

**Ireneusz Piotr Chmielik, Krzysztof  
Tubielewicz, Andrzej Zaborski**

---

**Metodyka wykorzystania  
modelowania i symulacji  
komputerowej do analizy  
stereometrii powierzchni**

---

Dydaktyka Informatyki 5, 198-208

---

2010

Artykuł został opracowany do udostępnienia w internecie przez Muzeum Historii Polski w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej [bazhum.muzhp.pl](http://bazhum.muzhp.pl), gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach  
dozwolonego użytku.

**Ireneusz Piotr Chmielik, Krzysztof Tubielewicz, Andrzej Zaborski**

## **METODYKA WYKORZYSTANIA MODELOWANIA I SYMULACJI KOMPUTEROWEJ DO ANALIZY STEREOMETRII POWIERZCHNI**

### **1. Wprowadzenie**

Pomiary cech geometrycznych warstwy wierzchniej powierzchni technicznych, zarówno w wymiarze mikro i makro, od prawie 100 lat stanowią istotną część badań wielu ośrodków naukowych. Pierwsze opracowania dotyczące chropowatości powierzchni pojawiły się w latach 30. ubiegłego wieku w Wielkiej Brytanii. Dr. R. E. Reason wraz z R. Taylorem oraz M. Hobsonem rozpoczęli badania i pierwsze próby standaryzacji parametrów określających jakość powierzchni. Pierwsze urządzenia umożliwiające pomiar chropowatości pojawiły się na początku lat 40. ubiegłego wieku. Początkowo były to proste urządzenia umożliwiające jedynie rejestrację zmierzonego profilu na papierze węglowym, dodatkowo wynik pomiaru chropowatości mógł być odczytany na analogowym wskaźniku.

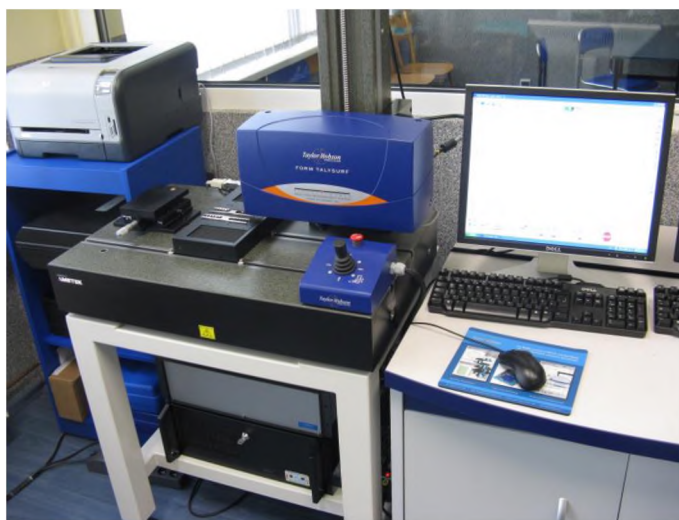
Przez kolejne kilkadziesiąt lat sukcesywnie powstawały normy dotyczące pomiarów oraz ich modyfikacje związane z rozwojem technik pomiarowych. Dopiero w latach 80. ubiegłego wieku rozwój technik komputerowych i pojawienie się pierwszych maszyn wyposażonych w procesory pozwoliło na opracowanie programów służących już nie tylko do pomiarów, ale również do modelowania mikrogeometrii powierzchni i przeprowadzania ich analiz symulacyjnych. Współczesna metrologia mikrogeometrii powierzchni coraz częściej wymaga ujęcia tego zagadnienia nie tylko w tradycyjnym wymiarze 2D, ale również jako topografii 3D, która to jako jedyna daje pełny obraz cech mierzonych powierzchni [Adamczak 2008; Oczóś, Liubimov 2003; Wieczorowski, Cellary, Chajda 2003]. Rozdzielczości głowic pomiarowych osiągnęły wartości subnanometryczne (pomiaru stykowe) i subpikometryczne (pomiaru optyczne).

Punktem wyjścia do przeprowadzenia modelowania stanu stereometrii powierzchni jest chmura punktów pozyskana na drodze pomiaru (metodą stykową – głowicą indukcyjną, z przetwornikiem interferencyjnym, lub metodą optyczną – konfokalną, interferencyjną lub laserową). Rozmieszczenie pozyskanych punktów w przestrzeni stanowi z reguły odwziewierciedlenie kształtu rzeczywistej, mierzonej powierzchni [Zaborski, Tubielewicz 2003: 343–350; Zaborski, Tubiele-

wicz 2009 : 415–422]. Współczesne oprogramowanie jest w stanie również sztucznie wygenerować chmurę punktów nieistniejącej, wirtualnej powierzchni. Pozyskaną na drodze pomiaru lub sztucznie wygenerowaną chmurę punktów można zaimplementować w programy służące do modelowania i analizy topografii powierzchni. Szybkie komputery pozwalają na modelowanie powierzchni składających się z dużej (do 100 000 000) ilości punktów, co pozwala na bardzo precyzyjne przeprowadzenie tego typu analiz.

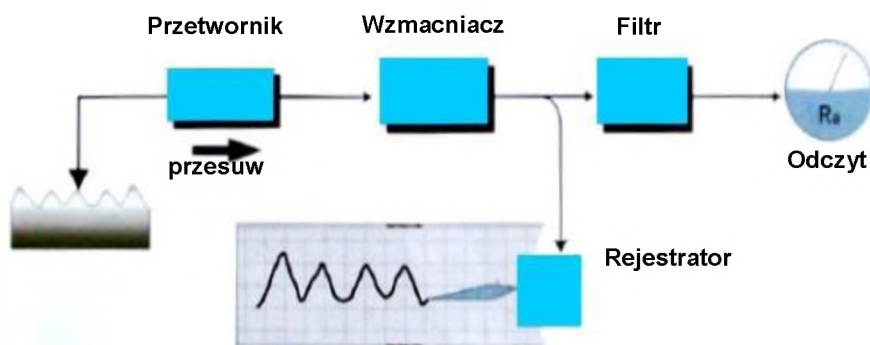
## 2. Modelowanie i analiza symulacyjna powierzchni

W opracowaniu opisano metodykę modelowania i symulacji komputerowej danych uzyskanych z profilografometru Taylor – Hobson New Form Talysurf 2D/3D 120 z oprogramowaniem „Ultra Surface 5.16” i „TalyMap Platinum 5.0” (rys. 1).



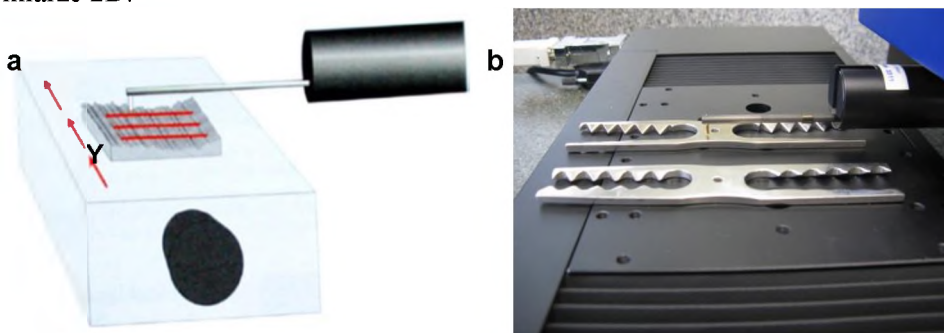
Rys. 1. Profilografometr Taylor – Hobson New Form Talysurf 2D/3D 120

Stanowisko to umożliwia kompleksowy pomiar parametrów chropowatości i stereometrii warstwy wierzchniej w tradycyjnym układzie 2D, jak również w układzie stereometrycznym 3D z rozdzielczością głowicy pomiarowej od 0,6 nm. Schemat ideowy (rys. 2) przedstawia zasadę zdejmowania punktów pomiarowych z mierzonej powierzchni w stosowanym od szeregu lat ujęciu 2D. Końcówka pomiarowa zakończona igłą diamentową o promieniu zaokrąglenia 2  $\mu\text{m}$  przesuwa się po mierzonej powierzchni. Zmiany jej wychylenia w osi pionowej (Z) wywołane strukturą powierzchni, są przetwarzane na sygnał elektryczny, następnie wzmacniane, filtrowane i obrabiane. Pozycjonowanie w osi poziomej (X) odbywa się w oparciu o liniał inkrementalny



Rys. 2. Schemat ideowy pomiaru 2D

Istotę pomiaru stereometrii powierzchni (3D) metodą stykową ilustruje rys. 3. Pomiar przestrzenny jest w istocie złożeniem kilkuset (i więcej) pomiarów płaskich przesuniętych równolegle względem siebie w kierunku prostopadłym do kierunku przesuwu igły pomiarowej. Tak więc w przypadku wykonywania pomiaru topografii powierzchni, dodatkowo musi być realizowany poprzeczny (Y), skokowy ruch mierzonej powierzchni. Ruch ten jest generowany o zadany skok (w zakresie od 500  $\mu\text{m}$ ) przez stolik pomiarowy, po każdym pojedynczym pomiarze 2D.



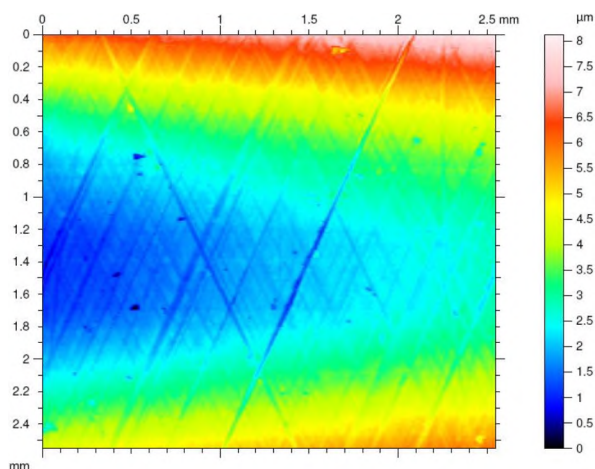
Rys. 3. Pomiar topografii powierzchni: a – zasada pomiaru 3D z wykorzystaniem przesuwu stolika w osi Y, b – stolik pomiarowy w trakcie realizacji pomiaru 3D

Profilografometr w trakcie pomiaru rejestruje współrzędne kolejnych punktów znajdujących się na badanej powierzchni. Punkty te zostają uporządkowane i zapisane do pliku w jednym z wybranych formatów. Otrzymuje się więc chmurę punktów o znanych współrzędnych X Y Z, która może stanowić punkt wyjścia do obróbki cyfrowej przy pomocy oprogramowania do analizy topografii powierzchni. W prezentowanym przypadku jest to program „TalyMap Platinum 5.0” firmy Taylor – Hobson. Funkcje tego programowania można pogrupować w następujący sposób:

- funkcje modelowania powierzchni (chmury punktów),
- funkcje analiz symulacyjnych (przy różnych parametrach wejściowych).

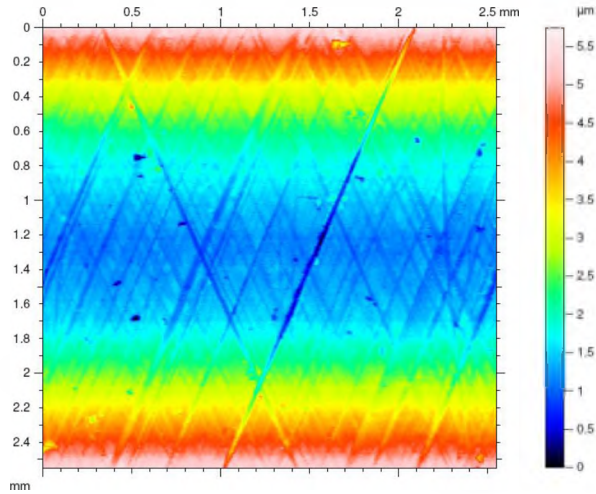
Do zaprezentowania możliwości modelowania chmury punktów oraz przeprowadzenia analiz symulacyjnych wykorzystano dane z pomiaru wycinka o wymiarach  $2,5\mu\text{m} \times 2,5\mu\text{m}$  tulei cylindrowej silnika wysokoprężnego po procesie honowania (rys. 4).

Metodykę modelowania chmury punktów można podzielić na etapy. Pierwszym z nich jest wczytanie i wizualizacja otrzymanej w wyniku pomiaru chmury punktów w postaci obrazu (mapy warstwicznej), w którym kolory są funkcją wartości współrzędnych poszczególnych punktów w osi Z (rys. 4).



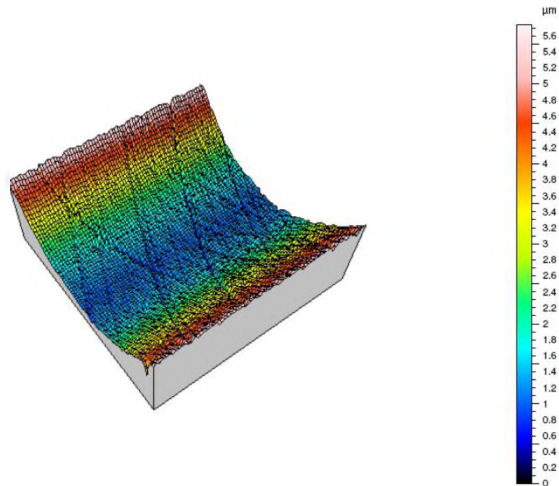
Rys. 4. Wizualizacja chmury punktów otrzymanych w wyniku pomiaru

Oczywiste jest, że tak otrzymany obraz powierzchni nie może jeszcze stanowić punktu wyjścia do przeprowadzenia wyznaczania parametrów chropowości i falistości, ani do wykonania analiz symulacyjnych. W trakcie pomiaru (pomimo zachowania staranności) niemożliwe jest takie ułożenie badanego wycinka powierzchni, by jego tworząca była dokładnie równoległa z kierunkiem przesuwu igły pomiarowej. Z tego powodu otrzymany model geometryczny nie jest wypoziomowany (rys. 4). Kolejnym etapem musi być więc poziomowanie chmury punktów. Ten niezwykle istotny proces wstępnego modelowania powierzchni pozwala na uzyskanie obrazu o równomiernie rozłożonych rzędnych punktów topografii i wyrazistszej wizualizacji jej szczegółów. Poziomowanie można wykonać względem płaszczyzny średnio kwadratowej (dla powierzchni o równomiernej strukturze) lub względem płaszczyzny wyznaczonej z 3 reprezentatywnych punktów (dla powierzchni złożonych). Rozkład rzędnych współrzędnych chmury punktów jest równomierny względem płaszczyzny średnio-kwadratowej (rys. 5).



**Rys. 5. Chmura punktów po poziomowaniu**

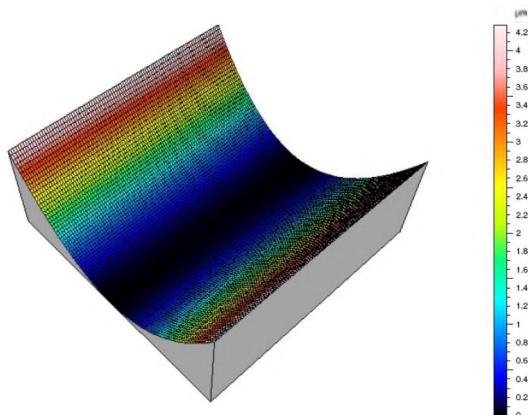
Możliwe jest również przedstawienie modelowanego wycinka w postaci widoku aksonometrycznego „trójwymiarowego” (rys. 6). Ten sposób wizualizacji bardzo ułatwia analizę otrzymanych rezultatów analiz.



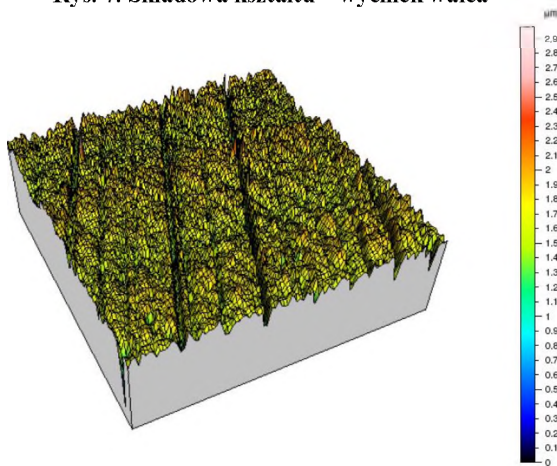
**Rys. 6. Widok aksonometryczny chmury punktów po operacji poziomowania**

W warunkach pomiarów przemysłowych dość rzadko zdarza się, aby pomiar był realizowany na powierzchni płaskiej. Bardzo często dokonuje się pomiaru topografii powierzchni na zewnętrznych lub wewnętrznych (tak jak w prezentowanym przykładzie – rys. 6) powierzchniach walcowych, powierzchni kulistych, stożkowych, lub też na powierzchniach o jeszcze bardziej złożo-

nych kształtach. W każdym z tych przypadków, przed przejściem do dalszych analiz, konieczne jest określenie i wyodrębnienie kształtu (cylinder, kula, wielomian) tworzonego przez punkty, a niebędącym składową topografii powierzchni. W prezentowanym przykładzie wycinka tulei cylindra rys. 6 przedstawia chmurę punktów stanowiących odzwierciedlenie powierzchni cylindra po honowaniu. Składa się ona z kształtu (walec), falistości i chropowatości. Po przeprowadzonym matematycznym rozdzieleniu składowej kształtu oraz chropowatości i falistości otrzymuje się dwie chmury punktów. Pierwsza to składowa kształtu (wycinek walca – rys. 7), druga to topografia powierzchni (chropowatość i falistość – rys. 8). Zastosowanie właściwego algorytmu modelowania pozwala na dalsze symulacje na punktach reprezentujących jedynie interesujący składnik.

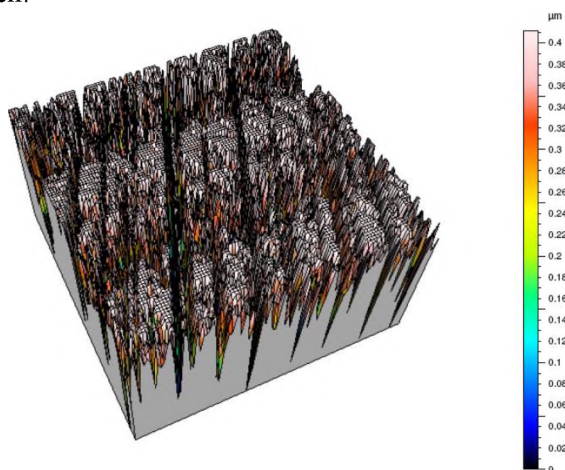


Rys. 7. Składowa kształtu – wycinek walca



Rys. 8. Składowa chropowatości i falistości

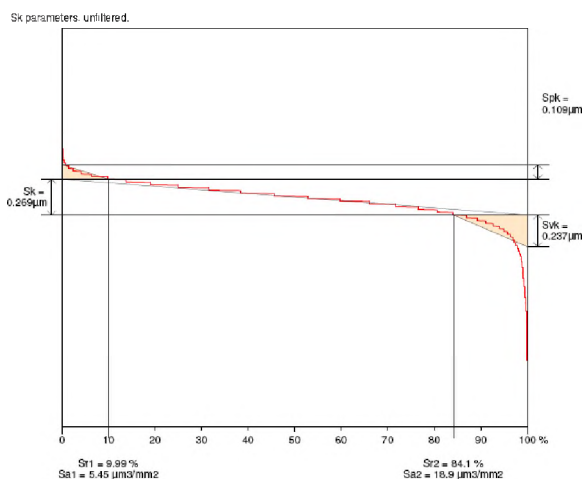
Po otrzymaniu chmury punktów będącej jedynie składową chropowatości i falistości (rys. 8) istnieje możliwość wykonania wirtualnych symulacji pozwalających na ocenę właściwości eksploatacyjnych analizowanych warstw wierzchnich. Dla przykładu możliwe jest przeprowadzenie symulowanego zużycia powierzchni, odcinając płaszczyznę równoległą do średniokwadratowej części chmury punktów o określonych współrzędnych powyżej określonego poziomu. Analogicznie można symulować zmniejszenie objętości kieszeni olejowych (odpowiedzialnych za właściwe smarowanie współpracujących powierzchni), odcinając część chmury punktów o określonych współrzędnych poniżej określonego poziomu. Taki sposób symulowania zużycia powierzchni z uwzględnieniem aspektu zmniejszenia zdolności smarowania pozwala na opracowanie modelu zużycia powierzchni bardzo bliski procesowi fizycznemu. Rys. 9 przedstawia powierzchnię po wykonanej symulacji procesu zużycia i zmniejszeniu objętości kieszeni olejowych.



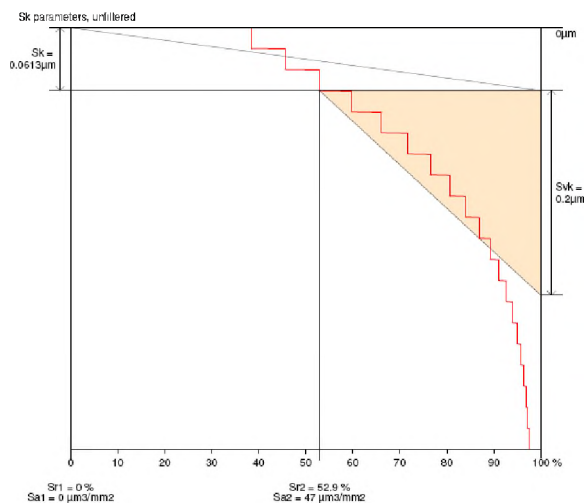
**Rys. 9. Powierzchnia po wykonaniu symulacji procesu zużycia**

Analiza numeryczna przeprowadzanego procesu symulowanego zużywania nie ogranicza się jedynie do wizualizacji otrzymanych powierzchni. Możliwe staje się również wyznaczanie wielu szczegółowych parametrów chropowatości i stereometrii pozwalających na wnikliwą ocenę zmieniających się właściwości analizowanych powierzchni. Dla przykładu można przedstawić tu wykresy krzywych nośności (Abbotta – Firestona) powierzchni przed zużyciem (rys. 10) oraz po symulowaniu zużyciu (rys. 11). Widoczna jest wyraźna zmiana kształtu krzywej. Dla powierzchni przed zużyciem (rys. 10) nośność 10% występuje na głębokości 0,1µm od maksymalnego szczytu. Dla powierzchni po symulowanym zużywanu na poziomie szczytów nośność powierzchni wynosi ponad 30%. Dzięki możliwości teoretycznego symulowania, można opracować optymalną nośność powierzchni, co jest niezwykle istotne w zagadnieniach tribologicznych.





Rys. 10. Krzywa udziału nośnego powierzchni przed symulacją zużycia

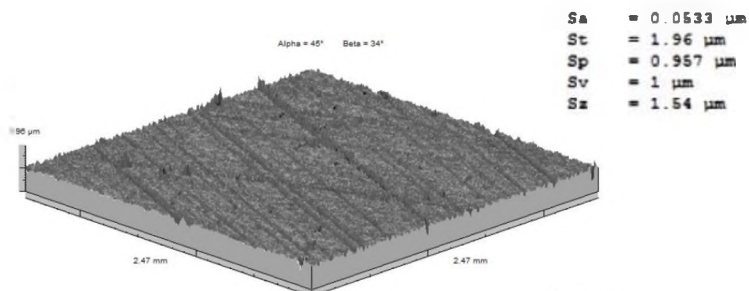


Rys. 11. Krzywa udziału nośnego powierzchni po symulacji zużycia

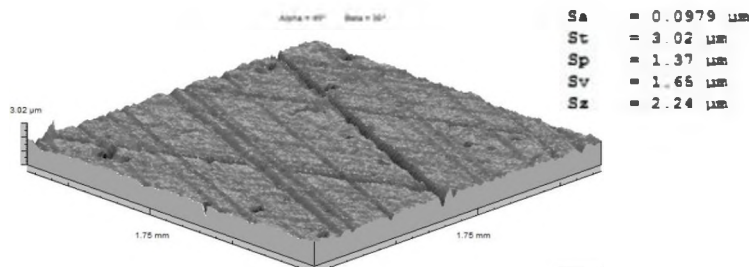
Otrzymana po symulowaniu zużycia powierzchnia może zostać poddana filtracji w celu oddzielenia składowej falistości od składowej chropowatości. Możliwe jest zastosowanie kilku rodzajów filtracji: Gaussa, Spline, Zgrubny Gauss oraz kilku rozmiarów powierzchni elementarnej, zarówno symetrycznej (kształt kwadratowy) jak i niesymetrycznej (kształt prostokątny – zapewnia prawidłowe odfiltrowanie falistości od chropowatości w przypadku powierzchni o silnie kierunkowej obróbce, np. toczenie czy nagniatanie). Właściwe dobranie wielko-

ści filtra jest kluczowe dla poprawnej analizy i poprawnego wyznaczenia parametrów chropowatości. Symulacja komputerowa pozwala na określenie optymalnej filtracji dla danej powierzchni, gdyż stosowane obecnie normy jedynie zalecają sposób filtracji. Przy niewłaściwie dobranym filtrze (za duża wartość odcięcia) część składowych falistości zostaje brana pod uwagę przy wyliczaniu chropowatości – zostaje ona zawyżona. Istnieje też możliwość zaniżenia wartości chropowatości, kiedy to filtr o za małej wartości odcięcia oprócz całej składowej falistości redukuje składową chropowatości. Częstym błędem popełnianym szczególnie w pomiarach przemysłowych jest zakładanie pewnych wartości parametrów chropowatości lub topografii powierzchni bez podania rodzaju i wielkości parametrów do ich wyliczenia, czyli rodzaju i wielkości filtra. W takich sytuacjach wielokrotnie spotyka się wykonywanie pomiarów przy takim doborze filtracji, aby wynik spełniał założenia.

O znaczeniu przeprowadzenia symulacji komputerowej na tym etapie analiz można się przekonać na przykładzie rys.12 i 13. Przedstawiają one różnicę wartości parametrów chropowatości przy analizie symulacyjnej chropowatości wykonanej dwoma różnymi wielkościami filtrów separujących chropowatość od falistości – 0,08 mm (rys. 12) oraz 0,8 mm (rys. 13). Różnica wielkości podstawowego parametru topografii powierzchni pomiędzy tymi dwoma wielkościami filtra wynosi aż 83%.



**Rys. 12. Powierzchnia po symulacji filtracji – filtr Gauss 0,08 mm**



**Rys. 13. Powierzchnia po symulacji filtracji – filtr Gauss 0,8 mm**

Przedstawione powyżej modelowanie i analizy symulacyjne mogą być przeprowadzone bezpośrednio na profilografometrze sprzęgniętym ze skomputeryzowanym stanowiskiem przeznaczonym do analizy wyników pomiaru. Można jednak analogiczną analizę wykonać na dowolnym komputerze wyposażonym w niezbędne oprogramowanie. W ITMiAP Politechniki Częstochowskiej w roku 2008 zostało uruchomione laboratorium wyposażone w pięć stanowisk komputerowych umożliwiających przeprowadzenie tego typu analiz. Każde z nich umożliwia niezależne modelowanie oraz symulację w oparciu o oprogramowanie zainstalowane na serwerze. Punkty pomiarowe pozyskiwane z urządzeń pomiarowych znajdujących się w laboratorium Instytutu mogą zostać przeniesione (przesyłane siecią lub przenoszone na nośnikach elektronicznych) do stanowisk komputerowych. Istnieje także możliwość wygenerowania punktów stanowiących odzwierciedlenie powierzchni teoretycznych i ich obróbka analogiczna do tych, uzyskanych z urządzeń.

## Podsumowanie

Współczesne prace badawcze poświęcone problematyce topografii powierzchni coraz częściej opierają się na wykorzystaniu oprogramowań komputerowych pozwalających na geometryczne modelowanie kształtu stereometrii oraz wykonanie szeregu analiz symulacyjnych. Dzięki takiej możliwości zmniejsza się czas (a tym samym koszt) prowadzonych badań. Niezwykle istotna jest także możliwość szybkiego wykonania analiz symulacyjnych realizowanych przy różnych parametrach wejściowych. Ich właściwy dobór jest kluczowy do prawidłowej oceny cech topografii powierzchni.

Przedstawione w opracowaniu praktyczne zastosowanie skomputeryzowanych stanowisk pomiarowych do analizy wybranych parametrów stereometrii pozwala na znaczne zwiększenie ilości i podniesienie przejrzystości informacji możliwych do uzyskania w wyniku przeprowadzonych pomiarów. Pozwala to na znaczne zwiększenie możliwych do uzyskania informacji dotyczących analizowanych procesów obróbki. Możliwe staje się prognozowanie parametrów eksploatacyjnych uzyskiwanych warstw wierzchnich. Warunkiem przeprowadzenia wszystkich przedstawionych w opracowaniu analiz jest zastosowanie właściwie dobranej do analizowanej problematyki współczesnej techniki obliczeniowej i oprogramowania umożliwiającego poprawne przeprowadzenie cyfrowej obróbki otrzymanych rezultatów.

## Bibliografia

Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni, zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. WNT, Warszawa 2008.

- Oczoś K, Liubimov V.: *Struktura geometryczna powierzchni*, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
- Wieczorowski M., Cellary A., Chajda J.: *Przewodnik po pomiarach nierówności powierzchni, czyli o chropowatości i nie tylko*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2003.
- Zaborski A., Tubielewicz K.: *Zastosowanie komputera do analizy chropowatości powierzchni*. Materiały VII Szkoły komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Jurata 12–16 maja 2003, s. 343–350.
- Zaborski A., Tubielewicz K.: *Wykorzystanie systemów pomiarowych do analizy stereometrii warstw wierzchnich i błędów kształtów przedmiotów*. Materiały XIII Międzynarodowej Szkoły komputerowego wspomaganie projektowania, wytwarzania i eksploatacji, Jurata 11–15 maja 2009, s. 415–422.