

# Teoretyczne aspekty analizy wybranych źródeł błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni

## Theoretical aspects of analysis 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.2017.4.53>

Zaprezentowano teoretyczne podstawy zagadnienia błędów w profilowych pomiarach nierówności powierzchni. Omówiono wpływ pomiarowej końcówki stykowej (w tym geometrię, nacisk i lot) oraz optycznej, bazującej na efekcie konfokalnym chromatycznym. Poruszono kwestie związane z elementem odniesienia. Przedstawiono założenia parametrów dokładnościowych w analizie topograficznej.

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

*In the paper theoretical background regarding selected errors in profile methods of surface asperities measurements were presented. The influence of a tip was discussed for stylus (including geometry, pressure and flight) and optical probe basing on confocal chromatic effect. Problems connected with translation tables was described. Basic assumptions regarding accuracy parameters in topographical analysis was shown.*

**KEYWORDS:** profile measurement, surface topography, errors

Praca przyrządów do analizy topografii powierzchni opiera się na jednej z dwóch zasadniczych metod, tj. na metodzie skaningowej lub powierzchniowej. Metody skaningowe można z kolei podzielić na profilowe i obrazowe [12]. Metody skaningowe profilowe oceniają nierówności na podstawie zbioru profili, a skaningowe obrazowe – na podstawie sekwencji obrazów. Metody powierzchniowe oceniają nierówności na podstawie uśrednienia i przyjęcia modelu opisującego mierzone nierówności. Ocena nierówności na podstawie zbioru profili wykorzystuje skaning poziomy i sprowadza się do profilometrii obejmującej serię profili, najczęściej w płaszczyznach równoległych do siebie. Skaning odbywa się wtedy w osi X, a po nim następuje przesunięcie o krok próbkowania w kierunku Y. Wśród metod profilowych wyróżnia się: profilometrię stykową, profilometrię autoogniskową punktową, zastosowanie profilometrycznych głowic konfokalnych, skaningową mikroskopię tunelową i mikroskopię sił atomowych. Metody profilowe są podatne na nieprawidłowości wynikające z ich specyfiki [5, 7], których nie można pominąć w analizie wyników pomiarów.

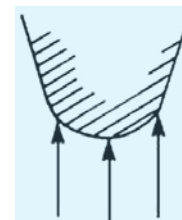
### Wpływ końcówki pomiarowej

Przy odwzorowywaniu powierzchni za pomocą metod profilowych znaczący wpływ na wierność uzyskiwanych wyników ma końcówka pomiarowa – niezależnie od tego,

czy jest to końcówka stykowa, wykonana z syntetycznego diamentu, czy końcówka optyczna, oparta na interferometrii lub zjawisku konfokalnym. Geometrię końcówki profilometru stykowego charakteryzują dwa zasadnicze parametry: wymiary wierzchołka i kąt wierzchołkowy. Jest to bowiem igła diamentowa w kształcie stożka z zaokrąglonym wierzchołkiem, o kącie wierzchołkowym  $90^\circ$  lub (rzadziej)  $60^\circ$ . Istotniejszy jest promień zaokrąglenia wierzchołka, przy czym problem stanowią zarówno krzywizna wierzchołka, jak i jej lokalne zmiany. W warunkach laboratoryjnych można osiągnąć znacznie mniejszą wartość promienia zaokrąglenia końcówki, jednak im jest on mniejszy, tym wyższy koszt końcówki i niższa trwałość.

Kształt wierzchołka zmienia faktyczną wartość nierówności – w efekcie zależność pomiędzy końcówką pomiarową i mierzoną geometrią powierzchni w każdym punkcie profilu jest bardzo złożona. Podstawowy przybliżony model kontaktu końcówki z powierzchnią przedstawiono na rys. 1 [11].

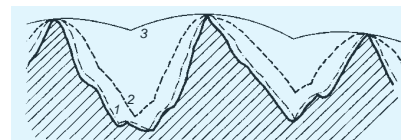
Rys. 1. Przybliżony zaokrąglony model kontaktu końcówki pomiarowej profilometru z powierzchnią



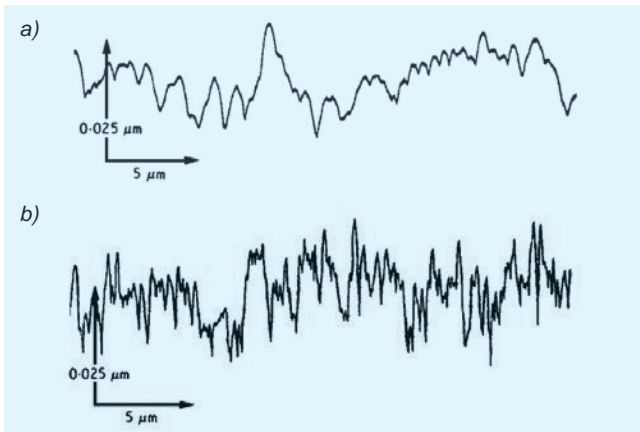
Ten model jest rozważany jako trójpunktowy, co nie znaczy, że muszą wystąpić trzy punkty kontaktu – najczęściej mamy do czynienia z kontaktem jedno- lub dwupunktowym. Jak wynika z badań, dla typowej powierzchni szlifowanej zmniejszenie wartości  $R_a$  przy promieniu zaokrąglenia końcówki równym  $2\ \mu\text{m}$  (w stosunku do końcówki idealnej) wynosi ok. 2%. Różnica ta wzrasta przy większej wartości promienia i jest widoczna zwłaszcza w przypadku powierzchni dokładnych. Przykłady wpływu wielkości promienia zaokrąglenia końcówki pomiarowej na kształt odwzorowywanego profilu przedstawiono na rys. 2 i 3.

Faktyczny wpływ kąta wierzchołkowego na wierność profilu jest stosunkowo prosty do ustalenia. Żeby ten kąt miał wpływ na odwzorowanie chropowatości (przy założeniu, że końcówka pomiarowa jest nieskończenie ostra), kąt zbocza profilu musiałby być większy od półkąta wierzchołkowego końcówki pomiarowej ( $> 45^\circ$ ). To oznaczałoby obecność niewykrywalnych wgłębień w ramach odstepu próbkowania, o szerokości rzędu  $0,05\ \mu\text{m}$ .

Rys. 2. Zmiany w odwzorowywanym profilu przy zmianach wielkości promienia zaokrąglenia końcówki pomiarowej ( $r_1 < r_2 < r_3$ ) [8]



\* 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) – Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej; mgr inż. Tatiana Miller (tatiana.miller@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytworzenia



Rys. 3. Profil wycinka powierzchni docieranej uzyskany tradycyjnym profilometrem (a) oraz ten sam profil, ale uzyskany za pomocą laboratoryjnej końcówki pomiarowej o promieniu zaokrąglenia wierzchołka ok.  $0,3 \mu\text{m}$  (b) [2]

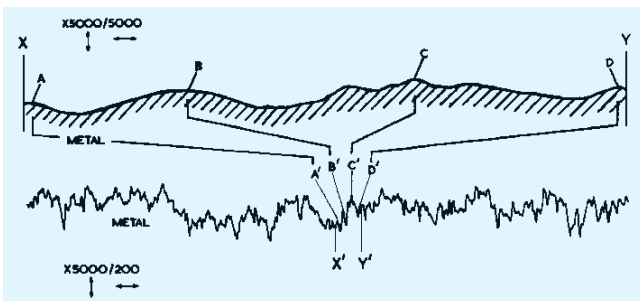
W praktyce dla typowej powierzchni szlifowanej te wartości są  $20\div 50$  razy większe. Stąd wniosek, że z dwóch parametrów geometrycznych końcówki pomiarowej tylko promień zaokrąglenia ma wpływ na wygładzanie profilu. Nieco mylące jest przedstawianie powierzchni w postaci profilogramu, gdzie powiększenie pionowe jest dużo większe od poziomego. Faktyczny wygląd profilu i jego obraz zniekształcony przez nierówne powiększenia przedstawiono na rys. 4.

Niemniej jednak stykowa końcówka pomiarowa ze względu na swój kształt ma działanie uśredniające, filtrujące w sposób mechaniczny analizowany profil. Polega ono na niepenetrowaniu wąskich mikroszczelin lub nierówności o podłożu mniejszej od promienia igły pomiarowej.

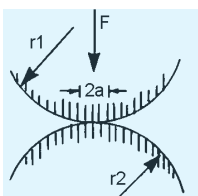
Bardzo istotnym czynnikiem w pomiarach chropowatości powierzchni jest również nacisk końcówki pomiarowej. Przypadek (najbardziej niekorzystny) kontaktu zaokrągłej końcówki pomiarowej z wierzchołkiem chropowatości pokazano na rys. 5.

Zgodnie z teorią Herta promień strefy styku dwóch powierzchni wynosi [10]:

$$a = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{4} \left( \frac{1 - \nu_1^2}{\pi E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{\pi E_2} \right) \frac{F r_1 r_2}{r_1 + r_2}}$$



Rys. 4. Faktyczny wygląd profilu i jego obraz zniekształcony przez nierówne powiększenia [9]



Rys. 5. Kontakt zaokrągłej końcówki pomiarowej z wierzchołkiem chropowatości

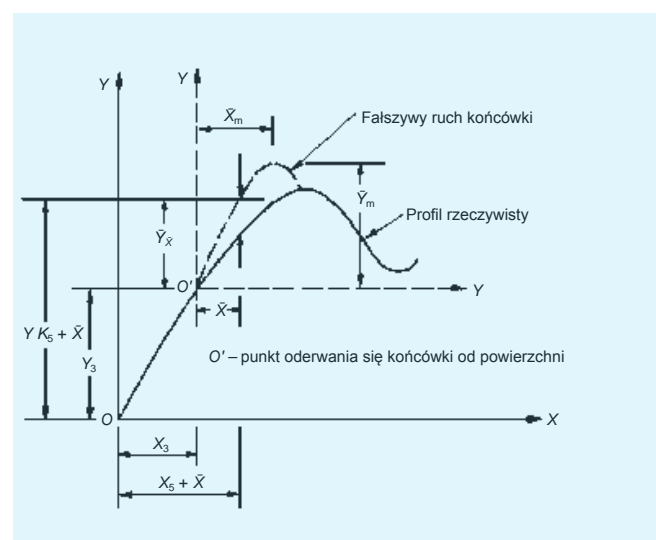
gdzie:  $\nu_1, \nu_2$  – liczby Poissona;  $E_1, E_2$  – moduły sprężystości materiałów w kontakcie.

Całkowita podatność mierzonej powierzchni pod naciskiem końcówki pomiarowej ma wartość:

$$\delta = \frac{a^2(r_1 + r_2)}{r_1 r_2}$$

W przypadku typowych nacisków stosowanych w końcówkach pomiarowych i typowych wartości minimalnych pola kontaktu nacisk powierzchniowy przyjmuje wartości mniejsze od granicy plastyczności większości materiałów wykorzystywanych w budowie maszyn, co jest warunkiem koniecznym, aby końcówka pomiarowa uszkodziła mierzoną powierzchnię. Jednakże granica plastyczności rdzenia materiału różni się od granicy plastyczności warstwy wierzchniej, z którą końcówka pomiarowa ma kontakt. W wielu sytuacjach, gdy wydaje się, że końcówka pomiarowa powinna poważnie uszkodzić powierzchnię, nic takiego nie następuje – jedynie sama końcówka zużywa się szybciej. Uszkodzenie powierzchni przez końcówkę pomiarową jest częstsze dla materiałów stosunkowo miękkich, np. miedzi czy aluminium, a rzadsze np. dla stali. Jest ono tym większe, im ostrzejszy jest wierzchołek, co niejako stawia w sprzeczności dwa wymagania dotyczące końcówki pomiarowej. Podobnie podatność sama w sobie nie zniekształca obrazu powierzchni, o ile jest w przybliżeniu stała i odpowiednio mała w porównaniu ze strukturą geometryczną mierzonej powierzchni.

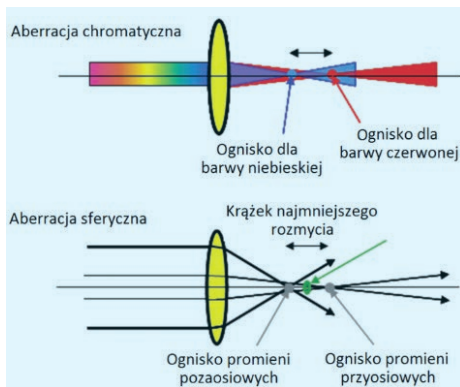
Potencjalnym źródłem błędów w profilometrycznej analizie powierzchni jest też kinematyka końcówki pomiarowej [1]. Porusza się ona po badanej powierzchni z określoną prędkością, która – jeśli jest odpowiednio duża – może spowodować oderwanie się końcówki od powierzchni, czyli tzw. lot (rys. 6). Moment, w którym to nastąpi, zależy nie tylko od układu kinematycznego, lecz także od geometrii powierzchni. McCool [4] opracował model symulacji zachowania się końcówki, uwzględniając promień zaokrąglenia jej wierzchołka i lot. Błędy wynikające z oderwania się końcówki od powierzchni są o tyle istotne, że przy topograficznej analizie wieloprofilowej, realizowanej za pomocą przyrządów stykowych, bardzo często pojawia się tendencja do zwiększania prędkości skaningu, aby zmniejszyć czasochłonność procesu.



Rys. 6. Droga końcówki pomiarowej po oderwaniu się od powierzchni

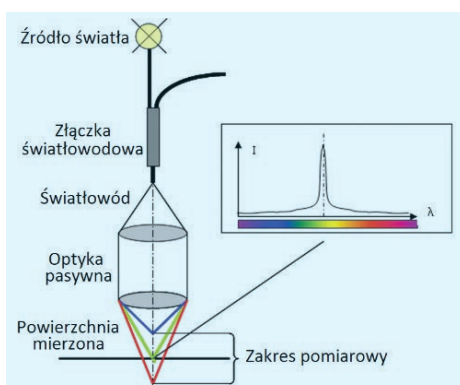
Interesujące opracowanie na temat oceny wielkości zniekształceń powodowanych przez lot końcówki pomiarowej zaprezentowano w [6]. Analizowano tu stopień pogorszenia wartości poszczególnych parametrów. Efektem prac był symulacyjny model, pozwalający ocenić wielkość zniekształceń profilu wywołanych lotem.

W ostatnich latach coraz większą popularność zdobywają głowice konfokalne światła białego, pracujące w układzie profilometrycznym. Współcześnie raczej nie projektuje się całych profilometrów konfokalnych, a jedynie głowice, które można zainstalować w specjalnych konstrukcjach umożliwiających ruch względny w osiach X i Y lub nawet w komercyjnych profilometrach – jako zamienniki głowic stykowych. Głowice konfokalne światła białego wykorzystują efekt konfokalny, dzięki czemu fotodetektor w dowolnym momencie obserwuje tylko jeden punkt. Punkt ten jest oświetlany przez małą, dokładnie zogniskowaną plamkę, podczas gdy cały system pozostaje niewrażliwy na inne promienie świetlne. Poza ruchem stolika profilometru ta metoda pomiarowa nie wymaga żadnych ruchomych elementów, a zakres determinują: spektrometr, długość liniiki fotodiody i parametry przyrządu. Technologia chromatyczna w połączeniu z chromatycznym efektem konfokalnym CCS (*chromatic confocal sensing*) opiera się na rozszczepianiu światła na poszczególne barwy w osi optycznej. Wykorzystywana jest zatem aberracja chromatyczna (rys. 7).



Rys. 7. Aberracja chromatyczna

Schemat działania przykładowej głowicy profilometrycznej pracującej na zasadzie chromatycznego efektu konfokalnego przedstawiono na rys. 8. Wiązka światła białego padająca na powierzchnię jest rozszczepiana na widmo kolorowe. Tylko jedna, określona częstotliwość, która jest zależna od nierówności powierzchni, ogniskuje się na powierzchni. Dla tej długości fali uzyskiwany jest ostry obraz, docierający następnie do fotodetektora – precyzyjnego spektrofotometru, który odczytuje długość lub częstotliwość fali, świadcząca o wysokości mierzonej nierówności.



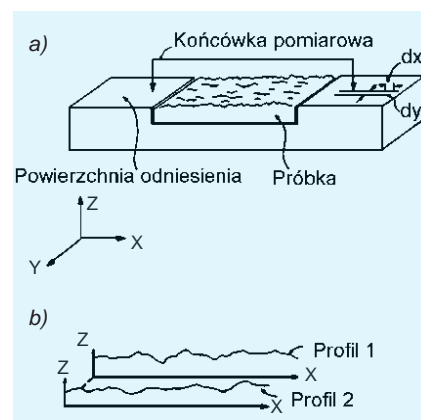
Rys. 8. Schemat działania głowicy konfokalnej światła białego [13]

## Błędy w pomiarach topografii

W pomiarach topografii powierzchni metodami profilometrycznymi występują podobne problemy co w pomiarach 2D. Oprócz tego konieczne są m.in.:

- utrzymanie dokładnej bazy odniesienia wysokości pomiędzy przejściami,
- zachowanie dokładnych odstępów próbkowania na każdej ścieżce względem innych ścieżek,
- odpowiednia kompensacja odchył kątowych przemieszczeń głowicy pomiarowej – pionowego, poprzecznego i wzdłużnego (z linii przesuwu),
- zaadaptowanie właściwych metod numerycznych,
- przyjęcie odpowiedniej siatki próbkowania, umożliwiającej pomiar danego obszaru w rozsądnym czasie i z zachowaniem akceptowalnych kosztów,
- użycie odpowiednich algorytmów przetwarzania obrazu i wydobywania cech interesujących pod względem funkcjonalnym,
- zachowanie odpowiedniej rozdzielczości do wykrycia wad i innych niestandardowych cech powierzchni,
- utrzymanie odpowiednich warunków temperaturowych.

Utrzymanie niezbędnej bazy odniesienia teoretycznie może się odbywać na jeden z trzech sposobów [3], tzn. przez zastosowanie: ślizgacza, elementu odniesienia niezwiązanego z analizowaną powierzchnią albo zewnętrznego elementu odniesienia z przyrządu. Pomiaru za pomocą głowicy ze ślizgaczem są analogiczne do analizy profilu, ale w układzie stereometrycznym bazą staje się powierzchnia skomplikowana i trudna do określenia, co dyskwalifikuje tę opcję. Zastosowanie elementu odniesienia niezwiązanego z analizowaną powierzchnią polega na dodatkowym przejściu końcówki przez powierzchnię o nominalnym kształcie i zdecydowanie mniejszej chropowatości, np. przez płytkę interferencyjną. Wydłuża to procedurę pomiarową, ale baza uzyskana w ten sposób jest najdokładniejsza. Taki charakter miały np. pierwsze poważniejsze próby odwzorowywania powierzchni dokonywane przez Williamsona [14]. W tym przypadku bazę odniesienia między poszczególnymi przejściami uzyskano za pomocą elementu niezwiązanego z powierzchnią, przez odniesienie każdej ścieżki do leżącej na jej początku i końcu polerowanej płaszczyzny (rys. 9).



Rys. 9. Schemat pomiarów topografii z elementem niezwiązanym z powierzchnią: a) element odniesienia niezwiązanym z analizowaną powierzchnią, b) korelacja krzyżowa

Innowacją wprowadzoną przez Williamsona było również krzyżowe korelowanie każdej ścieżki z poprzednią, aby uzyskać przestrzenną spójność danych. Jeśli więc na ścieżce z2 uzyskiwano wierzchołek przesunięty o wartość s w stosunku do odpowiadającego mu wierzchołka ścieżki z1, to profil z2 był przesuwany o tę wartość, aby zapewnić koherencję przestrzenną. Dzięki tym dwóm prostym zabiegom osiągnęto wiarygodne odwzorowanie powierzchni.



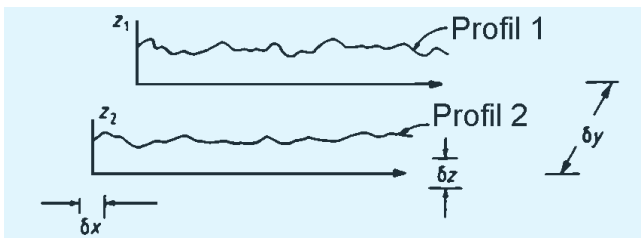
Gdy przedmiot miał kształt klina, było to widoczne na obrazie i pochylenie korygowano odpowiednimi prostymi regresji. Doświadczenia tego typu miały jednak wady. Jeśli np. powierzchnia wykazywała kierunkowość struktury, stosowanie metody korelacji czasem nie miało sensu, ponieważ przesunięcie  $s$  mogło pochodzić zarówno od niedokładności, jak i od śladów obróbki.

Zewnętrzny element odniesienia z przyrządu jest stosowany w systemach topograficznych w dwojaki sposób:

- w systemach z końcówką pomiarową przemieszczającą się tylko w osi  $Z$  oraz ze stolikiem przemieszczającym się w osiach  $X$  i  $Y$  elementem odniesienia są bardzo gładkie, płaskie i dokładne prowadnice, po których w kierunkach  $X$  i  $Y$  porusza się stolik;
- w systemach, w których końcówka pomiarowa przemieszcza się w osiach  $Z$  i  $X$ , a stolik w osi  $Y$ , jednym elementem odniesienia są prowadnice stolika (oś  $Y$ ), a drugim – jednostka napędowa, tj. układ prowadzący głowicę pomiarową (oś  $X$ ).

W przyrządach wykorzystujących zewnętrzny element odniesienia spotyka się dwa typy rozwiązań konstrukcyjnych stolika. Pierwszym jest stolik napędzany silnikiem liniowym z bezkontaktowym przetwornikiem położenia i pętlą sprzężenia zwrotnego w układzie sterowania, aby zminimalizować błędy pozycjonowania. Dodatkowym elementem jest układ redukujący błędy kątowe i błędy prostoliniowości. Drugim rozwiązaniem jest stolik z silnikiem krokowym i prowadzącą śrubą toczną. Taki sposób zdejmowania punktów pomiarowych z powierzchni nazywany jest próbkowaniem statycznym. W tym przypadku narzuca się dodatkowe warunki dokładnościowe, np. że stolik musi mieć regulację pochylenia w dwóch kierunkach. Jako regułę dokładnościową można ponadto przyjąć, że wariancja wartości odstępów próbkowania nie powinna przekraczać 0,1 wartości odstepu, czyli np. dla odstepu 1  $\mu\text{m}$  jest to 0,1  $\mu\text{m}$ . Co więcej, całkowity błąd sumy długości odstępów próbkowania nie powinien przekraczać połowy długości odstepu.

Dalszy rozwój technik pomiarowych doprowadził do umownego przyjęcia zaleceń i kryteriów poprawnego użytkowania topograficznego obrazu powierzchni. Po pierwsze układ mechaniczny i procedura próbkowania muszą być takie, aby rozrzut wartości kroku (lub odstepu) próbkowania dla każdej ścieżki był tylko ułamkiem jego wartości (nie przekraczał 1/4 jego wartości). Poza tym poszczególne ścieżki muszą być wzajemnie skorelowane (rys. 10).



Rys. 10. Odchyłki w kierunkach  $X$ ,  $Y$  i  $Z$ , zniekształcające mechaniczną integralność pomiędzy kolejnymi ścieżkami

Mechaniczna baza odniesienia pomiędzy  $z_1$  i  $z_2$  musi dawać bardzo małą niepewność w porównaniu z rzeczywistą wysokością geometrycznej struktury powierzchni. Typową akceptowaną wartością jest 0,1  $Rq$ . Nie oznacza to, że mechaniczny element odniesienia nie może być w sposób stały wyżej (lub niżej) przy każdej następnej ścieżce w kierunku  $Y$  (lub  $X$ ), ponieważ tego typu efekty można zawsze usunąć przez dobranie odpowiedniej płaszczyzny średniej. Wyznaczenie go nie może być jed-

nak obarczone zbyt dużą niepewnością. Z punktu widzenia tego kryterium jest oczywiste, że im gładsza mierzona powierzchnia, tym trudniej jest zmierzyć jej nierówności. Wobec rosnących wymagań dotyczących chropowatości powierzchni i dokładności pomiarów tego typu mechaniczna korelacja staje się coraz trudniejsza. Obecnie powiązanie pomiędzy ścieżkami realizowane jest przez zastosowanie abstrakcyjnego elementu odniesienia, np. przez dokładną regulację położenia końcówki.

## Podsumowanie

Do pomiaru chropowatości stosuje się różne przyrządy opracowywane w ciągu dziesięcioleci przez sztaby specjalistów z wielu branż. W budowie maszyn najpopularniejszymi przyrządami są profilometry stykowe. Przez lata były one modyfikowane, co doprowadziło do uzyskania niezwykle wszechstronnych rozwiązań konstrukcyjnych o subnanometrycznej rozdzielczości i milimetrycznym zakresie pomiarowym. W powiązaniu z elementem dodatkowym, zapewniającym trzecią oś, przyrządy te umożliwiają pomiar topografii powierzchni.

Przedstawione zagadnienia związane z topograficzną analizą powierzchni pokazują, jak ważny i powszechny jest to problem. Warto podkreślić, że pomiary nierówności powierzchni uważa się za najbardziej skomplikowane, a rzeczywista chropowatość powierzchni jest tak złożona, że jej poznanie i opisanie jest obecnie niemożliwe. Zlokalizowanie potencjalnych źródeł błędów i – tam, gdzie to jest możliwe – ich wyeliminowanie jest zatem koniecznością przy analizie powierzchni w dwóch i trzech wymiarach.

**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. Damir M. "Error in measurement due to stylus kinematics". *Wear*. 26 (1973): s. 219–227.
2. Jungles J., Whitehouse D.J. "An investigation of the shape and dimensions of some diamond styli". *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 3 (1970): s. 437–440.
3. Mainsah E., Sullivan P.J., Stout K.J. "Calibration of translational tables for use in three-dimensional surface topography measurement systems". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 34, 2 (1994): s. 211–224.
4. McCool J.I. "Assessing the effect of stylus tip radius and flight on surface topography measurements". *Transactions of the ASME: Journal of Tribology*. 106 (1984): s. 202–210.
5. Miller T. "Źródła niewiarygodności pomiarów topografii powierzchni". *Mechanik*. 11 (2016): s. 1722–1723.
6. Pawlus P., Śmieszek M. "The influence of stylus flight on change of surface topography parameters". *Precision Engineering*. 29 (2005): s. 272–280.
7. Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T. "The errors of stylus methods in surface topography measurements". Szczecin: ZAPOL, 2014.
8. Radhakrishnan V. "Effect of stylus radius on roughness values measured with tracing stylus instrument". *Wear*. 16 (1970): s. 325–335.
9. Reason R.E. "Progress in the appraisal of surface topography during the first half-century of instrument development". *Wear*. 57, 1 (1979): s. 1–16.
10. Walton J. "Gramophone record deformation". *Wireless World*. 67 (1961): s. 353–357.
11. Whitehouse D.J. "Theoretical analysis of stylus integration". *Annals of the CIRP*. 23 (1974): s. 181–182.
12. Wieczorowski M. "Kierunki rozwoju metrologii nierówności powierzchni". *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 467–479/600.
13. Wieczorowski M. "Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy". Szczecin: ZAPOL, 2013.
14. Williamson J.B.P. "The microtopography of solid surfaces". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineering*. 182/3k (1967/1968): s. 4–18.