

# Badania doświadczalne wybranych źródeł błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni

Experimental research of selected sources of errors in profile measurements of surface asperities

MICHAŁ WIECZOROWSKI  
BARTOSZ GAPIŃSKI  
KAROL GROCHALSKI  
TATIANA MILLER\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.4.54>

Prezentowane wyniki badań doświadczalnych związanych z wybranymi błędami w profilowych pomiarach nierówności powierzchni. Omówiono wpływ synchronizacji ścieżek pomiarowych, błędy skrócenia i możliwości przyrządów pomiarowych oraz zakłócenia pochodzące z otoczenia – zarówno wysoko-, jak i niskoczęstotliwościowe. Pokazano, że powtarzalność punktu początkowego i nawet powolne zmiany temperatury w otoczeniu przyrządu pomiarowego mają istotny wpływ na wiarygodność pomiarów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** pomiary profilowe, topografia powierzchni

*In the paper experimental results of research regarding selected errors in profile measurements of surface asperities were presented. Influence of synchronization of measurement tracks, errors coming from rotation and possibilities of measurement devices as well as interference from conditions in both: high and low frequencies were discussed. It was shown that repeatability of the first point and even slow temperature changes around a measurement device have a great influence on fidelity of results.*

**KEYWORDS:** profile measurement, surface topography

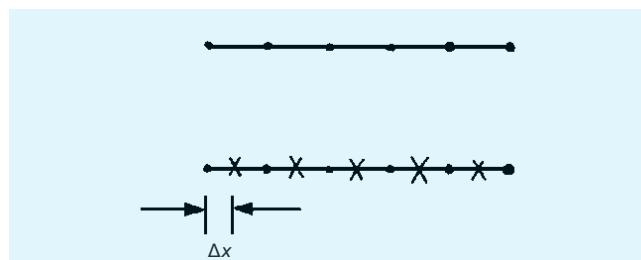
Do prawidłowego doboru procesu technologicznego konieczne jest zrozumienie strukturalnych wymagań co do powierzchni, aby zapewnić uzyskanie określonych właściwości i parametrów użytkowych. Integralną częścią tego postępowania jest analiza metrologiczna powierzchni w jego trakcie i po zakończeniu procesu. W związku z tym ważny jest dobór metody kontroli i urządzenia pomiarowego do analizy uzyskanej powierzchni. Wybór narzędzia jest na ogół funkcją celu, jakiemu ma ono służyć. Z jednej strony istotna jest wiarygodność odtworzenia powierzchni wraz z parametrami użytkowymi (rozdzielczością, zakresem pomiarowym itp.), a z drugiej strony liczy się koszt narzędzia i jego użyteczność.

Obecnie najbardziej rozpowszechnionymi przyrządami do pomiaru nierówności struktury geometrycznej powierzchni [14] są profilometry (zwłaszcza stykowe). Tradycyjnie za ich pomocą ocenia się powierzchnię na podstawie przejścia końcówki pomiarowej w jednym profilu, co jest niewystarczające, jeśli celem jest właściwe odzwierciedlenie charakteru występujących nierówności. Na bazie takich profilometrów tworzy się – przez dodanie głowic optycznych – bezstykowe przyrządy profilowe do pomiaru przedmiotów, w przypadku których kontakt końcówki pomiarowej z powierzchnią jest niedopuszczalny. Pomiary z wykorzystaniem metod bezstykowych

są obarczone błędami, wynikającymi zarówno z przyczyn wewnętrznych, pochodzących np. od układów napędowych, jak i zewnętrznych, takich jak wibracje lub zmiany temperatury. Część czynników zakłócających można eliminować poprzez działania hardware'owe lub software'owe. Ważne, aby osoba wykonująca pomiary miała świadomość, jakie są źródła zakłóceń i w jakim stopniu mogą one zniekształcać sygnał pomiarowy – tylko wtedy wynik pomiaru jest logicznie uzasadniony [4, 6].

## Błędy synchronizacji ścieżek

Z punktu widzenia wierności odwzorowania topografii powierzchni ważne jest jak najlepsze zachowanie siatki próbkowania. To z kolei jest możliwe pod warunkiem zapewnienia jak najmniejszej wartości tzw. płynięcia przy określaniu odstępów próbkowania (niestabilności wartości). Powodem płynięcia jest chociażby brak równowagi termicznej, który może wystąpić na skutek pracy silników urządzenia pomiarowego. Na stabilizację warunków pracy profilometru powinno się przeznaczyć co najmniej kilka godzin od włączenia i to z poruszającymi się elementami odpowiadającymi za przemieszczenia głowicy lub stolika w poszczególnych osiach. Prędkość, przy której zbierane są dane, musi być o wiele większa niż wartość płynięcia, jednak nie może przekroczyć wartości granicznej, przy której końcówka pomiarowa będzie się odrywać od powierzchni. Oprócz dokładności pozycjonowania pierwszego punktu każdej ścieżki istotna jest dokładność samego próbkowania. Błędy w synchronizacji ścieżek (rys. 1) mogą niejednokrotnie prowadzić do poważnych nieścisłości.



Rys. 1. Błędy w synchronizacji kolejnych ścieżek

Tradycyjne plany próbkowania są oparte na siatce prostokątnej. Jeżeli więc np. druga ścieżka jest przesunięta względem pierwszej o  $\Delta x$  i ta wartość jest rzędu połowy odstepu próbkowania, to cały plan ulega poważnym zmianom. Spowoduje to zmiany w oczekiwanych miejscach występowania wierzchołków i przekłamania własności mierzonej powierzchni. W praktyce maksymalna dopuszczalna wartość przesunięcia nie może przekraczać 1/4 wartości odstepu próbkowania. Ocena, jak rygorystyczne jest to kryterium, zależy od kroku próbkowania

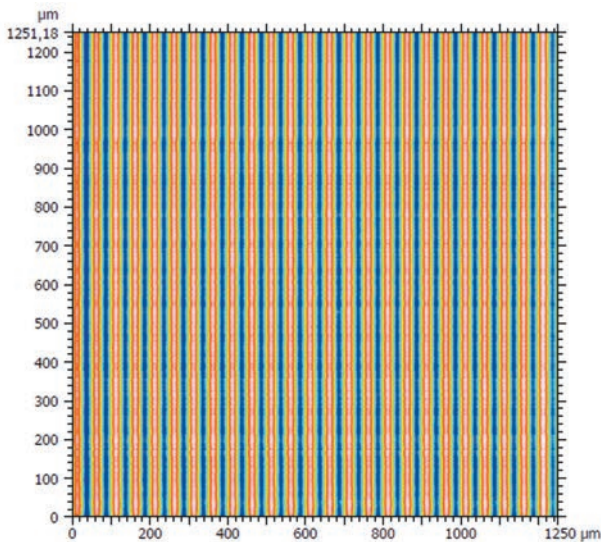
\* Prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski (michal.wieczorowski@put.poznan.pl), dr inż. Bartosz Gapiński (bartosz.gapinski@put.poznan.pl), mgr inż. Karol Grochalski (karol.grochalski@wp.pl) – Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej; mgr inż. Tatiana Miller (tatiana.miller@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

i jego wartości w porównaniu z długością korelacji powierzchni  $tL$  (długość korelacji to wartość opóźnienia, powyżej którego funkcja autokorelacji spada do małej wartości – zazwyczaj 50%, 10% lub  $1/e \times 100\%$ ). Im mniejszy krok próbkowania, tym ostrzejszy jest ten warunek i tym poważniejsze konsekwencje ma ewentualny błąd. Ponieważ typowe wartości kroku próbkowania to  $1 \div 2,5 \mu\text{m}$ , dlatego dopuszczalny błąd pierwszego punktu – mający wpływ na całe próbkowanie – nie może przekraczać  $0,25 \div 0,63 \mu\text{m}$ , choć w praktyce dla bezpieczeństwa zakłada się  $0,2 \div 0,5 \mu\text{m}$ . Wartości te – zwłaszcza w urządzeniach przemysłowych – są bardzo trudne do uzyskania.

Na punkt startowy (ale niekoniecznie na wszystkie kolejne rejestrowane wartości współrzędnych  $x$ ) wpływa szereg czynników, w tym:

- jakość elementów mechanicznych – powtarzalność ruchu pomiarowego i nawrotu po zmianie kierunku ruchu, wielkość i powtarzalność histerezy oraz kasowania luzów;
- jakość elementów elektronicznych – rozdzielczość i powtarzalność elementu definiującego punkt referencyjny rejestracji danych (liniału, dekodera obrotowego);
- oprogramowanie – sposób sterowania cyklem pomiarów 3D, czyli ruchem pomiarowym i powrotnym, w tym sposób eliminacji wpływu zmiany kierunku ruchu i histerezy nawrotu oraz luzów występujących w układach mechanicznych (procedura kasowania luzów i zwalnianie przy dojeździe do punktu odniesienia).

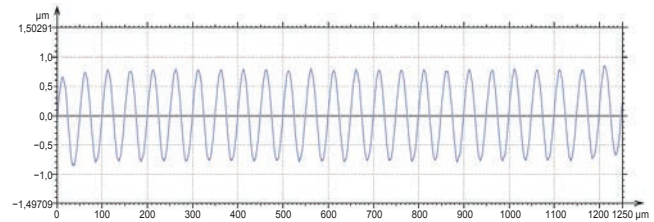
W konstrukcjach związanych z przemieszczeniem w osi  $X$  istnieją dwa rozwiązania: oparte na liniale inkrementalnym i niezawierające tego elementu. Jeśli przyrząd ma liniał inkrementalny, to punkt początkowy będzie rejestrowany z dużo lepszą powtarzalnością, a różnice w wartościach współrzędnej  $x$  punktu początkowego będą stosunkowo niewielkie. Sytuację taką przedstawiono na rys. 2, pokazującym mapę powierzchni wzorca sinusoidalnego typu C.



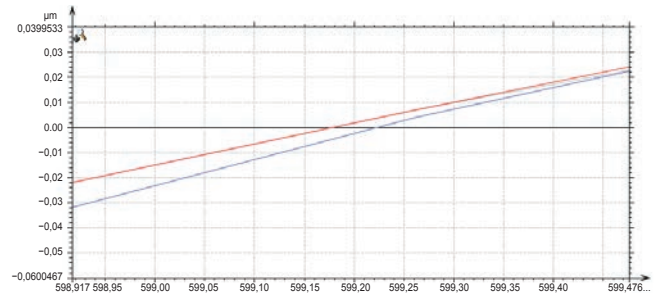
Rys. 2. Mapa warstwicowa wzorca sinusoidalnego zbrana z użyciem liniału w jednostce napędowej w osi  $X$

Na rys. 3 przedstawiono różnice pomiędzy kolejnymi profilami nałożonymi na siebie (rozwiniecie mapy w serię profili). Są one na tyle małe, że widoczny jest w zasadzie jeden profil, odchyłki zaś są niewidoczne.

Na rys. 4 zaprezentowano powiększenie rys. 3 z zaznaczonymi dwoma skrajnymi profilami. Różnica odciętych wynosi ok.  $0,05 \mu\text{m}$  i wartość ta jest jak najbardziej akceptowalna.

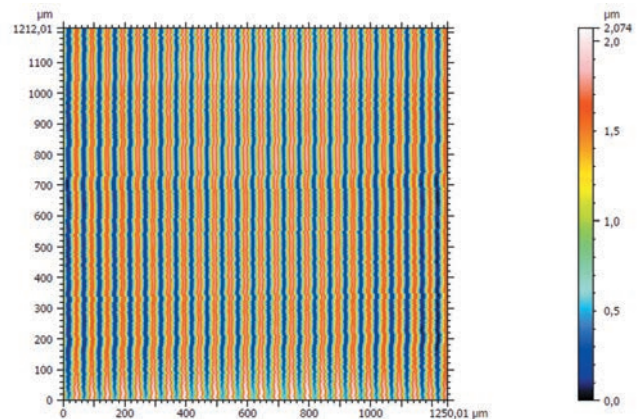


Rys. 3. Profile zebrane z mapy z rys. 2



Rys. 4. Powiększone skrajne profile z rys. 3

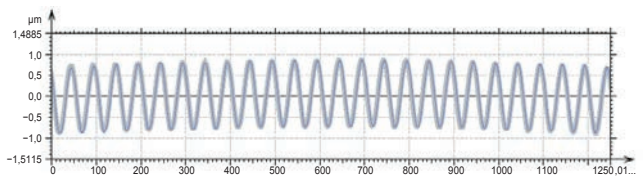
Jeśli profilometr nie ma liniału inkrementalnego, to punkt początkowy zbierany jest albo z wyłącznika krańcowego, albo na podstawie obrotów silnika. Wówczas powtarzalność punktu początkowego jest znacznie gorsza i w szczególnych sytuacjach może sięgać nawet kilku mikrometrów. Taką sytuację pokazano na rys. 5–7. Pierwszy z nich – podobnie jak poprzednio – przedstawia mapę warstwicową powierzchni wzorca typu C.



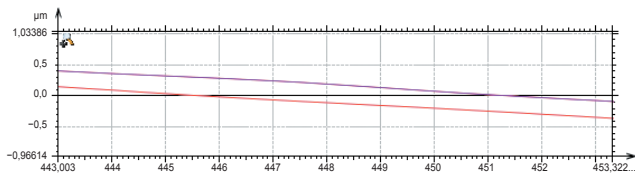
Rys. 5. Mapa warstwicowa wzorca typu C zbrana bez liniału w jednostce napędowej w osi  $X$

Już w takim ujęciu zauważalne są przemieszczenia pomiędzy profilami. Widać to w postaci szerokości wykresu na rys. 6, będącym rozwinięciem powierzchni w serię profili.

Powiększenie fragmentu wykresu z zaznaczonymi skrajnymi profilami pozwala określić różnicę w wartościach odciętych, wynoszącą ponad  $5 \mu\text{m}$ . Taka wartość powoduje bardzo wyraźne zniekształcenia i utratę korelacji pomiędzy kolejnymi ścieżkami.

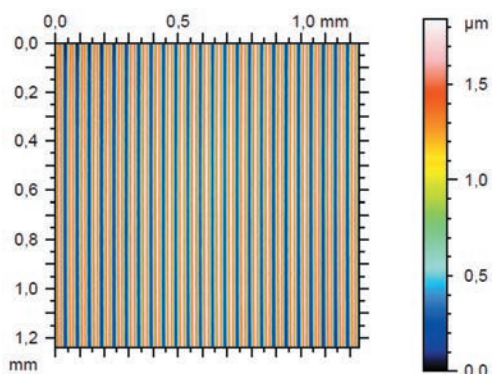


Rys. 6. Profile zebrane z mapy z rys. 5



Rys. 7. Powiększone skrajne profile z rys. 6

Opisane sytuacje dotyczyły rozwiązań profilometrów stykowych z jednostką napędową zamocowaną na kolumnie i ze stolikiem realizującym przemieszczenia w osi Y. W profilometrach optycznych częstsze są rozwiązania ze stolikiem realizującym oba przemieszczenia, czyli w osiach X i Y. Również w tym przypadku punkty początkowe mogą wykazywać pewne przesunięcia, choć ich wartości z reguły są niewielkie. Widać to na rys. 8–11. Pierwszy z nich znów obrazuje mapę wzorca sinusoidalnego, ale tym razem zebraną głowicą konfokalną.



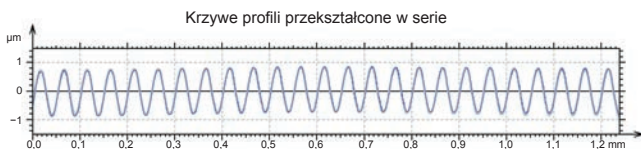
Rys. 8. Mapa warstwicowa wzorca typu C zebrana głowicą konfokalną chromatyczną

Rozwinięcie tej mapy w serię profili pokazano na rys. 9. Przy wnikliwej analizie przebiegu widać subtelne różnice pomiędzy kolejnymi profilami.

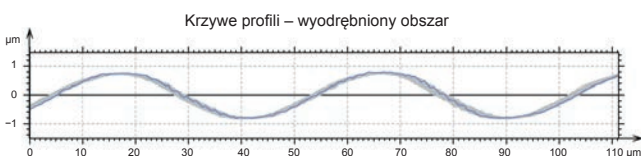
Powiększenie fragmentu tego obrazu zamieszczono na rys. 10. Tutaj różnice w postaci wstęgi są już zdecydowanie wyraźniejsze.

Na rys. 11 pokazano skrajne profile. Różnica odciętych pomiędzy nimi nie przekracza  $0,1 \mu\text{m}$ .

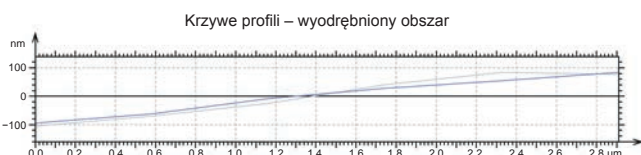
Metoda wyzwalania sygnału początkowego każdej ścieżki powinna być przynajmniej tak dokładna jak powtarzalność punktu początkowego. W przeciwnym razie ko-



Rys. 9. Profile zebrane z mapy z rys. 8



Rys. 10. Powiększenie serii profili z rys. 9



Rys. 11. Powiększone skrajne profile z rys. 10

lejne ścieżki będą przesunięte względem siebie i względem zamierzonego położenia. Wymaga to staranności w projektowaniu systemu wyzwalającego, który – w skrajnych przypadkach – wykracza poza granice możliwości standardowych interferometrów. Z kolei histereza części mechanicznej musi być ograniczona do wartości błędów założonych dla synchronizacji kolejnych ścieżek albo zbieranie kolejnych profili należy przeprowadzać w tym samym kierunku (dodatnim), co jednak wydłuża czas pomiaru. Przy pomiarach dwukierunkowych efektywny początek jest przesunięty ze względu na same zmiany kierunku albo obecność sił tarcia. Luzy lub odstępy są likwidowane za pomocą sprężyn, a do tego precyzyjne urządzenia napędowe pozwalają obecnie na zredukowanie histerezy i luzów do wartości ok.  $0,3 \mu\text{m}$ . Powtarzalność ścieżek po wyzerowaniu powinna być nie gorsza niż  $0,2 \mu\text{m}$ . Często zakłada się, że przy powtarzaniu pomiaru profilu końcówka pomiarowa przemieszcza się po tej samej linii. Rzeczywistość jest jednak inna, co widać na rys. 12. Powierzchnia została pokryta cienką warstewką miękkiego materiału ścieranego w trakcie pomiarów. Białe pole obrazuje rzeczywiste kilkakrotne przejście końcówki stykowej w tym samym miejscu (teoretycznie).

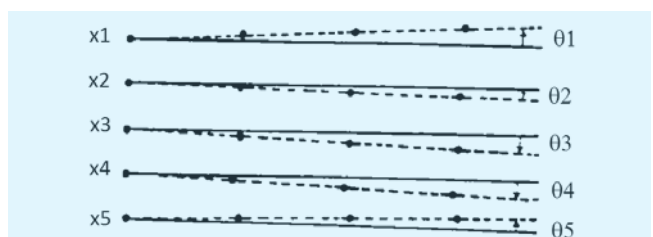


Rys. 12. Błąd powtarzalności profilu w kierunku Y [2]

### Błędy skręcenia i możliwości przyrządów pomiarowych

Kolejnym ważnym czynnikiem jest zapewnienie przesuwu liniowego tylko w jednej osi, dlatego prowadnice muszą być wykonane bez lokalnych błędów pochyleń. Typowe dopuszczalne wartości powinny być rzędu mikroradianów. Jednocześnie kolejne ścieżki powinny być jak najbardziej równoległe do siebie (rys. 13). Co więcej, cały system pomiarowy powinien być maksymalnie zbliżony do liniowego, aby uniknąć błędu Abbego.

Z myślą o zapewnieniu właściwej płaszczyzny pomiarów dwie osie powinny być możliwie prostopadłe do siebie, aby dla dużych wartości x i y siatka nie „wypadła z fazy”. Przykładowo: dla kwadratowej próbki o boku 10 mm prostopadłość nie powinna być gorsza niż  $0,25 \mu\text{m}$  (te błędy w praktyce mają raczej małe wartości). Przy przesuwie stolika w kierunku Y, a tym bardziej w kierunkach X i Y, nie można zignorować ciężaru przemieszczających się mierzonych części. Co więcej, w miarę przesuwu w niektórych układach napędowych może powstawać efekt dźwigni, nasilający się wraz ze wzrostem odległości od początku układu współrzędnych. Napęd głowicy pomiarowej powinien być – jak to się określa w żargonie



Rys. 13. Błędy równoległości kolejnych ścieżek zbierania danych

konstruktorów – zaledwie wystarczający do jej przesunięcia. Zbyt silny układ napędowy może spowodować efekty uboczne w postaci odkształcenia sprężystego.

Osiągnięcie podanych założeń zostało przedstawione w literaturze już pod koniec XX w. W [3] opisano trzyczęściowy system umożliwiający skaning i zbieranie rzędnych profilu, składający się z: niezależnego stolika o automatycznym przesuwie, jednostki sterująco-obliczeniowej i profilometru jako części mechanicznej. Podobny system został przedstawiony w [11] oraz [7], gdzie ponadto zastosowano inwersję, czyli odwrócenie obrazu względem płaszczyzny średniej w odniesieniu do aksonometrycznego obrazu powierzchni. Konstrukcję opartą na niezależnym elemencie odniesienia zaproponowano w [10]. Analizując niedokładność systemu w odniesieniu do topograficznej analizy powierzchni, autorzy [8] stwierdzili, że jest ona wynikiem dwóch składowych: niedokładności określenia współrzędnych  $x$  i  $y$  oraz niedokładności pomiaru wysokości rzędnej  $z$ . Całkowity średniokwadratowy błąd określenia punktu zbierania danych wyrazili wzorem:

$$SH^2 = Sx^2 + Sy^2 + S1x^2 + S2x^2 + S3x^2 + S3y^2 + Su^2$$

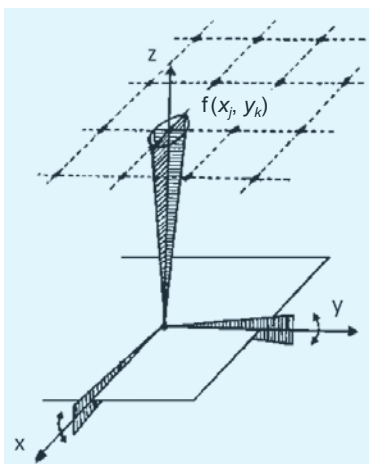
Poszczególne zmienne systemu miały następujące wartości:

- błąd liniowy określenia punktu w osi  $X$ :  $Sx = 0,28 \mu\text{m}$ ,
- błąd liniowy określenia punktu w osi  $Y$ :  $Sy = 0,28 \mu\text{m}$ ,
- błąd skrócenia względem osi  $Y$  wpływający na błąd pozycji w osi  $X$ :  $S1x = 0,25 \mu\text{m}$ ,
- błąd skrócenia względem osi  $X$  wpływający na błąd pozycji w osi  $Y$ :  $S2y = 0,25 \mu\text{m}$ ,
- błąd skrócenia względem osi  $Z$  wpływający na błąd pozycji w osi  $X$ :  $S3x = 0,50 \mu\text{m}$ ,
- błąd skrócenia względem osi  $Z$  wpływający na błąd pozycji w osi  $Y$ :  $S3y = 0,50 \mu\text{m}$ ,
- błąd ugięcia końcówki pomiarowej na skutek nierówności:  $Su = 0,3 \mu\text{m}$ .

Całkowity błąd średniokwadratowy  $SH$  wyniósł ok.  $0,93 \mu\text{m}$ . Schematy graficzne występowania poszczególnych błędów składowych przedstawiono na rys. 14 i 15.

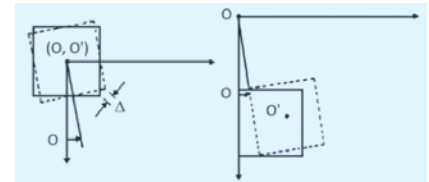
Autorzy [12] zidentyfikowali błąd synchronizacji ścieżek jako istotną składową zakłóceń. W ich przyrządzie osiągnął on wartość ok.  $5 \mu\text{m}$ , więc dane z każdej ścieżki zbierane były trzykrotnie i do analizy wybierano wersję uśrednioną. To pokazuje, jak trudny do minimalizacji okazuje się niekiedy błąd związany z pierwszym punktem próbkowania.

Podobne problemy sygnalizowano w [9] – autorzy po uwzględnieniu zakłóceń elektroniki, wpływu otoczenia, a także błędów stolika i końcówki pomiarowej osiągnęli



Rys. 14. Błędy skrócenia względem osi  $X$  i  $Y$

Rys. 15. Błędy skrócenia względem osi  $Z$

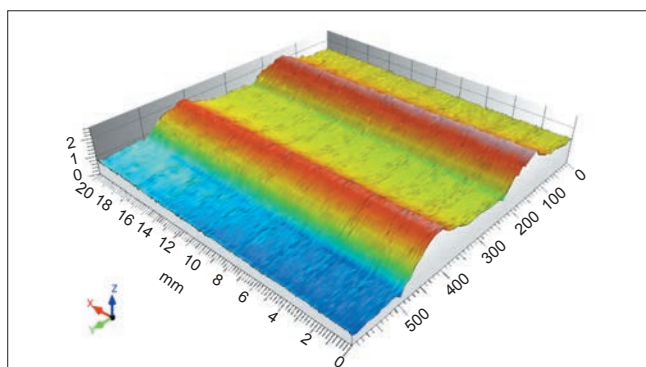


sumaryczną niepewność wskazań wysokości (współrzędnych w osi pionowej) na całej powierzchni mierzonej próbki ( $164 \times 164$  punkty przy odstępnie próbkowania  $2,5 \mu\text{m}$ ) na poziomie  $1,25 \mu\text{m}$ . Obszar próbkowania obejmował prostokątną siatkę o wymiarach  $164 \times 164$  punkty. Końcówka pomiarowa była nieruchoma, stolik zaś przemieszczał się w osiach  $X$  i  $Y$ . Po tych konstrukcjach pojawiły się komercyjne profilometry 3D rozwijane aż do czasów współczesnych. Schematem działania nie odbiegają one zasadniczo od przedstawionych konstrukcji badawczych, choć w szczegółach zmieniło się bardzo dużo. Z biegiem lat parametry dokładnościowe części mechanicznej poprawiono dzięki zastosowaniu układów komputerowego wspomaganie dokładności, co polegało na precyzyjnym odwzorowaniu mapy błędów całego systemu oraz wprowadzeniu jej do pamięci i wykorzystaniu w trakcie pomiaru jako korekcji wskazań. Dzięki rozwojowi informatyki zmieniły się naturalnie część elektroniczna i system przetwarzania danych [15].

### Zakłócenia pochodzące z otoczenia

Ostatnim z omawianych czynników wpływających na błędy odwzorowania powierzchni jest temperatura. Ogólnie przy topograficznej analizie powierzchni bardzo istotny wpływ na wyniki pomiarów mają zakłócenia pochodzące z otoczenia. W przypadku pomiarów profilometrycznych często jest to związane ze sposobem, w jaki otoczenie oddziałuje na przyrząd, czy raczej z tym – podążając za filozofią D.J. Whitehouse'a – jak dobrze przyrząd jest izolowany od otoczenia [13]. Zakłócenia mogą mieć charakter zmian o niskiej lub wysokiej częstotliwości. Zmiany o wysokiej częstotliwości są wynikiem drgań mechanicznych układu napędowego lub po prostu zmian o charakterze periodycznym oddziałujących na pętlę przetwornik–napęd–kolumna. Efekty drgań, pochodzące od takich źródeł, jak silniki, napędy i przekładnie, są bardzo istotnym elementem zakłócającym, odfiltrowywanym hardware'owo i – coraz częściej – dodatkowo jeszcze software'owo. Natomiast zmiany o niskiej częstotliwości są na ogół zmianami temperatury.

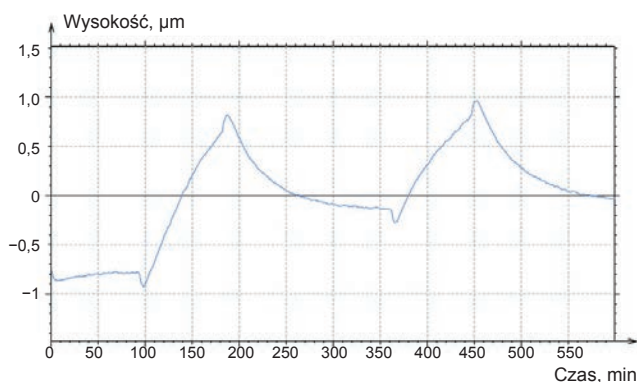
W pomiarach pojedynczego profilu zakłada się, że cały przyrząd powinien się znajdować w pomieszczeniu klimatyzowanym i wtedy powolne zmiany temperatury nie mają niekorzystnego znaczenia dla wyników pomiarów – pod warunkiem, że czas zmian jest długi w porównaniu z czasem pomiarów. Ten ostatni warunek dla pomiarów 3D z dużą liczbą pojedynczych przejść końcówki pomiarowej jest bardzo trudny do spełnienia. Z metrologicznego punktu widzenia istotne są bowiem zarówno absolutna zmiana wymiarów, jak i efekty gradientu temperatury, mogące prowadzić do błędów na skutek zmian geometrycznych i zmian kształtu całego przyrządu. Klimatyzacja – załączana przez regulator po przekroczeniu określonej górnej wartości granicznej i rozłączana po spadku temperatury do dolnej wartości granicznej – powoduje zniekształcenia odwzorowania powierzchni o charakterze zbliżonym do okresowego. Pokazano to na rys. 16, obrazującym profile zbierane w tym samym miejscu (bez przesunięcia w osi  $Y$ ) na płytce interferencyjnej.



Rys. 16. Zmiany w odwzorowaniu powierzchni pod wpływem działania klimatyzacji

Na rys. 16 widać, że po wstępnym ustabilizowaniu profilometru zaczął się on rozgrzewać, co spowodowało wydłużenie elementów mechanicznych i wzrost wartości sygnału (pierwszy grzbiet oznaczony na czerwono). Potem załączyła się klimatyzacja, przez co sygnał z profilometru się obniżył – nastąpiło skrócenie elementów mechaniki (obniżenie sygnału pomiędzy grzbietami). Po wyłączeniu klimatyzacji temperatura ponownie zaczęła się podnosić (drugi grzbiet). Zmiany te mają charakter cykliczny, a ich okres jest zgodny z periodycznym załączaniem klimatyzacji.

Na rys. 17 przedstawiono wielkość zmian odwzorowania powierzchni w czasie. Amplituda otrzymanej sinusoidy przekracza  $1\ \mu\text{m}$ , co dla powierzchni gładkich spowoduje wyraźne zafalszowanie rzeczywistego sygnału pomiarowego.



Rys. 17. Zmiany w wysokości profilu pod wpływem działania klimatyzacji

Korelacyjną analizę tego zjawiska w funkcji czasu przedstawiono w pracy [5]. Zmiany temperatury niekoniecznie mają charakter stopniowy. Poważne komplikacje może powodować np. efekt promieni słonecznych chwilowo tylko padających na przyrząd. Nawet obecność człowieka w otoczeniu przyrządu może zakłócać pomiar i wprowadzać błędy, zwłaszcza gdy wymagana jest duża dokładność. Efekty termiczne można polepszyć odpowiednią kombinacją materiałów o różnych współczynnikach rozszerzalności cieplnej. W [1] stosowano układ składający się z drutu stalowego nawiniętego na pręt inwarowy. Wzrost temperatury zmniejszał naprężenia obwodowe wywoływane przez stal na inwarze i w efekcie zmniejszał długość pręta (oczywiście w określonym zakresie).

## Wnioski

Choć obecnie w nauce i przemyśle wykorzystuje się wiele różnych metod pomiaru nierówności powierzchni, najbardziej rozpowszechnionymi przyrządami stosowany-

mi do takich pomiarów są profilometry stykowe, oparte na profilowych metodach analizy. Ich miejsce w praktyce przemysłowej jest ugruntowane wieloletnimi doświadczeniami oraz procedurami normalizacyjnymi, które jeszcze do niedawna odnosiły się wyłącznie do tej techniki pomiarowej. Uzupełnieniem profilometrów stykowych w przypadku powierzchni, dla których kontakt z końcówką pomiarową jest niedopuszczalny, są głowice optyczne, np. profilometryczne głowice konfokalne. Mierząc nierówności w układzie 3D, należy jednak mieć świadomość źródeł powstawania błędów pomiarów i ich skali, aby uniknąć sytuacji, gdy zakłócenia staną się istotną częścią sygnału pomiarowego.

Przy szacowaniu niepewności pomiaru nie zawsze można się odwołać do metod statystycznych. Konieczne jest wówczas wyodrębnienie źródeł powstawania błędów i określenie, jakiej wielkości zakłócenia są przez nie wprowadzane do wyniku pomiaru. Jest to szczególnie istotne w pomiarach topografii powierzchni w skali mikro, gdzie pomiar jest często tak czasochłonny, że jego powtórzenie nie wchodzi w grę, a trudności sprawia już relokacja, czyli wykonanie pomiaru po pewnym czasie w tym samym miejscu. Przykłady takich źródeł błędów i ich wpływ na wynik pomiaru opisano w artykule. Warto mieć również świadomość, że to, co widać w sygnale pomiarowym, nie zawsze ma związek z mierzoną powierzchnią – może być odzwierciedleniem świata zewnętrznego lub ograniczonych możliwości urządzenia pomiarowego. Software'owa filtracja takich zakłóceń może je częściowo wyeliminować, ale w większości przypadków zmodyfikuje również sygnał pomiarowy.

**Badania zostały zrealizowane w ramach projektu PBS2 finansowanego z NCBR (Nr PBS2/A6/20/2013) „Badania i ocena wiarygodności nowoczesnych metod pomiaru topografii powierzchni w skali mikro i nano”.**

## LITERATURA

1. Baird K.M. "Compensation for linear thermal expansion". *Metrologia*. 4 (1968): s. 145–146.
2. Davis E.J., Stout K.J. "Stylus measurement techniques: A contribution to the problem of parameter variation". *Wear*. 83 (1982): s. 49–60.
3. Idrus N. "An integrated digital system for three-dimensional surface scanning". *Precision Engineering*. 3 (1981): s. 37–43.
4. Miller T. „Źródła niewiarygodności pomiarów topografii powierzchni”. *Mechanik*. 11 (2016): s. 1722–1723.
5. 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*. 65, 1 (2017): s. 53–61.
6. Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T. "The errors of stylus methods in surface topography measurements". Szczecin: ZAPOL, 2014.
7. Snaith B., Edmonds M.J., Probert S.D. "Use of a profilometer for surface mapping". *Precision Engineering*. 3 (1981): s. 87–90.
8. Sherrington I., Smith E.H. "Performance assessment of stylus based areal roughness measurement systems". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 32 (1992): s. 219–226.
9. Stout K.J., Sullivan P.J. "The analysis of three dimensional topography of the grinding process". *Annals of the CIRP*. 38/1 (1989): s. 545–548.
10. Teague E.C., Scire F.E., Baker S.M., Jensen S.W. "Three-dimensional stylus profilometry". *Wear*. 83 (1982): s. 1–12.
11. Tsukada T., Sasajima K. "A three-dimensional measuring technique for surface asperities". *Wear*. 71 (1981): s. 1–14.
12. Whitehouse D.J., Phillips M.J. "Two-dimensional discrete properties of random surfaces". *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*. 305 (1982): s. 441–468.
13. Whitehouse D.J. "A revised philosophy of surface measuring systems". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 202/C (1988): s. 169–185.
14. Wieczorowski M. „Kierunki rozwoju metrologii nierówności powierzchni”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 467–479/600.
15. Wieczorowski M. „Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy”. Szczecin: ZAPOL, 2013.