

Dokładność procesu odtwarzania geometrii ostrzy skrawających w optycznych systemach pomiarowych

The process accuracy of reconstruction of cutting edges geometry in the optical measuring systems

JAN BUREK
BARBARA JAMUŁA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.143>

Przedstawiono analizę porównawczą dokładności dwóch optycznych systemów pomiarowych umożliwiających odtworzenie geometrii ostrzy narzędzia skrawającego. Do digitalizacji geometrii ostrzy narzędzia wykorzystano: mikroskop różnicowania ogniskowego Infinite Focus G4 firmy Alicona i skaner z niebieskim światłem strukturalnym Comet L3D 2 firmy Zeiss. **SŁOWA KLUCZOWE:** pomiary optyczne, narzędzia skrawające, dokładność pomiarów

The comparative analysis of two different optical measuring systems enabling the reconstruction of the cutting edges geometry is presented. For research uses: focus-variation microscope Alicona G4 and professional 3D scanner Zeiss Comet L3D 2.

KEYWORDS: optical measurements, cutting tools, measurement accuracy

Pomiary optyczne oferują znacznie większą elastyczność niż pomiary stykowe i pozwalają na zbieranie oraz przetwarzanie dużych zbiorów punktów w ciągu kilku sekund, w trakcie jednego pomiaru [4]. W zależności od wielkości analizowanego elementu urządzenia optyczne są przeznaczone do pomiarów w skali mikro lub makro i opisują obiekt metodą pomiaru współrzędnych punktów [5]. Bazują na analizie obrazu [3,6], a kluczową zaletą takich systemów jest szybkość pomiaru. Dlatego wiodący producenci narzędzi skrawających coraz częściej posługują się bezstykowymi urządzeniami pomiarowymi.

Pomiar geometrii narzędzia skrawającego z zastosowaniem systemów optycznych jest możliwy dzięki wykorzystaniu – w zależności od rodzaju urządzenia pomiarowego – specjalnych metod [1]. Trójwymiarowy pomiar pozwala na weryfikację właściwości skrawanych narzędzi w zależności od jego stanu oraz stopnia zużycia. Głównymi elementami analiz są geometrie ostrzy skrawających, które mają znaczący wpływ na proces skrawania, jakość powierzchni przedmiotów obrabianych oraz żywotność narzędzia [2]. Szybkie i precyzyjne uzyskiwanie wyników z użyciem optycznych urządzeń pomiarowych pozwala nadzorować geometrię narzędzia skrawającego zarówno w trakcie procesu wytwarzania, jak i po okresie pracy.

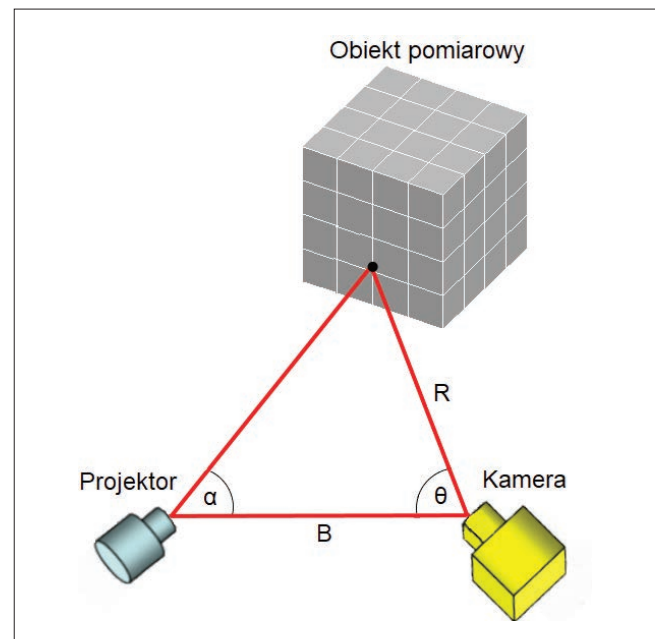
Obecnie na rynku jest wiele urządzeń do bezdotykowych pomiarów przestrzennych. Charakteryzują się one zróżnicowanymi parametrami technicznymi oraz przeznaczeniem. W przypadku niektórych optycznych systemów pomiarowych nie jest możliwe uzyskiwanie trójwymiarowej geometrii ostrzy skrawających z wysoką dokładnością i powtarzalnością. Szczególnie trudnym zadaniem jest pomiar krawędzi bocznych ostrza narzędzia skrawającego oraz kątów między powierzchniami bocznymi mniejszymi niż 30° . Stąd też poszukuje się skutecznego sposobu do-

boru optycznego systemu monitorowania wytwarzania narzędzi skrawających i oceny stanu ich zużycia.

Układy pomiarowe

W badaniach wykorzystano dwa kompletne rozwiązania przeznaczone do pomiarów geometrii narzędzi: skaner niebieskiego światła strukturalnego Comet L3D 2 firmy Zeiss (rozdzielczość detektora 2448×2050 pkt, pole pomiarowe $74 \times 62 \times 45$ mm) oraz mikroskop różnicowania ogniskowego Infinite Focus G4 firmy Alicona (powiększenie obiektywu $2,5\times$, rozdzielczość 1624×1232 pkt, pole widzenia $5,7 \times 4,3$ mm).

Skaner Comet L3D 2 charakteryzuje się układem jednej kamery oraz jednego projektora, dzięki czemu w prosty sposób można pozyskiwać dane o mierzonym obiekcie. Innowacyjna technologia w skanerze, zapewniająca wysoką intensywność i szybki sensor światła, gwarantuje elastyczność wykonywania pomiarów w różnych miejscach. Otrzymanie informacji o położeniu i kształcie mierzonego obiektu z wykorzystaniem strukturalnych skanerów światła opiera się na zasadzie triangulacji trygonometrycznej. Triangulacja polega na obliczeniu miejsca przecięcia się płaszczyzny i półprostej w przestrzeni (rys. 1).



Rys. 1. Schemat metody triangulacyjnej stosowanej w systemach optycznych wykorzystywanych do uzyskiwania obrazów 3D

Odtworzenie kształtu geometrycznego całej powierzchni skanowanego elementu jest możliwe dzięki projekcji charakterystycznego wzoru tej powierzchni przy niewielkiej liczbie akwizycji i bez konieczności względnego przemieszczania urządzenia i obiektu pomiarowego.

* Dr hab. inż. Jan Burek prof. PRz (jburek@prz.edu.pl), mgr inż. Barbara Jamuła (b.jamula@prz.edu.pl) – Katedra Technik Wytwarzania i Automatyki, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej

Odległość pomiędzy kamerą a powierzchnią mierzonego przedmiotu można określić zależnością:

$$R = B \cdot \frac{\sin \theta}{\sin (\alpha + \theta)}$$

gdzie: R – odległość pomiędzy kamerą a powierzchnią mierzonego przedmiotu; B – odległość pomiędzy kamerą a projektorem; α – kąt pomiędzy wiązką światła emitowaną przez projektor a odcinkiem łączącym projektor z kamerą, θ – kąt pomiędzy wiązką światła docierającą do kamery a odcinkiem łączącym projektor z kamerą.

Prosta kalibracja urządzenia w miejscu wykonywania pomiarów pozwala szybko dostosować pole pomiarowe poprzez wymianę obiektywów. Stabilny statyw, na którym jest mocowana głowica pomiarowa wyposażona w projektor oraz kamerę, daje możliwość regulacji wysokości oraz odległości do mierzonego przedmiotu.

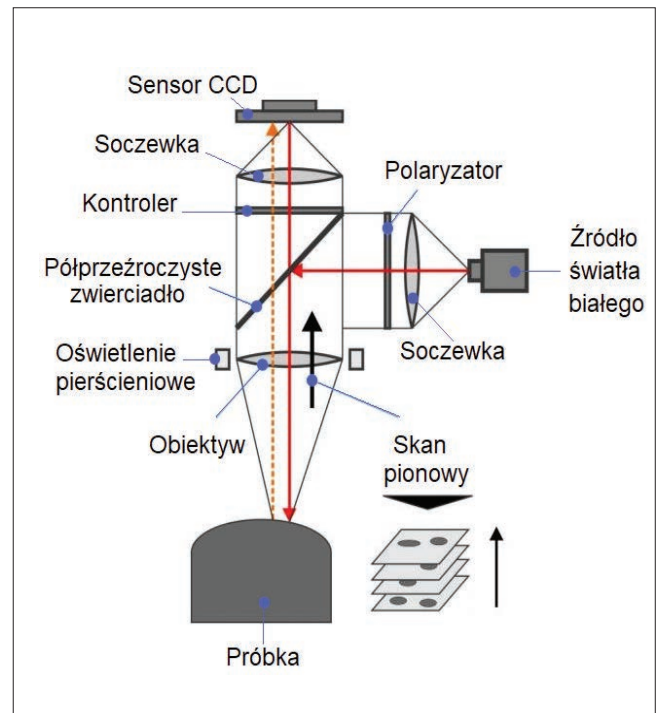
Istotnym elementem w tego typu skanerach jest stół obrotowy, na którym mocuje się obiekt przeznaczony do pomiaru i automatycznie się go ustawiania. Trójwymiarowe obrazy odwzorowanych powierzchni uzyskuje się z użyciem zaawansowanego oprogramowania Zeiss colin3D. Program ten zarówno zbiera i przetwarza dane otrzymane na podstawie pomiarów, jak i umożliwia porównywanie pomiarów z modelami teoretycznymi oraz generuje raporty.

Płaszczyzna utworzona przez układy prążków światła strukturalnego wyświetlanych przez projektor i rzutowanych na mierzoną powierzchnię przecina się z półprostą wychodzącą ze środka piksela matrycy kamery. Na podstawie położenia projektora względem kamery oraz parametrów obiektywów tych urządzeń można odtworzyć równania półprostych i płaszczyzn odpowiadających punktom obrazu. Wynikiem pojedynczego pomiaru jest chmura punktów, których liczba zależy od rozdzielczości kamery.

Optyczny system Infinite Focus firmy Alicona służy do wykonywania pomiarów w skali mikro i makro. Kluczowym elementem tej aparatury jest precyzyjna optyka z różnymi układami soczewek, które mogą być wyposażone w obiektywy pomiarowe do wykonywania pomiarów z różną rozdzielczością.

System wykorzystuje niezależną i innowacyjną technologię różnicowania ogniskowego (*focus variation*) (rys. 2). Łączy ona w sobie niewielką głębię ostrości ze skanowaniem w osi Z (EN ISO 25178). Obiekt pomiarowy oświetla się modulowanym światłem białym. Oświetlenie współosiowe osiąga się, kierując światło z optyki i ogniskując je poprzez obiektyw na analizowanym obiekcie (próbce) przy pomocy półprzezroczystego zwierciadła. Po dotarciu do obiektu światło odbija się od jego powierzchni w różnych kierunkach, a następnie jest rzutowane za pomocą precyzyjnej optyki na czujnik cyfrowy.

Ze względu na małą głębokość ogniskowania tylko mały fragment obiektu ma ostry obraz (w ognisku) i tylko ta część obrazu jest wykorzystywana do dalszego przetwarzania. Pomiar kształtu uzyskuje się poprzez pionowe skanowanie powierzchni, czyli zmianę odległości pomiędzy obiektywem a detektorem, oraz uzupełnienie obszarów, w których poprzednio nie uzyskano ogniskowania. Każdy obszar analizowanego obiektu ma obraz w ognisku w jednym położeniu pionowym mikroskopu. Dane z poszczególnych obrazów są przetwarzane na trójwymiarowy widok. Istnieje możliwość uzyskiwania obrazów przy różnych wartościach rozdzielczości lateralnie lub pionowo, w zależności od wybranego obiektywu.



Rys. 2. Schemat układu do pomiaru metodą różnicowania ogniskowego – *focus variation*

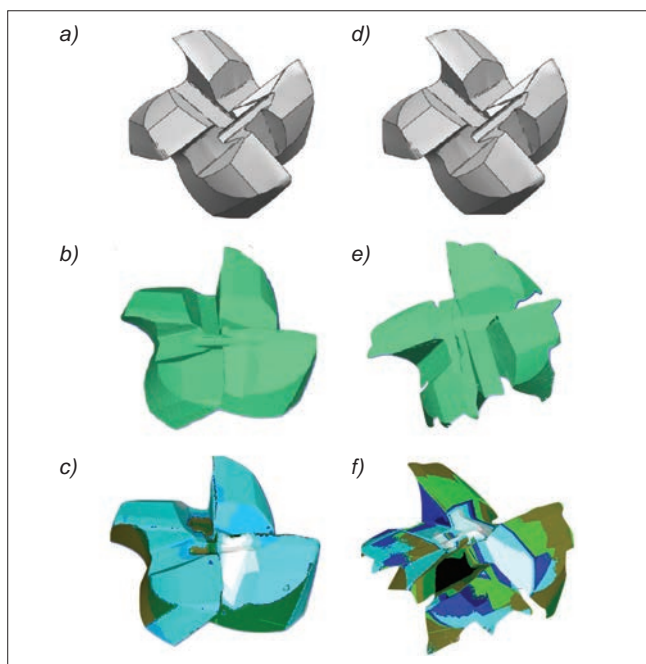
Pomiar geometrii ostrzy

Do badań wykorzystano czterostrzowy monolityczny frez trzpieniowy z węgla spiekane. Frez ten, na potrzeby optycznego systemu Infinite Focus, umieszczono w jednostce obrotowej pod kątem 45° . Powierzchnię zeskanowano z użyciem obiektywu o powiększeniu $2,5\times$. Dodatkowo, aby uzyskać wyniki bez dużych różnic jasności, zamontowano oświetlenie pierścieniowe z tarczą polaryzacyjną. Cyfrowe modele poddano dodatkowej obróbce danych. Usunięto szumy pomiarowe powstałe w wyniku działania czynników zewnętrznych.

Przy pomocy systemu optycznego Comet LED 2 otrzymano trójwymiarowe odwzorowane powierzchnie w ten sposób, że na stole obrotowym zamontowano frez i przy pomocy obiektywu o polu widzenia $118\times 98\times 60\text{ mm}^3$ przeprowadzono pomiary geometrii jego ostrzy. Kolejne pomiary wykonano obiektywem o mniejszym polu widzenia – $74\times 62\times 45\text{ mm}^3$. Ostatnie badania wykonano obiektywem o tym samym polu widzenia, jednak ponieważ frez miał błyszczące powierzchnie, pokryto go proszkiem zmniejszającym refleksyjność.

Trójwymiarowe powierzchnie frezu uzyskane z wykorzystaniem obu optycznych systemów pomiarowych pozwoliły na ocenę jakości odwzorowania geometrii ostrzy narzędzia skrawającego.

Aby określić dokładność pomiarów, na powierzchni nominalne zaprojektowanego frezu nakładano powierzchnie uzyskane na podstawie pomiarów. Proces weryfikacji dokładności odwzorowania powierzchni 3D przeprowadzono z użyciem oprogramowania Focus Inspection. Dopasowanie powierzchni nominalnych uzyskanych na etapie projektowania CAD oraz powierzchni odniesienia powstałych na podstawie pomiarów z użyciem skanera z niebieskim światłem strukturalnym oraz mikroskopu różnicowania ogniskowego zrealizowano metodą *best fit* z dokładnością do $0,001\text{ mm}$ (rys. 3).



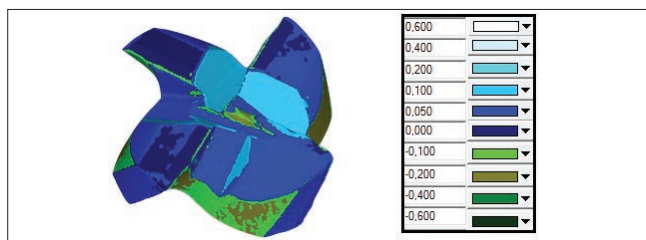
Rys. 3. Trójwymiarowe powierzchnie ostrzy frezu: a), d) powierzchnie nominalne, b) powierzchnie uzyskane z użyciem skanera Comet L3D 2 firmy ZEISS, c) mapa odchyłek uzyskana w wyniku porównania powierzchni a i b, e) powierzchnie uzyskane z użyciem mikroskopu Infinite Focus G4 firmy Alicona, f) mapa odchyłek uzyskana w wyniku porównania powierzchni d i e

Wyniki badań

Dokładność odwzorowania geometrii ostrzy frezu określono jako wartość różnicy pomiędzy wartością referencyjną (zaprojektowaną w systemie CAD) a otrzymaną w wyniku pomiarów urządzeniami optycznymi. Przykładowy rezultat zestawienia powierzchni nominalnych frezu z powierzchniami zmierzonymi przedstawiono na rys. 4 i 5.

TABLICA. Wyniki pomiarów

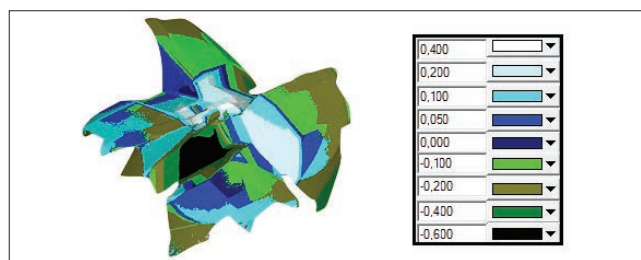
Urządzenie	Średnia odchyłka mm	Odchylenie standardowe mm
Alicona Infinite Focus G4	0,011	0,197
Zeiss Comet L3D 2	0,016	0,092



Rys. 4. Mapy odchyłek (w mm) dla pomiarów geometrii ostrzy frezu trzpieniowego z użyciem skanera Comet L3D 2 firmy Zeiss

Na podstawie analizy wyników uzyskanych z użyciem systemu Infinite Focus G4 firmy Alicona zauważono, że największe odchyłki wystąpiły w miejscach na rowkach na czole frezu, a najmniejsze – na głównej powierzchni przyłożenia. Wartości odchyłek na krawędziach skrawających wynosiły maksymalnie $-0,1$ mm. Niektóre fragmenty pomocniczej powierzchni przyłożenia nie zostały odwzorowane.

Z kolei, rozpatrując obrazy uzyskane za pomocą optycznego systemu pomiarowego Comet L3D 2 firmy Zeiss,



Rys. 5. Mapy odchyłek (w mm) dla pomiarów geometrii ostrzy frezu trzpieniowego z użyciem mikroskopu Infinite Focus G4 firmy Alicona

zauważono, że po zastosowaniu obiektywu o większym polu widzenia powierzchnie frezu, takie jak pomocnicza powierzchnia przyłożenia oraz powierzchnia natarcia, nie są odwzorowywane. Najmniejsze wartości odchyłek otrzymano z zastosowaniem obiektywu o polu widzenia $74 \times 62 \times 45$ mm³. W przypadku obrazów o tym polu widzenia stwierdzono, że największe wartości odchyłek otrzymano na krawędziach skrawających oraz na powierzchni natarcia. Wartości na powierzchniach natarcia wynoszą nawet do $0,2$ mm. Najmniejsze wartości odchyłek uzyskano na pomocniczej i głównej powierzchni przyłożenia – maksymalnie $0,005$ mm.

Wnioski

Główne zalety projekcji światła strukturalnego, z wykorzystaniem systemu Comet L3D 2, to jakość digitalizacji oraz czas przetwarzania danych. Dodatkowo w tego typu systemie można analizować zarówno geometrię ostrzy, jak i całą geometrię narzędzia skrawającego, a zwłaszcza jego część roboczą. Jednak w przypadku powierzchni na ostrzach narzędzia skrawającego dokładne odwzorowanie powierzchni natarcia oraz krawędzi skrawających staje się już problematyczne.

Technika różnicowania ogniskowego, wykorzystywana w optycznym systemie pomiarowym Infinite Focus firmy Alicona, umożliwia pomiary w skali mikro i makro. Odtworzenie strumych powierzchni narzędzia skrawającego nie stanowi najmniejszego problemu dla tego typu systemu optycznego. Powierzchnie narzędzia skrawającego, na których występują silne refleksy świetlne, można mierzyć dzięki zastosowaniu polaryzatora. W przypadku optycznego systemu wykorzystującego technikę światła strukturalnego jest to niemożliwe, czego skutkiem jest pokrywanie mierzonego obiektu proszkiem matującym. Dlatego układ pomiarowy Infinite Focus znalazł szerokie zastosowanie w przemyśle narzędziowym, m.in. do oceny zużycia ostrzy narzędzia skrawającego

LITERATURA

- Chen F., Brown G.M., Song M. „Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods”. *Optical Engineering*. 39, 1 (2000): s. 10.
- Danzl R., Helml F. „Geometry and wear measurement of cutting tools”. *Int. Conf. on High Perf. Cutting*. 1 (2008): s. 111–118.
- Huang Y., Qian X. „A dynamic sensing-and-modeling approach to three-dimensional point- and area-sensor integration”. *J.Manuf.Sci. Eng.* 129, 3 (2006): s. 623–635.
- Martínez S., Cuesta E., Barreiro J., Alvarez B. „Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control”. *Optics and Lasers in Engineering*. 48, 12 (grudzień 2010): s.1238–1246.
- Neuschaefer-Rube U., Wendt K., Ehrig W. „Optische Sensoren für die Koordinatenmesstechnik – Prinzipien und Prüfung”. *PTB-Mitteilungen*. 117 (2007): s. 380–389.
- Stadek J., Sitnik R., Kupiec M. „Ocena dokładności metody optycznej: koncepcja metody hybrydowej w pomiarach współrzędnościowych”. *Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją*. 1 (2004): s. 345–352.