwowe dyski ściernie z ziarnami Trizact™, znalazły zastosowanie w obróbce wykończeniowej materiałów trudno skrawalnych, takich jak: stale nierdzewne, stopy niklu i kobaltu. Stosowane są również do obróbki metali kolorowych, takich jak: miedź, brąz i aluminium, oraz materiałów kompozytowych i twardych minerałów syntetycznych.

W celu przeanalizowania charakteru rozkładu światła rozproszonego dla narzędzi ściernych o elementach powierzchni w postaci regularnych ostrosłupów przeprowadzono badania eksperymentalne. Ich dodatkowym celem było również określenie możliwości zastosowania metody różniczkowej wspomaganej technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego do oceny tego typu powierzchni, a także przydatności metodyki badawczej, wykorzystywanej z powodzeniem we wcześniejszych pracach.

Do badań eksperymentalnych wytypowano zestaw siedem dysków ściernych o średnicy zewnętrznej $d_z = 75$ mm, z ziarnami ściernymi typu Trizact™. Ich ogólną charakterystykę podano w tabeli 21.

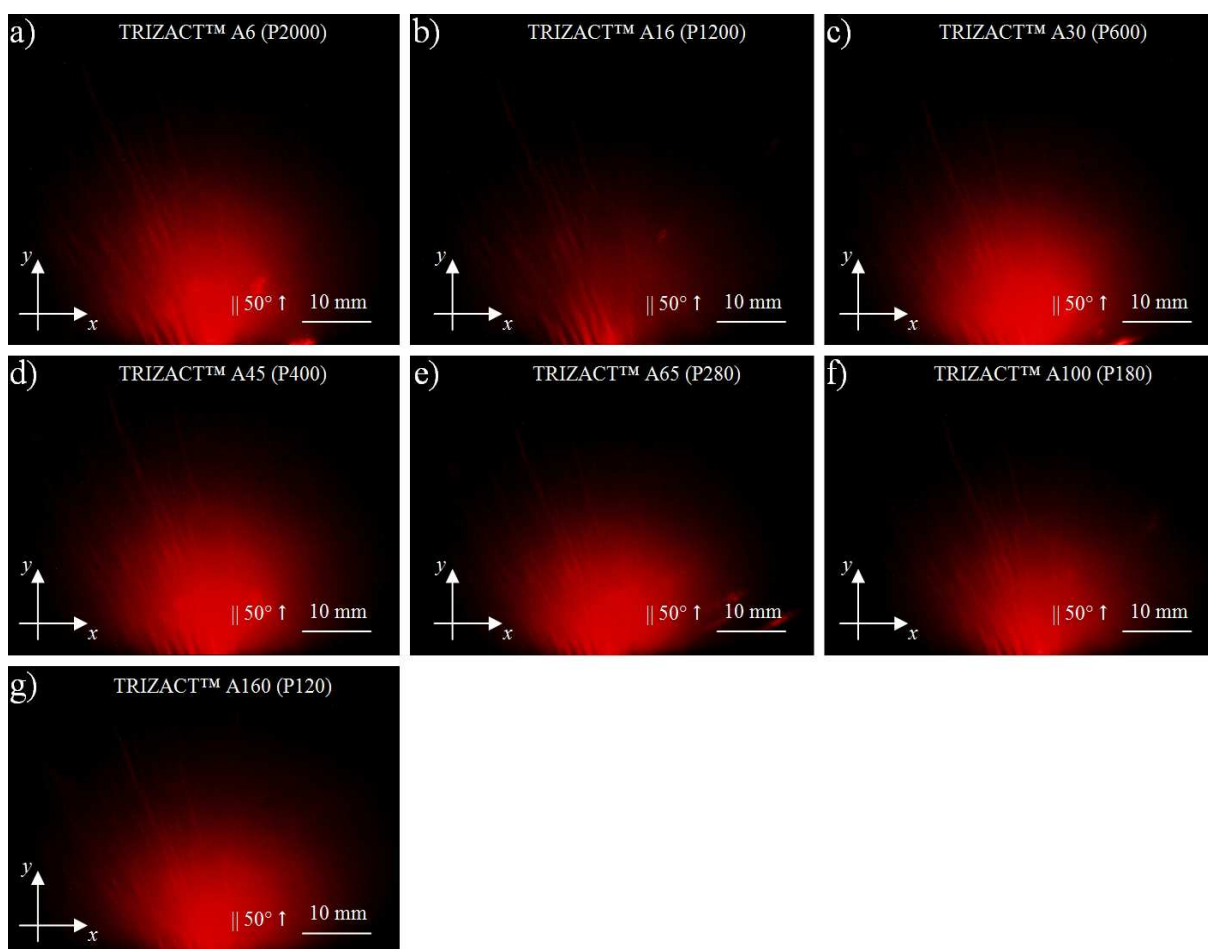
Tab. 21. Ogólna charakterystyka ziaren ściernych typu Trizact™ firmy 3M wykorzystywanych w badaniach eksperymentalnych

Nr próbki	Wielkość ziarna		Oznaczenie	Narzędzie ścierne	Podkład	Praca	Siła docisku
	3M ¹⁾	FEPA ²⁾					
1.	A6	P2000					
2.	A16	P1200					
3.	A30	P600					
4.	A45	P400	237AA	Dysk ścierny	Średnio elastyczny	Na sucho	Średnia i mała
5.	A65	P280					
6.	A100	P180					
7.	A160	P120					

¹⁾ ze względu na specyfikę narzędzi Trizact™ producent opracował oryginalną ich klasyfikację, w której ziarnistość A określona jest przez średnią wielkość ziaren podaną w μm , ²⁾ wielkość ziarna określona przez Federację Europejskich Producentów Materiałów Ściernych – FEPA (ang. *Federation of European Producers of Abrasives*)

Akwizycja obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego prowadzona była na stanowisku pomiarowym w skład którego wchodził laser półprzewodnikowy Lasiris™ SNF 660 firmy Coherent o mocy 1 mW, zamocowany w uchwycie. Laser emitował w sposób ciągły wiązkę światła o długości fali $\lambda = 660$ nm (barwa czerwona). Wiązka rzutowana była na powierzchnię ocenianej próbki pod kątem padania 50° . Odbita i rozproszona przez elementy powierzchni wiązka padała na płaszczyznę obserwacji, tworząc tam obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Jako płaszczyznę obserwacji wykorzystano matowy ekran o wymiarach 300×300 mm z naniesioną podziałką, służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu. Dla każdej z próbek rejestrowano obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego z dziesięciu wybranych obszarów znajdujących się w ich centralnej części. Do akwizycji wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Camedia C-5060WZ firmy Olympus zamocowany na antywibracyjnej platformie, sterowany przewodowym pilotem RM-UC1. Rejestrowane obrazy posiadały następujące parametry: czas ekspozycji $t_{exp} = 1$ s, rozdzielczość obrazu 2592×1944 pikseli, czułość ISO 250, format zapisu *.jpg. Uzyskane rezultaty akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przedstawiono na rysunku 26.

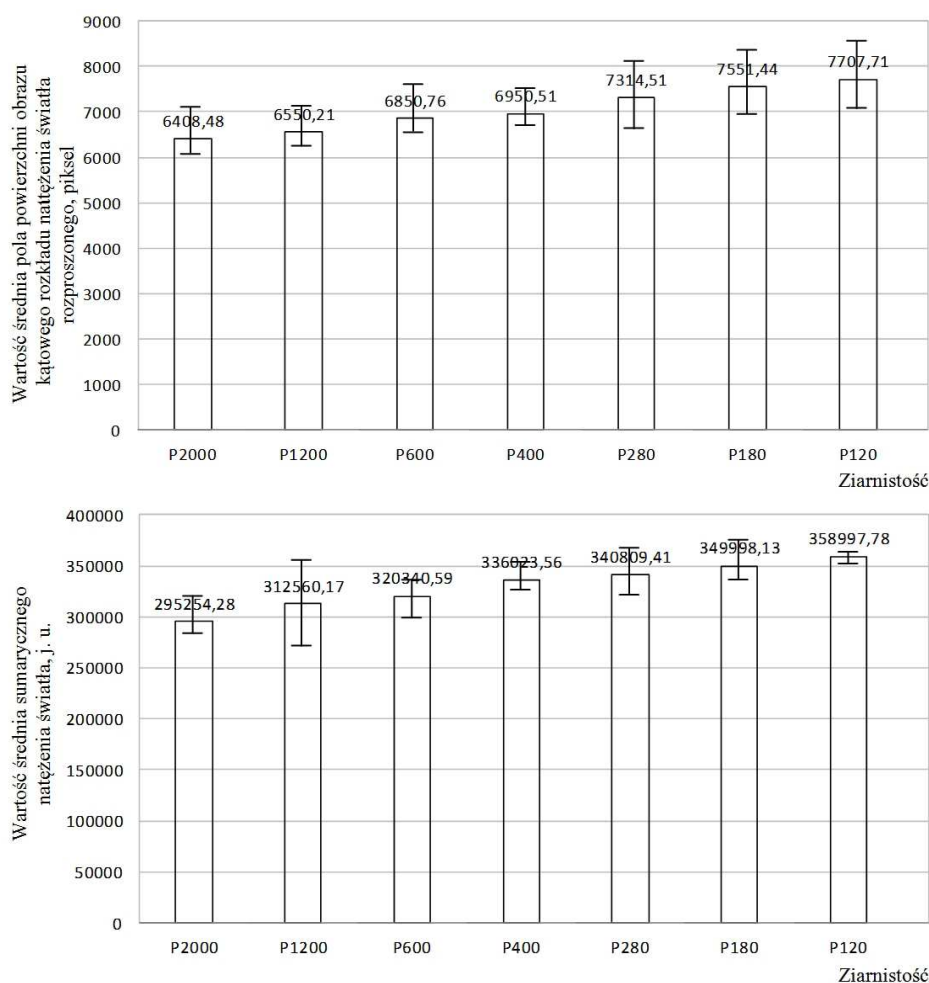
Do przetwarzania i analizy obrazów zastosowano oprogramowanie Image-Pro® Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Po przetworzeniu wstępnym obejmującym korekcję tonalną, odpowiednie wykadrowanie obrazu i jego binaryzację (poziomy progów w zakresie od 14% do 27%), przystąpiono do analizy, polegającej na wyznaczeniu wartości wybranych parametrów geo- i fotometrycznych. W tym przypadku



Rys. 26. Obrazy kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego uzyskane w wyniku odbicia wiązki światła laserowego o długości fali $\lambda = 660$ nm, skierowanej równolegle do osi próbki pod kątem padania 50° , od czynnych powierzchni dysków ściernych z ziarnami typu Trizact[™] o ziarnistości: a) A6 (P2000); b) A16 (P1200); c) A30 (P600); d) A45 (P400); e) A65 (P280); f) A100 (P180); g) A160 (P120)

były to: An – pole powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego i I_Σ – sumaryczne natężenie światła (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Wartości ww. parametrów dla powierzchni dysków ściernych z ziarnami typu Trizact[™] zestawiono w postaci wykresów słupkowych na rysunku 27. Wartości pola powierzchni An , zawierały się w zakresie od 6408,48 pikseli do 7707,71 pikseli, natomiast wartość $An_{sr} = 7047,66$ pikseli. Analizując uzyskane wartości można zauważyć tendencję wzrostową. Wraz ze zwiększeniem wielkości ziarna intensyfikują się zjawiska rozproszeniowe, co przekłada się na zwiększenie wartości pola powierzchni An . Podobną tendencję można zaobserwować w przypadku drugiego z analizowanych parametrów – sumarycznego natężania światła. Zakres pomiaru wartości dla tego parametru fotometrycznego wynosił od 295254,28 do 358997,78, przy $I_{\Sigma sr} = 330569,19$ j. u.

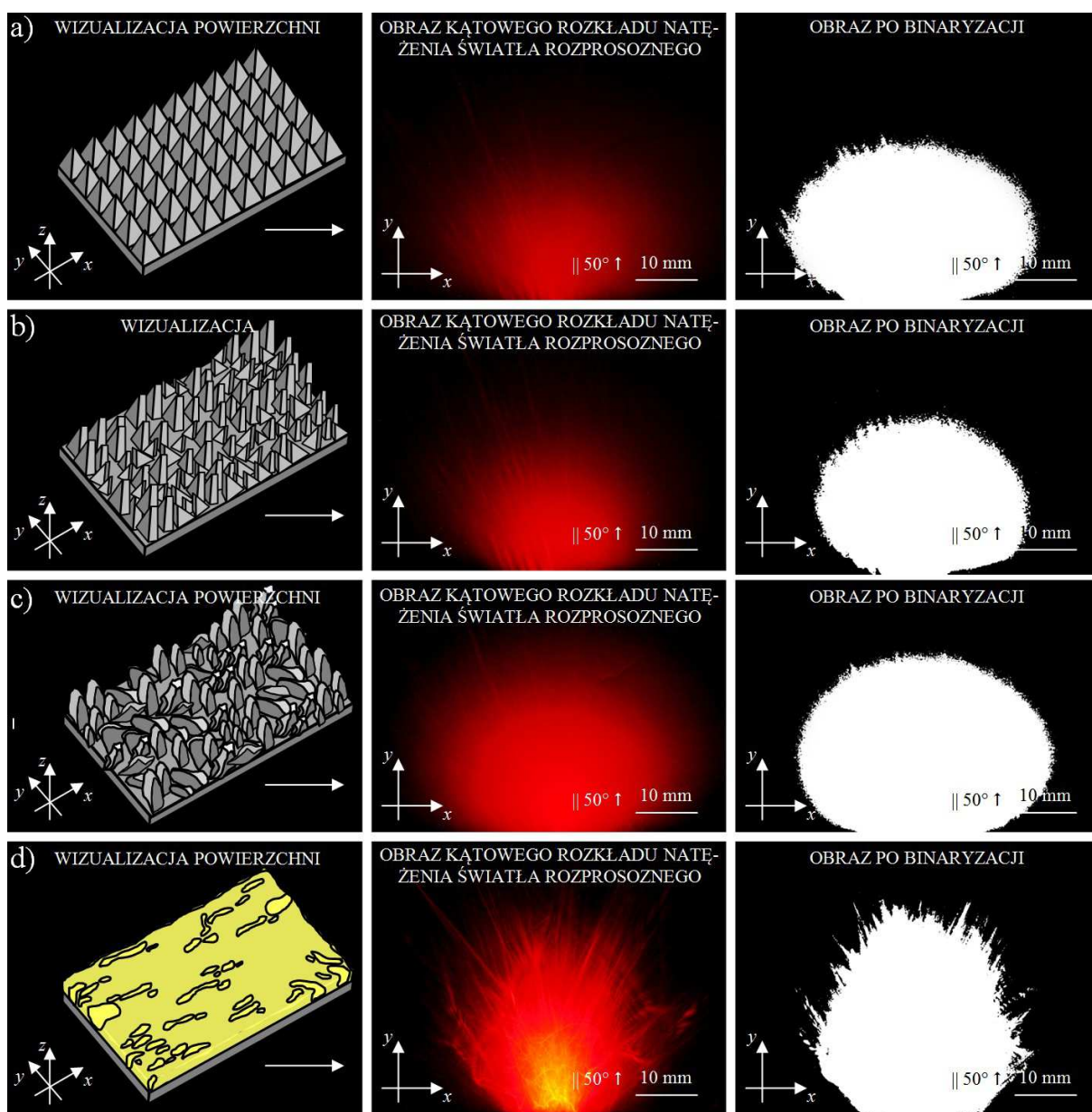
Obserwacje przeprowadzone w czasie akwizycji obrazów światła rozproszonego skłaniają do stwierdzenia, iż czynne powierzchnie jednowarstwowych ściernych materiałów nasypowych z ziarnami typu Trizact[™] są, w odniesieniu do analizy zjawiska rozpraszania światła, stosunkowo trudne w ocenie. Wynika to m.in. z występowania na ich powierzchni charakterystycznych elementów w postaci regularnych ostrosłupów. Tworzą one strukturę dość niekorzystną, z punktu widzenia przebiegu zjawiska. Fala światła laserowego odbija się i rozprasza zarówno na wierzchołkach ostrosłupów, których kąty zmieniają się losowo w przedziale od 60° do 90° , jak również na ich ścianach bocznych.



Rys. 27. Wartości średnie pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego (górze) oraz sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego (dół) uzyskane dla czynnych powierzchni dysków ściernych z ziarnami typu Trizact™ o różnych wielkościach ziarna

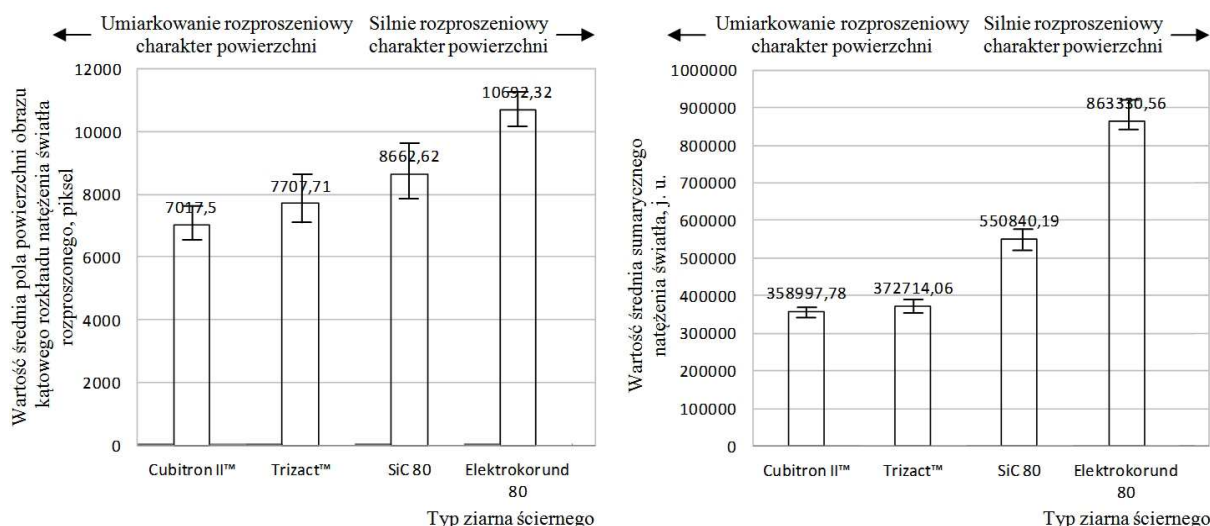
Przedstawione powyżej prace badawcze poszerzono o analizę zjawiska rozpraszania światła na innych typach narzędzi ściernych o zbliżonych właściwościach powierzchni czynnych. Narzędzia dobrano tak, aby ich wielkość ziaren była porównywalna z wielkością ziarna ściernego typu Trizact™ o wielkości ziarna A160 (P120). Wykorzystano próbki referencyjne w postaci arkuszy ściernych o wymiarach 50×20 mm z ziarnami ściernymi: Cubitron™ II o wielkości ziaren 80+, węgla krzemu SiC o wielkości ziaren 80 i elektrokorundu szlachetnego z warstwą złotą, napyłoną metodą fizycznego osadzania z fazy gazowej PVD (ang. *Physical Vapour Deposition*) o wielkości ziaren 80. W przypadku ostatniej z wymienionych próbek napylenie warstwy metalu szlachetnego (nieoksydującego) na ziarna ściernie elektrokorundu pozwalało na znaczne polepszenie właściwości odbiciowych fali światła laserowego, ważnych z punktu widzenia zastosowanej metody optycznej oraz techniki przetwarzania i analizy obrazu światła rozproszonego. Uzyskane rezultaty akwizycji obrazów kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przedstawiono na rysunku 28.

W celu stwierdzenia, na jakim poziomie kształtują się wartości pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego An dysków ściernych z ziarnami typu Trizact™, względem powierzchni innych narzędzi ściernych, dokonano ich porównania. Uzyskane rezultaty, przedstawiono na rysunku 29. Ich analiza skłania do stwierdzenia, iż arkusz ścierny z ziarnami Cubitron™ II ($An = 7017,5$ pikseli) oraz dysk ścierny z ziarnami typu Trizact™ ($An = 7707,71$ pikseli) cechują się umiarkowanym rozproszeniowym charakterem powierzchni. Charakter silnie rozproszeniowy posiada natomiast arkusz ścierny z ziarnami węgla krzemu SiC ($An = 8666,62$ pikseli) oraz arkusz



Rys. 28. Porównanie charakterystyk rozproszenia światła dla czynnych powierzchni różnych materiałów ściernych (wizualizacje powierzchni, obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego, obraz po binaryzacji): a) dysku ściernego z ziarnami typu Trizact™ A160 (P120); b) arkusza ściernego z ziarnami typu Cubitron™ II 80+; c) arkusza ściernego z ziarnami z węgla krzemowego SiC 80; d) arkusza ściernego z ziarnami z elektrokorundu szlachetnego 80 z napyłoną warstwą złota

ścierny z ziarnami elektrokorundu szlachetnego z napyłoną warstwą złota ($An = 10692,32$ pikseli). Można zatem ogólnie stwierdzić, iż materiały ściernie wytwarzane z wykorzystaniem technologii mikro-replikacji posiadają nieco gorsze charakterystyki rozproszeniowe niż tradycyjne materiały ściernie. Napylenie cienkich warstw powoduje zintensyfikowanie zjawiska rozpraszania światła, co w wielu aplikacjach jest korzystne. W rozpatrywanym przypadku zastosowanie warstwy złota napyłonej metodą PVD na ziarna elektrokorundu szlachetnego spowodowało zwiększenie pola powierzchni (obrazu światła rozproszonego) o 19% w stosunku do powierzchni bez napyłonej warstwy o takiej samej wielkości ziarna.



Rys. 29. Wartości średnie pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego (po lewej) oraz sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego (po prawej) uzyskane dla czynnych powierzchni dysków ściernych z ziarnami typu Trizact™ i próbek referencyjnych

Najważniejsze wnioski

Najważniejsze wnioski dotyczące metodyki oceny stanu powierzchni nowoczesnych ściernych materiałów nasypowych:

- opracowana metodyka może być wykorzystywana do oceny stanu powierzchni narzędzi ściernych, wykorzystujących typowe ziarna ściernic, jak również nowoczesne ich odmiany, jak np. ziarna typu Trizact™, będące aglomeratem ściernym wytwarzanym w procesie mikroreplikacji w postaci regularnych ostrosłupów;
- metodyka może być zastosowana do szerokiej grupy narzędzi ściernych w postaci różnego rodzaju ściernic, osełek ściernych, foliowych taśm ściernych oraz elastycznych taśm i dysków ściernych;
- w ocenie powierzchni dysków ściernych z ziarnami typu Trizact™ wykorzystano zestaw modułów B1(AC)+B2+C1(MRO)+C2+D1 (tab.3). Moduły były tak dobrane, aby ukierunkować metodykę głównie na prace laboratoryjne o charakterze badawczym. Ocena tego typu narzędzi nie jest przeprowadzana w warunkach przemysłowych – zużyty dysk traci swoje właściwości skrawne i wymieniany jest na nowy;
- struktura ziaren typu Trizact™, podobnie jak innych ziaren ściernych, jest stosunkowo trudna w ocenie metodami wykorzystującymi rozpraszanie światła. Zachodzi tam szereg zjawisk rozproszonych o umiarkowanym lub niekorzystnym wpływie na przebieg procesu pomiarowego;
- podobnie jak w innych aplikacjach, metoda różniczkowa wspierana była technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego. W niniejszej, przeprowadzono parametryczną analizę ilościową i wyznaczono wartości pola powierzchni (jasnych obszarów) obrazu światła rozproszonego A_n i sumarycznego natężenia światła (jasnych obszarów) obrazu kątownego rozkładu natężenia światła rozproszonego I_S ;
- ciekawym aspektem oceny czynnych powierzchni materiałów ściernych metodami rozpraszania światła wspieranymi technikami przetwarzania i analizy obrazu cyfrowego jest ich zestawienie, obejmujące różne formy rozkładu natężenia światła rozproszonego, rejestrowanego dla takich ziaren ściernych jak: Trizact™, Cubitron™ II, węgiel krzemu i elektrokorund szlachetny z warstwą złota, napyłoną metodą PVD.

Publikacje

1. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Baran J. (2015). *Analiza rozpraszania światła na powierzchniach jednowarstwowych ściernych materiałów nasypowych z ziarnami ściernymi typu Trizact™*. *Mechanik*, **88**(8-9), 185–189. (CD-ROM).
2. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Baran J., Królczyk G.M. (2016). *Stereometryczna charakterystyka stanu czynnej powierzchni tarcz ściernych z ziarnami Trizact™ po procesie szlifowania stali NC6 z wykorzystaniem mikroskopii różnicowania ogniskowego*. *Mechanik*, **89**(8-9), 1102–1103. (CD-ROM).
3. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Królczyk G. M. (2016). *The Use of Focus-Variation Microscopy for the Assessment of Active Surfaces of a New Generation of Coated Abrasive Tools*. *Meas. Sci. Rev.*, **16**(2), 42–53.
4. **Kapłonek W.**, Nadolny K., Królczyk G. M. (2016). *Zastosowanie mikroskopii różnicowania ogniskowego w ocenie czynnych powierzchni taśm ściernych z ziarnami Cubitron™ II* [w] *Development Technology Manufacturing Engineering* (Zaborowski T., Red.), Monografia IBiEN, 94–107.

4. Charakterystyka dorobku naukowego w odniesieniu do osiągnięć naukowo-badawczych, dydaktycznych i organizacyjnych

4.1. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć naukowo-badawczych

Wykaz osiągnięć	Przed doktorem	Po doktoracie	Łącznie
Publikacji ogółem	28	92	120
Liczba publikacji w j. polskim	26	45	71
Liczba publikacji w j. angielskim ¹⁾	2	45	47
Liczba publikacji w j. portugalskim ²⁾	–	2	2
Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> [®] indeksowanych przez <i>Web of Science</i> [™] Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone)	1 <i>IF</i> = 0,196	21 <i>IF</i> = 15,861	22 <i>IF</i> = 16,057
Cytowania Indeks Hirscha według <i>Web of Science</i> [™] Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone)		86 <i>h</i> = 7 (z dnia 07.11.2017)	
Cytowania Indeks Hirscha według <i>Scopus</i> [®] Elsevier B.V. (Holandia)		108 <i>h</i> = 7 (z dnia 07.11.2017)	
Cytowania Indeks Hirscha według <i>Google Scholar</i> [®] Google Inc. (Stany Zjednoczone)		296 <i>h</i> = 11 (z dnia 07.11.2017)	
Cytowania niezależne w czasopismach wydawnictwach monograficznych materiałach konferencyjnych w języku innym niż j. polski ³⁾	–	1 9 6	1 9 6
Cytowania niezależne w pracach kwalifikacyjnych inżynierskich magisterskich doktorskich w języku innym niż j. polski ⁴⁾	–	1 1 5	1 1 5
Recenzje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> [®] indeksowanych przez <i>Web of Science</i> [™] Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone)	–	5	5
Recenzje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych	–	8	8
Recenzje w materiałach konferencyjnych konferencji międzynarodowych	–	3	3
Recenzje w materiałach konferencyjnych konferencji krajowych	–	3	4

Autorstwo monografii	–	1	1
Udział w konferencjach międzynarodowych wygłoszone referaty	2 1	6 5	8 6
Udział w konferencjach krajowych wygłoszone referaty	13 9	14 15	27 24
Członkostwo w komitetach naukowych konferencji międzynarodowych	–	2	2
Międzynarodowe projekty badawcze	–	1	1
Projekty badawcze MNiSW	–	3	3
Zagraniczne staże naukowe	1	2	3
Zagraniczne staże dydaktyczne	–	10	10
Zagraniczne wyjazdy dydaktyczne	–	2	2
Nagrody organizacji technicznych	–	1	1
Nagrody konferencji naukowych	–	2	2
Nagrody Rektora PKosz.	–	2	2

¹⁾ Publikacje wydane w Arabii Saudyjskiej, Brazylii, Chinach, Chorwacji, Czechach, Egipcie, Indiach, Kanadzie, Korei Południowej, Malezji, Niemczech, Nigerii, Rumunii, Serbii, Słowacji, Stanach Zjednoczonych, Szwajcarii, Wenezueli, Wielkiej Brytanii, ²⁾ publikacje wydane w Brazylii, ³⁾ cytowania w j. angielskim (Stany Zjednoczone), j. białoruskim (Białoruś), j. portugalskim (Brazylia) i j. rosyjskim (Rosja), ⁴⁾ cytowania w j. angielskim (Kanada, Stany Zjednoczone, Wielka Brytania), j. chińskim (Tajwan), j. czeskim (Czechy), j. fińskim (Finlandia), j. flamandzkim (Belgia), j. hiszpańskim (Hiszpania), j. portugalskim (Brazylia), j. rosyjskim (Rosja) i j. ukraińskim (Ukraina), PKosz. – Politechnika Koszalińska

Liczba publikacji z podziałem na miejsce publikacji

Miejsce publikacji ¹⁾	Liczba publikacji
Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> [®] indeksowanych przez <i>Web of Science</i> [™] Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone) (w j. angielskim)	19 Sumaryczny IF = 15,423
Publikacje w naukowych i naukowo-technicznych czasopismach wyróżnionych w <i>Journal Citation Reports</i> [®] indeksowanych przez <i>Web of Science</i> [™] Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone) (w j. polskim)	3 Sumaryczny IF = 0,634
Publikacje w międzynarodowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych (w j. angielskim)	12

Publikacje w międzynarodowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych (w j. portugalskim)	2
Publikacje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych (w j. angielskim)	7
Publikacje w krajowych czasopismach naukowych i naukowo-technicznych (w j. polskim)	35
Publikacje w międzynarodowych wydawnictwach monograficznych indeksowanych przez <i>Web of Science</i> ™ Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone) (w j. angielskim)	1
Publikacje w międzynarodowych wydawnictwach monograficznych (w j. angielskim)	1
Publikacje w krajowych wydawnictwach monograficznych (w j. angielskim)	1
Publikacje w krajowych wydawnictwach monograficznych (w j. polskim)	13
Publikacje w materiałach konferencyjnych konferencji międzynarodowych indeksowanych przez <i>Web of Science</i> ™ Clarivate Analytics (Stany Zjednoczone) (w j. angielskim)	1
Publikacje w materiałach konferencyjnych konferencji międzynarodowych (w j. angielskim)	5
Publikacje w materiałach konferencyjnych konferencji krajowych (w j. polskim)	19

¹⁾ Publikacje w czasopismach naukowych i naukowo-technicznych – 78 (65%), publikacje w wydawnictwach monograficznych – 17 (14,16%), publikacje w materiałach konferencyjnych – 25 (20,83%)

4.2. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć dydaktycznych

Prowadzone kursy i formy dydaktyczne

Obszar	Liczba kursów	Forma zajęć
Metrologia	10	Wykład Laboratorium Ćwiczenia
Inżynieria jakości	2	Wykład Laboratorium
Inżynieria produkcji	1	Ćwiczenia
Fizyka	1	Laboratorium
Kursy i formy dydaktyczne prowadzone na studiach		Stacjonarnych Niestacjonarnych
Kursy i formy dydaktyczne prowadzone na studiach		I Stopnia II Stopnia
Kursy i formy dydaktyczne prowadzone w językach		Polskim Angielskim

Kursy dla studentów z uczelni zagranicznych	2008 – 2 studentów	2011 – 3 studentów	2014 – 6 studentów
	2009 – 1 student	2012 – 3 studentów	
	2010 – 5 studentów	2013 – 12 studentów	2015 – 16 studentów

Udział w procesie dyplomowania

Wykaz osiągnięć	Liczba osiągnięć
Opieka nad doktorantami	1
Wypromowane prace magisterskie	5
Wypromowane prace inżynierskie	6
Recenzje prac magisterskich	16
Recenzje prac inżynierskich	7
Konsultacja techniczna prac magisterskich	13
Konsultacja techniczna prac inżynierskich	3

4.3. Syntetyczna charakterystyka osiągnięć organizacyjnych

Wykaz osiągnięć	Liczba osiągnięć
Organizacja lub współorganizacja konferencji naukowych	6
Organizacja lub współorganizacja seminariów naukowych i warsztatów	2
Działania popularyzujące naukę	2

Pełnione funkcje organizacyjne	1.Członek Rekrutacyjnego Punktu Informacyjnego WM PKosz.
	2.Członek Zespołu ds. Promocji WM PKosz.
	3.Koordynator promocji kierunku Zarządzanie i Inżynieria Produkcji realizowanego na WM PKosz.
	4.Operator Modułu Sprawozdawczego Polskiej Bibliografii Naukowej dla Katedry Inżynierii Produkcji WM PKosz.
	5.Elektor Kolegium Elektorów WM PKosz.

WM PKosz. – Wydział Mechaniczny Politechnika Koszalińska

08.11.2017
.....
Data


.....
dr inż. Wojciech Kapłonek