

Przegląd metod skaterometrycznych stosowanych do aktywnej kontroli nierówności powierzchni

A review of scatterometric methods applied to in-process inspection of surface roughness

CZESŁAW ŁUKIANOWICZ *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.11.484

W artykule dokonano przeglądu metod aktywnej kontroli nierówności powierzchni części maszyn wykorzystujących zjawisko rozpraszania światła. Dokonano krótkiej charakterystyki wybranych metod aktywnej kontroli chropowatości powierzchni.

SŁOWA KLUCZOWE: kontrola aktywna, ocena chropowatości powierzchni, rozpraszanie światła

The in-process inspection of surface texture of machine elements by methods that use light scattering is analysed. A brief characterization of selected methods of in-process inspection of surface roughness was presented.

KEYWORDS: in-process inspection, assessment of surface roughness, light scattering

Kontrola aktywna, nazywana także kontrolą czynną, jest nowoczesną metodą nadzorowania procesów produkcyjnych. Jest ona prowadzona podczas procesu wytwarzania, a jej celem jest m.in. zapewnienie wysokiej jakości produkcji i ograniczenie liczby wyrobów niezgodnych z wymaganiami. Cel ten jest osiąganym dzięki szybkiemu oddziaływaniu wyników kontroli na proces produkcyjny.

W nowoczesnej produkcji często konieczna staje się nie tylko aktywna kontrola wymiarów, ale także struktury geometrycznej powierzchni (SGP). W wielu przypadkach stosowane są w tym celu metody optyczne [1], do których należą także metody oparte na wykorzystaniu zjawiska rozpraszania światła [2]. Metody oraz techniki oceny nierówności powierzchni wykorzystujące zjawisko rozpraszania światła są nazywane metodami skaterometrycznymi [3]. Zastosowanie metod skaterometrycznych w aktywnej kontroli SGP umożliwia bezstykową i szybką ocenę nierówności powierzchni, a niekiedy pozwala także ocenić nierówności podczas ruchu przedmiotu.

Podstawowe rodzaje metod skaterometrycznych

Podczas aktywnej kontroli SGP metodami rozpraszania światła ocena nierówności powierzchni dokonywana jest na ogół na podstawie pomiarów następujących wielkości:

- natężenia światła odbitego zwierciadlanie,
- natężenia światła rozproszonego w jednym lub w kilku kierunkach,
- całkowitego natężenia światła rozproszonego,
- kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego.

Metody wykorzystujące pomiar natężenia światła odbitego zwierciadlanie nazywane są często metodami reflektometrycznymi lub rzadziej odbiciowymi. Nazwy te obejmują również takie metody, w których – oprócz natężenia światła

odbitego zwierciadlanie – mierzone jest także natężenie światła rozproszonego w jednym lub w kilku wybranych kierunkach. W metodach tych wyznaczany jest stosunek refleksyjności zwierciadlanej do refleksyjności całkowitej. Zależy on od odchylenia standardowego wysokości nierówności:

$$\frac{R_s}{R_0} = \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (1)$$

gdzie: R_s – refleksyjność zwierciadlanej, R_0 – refleksyjność całkowita, σ – odchylenie standardowe wysokości nierówności, θ_i – kąt padania, λ – długość fali światła.

Metody oparte na pomiarze całkowitego natężenia światła rozproszonego w języku polskim nazywane są niekiedy metodami integracyjnymi. Nazwa ta wynika z tego, że w literaturze angielskiej metody te określane są terminem *total integrated scattering* i oznaczane są symbolem *TIS*. Parametr *TIS* jest stosunkiem refleksyjności dyfuzyjnej R_d do refleksyjności całkowitej R_0 , co pokazuje równanie:

$$TIS = \frac{R_d}{R_0} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{4\pi\sigma \cos\theta_i}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (2)$$

które uzyskuje się w wyniku przekształcenia zależności (1).

Metody skaterometryczne, w których dokonywany jest pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przez badaną powierzchnię, nazywane są metodami goniofotometrycznymi lub różniczkowymi. W języku angielskim metody te określane są terminami *angle-resolved scattering* lub *differential scattering* i oznaczane odpowiednio symbolami ARS oraz DS. Na ogół opierają się na wyznaczeniu funkcji opisującej przestrzenny rozkład natężenia światła rozproszonego. Funkcja ta często jest oznaczana symbolem *BRDF* (*bidirectional reflectance distribution function*) i została opisana w między innymi w pracach [4] i [5].

Ponadto, w stosunku do metod skaterometrycznych, których podstawy teoretyczne oparte są na teorii dyfrakcji, używa się niekiedy ogólnej nazwy: metody dyfrakcyjne.

Zainteresowanie metodami skaterometrycznymi wynika z ich zalet. Charakteryzują się one wysoką czułością i dzięki temu umożliwiają pomiary nierówności o wysokościach rzędu ułamków nanometra. Zakres pomiarowy tych metod pozwala mierzyć nierówności, których wysokość wynosi od dziesiątych części nanometra do kilkuset nanometrów, a niekiedy nawet do kilku mikrometrów. W tym ostatnim przypadku czułość tych metod jest mniejsza, co czyni je mniej wrażliwymi na drgania i inne czynniki zakłócające przebieg pomiaru, występujące w procesach wytwarzania.

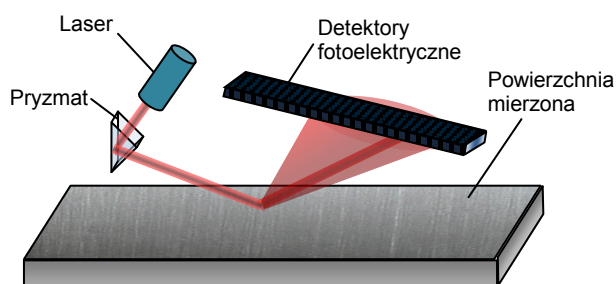
* Dr hab. inż. Czesław Łukianowicz (czeslaw.lukianowicz@tu.koszalin.pl) – Katedra Inżynierii Produkcji, Politechnika Koszalińska

Systemy aktywnej kontroli nierówności powierzchni

Najczęściej aktywna kontrola SGP jest stosowana:

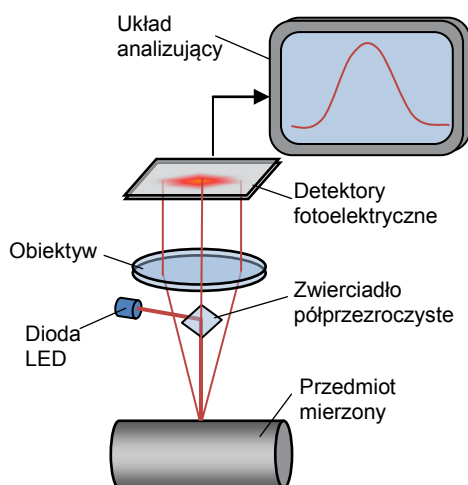
- w przemyśle precyzyjnym i motoryzacyjnym,
- w przemyśle optycznym i elektronicznym.

Głównymi powodami zastosowania aktywnej kontroli SGP z wykorzystaniem metod skaterometrycznych w przemyśle motoryzacyjnym itp. są: bezstykowy sposób oceny nierówności, krótki czas pomiaru oraz możliwość automatyzacji kontroli. Przykładem takiego systemu może być opracowany przez firmę Optical Dimensions LLC (USA) i produkowany przez Schmitt Industries, Inc. (USA) przyrząd Lasercheck® [6]. Jest on przeznaczony do aktywnej kontroli metodą różniczkową chropowatości powierzchni obrabianych w zakresie R_a od 0,01 μm do 2 μm . Schemat części optycznej tego przyrządu pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat części optycznej przyrządu Lasercheck

Innym przykładem systemów opartych na metodzie różniczkowej – przeznaczonych do aktywnej kontroli SGP z wykorzystaniem analizy światła rozproszonego – są układy proponowane przez niemiecką firmę OptoSurf GmbH [7]. Są one przewidziane do różnorodnych zastosowań i pozwalają oceniać poszczególne elementy SGP. Zakres chropowatości powierzchni mierzonych części zawiera się (w przybliżeniu) dla parametru R_z od 0,05 μm do 3 μm (dla kierunku poprzecznego) oraz od 3 μm do 30 μm (dla kierunku wzdłużnego). Schemat sensora OS 500 stosowanego w tych systemach ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Schemat sensora OS 500 firmy OptoSurf

W Politechnice Koszalińskiej opracowano elementy podobnych systemów przeznaczonych do aktywnej kontroli nierówności powierzchni opisane m.in. w pracach [8 i 9].

Bardziej szczegółowy przegląd omówionych sposobów oraz systemów służących do aktywnej kontroli SGP w budowie maszyn zawarto w pracach [10 i 11].

Krótki czas pomiaru, bezstykowy sposób oceny nierówności powierzchni oraz możliwość automatyzacji kontroli przyczyniają również do zastosowania omawianych metod w kontroli produkcji elementów optycznych i elektronicznych. W tym przypadku najważniejszym powodem jest jednak wysoka czułość metod skaterometrycznych. Dzięki niej można oceniać powierzchnie supergładkie, takie np. jak powierzchnie twardych dysków, zwierciadeł, podłoża krzemowe układów elektronicznych itp. Skaterometryczne systemy stosowane do aktywnej kontroli takich powierzchni są bardzo czułe, lecz ich zakres pomiarowy zazwyczaj nie przekracza kilkuset nanometrów. Przykłady takich systemów, przeznaczonych do aktywnej kontroli powierzchni, opartych na metodach integracyjnych i różniczkowych, przedstawiono m.in. w pracach [12, 13].

Podsumowanie

Aktywna kontrola nierówności powierzchni metodami skaterometrycznymi ma wiele zalet. Są to przede wszystkim bezstykowy sposób oceny powierzchni i wysoka czułość metod skaterometrycznych, którą można dostosować do zakresu wysokości nierówności mierzonych powierzchni. Dzięki bezstykowej ocenie SGP możliwa jest nieinwazyjna, nieniszcząca aktywna kontrola przedmiotów w procesie produkcji. Jest to szczególnie ważne w przypadku powierzchni, które są mało odporne na zanieczyszczenia, podatne na odkształcenia i wrażliwe na różnorodne inne oddziaływania fizyczne bądź chemiczne, pojawiające się podczas styku z inną powierzchnią.

Aktywna kontrola nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła ma także inne zalety, takie jak możliwość oceny SGP podczas ruchu przedmiotu mierzonego oraz krótki czas pomiaru. W ocenie nierówności metodami rozpraszania światła korzystne jest również to, iż pomiarem objęty jest pewien obszar powierzchni przedmiotu mierzonego, a nie tylko pojedynczy profil.

LITERATURA

1. Wieczorowski M. „Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy”. Szczecin, ZAPOL, 2013.
2. Goch G., Schmitt R., Patzelt S., Stürwald S., Tausendfreund A. „In-situ and In-process Metrology for Optical Surfaces”. In *Fabrication of Complex Optical Components*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
3. Baumgart J.W., Truckenbrodt H. “Scatterometry of honed surfaces”. *Optical Engineering*. Vol. 37, No. 5 (1998): pp. 1435–1441.
4. Stover J.C. “Optical Scattering. Measurement and Analysis”. 3rd edition, Bellingham, WA: SPIE Press, 2012.
5. Bennett J.M., Mattsson L. “Introduction to surface roughness and Scattering”. 2nd edition, Washington, D.C.: OSA, 1999.
6. www.schmitt-ind.com/ (dostęp: 15.05.2016 r.).
7. www.optosurf.de/ (dostęp: 15.05.2016 r.).
8. Łukianowicz C., Karpiński T. “Optical system for measurement of surface form and roughness”. *Measurement Science Review*. Vol. 1, No. 1 (2001): pp. 151–154.
9. Kapłonek W., Łukianowicz C. “Non-Contact Optical Metrology for Automated In-Process Inspection of Machined Surfaces”. *Proceedings of the 11th IMEKO TC14 International Symposium on Measurement and Quality Control*, Cracow (2013): pp. 36–39.
10. Tian, G.Y., Lu R.S., Gledhill D. “Surface measurement using active vision and light scattering”. *Optics and Lasers in Engineering*. Vol. 45, No. 1 (2007): pp. 131–139.
11. Kapłonek W., Nadolny K. “Laser methods based on an analysis of scattered light for automated, in-process inspection of machined surfaces: A review”. *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. Vol. 126, Iss. 20 (2015): pp. 2764–2770.
12. Synak R. “Analysis and optimization of a total integrating scatter measuring unit based on a photodiode integrator”. *Optical Engineering*. Vol. 51, No. 11 (2012): pp. 11361.
13. Zhenrong Z., Jing Z., Peifu G. “Roughness characterization of well-polished surfaces by measurements of light scattering distribution”. *Optica Applicata*. Vol. 40, No. 4 (2010): pp. 811–818.