

# Pomiar geometrii i ocena powierzchni narzędzi za pomocą mikroskopu różnicowania ogniskowego

## Geometry measurement and tool surface evaluation using a focus-variation microscope

DARIUSZ BRZOWSKI  
MICHAŁ WIECZOROWSKI  
BARTOSZ GAPIŃSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.11.167>

English version available on: [www.mechanik.media.pl](http://www.mechanik.media.pl)

Zaprezentowano możliwości pomiaru cech geometrycznych narzędzi skrawających i chropowatości powierzchni za pomocą mikroskopu różnicowania ogniskowego. Technologia ta wspiera producentów w rozwoju nowych produktów oraz w kontroli stanu zużycia krawędzi skrawającej i geometrii. Wszystkie pomiary, niezależnie od miejsca aplikacji, cechują się wysoką rozdzielczością, powtarzalnością i identyfikowalnością. Co więcej, mikroskopia różnicowania ogniskowego pozwala mierzyć nierówności powierzchni i wykruszenia ostrzy, co daje szerokie możliwości przeprowadzania analizy numerycznej jakości krawędzi. Technologia gwarantuje także stabilność uzyskiwanych wyników pomiarów nawet w warunkach produkcyjnych.  
**SŁOWA KLUCZOWE:** narzędzia skrawające, różnicowanie ogniskowe, pomiary wyszczerbień, chropowatość narzędzia

*Possibility of measuring the geometrical features of cutting tools and surface roughness by means of a focus-variation microscope is presented. This technology supports manufacturers in the development of new products and in the quality control of cutting edges and geometry. All measurements, regardless of the application site, are characterized by high resolution, repeatability and traceability. Furthermore, focus-variation microscopy allows measurement of surface irregularities and edge chipping, giving a wide range of possibilities for numerical analysis of edge quality. The technology also provides the stability of measurement results obtained even under production conditions.*

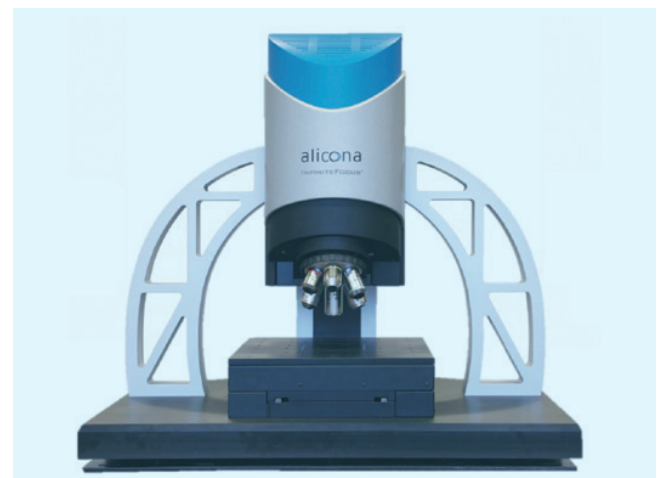
**KEYWORDS:** cutting tools, focus-variation, chipping measurement, tool roughness

Różnicowanie ogniskowe jest skaningową obrazową techniką pomiarową służącą do pomiaru mikrokształtu i nierówności powierzchni [1–4]. Łączy ona funkcjonalność pomiaru chropowatości powierzchni z pomiarem współrzędnościowym w skali mikro. Pomiary techniką różnicowania ogniskowego są powtarzalne, identyfikowalne i pozwalają uzyskać wyniki z rozdzielczością pionową od 10 nm. Dzięki zastosowaniu tej techniki możliwa jest analiza powierzchni o bardzo różnej refleksyjności i takich, na których występują pochylenia zboczny nawet do 87°.

### Technika różnicowania ogniskowego

Technologia pomiaru za pomocą różnicowania ogniskowego znalazła odbicie w normie EN ISO 25178. Łączy ona małą głębokość ogniskowania systemu optycznego i skaning obrazowy w kierunku pionowym, by uzyskać

kolorowy obraz powierzchni [5]. Wygląd przykładowego mikroskopu, na którym badano narzędzia skrawające, przedstawiono na rys. 1.

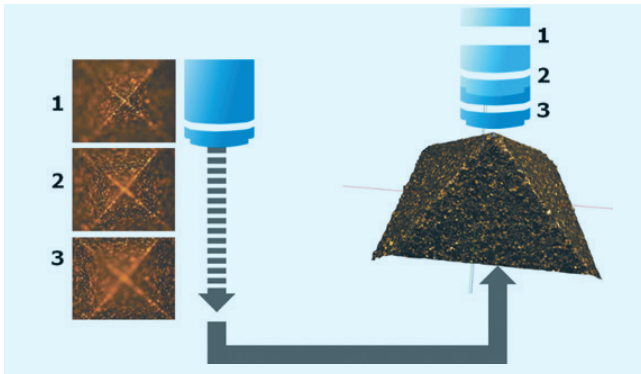


Rys. 1. Mikroskop różnicowania ogniskowego (Alicona IF G5)

Zasadniczym elementem systemu pomiarowego jest precyzyjna optyka, obejmująca różne układy soczewek, w które mogą być wyposażone obiektywy pomiarowe, co umożliwia pomiary z różną rozdzielczością. Dzięki zwierciadłu półprzepuszczalnemu (funkcjonującemu jako układ dzielący światło) wiązka wychodząca ze źródła kierowana jest na ścieżkę optyczną systemu i ogniskowana przez obiektyw na mierzonym przedmiocie (próbce). Zależnie od topografii tej próbki światło – po dotarciu do przedmiotu – odbija się od jego powierzchni w różnych kierunkach. Jeśli układ struktury geometrycznej powierzchni wykazuje właściwości dyfuzyjne, to światło jest rozpraszane równomiernie we wszystkich kierunkach. Natomiast w przypadku odbicia zwierciadlanego wiązka odbija się w jednym ściśle określonym kierunku.

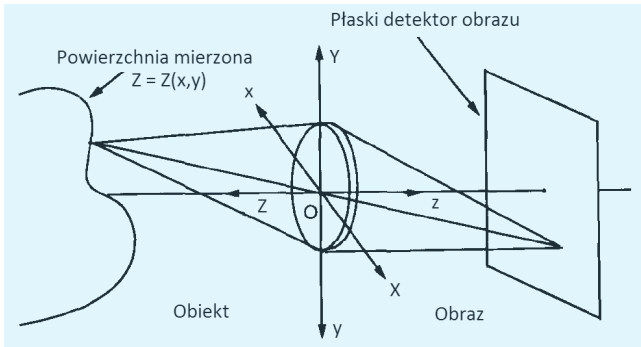
Wszystkie promienie odbite od próbki i docierające do obiektywu są zbierane przez sensor światłoczuły za układem dzielącym światło. Z uwagi na małą głębokość pola widzenia tylko niewielki obszar przestrzeni jest ostry. Aby przeprowadzić całkowitą detekcję powierzchni z pełną głębią ostrości, precyzyjny układ optyczny przemieszcza się względem stolika (przemieszczenie wykonuje jeden z tych elementów) wzdłuż osi pionowej (zgodnej z osią optyczną). W czasie tego ruchu w sposób ciągły zbierane są ostre obrazy reprezentujące nierówności i geometrię mierzonej powierzchni [6]. Oznacza to, że każdy region obiektu został odtworzony z obrazu o odpowiedniej ostrości i rozdzielczości. Zasadę funkcjonowania takiego zbierania danych pokazano na rys. 2.

\* Mgr inż. Dariusz Brzozowski (db@ita-polska.com.pl) – ITA sp. z o.o., sp.k.; prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski (michal.wieczorowski@put.poznan.pl), dr inż. Bartosz Gapiński (bartosz.gapinski@put.poznan.pl) – Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych Politechniki Poznańskiej



Rys. 2. Zasada ciągłego zbierania danych z powierzchni

Zgodnie z zasadami i teorią optyki geometrycznej występuje bezpośredni związek pomiędzy kształtem obiektu rzeczywistego i kształtem jego powierzchni ogniskowania obrazu, co umożliwia uzyskanie kształtu powierzchni przedmiotu (lub jego nierówności) z FIS (*focused image surface*), czyli powierzchni ogniskowania obrazu utworzonej przez zbiór punktów, dla których obiektyw kamery pozwala uzyskać skupienie wiązki świetlnej. Schematycznie przedstawiono to na rys. 3.

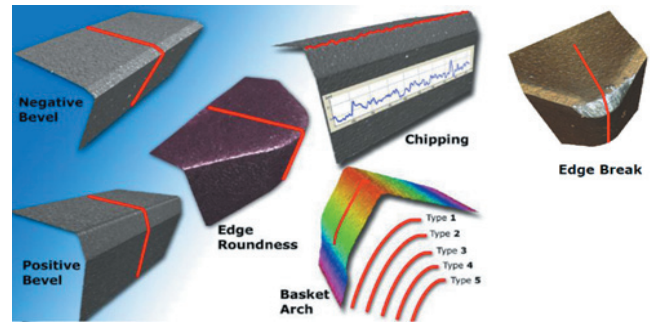


Rys. 3. Akwizycja obrazu w technice różnicowania ogniskowego

Metoda uzyskiwania obrazu za pomocą różnicowania ogniskowego bywa nazywana metodą uzyskiwania kształtu z ogniska (*shape from focus – SFF*). Specjalny algorytm obliczeniowy przetwarza dane zebrane przez sensor na trójwymiarową informację i rzeczywisty kolor obiektu z pełną głębią pola widzenia. Osiąga się to dzięki analizie zmian ogniskowania wzdłuż osi pionowej. W połączeniu z technologią Real3D możliwe jest łączenie pomiarów z pojedynczych ujęć w jeden pełny zbiór danych 3D.

### Pomiary geometrii narzędzi

Pomiary cech i mikrogeometrii powierzchni realizowane za pomocą technologii różnicowania ogniskowego stwarzają nowe możliwości badawcze i pozwalają na nowe spojrzenie na problemy charakteryzacji krawędzi skrawającej, niemożliwe dotychczas i nieosiągalne w takim zakresie. Przy wytwarzaniu narzędzi bardzo istotną jest kontrola jakości ukierunkowana na pomiary promieni, wykruszeń, zużycia i mikropęknięć. Istotną korzyścią z pomiarów techniką różnicowania ogniskowego jest zwłaszcza możliwość realizacji identyfikowalnych pomiarów geometrii i chropowatości różnych krawędzi. Do najważniejszych zagadnień, z jakimi mierzą się producenci narzędzi skrawających, należą efekty uzyskiwane na powierzchni przedmiotu obrabianego przy konkretnym wykonaniu i kształcie krawędzi skrawającej oraz promieniu jej zaokrąglenia. Przekroje, w których dokonywane są pomiary promienia i kształtu pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Profile, w których dokonywane są pomiary cech na krawędzi

Krawędzie można analizować bez względu na typ, wielkość, materiał czy sposób realizacji obróbki wykończeniowej powierzchni narzędzia. Mikroskop różnicowania ogniskowego umożliwia realizację zadań pomiarowych związanych z promieniami zaokrąglenia krawędzi skrawających większych od  $1 \mu\text{m}$  oraz kątów związanych z procesem obróbki i układem narzędzia. Technologia gwarantuje także stabilność uzyskiwanych wyników pomiarów nawet w warunkach produkcyjnych (w bezpośrednim otoczeniu maszyn technologicznych). W takiej sytuacji znacząco maleje pętla sprzężenia zwrotnego, a informacja odnośnie do poprawności produkcji bądź zakłóceń dociera do systemu wytwórczego w ciągu pojedynczych minut.

### Pomiar chropowatości powierzchni narzędzi

Zazwyczaj do pomiaru nierówności powierzchni stosowany jest specjalny system pomiarowy umożliwiający identyfikację topografii w skali mikro. Do tego pomiary geometrii w skali makro realizowane są za pomocą współrzędnościowej maszyny pomiarowej lub innego urządzenia pracującego w tej technice (np. konturografu). Mikroskop różnicowania ogniskowego pozwala na połączenie tych dwóch urządzeń i wykorzystanie pełnej funkcjonalności operacyjnej w jednym systemie pomiarowym.

Na rys. 5 pokazano przykładowy obraz chropowatości profilu z parametrami 2D.



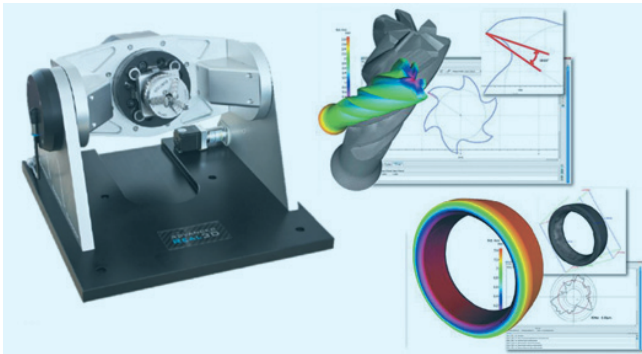
Rys. 5. Wykres profilu chropowatości uzyskany metodą różnicowania ogniskowego

W efekcie takiego połączenia sama kontrola jakości staje się łatwiejsza, bardziej efektywna i wydajna, a także wszechstronna pod względem możliwości generowania raportów pomiarowych zawierających pełne wyniki. Nierówności można analizować w układzie 2D, ale także w układzie trójwymiarowym zgodnie z normami ISO z serii 25178.

### Przestrzenne pomiary narzędzi

Jako wyposażenie dodatkowe do stanowiska pomiarowego wykorzystującego technikę różnicowania ogniskowego można dołożyć jednostkę obrotową. Pozwala to na odtworzenie pełnej geometrii trójwymiarowej narzędzi obrotowych – zwłaszcza frezów i wiertel – jak również nierówności na powierzchni natarcia i przyłożenia.

Przykładową realizację takiego procesu pokazano na rys. 6.

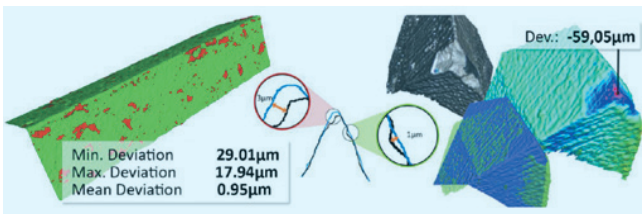


Rys. 6. Jednostka obrotowa umożliwia pełne skanowanie 3D geometrii narzędzi i elementów obrotowych

W ten sposób można analizować wpływ chropowatości powierzchni na proces wytwarzania, przedmiot, a także szerzej – na przepływ wióra i jakość wyrobów. Interesującą opcją oprogramowania jest możliwość porównania powierzchni nominalnej i zmierzonej. W tym celu wczytywany jest plik CAD z danymi konstrukcyjnymi narzędzia skrawającego, a na niego nakładana jest powierzchnia rzeczywista. Z takiego porównania powstaje kolorowa mapa odchyłek od modelu CAD. Inną możliwością aplikacji takiej technologii jest realizacja procesu inżynierii odwrotnej wobec przedmiotów o nieznanej lub niepełnej dokumentacji odnośnie do geometrii.

### Pomiar zużycia

Typowym i powszechnym problemem przy obróbce narzędziami skrawającymi jest ich zużycie i stan po określonym czasie pracy [7]. Jak pokazano na rys. 7, możliwe jest przeskanowanie narzędzia (obiektu) przed obróbką (nowego) i po jej zakończeniu (zużytego).



Rys. 7. Rekonstrukcja obrazu 3D za pomocą techniki różnicowania ogniskowego

Specjalny moduł oprogramowania opisywanego mikroskopu różnicowania ogniskowego porównuje te dwa obrazy i daje informację o wielkości zużycia oraz jego umiejscowieniu na poszczególnych elementach narzędzia skrawającego. Również tutaj efektem pracy jest kolorowa mapa odchyłek i wartości odchyłek w poszczególnych punktach pomiarowych. Przykładową analizę pokazano na rys. 8.

Analiza zużycia jest jednocześnie punktem wyjścia do modyfikacji cech konstrukcyjnych narzędzi skrawających lub procesów ich wytwarzania w taki sposób, aby przedłużyć ich trwałość z uwzględnieniem kosztów.



Rys. 8. Porównanie fragmentu narzędzia nowego i zużytego

### Wnioski

Mikroskop różnicowania ogniskowego ma zastosowanie w jednej z najbardziej interesujących technik wszechstronnej analizy danych uzyskanych z powierzchni pomiarowych w skali nano, mikro i makro. Można go zastosować w wielu gałęziach nauki oraz przemysłu [8]. Korzyści, jakie daje ta metoda, dotyczą również tego, że przy różnicowaniu ogniskowym odwzorowanie lokalnych zboczy nie zależy od apertury numerycznej, co pozwala odtwarzać nawet bardzo strome obszary mierzonych przedmiotów. Co więcej, opisywaną technikę można realizować przy wielu różnych sposobach oświetlenia, np. przy świetle padającym przez obiektyw albo z pierścienia wokół obiektywu składającego się z kilkudziesięciu segmentów, z których dowolną liczbę i ułożenie można włączyć. Dodatkową opcją ułatwiającą pracę przy różnym oświetleniu jest polaryzator, który poprawia sytuację, gdy występują silne refleksy świetlne od bardzo gładkich powierzchni (zwłaszcza polerowanych powierzchni metalowych).

### LITERATURA

1. Danzi R., Helml F., Scherer S. „Automatic measurement of calibration standards with arrays of hemi-spherical calottes”. *Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Huddersfield, 2007, s. 41–46.
2. Leach R. „Optical Measurement of Surface Topography” ISBN: 978-3-642-12011-4 (Print) 978-3-642-12012-1 (Online).
3. Wieczorowski M. „Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy”. Szczecin: ZAPOL, 2013.
4. Wieczorowski M. „Kierunki rozwoju metrologii nierówności powierzchni”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 467–479/600.
5. Subbarao M., Choi T., „Accurate recovery of three-dimensional shape from image focus”. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 17 (1995): s. 266–274.
6. Danzi R., Helml F., Scherer S. „Focus variation – a robust technology for high resolution optical 3D surface metrology”. *Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering*. 57, 3 (2011): 245–256. DOI:10.5545/sv-jme.2010.175.
7. Danzi R., Helml F. „Geometry and wear measurement of cutting tools”. *Int. Conf. on High Performance Cutting*. Dublin. 1 (2008): s. 111–118.
8. Grossmann D., Hofer A., Brzozowski D., Wieczorowski M., Ziętkiewicz P. „Quality Assurance of Turbine Blades. Optical 3D metrology in the aerospace industry”. DOI: 10.1714/mechanik.2015.12.561. ■

4 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31

**KWARTALNA** **ROCZNA** **PÓŁROCZNA**

**PAMIĘTAJ**  
O ZAMÓWIENIU  
PRENUMERATY  
NA 2019 r.!

## CZYTAJ **mechanika!**

TU ZNAJDZIESZ INFORMACJE O:

- targach, konferencjach i wydarzeniach branżowych
- nowościach z dziedziny metrologii i materiałoznawstwa oraz technik CAD/CAM/CAE
- najnowszych rozwiązaniach z zakresu konstrukcji i eksploatacji maszyn i urządzeń oraz obróbki materiałów
- ofercie wiodących producentów maszyn, narzędzi i oprogramowania