

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Wpływ natężenia oświetlenia w profilometrze optycznym na wyniki pomiarów struktury geometrycznej powierzchni

ANDRZEJ DZIERWA
POLITECHNIKA RZESZOWSKA

Słowa kluczowe: profilometr optyczny, struktura geometryczna powierzchni, natężenie oświetlenia

STRESZCZENIE:

W pracy badano wpływ doboru natężenia oświetlenia na wyniki pomiarów parametrów struktury geometrycznej powierzchni, jak również wpływ tegoż natężenia na liczbę punktów niezmiernych z wykorzystaniem interferometru światła białego Talysurf CCI Lite. Badaniu poddano powierzchnie próbek: anizotropowe, izotropowe oraz mieszane. Natężenie oświetlenia zmieniano w zakresie od 10 do 90%, każdorazowo co 5%. Określono wpływ zmiany natężenia oświetlenia na jakość pomiaru oraz na zmianę wartości parametrów struktury geometrycznej powierzchni. Parametr Smr oraz parametry z grupy cech są najbardziej wrażliwe na zmianę natężenia oświetlenia, nawet jeśli liczba punktów niezmiernych nie przekracza 10%.

Influence of light intensity in optical profilometer on measurement results of surface topography

Keywords: optical profilometer, surface topography, light intensity

ABSTRACT:

Ten isotropic, anisotropic and mixed surface topographies were analysed. Surface measurements were made using white light interferometer Talysurf CCI Lite. All surfaces were measured with different light intensity. Light intensity was changed in the range of 10%-90% every time at 5%. Parameters from ISO 25178 group were calculated. Parameters were calculated using the software Talymap Gold, version 6.0. Influence of light intensity on the change of surface topography parameters was analysed. The functional parameter Smr and feature parameters are the most sensitive to light intensity even if number of non-measured points was smaller than 10%.

1. WSTĘP

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o jej jakości. Wpływa na własności eksploatacyjne elementów maszyn wyrażone m.in. przez warunki tarcia na powierzchniach stykowych, naprężenia stykowe, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na korozję, szczelność połączeń, powierzchniowe promieniowanie cieplne czy własności magnetyczne [1]. SGP złożona jest z trzech składników: odchyłki kształtu, falistości i chropowatości powierzchni. Odchyłki kształtu są odchyłkami dużej skali, odchyłki falistości – średniej, a odchyłki chropowatości – małej skali [2]. SGP analizowana jest najczęściej w przekrojach, czyli profilach powierzchni. Dla kompleksowej charakterystyki jej powierzchni stosuje się wiele parametrów wysokościowych i wzdlużnych (R_a , R_z , R_t , R_p , R_q , R_{Sm} , $R_{mr}(c)$) oraz funkcji (krzywą gęstości amplitudowej, krzywą udziału materiału, funkcję gęstości widmowej mocy) [3].

W ostatnich dwóch dekadach wyraźnie wzrosło zainteresowanie analizą trójwymiarową, bowiem pojedynczy profil nie charakteryzuje odpowiednio całej powierzchni. Postęp w badaniach struktury geometrycznej doprowadził do powstania urządzeń pomiarowych, umożliwiających badanie i rejestrację powierzchni w układzie przestrzennym. Opracowano również duży zbiór parametrów struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D, dokładnie opisujących stan powierzchni [4].

Metody analizy przestrzennej powierzchni można ogólnie podzielić na 2 kategorie [5]:

– metody powierzchniowe, które pozwalają na jednoczesną obserwację fragmentu powierzchni, dając jej obraz na podstawie statystycznego uśredniania (są to metody wykorzystujące rozpraszanie światła, interferencyjne itp.),

– metody profilowe, które polegają na zbieraniu danych pomiarowych w określonych punktach w kierunkach X i Y (skaning dwukierunkowy) i odtwarzaniu na ich podstawie obrazu powierzchni.

Na każdą z metod pomiaru struktury geometrycznej powierzchni może wpływać wiele czynników skutkujących mniejszą lub większą dokładnością pomiaru. Mogą to być czynniki związane m.in. z wyposażeniem pomiarowym, mierzonym elementem, oprogramowaniem, przyjętą metodą pomiaru czy też warunkami pomiaru [6-11]. Celem przeprowadzonych badań było określenie

wpływu intensywności oświetlenia w badaniach z wykorzystaniem profilometru optycznego na liczbę punktów niezmiernych, powierzchni elementów po różnych typach obróbek wykańczających. Drugim celem było wyselekcjonowanie parametrów struktury geometrycznej najmniej wrażliwych na zmianę natężenia oświetlenia.

2. METODYKA BADAŃ

Analizie poddano dziesięć SGP o różnej wartości wskaźnika tekstury powierzchni – Str (Tab. 1). Parametr ten może przyjmować wartości od 0 do 1, przy czym wartości zbliżone do 1 świadczą o izotropowości SGP, z kolei wartości zbliżone do 0 o jej anizotropowości. W Tabeli 1 zaprezentowano również wybrane parametry SGP: S_q , S_{sk} , S_{ku} , S_{pd} oraz S_{al} . Obróbkę wykańczającą próbek stanowiły: szlifowanie, polerowanie, frezowanie (2 warianty), piaskowanie, honowanie, nagniatanie ślizgowe, toczenie i kulowanie (2 warianty). Widoki izometryczne badanych powierzchni przedstawiono na Rysunku 1, a ich krzywe udziału materiałowego na Rysunku 2. Wszystkie mierzone i analizowane parametry struktury geometrycznej powierzchni, zgodnie z [4], były następujące:

Parametry wysokościowe

- S_q – średnie kwadratowe odchylenie powierzchni [μm],
- S_{sk} – współczynnik asymetrii,
- S_{ku} – współczynnik nachylenia,
- S_p – maksymalna wysokość szczytów powierzchni [μm],
- S_v – maksymalna głębokość wgłębień powierzchni [μm],
- S_z – maksymalna wysokość powierzchni [μm],
- S_a – średnie arytmetyczne odchylenie powierzchni [μm],

Parametry funkcyjne (ogólne)

- S_{mr} – udział materiałowy powierzchni na określonej wysokości c [%],
- S_{mc} – odwrotność udziału materiałowego powierzchni [μm],
- S_{xp} – skrajna wysokość szczytu [μm],

Parametry przestrzenne

- S_{al} – długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji [mm],
- S_{tr} – wskaźnik tekstury powierzchni,
- S_{td} – kierunkowość struktury powierzchni [$^\circ$],

Parametry hybrydowe

- S_{dq} – średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni,

- Sdr – współczynnik rozwinięcia obszaru wydzielonego [%],

Parametry funkcyjne (Sk)

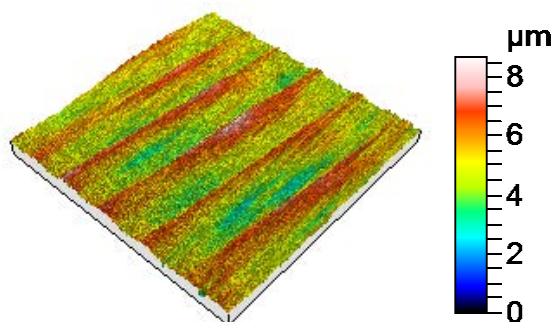
- Vm – całkowita objętość materiału nierówności na jednostkowej powierzchni [mm^3/mm^2],
- Vv – całkowita objętość pustek materiału na jednostkowej powierzchni [mm^3/mm^2],
- Vmp – objętość materiału w strefie wierzchołków na jednostkowej powierzchni, określona dla STp = 10% [mm^3/mm^2],
- Vmc – objętość materiału w strefie rdzenia na jednostkowej powierzchni, określona dla STp = 10%-80% [mm^3/mm^2],
- Vvc – objętość pustek w strefie rdzenia na jednostkowej powierzchni, określona dla STp = 10%-80% [mm^3/mm^2],

- Vvv – objętość pustek w strefie wgłębień na jednostkowej powierzchni, określona dla STp = 80% [mm^3/mm^2],

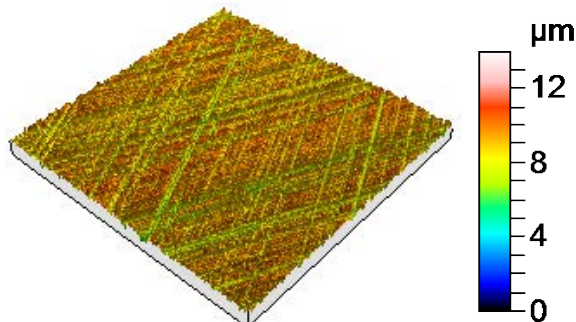
Parametry cech

- Spd – gęstość szczytów powierzchni [$1/\text{mm}^2$],
- Spc – średnia arytmetyczna krzywizna szczytów powierzchni [$1/\text{mm}$],
- S10z – wysokość wg 10 punktów [μm],
- S5p – średnia pięciu najwyższych pików powierzchni [μm],
- S5v – średnia pięciu największych wgłębień powierzchni [μm],
- Sda – średnia powierzchnia dolin [mm^2],
- Sha – średnia powierzchnia wzniesień [mm^2],
- Sdv – średnia objętość dolin [mm^3],
- Shv – średnia objętość wzniesień [mm^3].

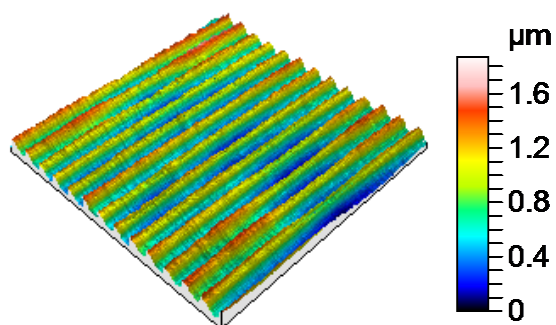
a) próbka toczone



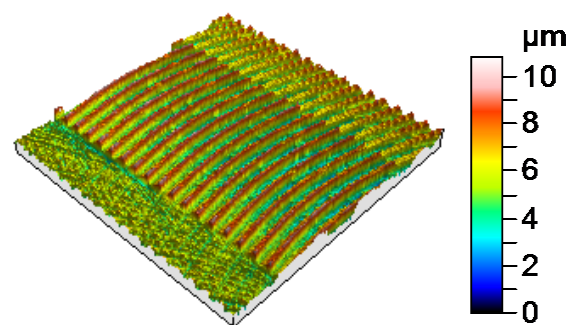
b) próbka honowana



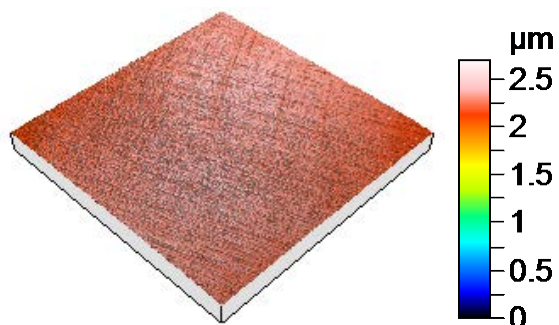
c) próbka frezowana A



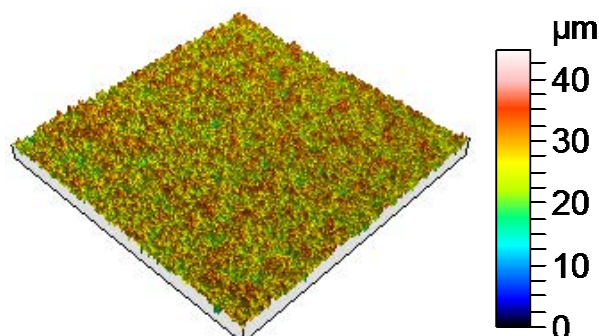
d) próbka frezowana B



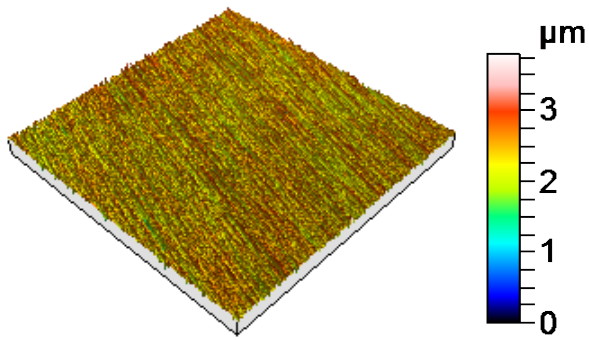
e) próbka polerowana



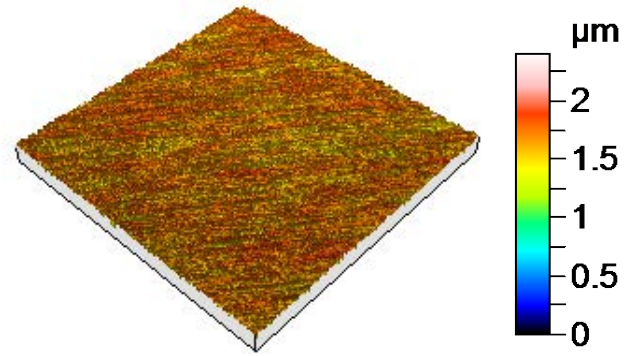
f) próbka piaskowana



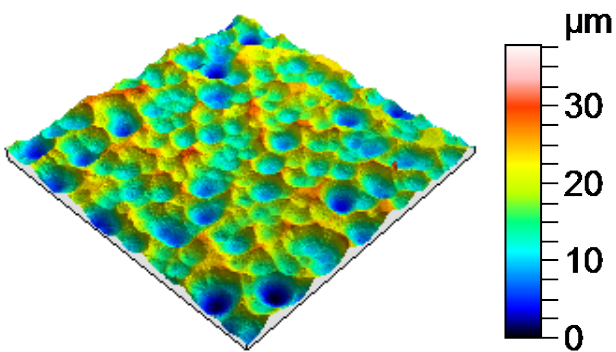
g) próbka szlifowana



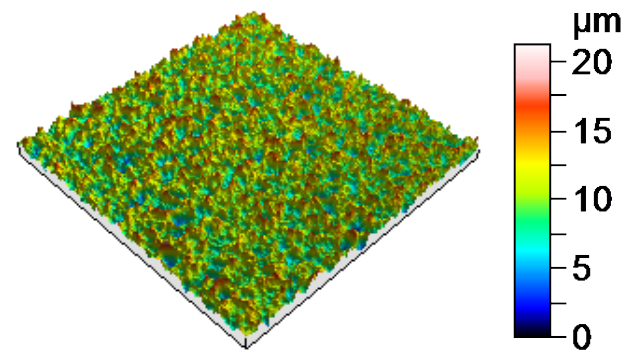
h) próbka nagniatana ślizgowo



i) próbka kulowana A

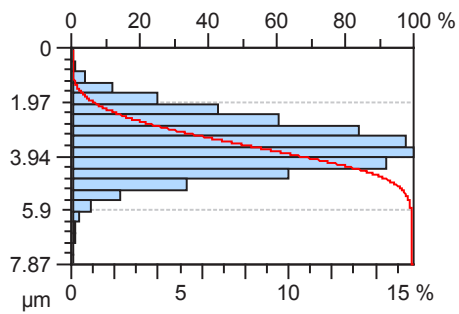


j) próbka kulowana B

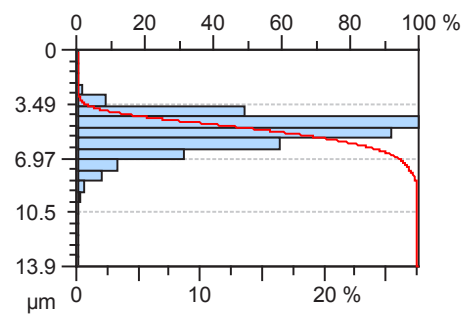


Rysunek 1 Widoki izometryczne próbek przyjętych do badań

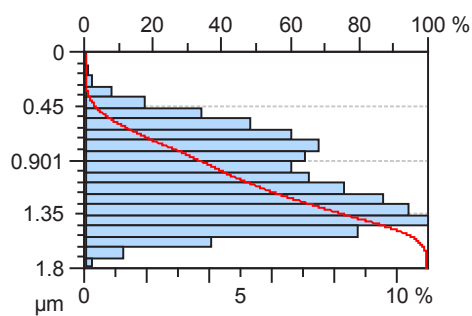
a) próbka toczona



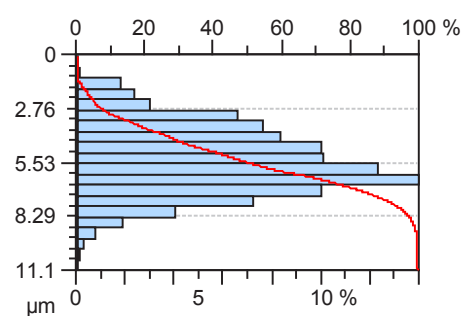
b) próbka honowana



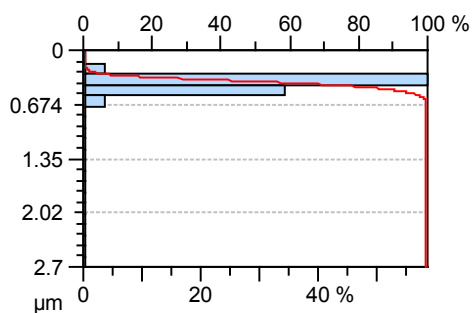
c) próbka frezowana A



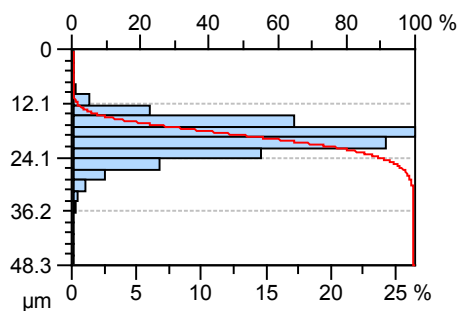
d) próbka frezowana B



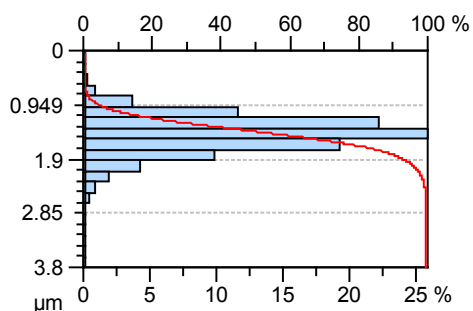
e) próbka polerowana



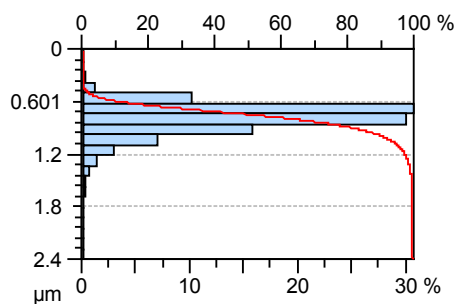
f) próbka piaskowana



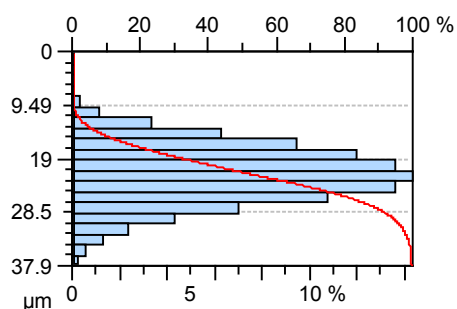
g) próbka szlifowana



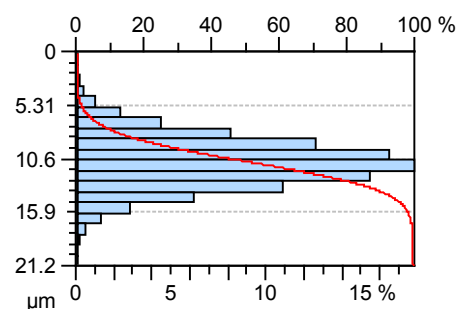
h) próbka nagniatana ślizgowo



i) próbka kulowana A



j) próbka kulowana B



Rysunek 2 Krzywe udziału materiałowego próbek przyjętych do badań

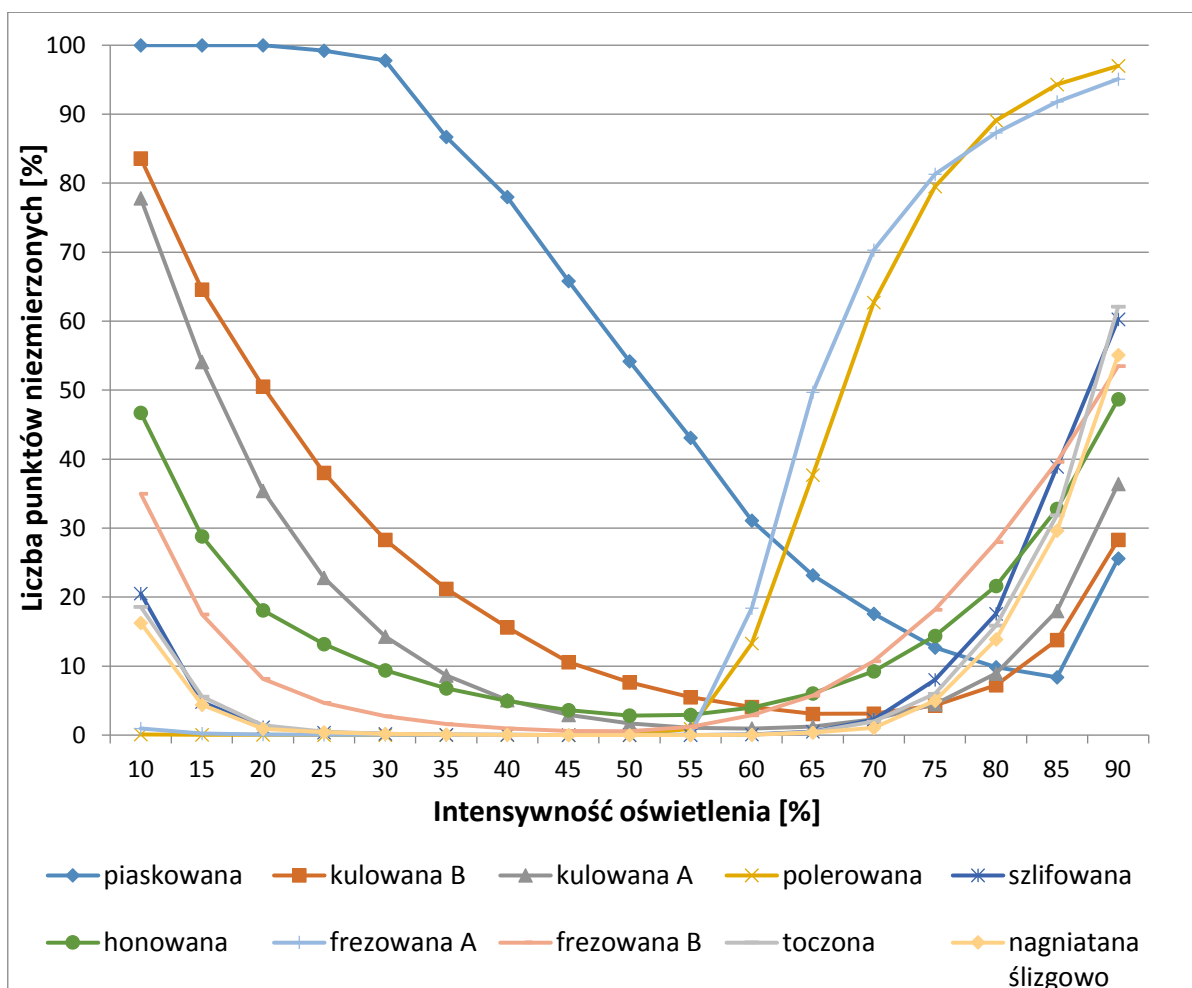
Tabela 1 Wybrane parametry SGP próbek przyjętych do badań

Próbka	Parametry SGP					
	Sa [μm]	Ssk	Sku	Str	Spd [$1/\text{mm}^2$]	Sal [mm]
Honowana	0,825	-0,785	4,36	0,011	325	0,0161
Szlifowana	0,239	-0,433	3,85	0,019	1457	0,0091
Frezowana A	0,285	0,301	2,09	0,040	45,8	0,0579
Frezowana B	1,411	0,227	2,52	0,131	168	0,0386
Polerowana	0,057	-0,708	9,46	0,524	122	0,4782
Piaskowana	2,892	-0,425	3,65	0,851	264	0,0398
Kulowana A	4,041	-0,146	2,76	0,897	7,01	0,1641
Kulowana B	1,923	0,059	3,15	0,907	79,1	0,0508
Toczona	0,950	0,069	2,89	0,097	2179	0,0643
Nagniatana ślizgowo	0,128	-1,261	6,62	0,038	542	0,0155

Pomiaru SGP dokonywano przy użyciu interferometru światła białego Talysurf CCI Lite w wersji 2.8.2.95. Rozdzielczość pionowa urządzenia wynosiła 0,01 nm, a mierzony obszar wynosił $3,3 \times 3,3$ mm. Powierzchnie były mierzone przy różnym natężeniu oświetlenia w zakresie od 10 do 90%. Natężenie to było zmieniane każdorazowo o 5%. Każdy pomiar dokonywany był z trzykrotną powtarzalnością. Po pomiarze powierzchnie były poziomowane, a następnie usuwano punkty niezmierzone, stosując algorytm „do najbliższego sąsiada”. Parametry były obliczane przy pomocy oprogramowania TalyMap Gold 6.0. Jako element odniesienia do oceny zmian parametrów SGP przyjmowano powierzchnie o najmniejszej liczbie punktów niezmiarzonych. Producenci profilometrów optycznych utrzymują, że wiarygodne wartości parametrów SGP można uzyskać, gdy liczba punktów niezmiarzonych nie przekracza 20-25%, natomiast w artykule porównywano ze sobą parametry SGP, wówczas gdy liczba punktów niezmiarzonych nie przekraczała 10%.

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wyniki badań przedstawiające liczbę punktów niezmiarzonych przy różnym stopniu natężenia oświetlenia zaprezentowano na Rysunku 3. Natomiast Tabela 2 przedstawia fragment zestawienia wyników zmian wartości parametrów SGP, jakie zostały wykonane dla każdej z próbek. W Tabeli 2 zaprezentowano wyniki próbki polerowanej w zakresie intensywności oświetlenia 10-45%. Próbka honowana w zakresie natężenia oświetlenia 30-70% charakteryzowała się liczbą punktów niezmiarzonych poniżej 10%. Wzrost natężenia oświetlenia powyżej 70% spowodował znaczny skok liczby punktów niezmiarzonych. W przyjętym zakresie punktów niezmiarzonych bardzo stabilnie zachowywały się parametry amplitudowe (z wyjątkiem parametru S_p), przestrzenne oraz funkcyjne (S_k). Zmiany tych parametrów z reguły nie przekraczały 3%, a często nawet 0,9%. Najbardziej niestabilne okazały się parametry z grupy cech, gdzie różnice sięgały 60%. Również



Rysunek 3 Liczba punktów niezmiarzonych próbek przyjętych do badań przy różnej intensywności oświetlenia

zmiany wartości parametru Smr były wyraźne i dochodziły do 35%. Zmiany parametrów hybrydowych nie przekraczały 8%.

Próbka szlifowana wartości punktów niezmiernych poniżej 10% zawierała w szerokim zakresie natężenia światła – od 15 do 75%. W zakresie tym najbardziej stabilnie zachowywały się parametry amplitudowe, przestrzenne, hybrydowe oraz funkcyjne z grupy Sk. Zmiany tych parametrów nie przekraczały zazwyczaj 0,9% (w jednostko-

wych przypadkach sięgały maksymalnie 4%). Na przeciwnym biegunie plasowały się parametry Smr (zmiany dochodzące nawet do 90%), oraz parametry cech (zmiany dochodzące do 28-30%). Identycznym jak powierzchnia szlifowana zakresem wartości punktów niezmiernych, charakteryzowały się powierzchnie toczone i nagniatana ślizgowo. Wartości poniżej 10% punktów niezmiernych uzyskano w zakresie natężenia światła od 15 do 75%, a do najbardziej wrażliwych na

Tabela 2 Zmiany parametrów SGP w zależności od natężenia oświetlenia (powierzchnia polerowana).
Kolumna szara – wartość parametru; pozostałe kolumny – zmiany parametrów SGP (w %)

Parametr	50%	Natężenie światła [%]							
		10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%
Sq	0,0742	0,40	0,27	0,67	0,67	0,54	0,54	0,40	0,27
Ssk	-0,708	33,76	34,46	30,65	27,82	26,98	28,39	27,12	25,14
Sku	9,46	49,73	49,52	48,03	46,24	45,81	47,51	45,29	43,91
Sp	0,389	3,08	3,08	1,54	2,06	1,29	4,11	2,57	2,83
Sv	2,31	48,61	47,84	39,35	43,25	41,95	43,68	39,35	39,78
Sz	2,7	48,15	48,52	42,22	45,93	34,07	36,67	32,59	43,33
Sa	0,0575	0,35	0,70	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,17
Smr	100	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Smc	0,303	3,63	3,29	1,65	2,64	1,65	4,28	2,30	2,96
Sxp	0,171	0,00	0,00	0,58	0,58	0,58	0,00	0,00	0,00
Sal	0,478	0,84	1,46	0,84	2,09	2,51	0,84	0,84	0,84
Str	0,524	3,05	0,95	0,38	2,10	1,34	1,72	1,72	0,19
Std	17,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Sdq	0,0205	1,46	0,49	0,00	0,49	0,49	0,49	0,00	0,00
Sdr	0,0211	2,84	0,95	0,47	1,42	1,42	0,95	0,95	0,00
Vm	3,01E-06	0,33	1,66	0,33	0,33	0,33	1,00	1,33	1,33
Vv	8,97E-05	0,00	0,11	0,33	0,45	0,45	0,56	0,22	0,33
Vmp	3,01E-06	0,33	1,66	0,33	0,33	0,33	1,00	1,33	1,33
Vmc	6,40E-05	1,72	1,72	0,62	0,47	0,62	0,78	0,78	0,94
Vvc	7,88E-05	0,38	0,51	0,00	0,25	0,25	0,38	0,00	0,13
Vvv	1,09E-05	2,75	2,75	2,75	2,75	1,83	1,83	1,83	1,83
Spd	122	93,44	62,49	80,33	81,31	95,08	79,59	71,31	81,15
Spc	0,0223	37,67	37,22	26,91	28,25	26,91	28,25	25,56	25,56
S10z	557	77,02	21,01	66,07	44,31	70,41	62,21	42,84	36,71
S5p	554	45,31	55,56	83,57	89,53	27,15	40,79	62,64	10,11
S5v	2,8	88,57	95,57	99,71	71,43	81,43	68,57	20,00	92,86
Sda	0,0431	53,69	82,23	68,21	41,23	69,14	70,07	66,82	67,05
Sha	0,257	94,86	93,74	81,52	84,75	40,86	82,65	78,79	80,12
Sdv	4,73E-08	88,44	87,61	73,78	47,38	75,90	47,38	73,36	73,78
Shv	1,72E-07	73,37	72,21	60,35	61,80	61,05	61,34	57,85	57,73

zmianę natężenia oświetlenia parametrów SGP zaliczały się parametry cech oraz parametr Smr. Próbką frezowana A w zakresie natężenia oświetlenia 10-55% charakteryzowała się znikomą liczbą punktów niezmiernych, poniżej 1%. Wzrost natężenia oświetlenia powyżej 60% spowodował znaczny skok liczby punktów niezmiernych. W przyjętym zakresie punktów niezmiernych bardzo stabilnie zachowywały się parametry amplitudowe, przestrzenne oraz funkcyjne (Sk). Zmiany tych parametrów z reguły nie przekraczały 2%, a często nawet 0,7%. Najgorzej wypadły parametry z grupy cech – S5v, Sdv – gdzie różnice sięgały 50%.

Próbka frezowana B wartości punktów niezmiernych poniżej 10% zawierała przy natężeniu światła od 20 do 65%. W zakresie tym najbardziej stabilnie zachowywały się parametry amplitudowe, przestrzenne, hybrydowe oraz funkcyjne z grupy Sk. Zmiany tych parametrów nie przekraczały zazwyczaj 0,8% (w jednostkowych przypadkach sięgały maksymalnie 4%). Na przeciwległym biegunie plasowały się parametry Smr (zmiany dochodzące do 70%) oraz Sda, Sha, Spd, Shv, S5v, S5p, S10z (zmiany dochodzące do 20-22%).

Wartości punktów niezmiernych poniżej 10% w przypadku próbki polerowanej uplasowały się w zakresie 10-55%. Należy dodać, że we wspomnianym zakresie wartości punktów niezmiernych były niższe niż 1%. Najstabilniejszymi parametrami okazały się parametry hybrydowe, przestrzenne oraz funkcyjne – ogólne oraz te z grupy Sk. Zmienność tych parametrów była w większości przypadków niższa niż 1%. Podobna sytuacja dotyczyła części parametrów amplitudowych (Sa, Sq, Sp). Pozostałe parametry amplitudowe wykazywały już większe wahnięcia, sięgające 50%. Jeszcze bardziej niestabilnie zachowywały się parametry cech. Zmiany tych parametrów niejednokrotnie przekraczały 70%.

Najwęższy zakres możliwości pomiaru z liczbą punktów niezmiernych poniżej 10% zaobserwowano w przypadku próbki piaskowanej. Zakres ten wyniósł jedynie 80-85%. W zakresie tym najstabilniejszymi parametrami były parametry przestrzenne, hybrydowe, funkcyjne (Sk) oraz część parametrów amplitudowych (Sa, Ssk, Sku, Sa) – zmiany były generalnie mniejsze niż 1%. Zmienność pozostałych parametrów amplitudowych dochodziła do 8%. Najbardziej niestabilnymi parametrami okazały się parametry cech oraz

parametr Smr. Zmienność tychże parametrów niejednokrotnie przekraczała 60%.

Próbka kulowana A wartości punktów niezmiernych poniżej 10% zawierała w szerokim zakresie natężenia światła – od 35 do 80%. W zakresie tym najbardziej stabilnie zachowywały się parametry amplitudowe (wyjątek Sp), przestrzenne, oraz funkcyjne z grupy Sk. Zmiany tych parametrów nie przekraczały zazwyczaj 0,6% (w jednostkowych przypadkach sięgały maksymalnie 2,5%). Na przeciwległym biegunie plasowały się parametry Smr (zmiany dochodzące nawet do 90%), oraz parametry cech (zmiany dochodzące do 35%). Zmiany parametrów hybrydowych wskutek zmian oświetlenia dochodziły do 10%.

Ostatnią z analizowanych powierzchni była powierzchnia kulowana B. W przypadku tej powierzchni wartości punktów niezmiernych poniżej 10% znalazły się w zakresie 20-65%. Do najstabilniejszych parametrów zaliczały się parametry przestrzenne, hybrydowe i funkcyjne (Sk) oraz część parametrów amplitudowych (Sa, Ssk, Sku, Sa) – zmiany były generalnie mniejsze niż 1%. Zmienność pozostałych parametrów amplitudowych dochodziła do 25%. Najbardziej niestabilnymi parametrami okazały się parametry cech oraz parametr Smr. Zmiana natężenia oświetlenia powodowała niejednokrotnie zmiany tych parametrów o ponad 55%.

4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiany natężenia oświetlenia w pomiarach profilometrem optycznym mogą być przyczyną błędów pomiarowych, i to w zakresie uważanym przez producentów za stosunkowo bezpieczny pomiarowo. Przyjmując jako wyznacznik granicę 10% punktów niezmiernych, najszerszym zakresem pomiarowym charakteryzowały się próbki: szlifowana, toczona oraz nagniatana ślizgowo. W przypadku tych powierzchni wartości punktów niezmiernych poniżej 10% uzyskano w zakresie 15-75% natężenia oświetlenia. Powierzchnią, z którą profilometr optyczny radził sobie zdecydowanie najgorzej, była powierzchnia piaskowana. Wartości poniżej 10% punktów niezmiernych uzyskano tylko w zakresie 80-85% natężenia oświetlenia i były to wartości nieznacznie niższe niż 10%. Generalnie, mniejszymi wartościami punktów niezmiernych i szerszym zakresem, w którym liczba ta jest niższa niż 10%, charakteryzowały się powierzchnie anizotropowe.

Spośród szeregu parametrów charakteryzujących SGP do najmniej wrażliwych na zmianę natężenia oświetlenia zaliczyć należy parametry przestrzenne, hybrydowe, funkcyjne z grupy S_k oraz część amplitudowych (S_a , S_q , S_p). Z kolei do parametrów, dla których nawet niewielka zmiana natężenia oświetlenia powodowała ich wyraźne zmiany, zaliczyć należy przede wszystkim parametry

cech oraz parametr S_{mr} (jedynym pozytywnym wyjątkiem w przypadku tego parametru, gdzie w zasadzie tej zmienności nie zaobserwowano, była powierzchnia polerowana). Wydaje się, że należałoby jednak rozważyć potrzebę stosowania tych parametrów w celu uniknięcia dużej niepewności pomiarów.

LITERATURA

- [1] Patejuk A., Poniatowska M., Struktura geometryczna powierzchni kompozytów odlewniczych typu FeAl-Al₂O₃ po próbach tarcia. *Archiwum Odlewnictwa*, Rocznik 6, Nr 18 (1/2), 2006, 381-386.
- [2] Pawlus P., Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
- [3] PN-ISO 4287:1999 Struktura geometryczna powierzchni: Metoda profilowa.
- [4] PN-EN ISO 25178-2:2012 Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna – Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [5] Adamczak S., Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistość i chropowatość. WNT, Warszawa 2008, 195-196.
- [6] Kalin M., Pogačnik A., Etsion I., Raeymaekers B., Comparing surface topography parameters of rough surfaces obtained with spectral moments and deterministic methods. *Tribology International*, 93, 2016, 137-141.
- [7] Dzierwa A., Reizer R., Pawlus P., Graboń W., Variability of areal surface topography parameters due to the change in surface orientation to measurement direction. *Scanning*, vol. 36, 2014, 170-183.
- [8] Leach R., Evans C., He L., Davies A., Duparré A., Henning A., Jones C., O'Connor D., Open questions in surface topography measurement: a roadmap. *Surface Topography: Metrology and Properties*, vol. 3, No. 1, 2015, 013001.
- [9] Pawlus P., Graboń W., Reizer R., Variation of areal parameters on machined surfaces. 11th International Symposium on Measurement and Quality Control 2013, Kraków–Kielce.
- [10] Leach R. (Ed.), *Optical Measurement of Surface Topography*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [11] Zawada-Tomkiewicz A., Storch B., Analiza struktury geometrycznej powierzchni z wykorzystaniem krzywej udziału materiału. *Mechanik*, 11/2016, 1728-1729.