

Wpływ warunków otoczenia i sposobu akwizycji chmury punktów z wykorzystaniem optycznych systemów pomiarowych na wartości parametrów SGP

Susceptibility of SPG parameters to the environment conditions and the method of acquisition of cloud of points with optical measuring systems applied

EMILIA BACHTIAK-RADKA
SARA DUDZIŃSKA
DANIEL GROCHAŁA
STEFAN BERCZYŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.8-9.108>

Cyfrowa obróbka chmury punktów zarejestrowanej na współcześnie wytworzonej powierzchni daje operatorowi duże możliwości kreowania schematów postępowania metrologicznego oraz pewną swobodę w końcowej ocenie stanu struktury geometrycznej powierzchni (dalej: SGP). Wartości parametrów SGP wyznaczone w specjalnych (niestandardowych) warunkach mogą być trudne do walidacji. Brak powtarzalności wyników pomiarów często bywa przyczyną eskalacji problemów dotyczących jakości we współczesnym przemyśle, a w przypadku prac naukowych budzi wątpliwości co do rzetelności badań. Autorzy przedstawili w artykule wyniki badań wpływu warunków otoczenia oraz wybranych parametrów nastawczych w trakcie pomiarów SGP przeprowadzonych z użyciem aparatury opartej na chromatycznej mikroskopii konfokalnej. Za pomocą analizy wariancji ANOVA określono istotność oddziaływania wybranych parametrów w trakcie akwizycji i cyfrowej obróbki chmury punktów, co w praktyce przekłada się na powtarzalność i odtwarzalność wartości parametrów najczęściej wykorzystywanych w ocenie stanu SGP.

SŁOWA KLUCZOWE: topografia powierzchni, mikroskopia konfokalna, wpływ parametrów nastawczych na pomiar, analiza wariancji (ANOVA)

Digital processing of a point cloud as measured on a concurrently produced surface would offer many opportunities for the operator to plan metrological process and to give more freedom to assess geometric structure (SGP) of the surface. SGP parameters when estimated in specific (non-standard) conditions could be difficult to validate. Non-repeatability of measurement results can often be the reason for escalation of quality problems in today's industry and can arise doubts about reliability of scientific research work. Presented by the authors in the article are the results of studies on how the SGP measurements, when carried out by means of devices based on chromatic confocal microscopy, could be distorted by ambient conditions and by the selected parameter settings. It was ANOVA analysis of variance used to determine effect of interaction of the selected parameters during acquisition and digital processing of the measured cloud of points. Which in practice is related to the repeatability and reproducibility of the parameters values as most frequently used in the assessment of SGP status.

KEYWORDS: surface topography, confocal microscopy, influence of setting parameters on measurement, analysis of variance (ANOVA)

Chmura punktów zarejestrowana bez błędów kształtu nierówności i wysokości powierzchni pozwala na rezygnację z jej cyfrowej obróbki, dzięki czemu wyznaczone wartości parametrów SGP mogą być wolne od losowego wpływu operatora [1–3]. Ponadto metodyka określania wartości parametrów SGP staje się znacznie prostsza. Wartości parametrów SGP rejestrowane bez filtracji powinny być odtwarzalne i powtarzalne dla różnych systemów pomiarowych oferowanych na rynku przez różnych producentów, a jednocześnie pozwalać na łatwą klasyfikację dostępnych urządzeń pomiarowych.

W celu zidentyfikowania wpływu warunków otoczenia i parametrów nastawczych na topografię powierzchni przeprowadzono eksperyment, w trakcie którego w kontrolowanych warunkach wykonano serię skanów powierzchni za pomocą mikroskopu konfokalnego.

Badania wykonywano na wzorcach chropowości. W eksperymencie uwzględniono zmienny wpływ temperatury otoczenia oraz ekstremalne, możliwe do zrealizowania nastawy pracy multisensorycznej maszyny Altisurf 520 do badań SGP. Zbadano istotność wpływu poszczególnych czynników na zróżnicowanie najczęściej wykorzystywanych (w przemyśle i nauce) amplitudowych parametrów SGP na podstawie analizy wariancji ANOVA.

W ostatnich latach na rynek wprowadzane są różne optyczne urządzenia do pomiaru topografii powierzchni, których zasada działania opiera się na efekcie przesunięcia fazowego [4] lub efekcie konfokalnym światła chromatycznego [5]. Dostępne są również urządzenia wykorzystujące efekt ogniskowania i odbicia na mierzonej powierzchni światła monochromatycznego [6, 7]. Dokumentacja techniczna, która jest dołączana do tego typu urządzeń, oraz normy [4, 5] niewiele mówią o warunkach akwizycji punktów na mierzonej powierzchni. W normach [8, 9] zdefiniowano jedynie podstawowe reguły i zalecenia. Prawdopodobnie wynika to z bardzo szerokiej możliwości wykorzystania tego typu urządzeń oraz z konieczności ich każdorazowego ustawiania odpowiednio do mierzonego obiektu. Wpływ na współrzędne zarejestrowanej chmury punktów może mieć wiele czynników, zależnie od używanego systemu pomiarowego, środowiska czy samego operatora [1–3]. W badaniach prowadzonych w Laboratorium Topografii Powierzchni (LTP) Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego (ZUT) w Szczecinie skoncentrowano się na doborze warunków akwizycji chmury punktów dla powierzchni przedmiotów wykonanych z metali.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono – z wykorzystaniem wielowymiarowej analizy wariancji ANOVA – badania istotności wpływu parametrów nastawczych na zróżnicowanie wartości parametrów amplitudowych SGP. Doświadczenia prowadzono w zmiennych, ale

* Mgr inż. Emilia Bachtiak-Radka (emilia.bachtiak-radka@zut.edu.pl), mgr inż. Sara Dudzińska (sara.dudzinska@zut.edu.pl), dr inż. Daniel Grochała (daniel.grochala@zut.edu.pl), prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński (stefan.berczynski@zut.edu.pl) – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

kontrolowanych warunkach środowiska, z zastosowaniem nowoczesnego urządzenia pomiarowego Altisurf 520 firmy Altimet (rys. 1) oraz wzorca chropowatości z rowkami sinusoidalnymi typu C3 (według PN-EN ISO4536-1) Hommel-Etamic nr 3442.

Altisurf 520 jest multisensorycznym urządzeniem do pomiarów topografii powierzchni. Umożliwia akwizycję danych sensorami optycznymi lub stykowymi (w tym przy zredukowanej sile nacisku ostrza odwzorowującego).

Konstrukcja urządzenia opiera się na stole i bramie, które wykonano z granitu. Ruchy stołu są realizowane w płaszczyźnie XY za pomocą zmotoryzowanych napędów o rozdzielczości $0,1\ \mu\text{m}$. Rozdzielczość mechanizmu wykorzystanego do napędu osi Z wynosi $0,5\ \mu\text{m}$. W zależności od użytego sensora urządzenie wykorzystuje efekt mikroskopii interferometrycznej [4] lub konfokalnej [5]. W prowadzonych badaniach zdecydowano się na wykorzystanie zasady optycznego obrazowania konfokalnego chromatycznego, aby zapewnić wysoką rozdzielczość punktów zbieranych wzdłuż optycznej osi przyrządu. Dzięki specjalnemu układowi przesłon w optycznej osi pomiarowej na przetwornik fotoelektryczny trafia jedynie wiązka światła zogniskowana i odbita w mierzonym punkcie powierzchni. Chromatyczne sensory konfokalne mogą być używane w pomiarach przedmiotów wykonanych z dowolnego materiału o dowolnej barwie, a częstotliwość ich próbkowania może wynosić nawet $2\ \text{kHz}$.

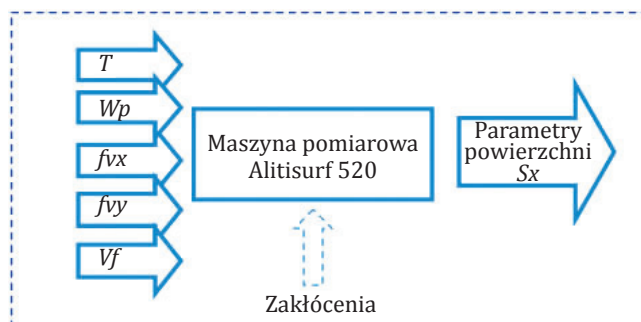


Rys. 1. Profilometr Altisurf 520 o modularnej konstrukcji, umożliwiający pomiary optyczne i stykowe

Metodyka badań

W badaniach uwzględniono pięć czynników wejściowych, do których zalicza się typowe dla pomiarów optycznych parametry skanowania punktów powierzchni, nastawiane przez operatora (bez względu na metodę pomiaru i typ maszyny pomiarowej), i temperaturę (rys. 2, tabl. I). Określona w planie zmienność parametrów nastawczych skanowania jest reprezentatywna dla ogółu dostępnych na rynku urządzeń do badań SGP oraz zgodna z [5].

Badania podzielono na dwie części, tj. ciepłą i zimną, w trakcie których realizowano odpowiednie eksperymenty zgodnie z planem. Za każdym razem odpowiednio przy-



Rys. 2. Złożony obiekt badań

TABLICA I. Opis wybranych czynników wejściowych przyjętych w planie eksperymentu

Symbol i nazwa czynnika	Opis czynnika	Zakres
T temperatura	Temperatura otoczenia (w laboratorium badawczym jest zmniejszana bądź zwiększana za pomocą klimatyzatorów)	$16 \pm 26^\circ\text{C}$
W_p jasność diody LED	Jasność diody to ilość światła emitowanego w kierunku próbki. Można ją regulować ręcznie przez zmniejszanie lub zwiększanie jasności LED (gdy ilość światła emitowanego w kierunku próbki maleje, wtedy intensywność światła zmniejsza się na próbce)	25 ± 100
f_{v_x} próbkowanie w osi X	Krok próbkowania w osi X określa odległość pomiędzy punktami w każdym z mierzonych profili	$0,6 \pm 6\ \mu\text{m}$
f_{v_y} próbkowanie w osi Y	Krok próbkowania w osi Y określa liczbę profili mierzonych na powierzchni	$0,6 \pm 6\ \mu\text{m}$
V_f prędkość pomiaru	Prędkość pomiaru może być zmieniana na każdym etapie, przy czym jest ograniczona automatycznie przez zależność $V_f = F \cdot f_{v_x}$, gdzie F (w Hz) jest częstotliwością próbkowania optycznego czujnika używanego do akwizycji punktów mierzonej powierzchni, lub przez maksymalną dopuszczalną prędkość na czujniku	$120 \pm 1200\ \mu\text{m/s}$

gotowywano laboratorium do badań, gdzie przez ok. 48 h wygrzewano (ochładzano) przyrząd pomiarowy i wzorec.

Przed wykonaniem właściwych pomiarów maszyna realizowała najpierw skanowanie testowe, po którym następowła właściwa sekwencja programu pomiarowego. Pomiar testowy trwał ok. 30 min i miał na celu ustabilizowanie warunków otoczenia po nastawieniu maszyny i wyjściu operatora z laboratorium. Właściwe pomiary prowadzono na wzorcu chropowatości z rowkami sinusoidalnymi typu C3 Hommel-Etamic nr 3442. Maszynę pomiarową Altisurf 520 wyposażono w sensor konfokalny CL2 o zakresie pomiarowym $0 \pm 400\ \mu\text{m}$. Obszar skanowanej powierzchni wynosił $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$. Całą serię pomiarów (16 eksperymentów) przeprowadzono w jednym ustawieniu wzorca na maszynie (bez zdejmowania go z maszyny). Wszystkie podjęte działania miały zapobiec dodatkowym zakłóceniom (na skutek niezamierzonego udziału operatora), mogącym doprowadzić do pogorszenia powtarzalności i odtwarzalności wyników pomiarów. Obie części planu eksperymentu, tj. ciepłą i zimną, wykonano trzykrotnie na przemian.

Wyniki skanowania każdorazowo opracowywano z zastosowaniem standardowych metod analizy topografii powierzchni. Procedura obejmowała:

- wyznaczanie wartości progowej w celu usunięcia błędnie zebranych punktów powierzchni; usuwane punkty każdorazowo ustawiano jako wartości niemierzone;

- poziomowanie powierzchni (płaszczyznę średnią, aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów);
- filtrowanie chropowatości powierzchni (filtrem gaussowskim, przy długości odcinka *cutoff* równej 0,8 mm);
- wyznaczanie wartości stereometrycznych parametrów chropowatości według ISO 25178 (wybranych parametrów wysokości powierzchni, parametrów funkcyjnych i cech powierzchni) [7].

Skanowanie powierzchni w każdym punkcie planu eksperymentu powtarzano trzy razy. Aby wyznaczyć wpływ warunków akwizycji danych, po wykonaniu wszystkich eksperymentów zgodnie z planem przeprowadzono analizę wariancji ANOVA w programie STATISTICA 10.

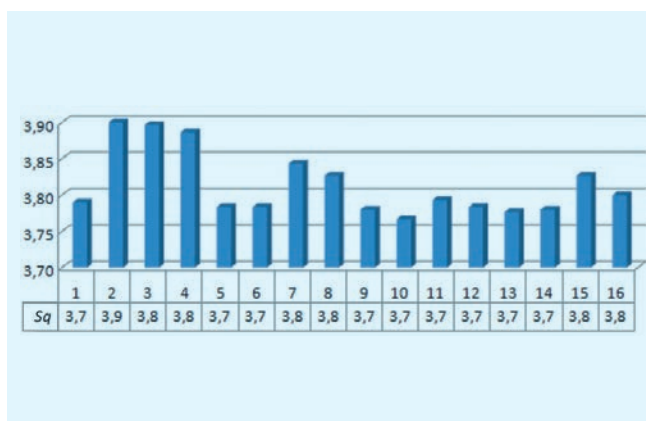
Wyniki badań uzyskano przez określenie istotności wpływu wybranych czynników wejściowych na wartość stereometrycznego parametru Sq , tj. na odległość średniokwadratową punktów powierzchni, określaną w stosunku do powierzchni odniesienia jako odchylenie standardowe wysokości nierówności powierzchni [7]. Wartość Sq jest definiowana podobnie jak średnie kwadratowe odchylenie profilu odwzorowanego Rq w układzie 2D:

$$Sq = \sqrt{\frac{1}{M \cdot N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^M \theta^2(x_i, y_j)}$$

gdzie: $M \cdot N$ – wielkość macierzysta próbkowania, $\theta(x_i, y_j)$ – powierzchnia resztkowa (powierzchnia nośności).

TABLICA II. Plan eksperymentu z rzeczywistymi wartościami parametrów wejściowych i wyjściowych Sq (Sq – wysokość średniokwadratowa powierzchni)

Układ eksperymentu	Parametry wejściowe					Parametry wyjściowe			Średnia, μm	Rozstęp, μm	Odchylenie standardowe, μm
	$T, ^\circ C$	Wp	$f_{v_x}, \mu m$	$f_{v_y}, \mu m$	$V_f, \mu m/s$	$Sq_1, \mu m$	$Sq_2, \mu m$	$Sq_3, \mu m$			
1	16	25	6	6	1200	3,78	3,82	3,77	3,79	0,05	0,026
2	16	100	6	6	120	3,82	4,09	3,79	3,90	0,30	0,165
3	16	100	0,6	6	1200	3,90	3,98	3,81	3,90	0,17	0,085
4	16	25	0,6	6	120	4,05	3,80	3,81	3,89	0,25	0,142
5	16	100	0,6	0,6	120	3,77	3,77	3,81	3,78	0,04	0,023
6	16	25	6	0,6	120	3,79	3,78	3,78	3,78	0,01	0,006
7	16	100	6	0,6	1200	3,78	3,78	3,97	3,84	0,19	0,110
8	16	25	0,6	0,6	1200	3,88	3,80	3,80	3,83	0,08	0,046
9	26	100	6	0,6	120	3,78	3,78	3,78	3,78	0,00	0,000
10	26	100	6	6	1200	3,78	3,76	3,76	3,77	0,02	0,012
11	26	100	0,6	0,6	1200	3,79	3,79	3,80	3,79	0,01	0,006
12	26	25	0,6	6	1200	3,78	3,78	3,79	3,78	0,01	0,006
13	26	25	6	6	120	3,78	3,77	3,78	3,78	0,01	0,006
14	26	100	0,6	6	120	3,79	3,78	3,77	3,78	0,02	0,010
15	26	25	6	0,6	1200	3,81	3,80	3,87	3,83	0,07	0,038
16	26	25	0,6	0,6	120	3,77	3,89	3,74	3,80	0,15	0,079



Rys. 3. Zestawienie wartości parametrów Sq dla poszczególnych układów planu badań

Opracowanie wyników badań

W tabl. II przedstawiono plan eksperymentu oraz wyznaczone wartości parametru Sq , w tabl. III – statystyki opisowe (średnie brzegowe, odchylenia standardowe oraz przedziały ufności), na rys. 3 – zestawienie parametrów wysokości średniokwadratowej (średniego kwadratowego odchylenia punktów powierzchni Sq) otrzymanych w poszczególnych eksperymentach przeprowadzonych zgodnie z planem badań, a na rys. 4 – przykładowe widoki powierzchni uzyskane dla niefiltrowanych chmur punktów.

Dla każdego układu eksperymentu bardzo dobrze została odwzorowana regularna powierzchnia wzorca, którą wcześniej wypoziomowano. W żadnym przypadku nie zaobserwowano nienaturalnych struktur powierzchni, będących efektem błędów pomiaru lub innego nieokreślonego (ale systematycznego) oddziaływania. Również liczba punktów niemierzonych była za każdym razem porównywalna i wynosiła mniej niż 0,1% zdefiniowanych punktów powierzchni.

Podstawowe parametry statystyki opisowej dla każdej podklasy układu opracowano za pomocą programu STATISTICA 10. Wygenerowano średnie brzegowe, odchylenia standardowe oraz 95-procentowe przedziały ufności dla średniej wartości rozpatrywanego parametru SGP.

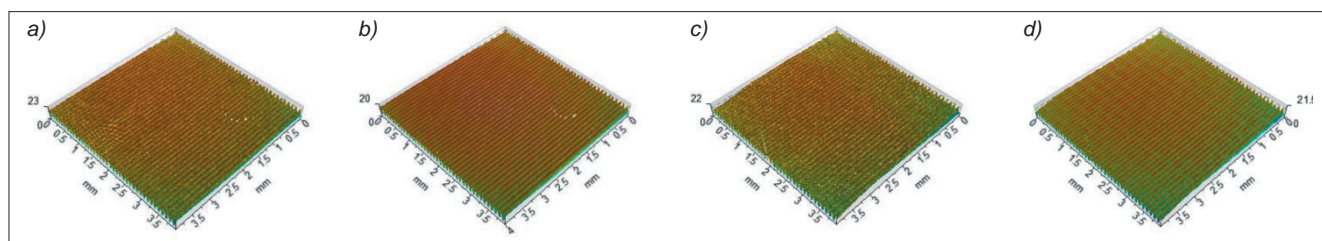
W tabl. III przedstawiono jedynie wyniki dla średniego kwadratowego odchylenia powierzchni Sq . Analogiczne obliczenia powtórzono dla pozostałych analizowanych parametrów SGP – wartości średnie zestawiono w tabl. IV.

TABLICA III. Statystyka opisowa wartości parametru Sq

Efekt	Poziomczynnika	Liczba obserwacji N	Statystyki opisowe (Sq)				
			Sq średnie	Sq odchylenie standardowe	Sq błąd standardowy	Sq –95%	Sq +95%
Ogół		48	3,813542	0,072655	0,010487	3,792445	3,834638
T	16	24	3,838750	0,091903	0,018760	3,799943	3,877557
T	26	24	3,788333	0,031851	0,006502	3,774884	3,801783
Wp	25	24	3,809167	0,062479	0,012753	3,782784	3,835549
Wp	100	24	3,817917	0,082724	0,016886	3,782985	3,852848
f_{v_x}	1	24	3,818750	0,072250	0,014748	3,788241	3,849259
f_{v_x}	6	24	3,808333	0,074230	0,015152	3,776989	3,839678
f_{v_y}	1	24	3,804583	0,049955	0,010197	3,783489	3,825677
f_{v_y}	6	24	3,822500	0,090133	0,018398	3,784440	3,860560
V_f	120	24	3,811250	0,084406	0,017229	3,775608	3,846892
V_f	1200	24	3,815833	0,060427	0,012335	3,790317	3,841350

TABLICA IV. Średnie wartości wybranych parametrów SGP

Układ eksperymentu	Sa, μm	Sz, μm	Sq, μm	Ssk	Sku	Sp, μm	Sv, μm
1	3,313	24,867	3,79	0,536	1,97	12,367	12,533
2	3,36	29,867	3,9	0,459	2,09	14,7	15,167
3	3,347	40,3	3,897	0,604	2,217	19,967	20,367
4	3,337	37,433	3,887	0,563	2,13	18,3	19,133
5	3,307	25,067	3,783	0,547	1,967	13,333	11,733
6	3,303	26,533	3,783	0,543	1,97	13,933	12,567
7	3,313	37,8	3,843	0,614	2,153	18,3	19,533
8	3,307	33,533	3,827	0,591	2,09	16,633	17,233
9	3,31	23,1	3,78	0,532	1,953	11,167	11,9
10	3,293	24	3,767	0,54	1,957	12,3	11,7
11	3,283	29,3	3,793	0,625	2,097	15,433	17,133
12	3,283	35,067	3,783	0,618	2,077	17,633	17,433
13	3,307	21,267	3,777	0,535	1,953	10,293	10,967
14	3,303	22,033	3,78	0,535	1,95	11,267	10,733
15	3,297	31,833	3,827	0,6	2,137	15,167	16,667
16	3,297	32,267	3,8	0,606	2,083	15,867	16,4
Zmienność wartości, %	102,3	189,5	103,5	136,2	113,7	194,0	189,8



Rys. 4. Widoki powierzchni dla eksperymentów otrzymanych z planu badań: a) nr 1, b) nr 13, c) nr 2, d) nr 14

Analiza wariancji ANOVA

Celem badania była ocena istotności wpływu poszczególnych parametrów wejściowych na wartości wybranych parametrów SGP. W tabl. V zaprezentowano jedynie wyniki analizy wariancji dla weryfikowanej hipotezy o braku istotności wpływu parametrów wejściowych na średniokwadratowe odchylenie współrzędnych punktów powierzchni Sq. Analogiczne obliczenia powtórzono dla pozostałych analizowanych parametrów SGP. Określenie istotności wpływu czynników wejściowych na pozostałe wartości parametrów SGP (Sa, Sz, Ssk, Sku, Sp oraz Sv) podano w tabl. VI.

TABLICA V. Arkusz wyników analizy wariancji dla Sq

	Suma kwadratów pomiędzy grupami SS	Stopnie swobody	Średnia kwadratów pomiędzy grupami MS	Wartość testu F	Poziom prawdopodobieństwa p
Wyraz wolny	698,0688	1	698,0688	138 774,0	0,000000
T	0,0305	1	0,0305	6,1	0,017983
Wp	0,0009	1	0,0009	0,2	0,671293
fv _x	0,0013	1	0,0013	0,3	0,613574
fv _y	0,0039	1	0,0039	0,8	0,386502
Vf	0,0003	1	0,0003	0,1	0,823951
Błąd	0,2113	42	0,0050		

Dla wszystkich analizowanych parametrów wejściowych przyjęto poziom istotności testu $p = 0,05$. W przypadku parametru amplitudowego Sq stwierdzono jedynie istotne oddziaływanie temperatury (tabl. V).

W tabl. VI zaprezentowano wynik analizy wzajemnego oddziaływania pomiędzy parametrami wejściowymi na średniokwadratowe odchylenie współrzędnych punktów powierzchni Sq.

W odniesieniu do pozostałych parametrów wejściowych nie było podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej.

TABLICA VI. Jednowymiarowe testy istotności dla Sq

	Suma kwadratów pomiędzy grupami SS	Stopnie swobody	Średnia kwadratów pomiędzy grupami MS	Wartość testu F	Poziom prawdopodobieństwa p
Wyraz wolny	698,0688	1	698,0688	143 071,3	0,000000
T	0,0305	1	0,0305	6,3	0,017725
Wp	0,0009	1	0,0009	0,2	0,667247
fv _x	0,0013	1	0,0013	0,3	0,608994
fv _y	0,0039	1	0,0039	0,8	0,380883
Vf	0,0003	1	0,0003	0,1	0,821637
T · Wp	0,0078	1	0,0078	1,6	0,216610
T · fv _x	0,0009	1	0,0009	0,2	0,667247
Wp · fv _x	0,0046	1	0,0046	0,9	0,338738
T · fv _y	0,0204	1	0,0204	4,2	0,049079
Wp · fv _y	0,0039	1	0,0039	0,8	0,380883
fv _x · fv _y	0,0039	1	0,0039	0,8	0,380883
T · Vf	0,0002	1	0,0002	0,0	0,853640
Wp · Vf	0,0011	1	0,0011	0,2	0,637827
fv _x · Vf	0,0008	1	0,0008	0,2	0,697211
fv _y · Vf	0,0117	1	0,0117	2,4	0,131031
Błąd	0,1561	32	0,0049		

Z wykonanej analizy wyłania się interesujący wniosek, że dla wszystkich efektów głównych istotnym parametrem wejściowym jest temperatura (tabl. VII).

W celu doprecyzowania analizy statystycznej przeprowadzono dodatkową analizę z uwzględnieniem wzajemnych interakcji parametrów wejściowych. Interakcje efektów głównych zbadano za pomocą analizy wariancji ANOVA układów czynnikowych.

Na podstawie wyników zamieszczonych w tabl. VI można stwierdzić, że dla parametru Sq istotny wpływ mają jedynie temperatura otoczenia oraz interakcja temperatury w połączeniu z próbkowaniem nastawionym przez operatora w osi Y (fv_y).

TABLICA VII. Zestawienie istotności wpływu wybranych czynników wejściowych na wyjściowe wartości parametrów SGP

	Sa	Sz	Sq	Ssk	Sku	Sp	Sv
T	■	■	■	■		■	■
Wp							
f _{v_x}		■		■	■	■	■
f _{v_y}							
Vf		■		■	■	■	■
T·Wp		■			■	■	■
T·f _{v_x}							
T·f _{v_y}		■	■	■	■	■	■
T·Vf							
Wp·f _{v_x}		■				■	■
Wp·f _{v_y}							
Wp·Vf		■				■	■
f _{v_x} ·f _{v_y}		■				■	■
f _{v_x} ·Vf							
f _{v_y} ·Vf					■		■

Analogiczne obliczenia powtórzone dla pozostałych analizowanych parametrów SGP. Ze względu na bardzo dużą liczbę wyników w tabl. VII istotny wpływ badanego czynnika przedstawiono graficznie – za pomocą znaku ■.

Podsumowanie

Przeprowadzone doświadczenia oraz statystyczna obróbka i analiza danych z analizą wariancji ANOVA pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

Okazuje się, że operator, przyjmując podczas skanowania powierzchni określoną temperaturę w laboratorium, może istotnie wpływać na większość badanych parametrów SGP (tabl. VII). Temperatura w powiązaniu z wielkością zastosowanego próbkowania w osi Y może spowodować istotną zmianę wartości większości zarejestrowanych parametrów SGP. Różnice wywołane nieświadomie przez operatora w trakcie skanowania powierzchni wynoszą od kilku do kilkudziesięciu procent wartości amplitudowych parametrów SGP.

Do badań wykorzystano multisensoryczną maszynę Altisurf 520. Niektóre spostrzeżenia i obserwacje wydają się słuszne również dla pomiarów wykonywanych przyrządami stykowymi, jednak w LTP nie przeprowadzono szczegółowych badań porównawczych. W literaturze dotyczącej badań dokładności optycznych systemów pomiarowych brak jest podobnych opracowań. W związku z tym stosowne badania należałoby przeprowadzić również dla innych urządzeń pomiarowych różniących się konstrukcją oraz materiałem wykonania. Poszerzenie badań w zbiorze różnych urządzeń do pomiarów SGP powinno doprowadzić do sformułowania szczegółowych wytycznych – jak wykonywać akwizycję punktów powierzchni dla określonych grup materiałów o danych właściwościach, aby wyniki były powtarzalne i odtwarzalne.

Jeden z częściej badanych parametrów SGP, czyli parametr Sa (średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia), okazał się najmniej wrażliwy na warunki nastawcze maszyny pomiarowej. Poza zidentyfikowanym wpływem temperatury T stwierdzono brak interakcji pomiędzy poszczególnymi parametrami nastawczymi.

Z kolei bardzo wrażliwe na nastawy operatora okazały się parametry związane z maksymalną wysokością punktów powierzchni Sz oraz maksymalną wysokością pików Sp i głębień powierzchni Sv. Różnice tych parametrów w poszczególnych eksperymentach planu badań sięgały od kilkunastu do nawet 200%. Oprócz wspomnianego już wpływu temperatury zauważalny jest bardzo wysoki wpływ próbkowania w kierunkach X i Y oraz skojarzony

wpływ intensywności oświetlenia emitowanego ze źródła skierowanego na mierzoną powierzchnię. W dokumentacji technicznej często występują parametry Sz, Sp i Sv, a operator nieświadomie może się przyczynić do znaczących rozrzutów (utruty powtarzalności i odtwarzalności) zebranych wartości pomiarowych. Ratunkiem w takiej sytuacji może być odpowiednia metodyka filtracji (cyfrowej obróbki) zarejestrowanych chmur punktów. Wtedy każdorazowo należy podać jej przebieg i warunki akwizycji punktów na powierzchni badanego przedmiotu.

Aby uniknąć konieczności filtracji, najwygodniej byłoby się posłużyć parametrami, których wartości wyznaczane są w sposób uśredniony w stosunku do uśrednionego przebiegu poziomu odniesienia, tj. stosunkowo stabilnych wartości parametrów Sa i Sq.

Stwierdzono również wpływ efektów głównych na wartości parametrów rozkładu rzędnych powierzchni, tj. na skośność Ssk i kurtozę Sku. Operator, dobierając gęstość próbkowania punktów profilu oraz odległość wierszy i prędkość w trakcie skanowania powierzchni, może doprowadzić do powstania różnic sięgających od kilkunastu do kilkudziesięciu procent wartości parametrów. Różnice te są o tyle istotne, że w szczególnych przypadkach mogą prowadzić do błędnej oceny charakteru powierzchni płasko- lub ostrowierzchołkowej.

Zarejestrowany w trakcie badań istotny wpływ temperatury na wszystkie parametry SGP należy tłumaczyć m.in. zmianami wynikającymi z rozszerzalności wzorca. Współczesne urządzenia do badań SGP nie mają funkcji kompensacji temperaturowej mierzonego obiektu, w którą są wyposażone współrzędnościowe maszyny pomiarowe. Obecnie bardzo trudna wydaje się również kompensacja temperatury małych nierówności mierzonej powierzchni (niewielkich długości) na podstawie znanych wartości współczynników rozszerzalności – w przypadku mierzonego obiektu wartość kompensacji była na pograniczu mikro- i nanometrów. Kompensować należy również zmiany wymiarów i geometrii przyrządów pomiarowych wywołane temperaturą. Tych zmian często trudno jest uniknąć (nawet przy współczesnych inwertorowych systemach klimatyzacji), zwłaszcza gdy czas skanowania osiąga 30 h.

LITERATURA

1. Miller T., Adamczak S., Świdorski J., Wieczorowski M., Łętocha A., Gapiński B. "Influence of temperature gradient on surface texture measurements with the use of profilometry". *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences*. 65 (2017): s. 53–61.
2. Wieczorowski M., Gapiński B., Grochalski K., Miller T. "Teoretyczne aspekty analizy wybranych źródeł błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni". *Mechanik*. 4 (2017): s. 335–338. DOI: 10.17814/mechanik.2017.4.53.
3. Miller T. "Źródła niewiarygodności pomiarów topografii powierzchni". *Mechanik*. 11 (2016): s. 1722–1723. DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.509.
4. PN-EN ISO 25178-603:2013-12. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 603. Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (mikroskopów interferometrycznych z korektą fazy).
5. PN-EN ISO 25178-602:2010. Specyfikacje geometrii wyrobów. Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 602. Charakterystyki nominalne przyrządów bezstykowych (z czujnikiem chromatycznym konfokalnym).
6. Wieczorowski M. „*Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy*”. Szczecin: ZAPOL Sobczyk Sp.J., 2013.
7. Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T. „*The errors of stylus methods in surface topography measurements*”. Szczecin: ZAPOL Sobczyk Sp.J., 2014.
8. PN-EN ISO 25178-2:2012. Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS). Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2. Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
9. ISO 25178-1:2016(en). Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal – Part 1. Indication of surface texture. ■