

Wojciech KAPŁONEK¹, Czesław ŁUKIANOWICZ¹, Krzysztof NADOLNY¹, Robert TOMKOWSKI²¹ POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin² POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ MECHANICZNY, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNEJ, ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin**Zastosowanie konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej do oceny cech stereometrycznych powierzchni technicznych****Dr inż. Wojciech KAPŁONEK**

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2003 r.). W 2010 r. obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską. Od 2007 r. jest pracownikiem Zakładu Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji Politechniki Koszalińskiej, gdzie obecnie jest zatrudniony na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania naukowe skupiają się wokół zagadnień związanych z pomiarami struktury geometrycznej powierzchni metodami optycznymi oraz wykorzystaniem technik przetwarzania i analizy obrazu.

e-mail: wojciech.kaplonek@tu.koszalin.pl

**Dr inż. Krzysztof NADOLNY**

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2001 r.). W 2006 r. obronił z wyróżnieniem rozprawę doktorską. Od 2006 r. jest zatrudniony na stanowisku adiunkta w Katedrze Inżynierii Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Specjalizuje się w badaniach nad innowacyjnymi narzędziami ściernymi oraz nowymi odmianami kinematycznymi procesu szlifowania. Opublikował z tego zakresu ponad 40 artykułów i referatów naukowych.

e-mail: krzysztof.nadolny@tu.koszalin.pl

**Dr hab. inż. Czesław ŁUKIANOWICZ**

Autor jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej. Od 2001 r. kieruje Zakładem Metrologii i Jakości w Katedrze Inżynierii Produkcji. Specjalizuje się w pomiarach struktury geometrycznej powierzchni metodami stykowymi i optycznymi. Opublikował z tego zakresu ponad 100 artykułów i referatów naukowych.

e-mail: czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl

**Mgr inż. Robert TOMKOWSKI**

Autor jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (2005 r.). Od 2008 roku jest pracownikiem Laboratorium Mikro- i Nanoinżynierii w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej. W swojej działalności naukowej zajmuje się modelowaniem i symulacją procesów obróbki, zastosowaniami sztucznej inteligencji oraz metrologią powierzchni.

e-mail: robert.tomkowski@tu.koszalin.pl

**Streszczenie**

Coraz częściej we współczesnej metrologii wielkości geometrycznych stosowane są metody oraz urządzenia pierwotnie opracowane dla innych celów oraz wykorzystywane w odrębnych dziedzinach nauki i techniki. Od kilku lat obserwuje się wzrost zainteresowania metodami mikroskopii konfokalnej związanymi do tej pory głównie z naukami biologicznymi i medycznymi. Jedną ze współczesnych odmian tych klasycznych metod jest konfokalna laserowa mikroskopia skaningowa *CLSM* (ang. *Confocal Laser Scanning Microscopy*), opracowana pod koniec lat 80-tych XX w. W pracy przeanalizowano możliwość wykorzystania konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej do analizy cech stereometrycznych powierzchni technicznych. Przedstawiono podstawy tej metody oraz zaprezentowano wybrane wyniki badań doświadczalnych prowadzonych z zastosowaniem zaawansowanego mikroskopu laserowego LEXT OLS3100 firmy Olympus. Ocenie poddano wzorce kontrolne typu C (w odmianach C2 i C3), służące do wzorcownia i okresowego sprawdzania profilometrów stykowych oraz powierzchnię elastycznej foliowej taśmy mikrościernej typu IDLF (ang. *Imperial Diamond Lapping Film*). Pomiary dokonywane były dla wybranych ustawień mikroskopu w zależności od rodzaju badanego materiału. Zarejestrowane dane pomiarowe przetworzono i analizowano wykorzystując dedykowane oprogramowanie o nazwie LEXT-OLS 5.0 opracowane przez producenta urządzenia. Wyniki badań potwierdziły wysoką przydatność wykorzystanego urządzenia pomiarowego oraz jego duże możliwości oceny struktury geometrycznej różnego rodzaju powierzchni technicznych.

Słowa kluczowe: konfokalna laserowa mikroskopia skaningowa, topografia powierzchni, cechy stereometryczne, powierzchnie techniczne.

Confocal laser scanning microscopy used for assessment of stereometric features of engineering surfaces**Abstract**

In modern metrology of geometric quantities there are often used methods originally developed for other applications and used in separate fields of modern science and technology. For several years there has been increasing interest in methods of confocal microscopy related up to now to the medical and biological sciences. One of the modern variant of these classical methods is CLSM (*Confocal Laser Scanning Microscopy*). This method was developed in the late 80's. In the paper there are presented and discussed the possibilities

of using confocal laser scanning microscopy for the assessment of stereometric features of the engineering surfaces. The authors describe the basics of this method and present selected results of experimental investigations carried out using the advanced 3D laser micro-scope LEXT OLS3100 produced by Olympus (Fig. 1). The calibration specimens of C type (C2 and C3 variants) for calibrating the stylus profilometers (Figs. 2 and 3) and the surface of the microfinishing film of IDLF type (*Imperial Diamond Lapping Film*) (Fig. 4) were assessed. Measurements were taken for selected microscope settings, depending on the type of a material surface structure. The recorded measurement data were processed and analysed using dedicated LEXT OLS 5.0 software developed by the microscope manufacturer. The results of investigations confirmed the high usefulness of the measuring system for measurements of the geometrical structure of various types of engineering surfaces.

Keywords: confocal laser scanning microscopy, surface topography, stereometric features, engineering surfaces.

1. Wprowadzenie

Coraz częściej we współczesnej metrologii wielkości geometrycznych stosowane są metody oraz urządzenia pierwotnie opracowane dla innych celów oraz wykorzystywane w odrębnych dziedzinach nauki i techniki. Dobrym przykładem są tu metody bezinwazyjnego obrazowania wykorzystujące mikro- i nanotomografię komputerową [1-2], wywodzące się w prostej linii z klasycznej tomografii komputerowej [3-4] stosowanej w diagnostyce ciała ludzkiego. Zastosowanie tego typu klasycznych metod w nowoczesnej technice pomiarowej jest znacznie szersze. Od kilku lat obserwuje się duże zainteresowanie metodami mikroskopii konfokalnej [5] związanymi do tej pory głównie z naukami biologicznymi i medycznymi [6-7].

Jedną ze współczesnych odmian klasycznej mikroskopii konfokalnej jest konfokalna laserowa mikroskopia skaningowa *CLSM* (ang. *Confocal Laser Scanning Microscopy*) [8-9]. Technika ta stanowiąca łącznik pomiędzy szerokąkątą mikroskopią optyczną a mikroskopią elektronową posiada szereg zalet. Możemy do nich zaliczyć np. możliwość uzyskiwania obrazów warstwicznych dla kolejnych przekrojów i generowania na tej podstawie trójwymiarowych obrazów powierzchni badanego elementu, wysoką jakość

oraz dużą rozdzielczość uzyskiwanych danych obrazowych, stosunkowo krótki czas pomiaru.

Wymienione zalety pozwalają na zastosowanie tej techniki w szerokim zakresie pomiarów, dotyczących oceny struktury geometrycznej powierzchni (SGP) [10] m.in. precyzyjnie wykonanych elementów produkowanych we współczesnym przemyśle maszynowym, elektronicznym i optycznym. Wśród tych zastosowań można wymienić pomiary powierzchni podłoży krzemowych układów półprzewodnikowych, analizy struktur dyfrakcyjnych elementów optycznych DOE (ang. *Diffractive Optical Element*), pomiary miniaturowych urządzeń elektro-mechanicznych MEMS (ang. *Micro Electro-Mechanical Systems*) i opto-elektro-mechanicznych MOEMS (ang. *Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems*), rutynową kontrolę elementów przeznaczonych do montażu powierzchniowego SMT (ang. *Surface Mount Technology*).

W niniejszej pracy Autorzy rozważyli możliwość wykorzystania techniki konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej do analizy cech stereometrycznych powierzchni technicznych. W badaniach doświadczalnych wykorzystano zaawansowany mikroskop laserowy LEXT OLS3100 firmy Olympus [11]. Został on wraz z wybranymi wynikami badań doświadczalnych opisany w dalszej części pracy.

2. Podstawy konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej

Podstawy mikroskopii konfokalnej zostały opracowane przez M. Minsky'ego z Harvard University w połowie lat 50-tych XX w. [12]. Minsky chciał zobrazować sieć neuronową w barwionym preparacie tkanki mózgowej, aby obserwować zachodzące tam procesy biologiczne. Pod koniec 1961 r. [13], opatentował on pierwszy prototyp mikroskopu konfokalnego własnej konstrukcji. Do lat 70-tych XX w. idea Minsky'ego nie znalazła szerszego zainteresowania, głównie ze względu na brak odpowiedniego źródła światła o dużej intensywności potrzebnego do obrazowania oraz wydajnego komputera o dużej mocy obliczeniowej niezbędnej do przetwarzania danych obrazowych.

Pod koniec lat 60-tych XX w. M. D. Egger i M. Petran [14] opracowali wielowiązkowy mikroskop konfokalny (ang. *Multiple-Beam Confocal Microscope*), wykorzystujący wirujący dysk Nipkowa. Był on przeznaczony do analizy tkanki mózgowej. Prace w tej dziedzinie kontynuował Egger, który opracował pierwszy mechanicznie skanujący laserowy konfokalny mikroskop i opublikował w 1973 r. pierwsze uzyskane dzięki temu urządzeniu obrazy komórek [15].

Na przełomie lat 70-tych i 80-tych XX w., powstało kilka innych technicznych rozwiązań bazujących na idei Minsky'ego. W 1979 r. G. F. Brakenhoff skonstruował skaningowy mikroskop konfokalny [16], a C. Sheppard opracował podstawy przetwarzania obrazów z mikroskopów konfokalnych [17]. T. Wilson, B. Amos i J. White spopularyzowali tę koncepcję i później (pod koniec 1980 r.) wykazali dużą przydatność obrazowania konfokalnego w trakcie badań fluorescencyjnych próbek biologicznych [18-19].

Pierwsze komercyjne mikroskopy pojawiły się w 1987 roku. Na początku lat 90-tych XX w., znacznie wzrosło zainteresowanie mikroskopią konfokalną. Złożyło się na to kilka przyczyn. Duży postęp w dziedzinie optyki i elektroniki, który zapewnił bardziej stabilne i o większej mocy lasery, wysokiej wydajności układy z lustrami skanującymi, wysokiej przepustowości światłowody, wysokiej jakości cienkowarstwowe powłoki dielektryczne oraz detektory, których zastosowanie spowodowało zredukowanie szumów. W połączeniu z szybko rozwijającą się techniką komputerową (kilkuset-krotny wzrost mocy obliczeniowej komputerów), udoskonaleniem metod wyświetlania obrazu, nowymi technologiami przechowywania dużej ilości danych oraz opracowaniem nowych algorytmów cyfrowego przetwarzania obrazów gwałtownie rozszerzył się zakres dziedzin i zastosowań [20-23], w których może być wykorzystywana konfokalna laserowa mikroskopia skaningowa.

3. Charakterystyka konfokalnego laserowego mikroskopu skaningowego Olympus LEXT OLS3100

Obecnie na świecie istnieje kilka koncernów specjalizujących się w produkcji tak specyficznej aparatury pomiarowej jaką są laserowe konfokalne mikroskopy skaningowe. Są to m.in. firmy Leica, Nikon, Carl Zeiss, Keyence.

Na początku XXI w. do grona producentów tego typu urządzeń dołączył japoński koncern Olympus mający już duże doświadczenie i niepodważalny wkład w rozwój szeroko pojętej mikroskopii. Nowa linia produktów oferowanych przez Olympusa przyjęła nazwę LEXT (od słów: "Laser" i "Next Generation"). Linia ta obejmuje obecnie pięć głównych typów urządzeń, których szczegółową charakterystykę podano w tablicy 1.

Tab. 1. Przegląd konfokalnych laserowych mikroskopów skaningowych produkowanych przez japońską firmę Olympus

Tab. 1. Review of confocal laser scanning microscopes manufactured by Olympus

Lp.	Nazwa urządzenia	Data wprowadzenia na rynek
1	LEXT OLS3000*	Sierpień 2002 (Japonia), 26 stycznia 2004
2	LEXT OLS3500**	30 Sierpnia 2004
3	LEXT OLS3100*** LEXT OLS3100-300****	25 Stycznia 2007
4	LEXT OLS3000IR*****	28 Maja 2008
5	LEXT OLS4000***** LEXT OLS4000-LAT*****	21 Kwietnia 2009

*Pierwszy mikroskop laserowy linii LEXT. Źródło światła: pojedynczy laser półprzewodnikowy $\lambda = 408$ nm, element detekcyjny: fotopowielacz, zakres powiększeń: od 100× do 12000×, rozdzielczość w osi x-y: 120 nm, tryby wizualizacji: jasne pole, ciemne pole, kontrast interferencyjno-różniczkowy Nomarskiego, zastosowania: ocena chropowatości powierzchni, analiza cząstek, pomiary elementów MEMS.

**Urządzenie oparte na korpusie OLS3000, wyposażone dodatkowo w moduł mikroskopu z sondą skanującą opracowany w firmie Shimadzu Corporation. Mikroskop sprzedawany jest również pod marką Shimadzu pod oznaczeniem SFT-3500.

***Urządzenie oparte na korpusie OLS3000, zmodyfikowane oprogramowanie, zwiększona liczba trybów wizualizacji, zakres powiększeń: od 120× do 14400×.

****Specjalistyczna wersja OLS3100, wyposażona w zmotoryzowany stolik pomiarowy przeznaczony do kontroli podłoży układów półprzewodnikowych.

*****Urządzenie oparte na korpusie OLS3000. Źródło światła: pojedynczy laser półprzewodnikowy $\lambda = 1310$ nm, element detekcyjny: fotopowielacz, zakres powiększeń: od 120× do 12960×, rozdzielczość w osi x-y: 550 nm, zastosowania: kontrola elementów półprzewodnikowych.

*****Pierwszy mikroskop laserowy II generacji linii LEXT. Źródło światła: pojedynczy laser półprzewodnikowy $\lambda = 405$ nm oraz dioda LED $\lambda = 400-700$ nm, element detekcyjny: zestaw dwóch fotopowielaczy, zakres powiększeń: od 108× do 17280×, rozdzielczość w osi x-y: 120 nm, tryby wizualizacji: jasne pole, ciemne pole, prosta polaryzacja i kontrast interferencyjno-różniczkowy Nomarskiego.

*****Wersja OLS4000, wyposażona w zmotoryzowany stolik pomiarowy o zwiększonym zakresie 300×300 mm (standardowy 100×100 mm).

Działanie mikroskopu LEXT OLS3100 [11,24] w trybie konfokalnym, opierało się na generowaniu obrazu na podstawie odbicia światła z płaszczyzny ogniskowania. Światło odbijane poza tą płaszczyzną (tworzące obraz o różnej głębokości ogniskowania) było pomijane za pomocą kołowej przysłony konfokalnej.

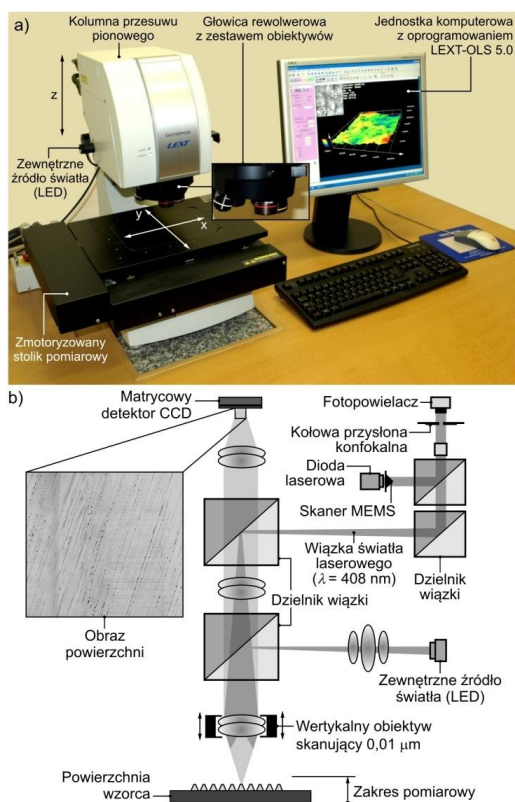
Głębokość ogniskowanego przekroju była funkcją średnicy otworu i długości fali padającego światła. Mikroskop LEXT OLS3100 wykorzystywał wiązkę światła z zakresu widma widzialnego o długości fali $\lambda = 408$ nm (barwa fioletowa) generowaną przez diodę laserową klasy II. Układ, w którym pracował laser, zawierał szereg wysokiej jakości elementów optycznych. Ich charakterystyka pozwalała na minimalizację deformacji uzyskanego obrazu, spowodowanych występowaniem zjawiska aberracji, powstającej w zakresie fal krótkich, oraz maksymalizację transmisji fali światła o długości 408 nm.

Uzyskanie przestrzennego odwzorowania powierzchni badanego obiektu związane było z przeprowadzeniem jej precyzyjnego skanowania w osiach x-y. Proces skanowania realizowany był za pomocą miniaturowego elementu elektro-mechanicznego (ang. *MEMS – Micro Electro-Mechanical Systems*). LEXT OLS3100 wyposażony był w zestaw pięciu obiektywów mikroskopowych o różnych powiększeniach (5×, 10×, 20×, 50×, 100×), zamocowanych w głowicy rewolwerowej. Głowica znajdowała się w motoryzowanej kolumnie przesuwu pionowego, umożliwiającej realizację

precyzyjnych przemieszczeń w zakresie wynoszącym 70 mm. Pozwalało to na akwizycję obrazu w kolejnych przekrojach, które były przetwarzane tak, aby uzyskać przestrzenne odwzorowanie badanego obiektu lub jego dane w postaci chmury punktów. Operacje na obrazach wykonywane były za pomocą oprogramowania firmy Olympus o nazwie LEXT-OLS w wersji 5.0.

W celu minimalizacji drgań spowodowanych pracą zmotoryzowanego stolika pomiarowego i warunkami środowiskowymi wykorzystano aktywny system antywibracyjny TS 150 firmy TableStable (Szwajcaria). System ten w postaci platformy antywibracyjnej, na której ustawiono urządzenie, pozwalał na uzyskanie izolacji wibracyjnej w zakresie od 0,7 Hz do 1 kHz (aktywnie) i powyżej 1 kHz (pasywnie). Ponadto platforma TS 150 charakteryzowała się możliwością korygowania rozkładu sił – max. ± 4 N w każdym kierunku oraz podatnością statyczną – ok. 12 mm/N (pionowo), ok. 30–40 mm/N (poziomo). Przy masie własnej wynoszącej 16,5 kg platforma antywibracyjna TS 150 umożliwia poprawną pracę do obciążenia masą 150 kg.

Na rysunku 1 przedstawiono widok ogólny wykorzystywanego w badaniach mikroskopu konfokalnego LEXT OLS3100 wraz ze schematem ilustrującym zasadę jego działania.



Rys. 1. Konfokalny laserowy mikroskop skaningowy LEXT OLS3100 firmy Olympus: a) widok ogólny urządzenia, b) schemat przedstawiający zasadę działania

Fig. 1. Confocal laser scanning microscope LEXT OLS 3100 produced by Olympus: a) general view of the microscope, b) diagrams showing the principle of operation

4. Badania doświadczalne

Sprawdzenie przydatności techniki mikroskopii konfokalnej oraz mikroskopu LEXT OLS3100 do oceny cech stereometrycznych różnego rodzaju powierzchni technicznych było głównym celem prowadzonych badań doświadczalnych. Starano się uzyskać miarodajny materiał badawczy i zbadać, czy zastosowane urządzenie jest użyteczne w tego typu badaniach. Ocenie poddano szereg powierzchni wykonanych m.in. z metali i ich stopów, ceramiki, szkła i tworzyw sztucznych. Uzyskane wyniki analizowano korzystając z oprogramowania LEXT-OLS 5.0.

5. Wybrane wyniki badań doświadczalnych

Na rysunkach 2-4 przedstawiono przykładowe wyniki uzyskane podczas badań doświadczalnych.

Na rysunku 2 pokazano zestawienie analiz uzyskanych dla powierzchni szklanego wzorca kontrolnego typu C, służącego do wzorcownia i okresowego sprawdzania profilometrów stykowych. Oceniany wzorec w odmianie C3 charakteryzował się rowkami o profilu w przybliżeniu sinusoidalnym i nominalnymi parametrami: $Ra = 0,064$ μ m oraz $RSm = 0,06$ μ m. Wyznaczono dla niego m.in. kolorową dwu- i trójwymiarową mapę wysokości z obszaru powierzchni o wymiarach $128 \times 96 \times 0,26$ μ m. Z tej ostatniej wydzielono pojedyncze profile, na których wyznaczono wysokości poszczególnych rowków. Analiza obejmowała również wyznaczenie innych parametrów profilu podanych na rysunku 2.

Na rysunku 3 pokazano zestawienie analiz uzyskanych dla powierzchni wzorca kontrolnego typu C wykonanego ze stali, służącego do wzorcownia i okresowego sprawdzania profilometrów stykowych. Oceniany wzorec w odmianie C2 (Reference Specimen Type 112 1107 firmy Taylor-Hobson Ltd.) charakteryzował się rowkami o profilu trójkąta równoramiennego oraz nominalną wartością parametru $Ra = 6,07$ μ m. Powierzchnia wzorca została uszkodzona w sposób mechaniczny ostrzem odwzorującym profilometru stykowego, które dokonało przemieszczenia, przy nieprawidłowym obciążeniu. Spowodowało to powstanie dwóch charakterystycznych równoległych śladów doskonale widocznych na obrazie wykonanym techniką jasnego pola (przy powiększeniu $5\times$). Uszkodzenia wierzchołków rowków zostały zarejestrowane w postaci zbioru obrazów i map uzyskanych techniką jasnego pola oraz techniką konfokalną. Odpowiednia analiza powyższych danych może stanowić podstawę do interpretacji skutków powstania tego typu uszkodzenia.

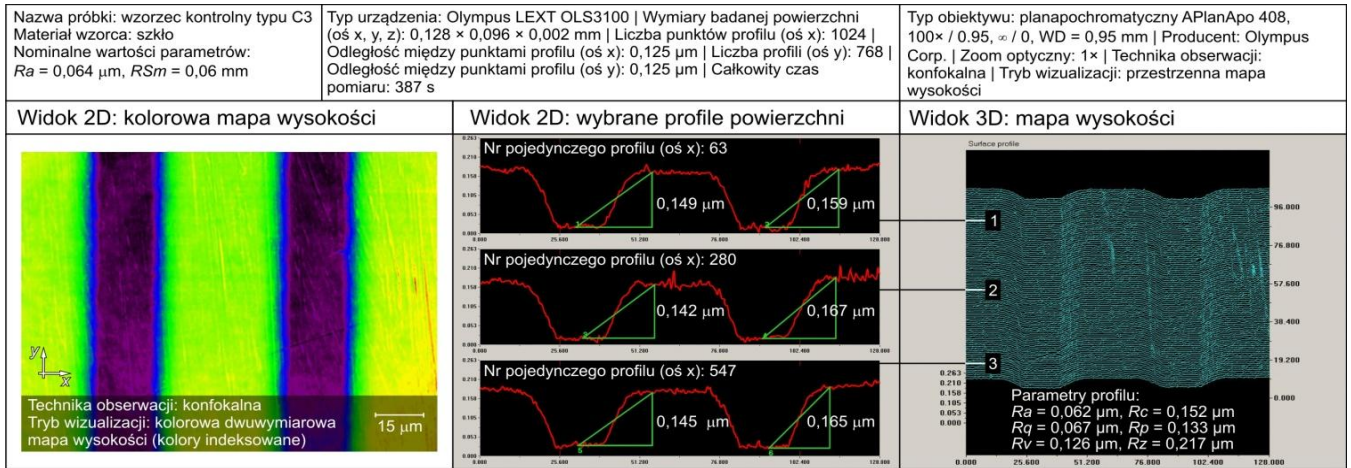
Na rysunku 4 pokazano zestawienie analiz uzyskanych dla powierzchni elastycznej foliowej taśmy mikrościerniej typu IDLF (ang. *Imperial Diamond Lapping Film*) wyprodukowanej przez firmę 3M. Taśma wykonana była na bazie nośnika poliestrowego, na którym osadzono ziarna diamentowe zatopione w żywicznym spoiwie. W omawianym przypadku nominalny rozmiar ziaren wynosił 15 μ m. Również dla tej powierzchni wyznaczono zbiór obrazów oraz map wysokości. Rejestrowano je przy powiększeniach $5\times$ i $50\times$ różnymi technikami. Kolorowa trójwymiarowa mapa wysokości zarejestrowana techniką jasnego pola przedstawiająca fragment powierzchni o wymiarach $256 \times 192 \times 10$ μ m pokazuje ziarna ścierna zgrupowane w tzw. agregaty. Są one losowo ułożone na powierzchni narzędzia ściernego, co jest jego charakterystyczną cechą.

6. Podsumowanie i wnioski

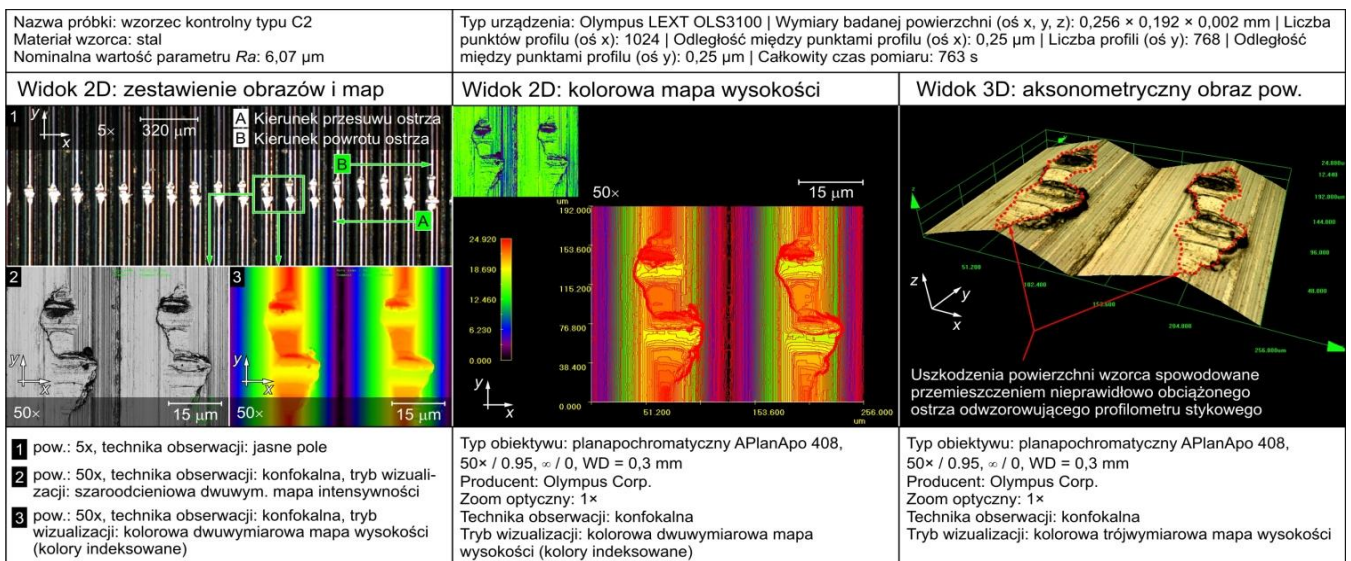
Przeprowadzone badania doświadczalne skłaniają do stwierdzenia, iż technika konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej jest niezwykle użyteczna w przypadku oceny różnego rodzaju powierzchni technicznych, w tym powierzchni przedstawionych w tej pracy. Do zalet tej techniki można zaliczyć przede wszystkim możliwość generowania wysokiej jakości i rozdzielczości przestrzennych obrazów powierzchni ocenianych przedmiotów. Sprzężenie systemu pomiarowego LEXT OLS3100 z szybkim komputerem pozwala dokonywać pomiarów w stosunkowo krótkim czasie, a zastosowanie oprogramowania LEXT-OLS 5.0 umożliwia prowadzenie zaawansowanych analiz uzyskanych danych pomiarowych.

Technika konfokalnej laserowej mikroskopii skaningowej może stanowić ciekawą alternatywę dla tradycyjnych metod pomiarowych takich jak profilometria stykowa i optyczna lub mikroskopia interferencyjna. Może też stanowić uzupełnienie ww. metod.

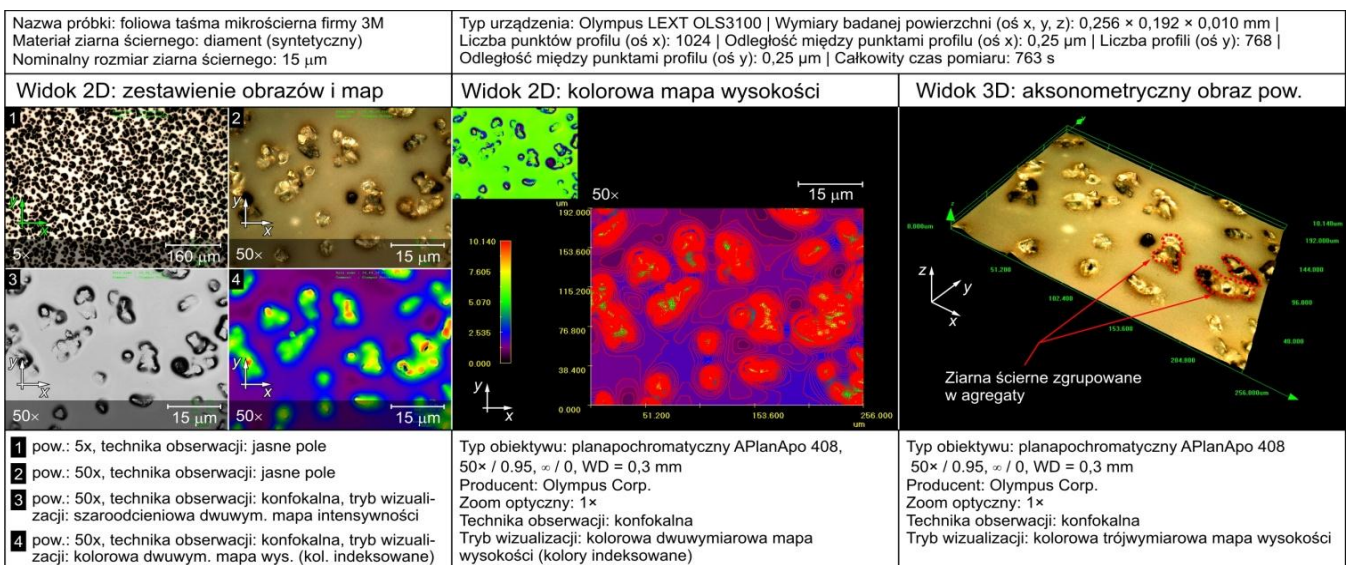
Należy oczekiwać, iż konfokalna laserowa mikroskopii skaningowa będzie jedną ze szczególnie dynamicznie rozwijających się technik pomiarowych w przeciągu następnych kilku- kilkunastu lat. Już dzisiaj istnieje wiele dziedzin nauki i techniki, w których intensywnie się ją wykorzystuje.



Rys. 2. Zestawienie wyników analiz powierzchni wzorca kontrolnego typu C3, dla pomiarów uzyskanych za pomocą mikroskopu laserowego LEXT OLS3100 firmy Olympus
 Fig. 2. Results of surface analysis of the calibration specimen of C3 type, for the measuring data obtained by 3D laser microscope Olympus LEXT OLS3100



Rys. 3. Zestawienie wyników analiz powierzchni wzorca kontrolnego typu C2, dla pomiarów uzyskanych za pomocą mikroskopu laserowego LEXT OLS3100 firmy Olympus
 Fig. 3. Results of surface analysis of the calibration specimen of C2 type, for the measuring data obtained by 3D laser microscope Olympus LEXT OLS3100



Rys. 4. Zestawienie wyników analiz powierzchni elastycznej foliowej taśmy mikrościernego typu ILDF (nominalny rozmiar ziarna 15 μm), dla pomiarów uzyskanych za pomocą mikroskopu laserowego LEXT OLS3100 firmy Olympus
 Fig. 4. Results of surface analysis of the microfinishing film of ILDF type (nominal grain size 15 μm), for the measuring data obtained by 3D laser microscope Olympus LEXT OLS3100

Autorzy składają podziękowania Panu dr. S. Yatsuniece oraz Panu S. Rybce z Działu Mikroskopów firmy Olympus Polska sp. z o.o. za umożliwienie przeprowadzenia pomiarów optycznych mikroskopem laserowym LEXT OLS3100.

7. Literatura

- [1] Nazarian A., et al: Quantitative Micro-Computed Tomography: A Non-Invasive Method to Assess Equivalent Bone Mineral Density. *Bone*, Vol. 43, No. 2, 2008, 302-311.
- [2] Stock S. R.: *MicroComputed Topography: Methodology and Applications*. CRC Press, Boca Raton, 2008.
- [3] Hsieh J.: *Computed Tomography: Principles, Design, Artefacts and Recent Advances* (SPIE Press Monograph Vol. PM114). SPIE Press, Bellingham, 2003.
- [4] Kalender W. A.: *Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications*. John Wiley & Sons, 2011.
- [5] Paddock S. W. (Ed.): *Confocal Microscopy: Methods and Protocols* (Methods in Molecular Biology Vol.122). Humana Press, 1999.
- [6] Hibbs A. R.: *Confocal Microscopy for Biologists*. Springer, 2003.
- [7] Pawley J. B. (Ed.): *Handbook of Biological Confocal Microscopy* (3rd Edition), Springer Science+Buisness Media, New York, 2006.
- [8] Claxton N. S., Fellers T. J., Davidson M. W.: *Laser Scanning Confocal Microscopy*. <http://www.olympus-fluoview.com/theory/LSCMIntro.pdf>
- [9] Miller F. P., et al: *Confocal Laser Scanning Microscopy*. Alphascript Publishing, Amsterdam, 2010.
- [10] Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni – zarysy kształtu, falistość i chropowatość*. WNT, Warszawa, 2008.
- [11] Olympus Corp.: *Confocal Laser Scanning Microscope LEXT OLS3100 – Welcome to the World of LEXT 3D* (Brochure), 2007.
- [12] Minsky M.: *Memoir on Inventing the Confocal Scanning Microscope*, *Scanning*, Vol. 10, 1988, 128-138.
- [13] Minsky M.: *Microscopy Apparatus*, US Pat. 3,013,467,1961.
- [14] Egger M. D., Petran M.: *New Reflected-Light Microscope for Viewing Unstained Brain and Ganglion Cells*. *Science*, Vol. 157, No. 786, 1967, 305-307.
- [15] Davidovits P., Egger M. D.: *Photomicrography of Corneal Endothelial Cells in vivo*. *Nature*, Vol. 244, 1973, 366-367.
- [16] Brakenhoff G. J., Blom P., Barends P.: *Confocal Scanning Light Microscopy with High Aperture Immersion Lenses*. *Journal of Microscopy*, Vol. 117, 1979, 219-232.
- [17] Sheppard C. J. R., Wilson T.: *Effect of Spherical Aberration on the Imaging Properties of Scanning Optical Microscopes*. *Applied Optics*, Vol. 18, No. 7, 1979, 1058-1063.
- [18] Amos W. B., White J. G.: *How the Confocal Laser Scanning Microscope Entered Biological Research*. *Biology of the Cell*, Vol. 95, 2003, 335-342.
- [19] Hamilton D. K., Wilson T.: *Scanning Optical Microscopy by Objective Lens Scanning*. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 19, 1986, 52-54.
- [20] Carey N., Daeid N. N.: *Confocal Laser Scanning Microscopy of Electrical Conductors at Fire Scenes*. *Microscopy and Analysis (EU)*, Vol. 24, No. 6, 2010, 5-7.
- [21] Powers B. M., Ham M., Wilkinson M. G.: *Small Data Set Analysis in Surface Metrology: An Investigation Using a Single Point Incremental Forming Case Study*. *Scanning*, Vol. 32, 2010, 199-211.
- [22] Ficker T., Martišek D., Jennings H. M.: *Roughness of Fracture Surfaces and Compressive Strength of Hydrated Cement Pastes*. *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, 2010, 947-955.
- [23] Haosheng C., Shihan L.: *Inelastic Damages by Stress Wave on Steel Surface at the Incubation Stage of Vibration Cavitation Erosion*. *Wear*, Vol. 266, 2009, 69-75.
- [24] Matuszewski M., Styp-Rekowski M.: *Konfokalny laserowy mikroskop skaningowy w badaniach tribologicznych*. *Tribologia*, Vol. 41, No. 1, 2010, 157-165.

otrzymano / received: 21.06.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011

artykuł recenzowany

INFORMACJE

Informacje dla Autorów

Redakcja przyjmuje do publikacji tylko prace oryginalne, nie publikowane wcześniej w innych czasopismach. Redakcja nie zwraca materiałów nie zamówionych oraz zastrzega sobie prawo redagowania i skracania tekstów oraz streszczeń.

Artykuły naukowe publikowane w czasopiśmie PAK są formatowane jednolicie zgodnie z ustaloną formatką zamieszczoną na stronie redakcyjnej www.pak.info.pl. Dlatego artykuły przekazywane redakcji należy przygotowywać w edytorze Microsoft Word 2003 (w formacie DOC) z zachowaniem:

- wielkości czcionek,
- odstępów między wierszami tekstu,
- odstępów przed i po rysunkach, wzorach i tabelach,
- oznaczeń we wzorach, tabelach i na rysunkach zgodnych z oznaczeniami w tekście,
- układu poszczególnych elementów na stronie.

Osobno należy przygotować w pliku w formacie DOC notki biograficzne autorów o objętości nie przekraczającej 450 znaków, zawierające podstawowe dane charakteryzujące działalność naukową, tytuły naukowe i zawodowe, miejsce pracy i zajmowane stanowiska, informacje o uprawianej dziedzinie, adres e-mail oraz aktualne zdjęcie autora o rozmiarze 3,8 x 2,7 cm zapisane w skali odcieni szarości lub dołączone w osobnym pliku (w formacie TIF).

Wszystkie materiały:

- artykuł (w formacie DOC),
- notki biograficzne autorów (w formacie DOC),
- zdjęcia i rysunki (w formacie TIF lub CDR),

prosimy przesyłać w formie plików oraz dodatkowo jako wydruki na białym papierze (lub w formacie PDF) na adres e-mail: wydawnictwo@pak.info.pl lub pocztą zwykłą, na adres: Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka Kontrola, Asystent Redaktora Naczelnego mgr Agnieszka Skórkowska, ul. Akademicka 10, p.21A, 44-100 Gliwice.

Wszystkie artykuły naukowe są dopuszczane do publikacji w czasopiśmie PAK po otrzymaniu pozytywnej recenzji. Autorzy materiałów nadesłanych do publikacji są odpowiedzialni za przestrzeganie prawa autorskiego. Zarówno treść pracy, jak i wykorzystane w niej ilustracje oraz tabele powinny stanowić dorobek własny Autora lub muszą być opisane zgodnie z zasadami cytowania, z powołaniem się na źródło cytatu.

Przedrukowywanie materiałów lub ich fragmentów wymaga pisemnej zgody redakcji. Redakcja ma prawo do korzystania z utworu, rozporządzania nim i udostępniania dowolną techniką, w tym też elektroniczną oraz ma prawo do rozpowszechniania go dowolnymi kanałami dystrybucyjnymi.