

# Przegląd metod oceny struktury geometrycznej powierzchni wyrobów walcowanych

## Review of methods for assessing the geometric structure of rolled products

CZESŁAW ŁUKIANOWICZ\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.192>

W artykule zawarto przegląd metod optycznych, stosowanych do pomiarów i oceny struktury geometrycznej powierzchni (SGP) wyrobów walcowanych, takich jak blachy czy taśmy. Metody optyczne są przydatne zwłaszcza w tzw. aktywnej kontroli procesów wytwarzania wyrobów walcowanych oraz w ocenie SGP tych produktów.

**SŁOWA KLUCZOWE:** wyroby walcowane, ocena struktury geometrycznej powierzchni, metody optyczne

*The paper reviews the optical methods used to measure and evaluate the surface texture of rolled products, such as sheets, strips, etc. Optical methods are particularly useful in conducting the so-called active control of the production processes of rolled products and surface texture assessment.*

**KEYWORDS:** rolled products, surface textures assessment, optical methods

Struktura geometryczna powierzchni (SGP) w wielu przypadkach jest istotnym czynnikiem określającym jakość wyrobów [1, 2]. Do oceny SGP stosuje się m.in. uniwersalne przyrządy i systemy pomiarowe, np. profilometry stykowe.

Wymagania dotyczące wyrobów walcowanych, w tym ich SGP, zostały sformułowane w stosownych normach [3, 4] lub warunkach technicznych [5]. Zapewnienie prawidłowej SGP tych wyrobów wiąże się z koniecznością oceny i kontroli stanu ich powierzchni w trakcie procesu wytwarzania. W tym celu stosuje się m.in. odpowiednio zaadaptowane metody optyczne, pozwalające na aktywne sterowanie przebiegiem produkcji blach, taśm, kształtowników itp. Kontrola często odbywa się podczas ruchu badanej powierzchni i w warunkach różnorodnych zakłóceń towarzyszących procesowi wytwarzania.

W ostatnich latach coraz więcej uwagi poświęca się różnym metodom optycznym i zautomatyzowanym systemom kontrolno-pomiarowym, przeznaczonym do szybkiej i bezstykowej oceny SGP wyrobów walcowanych.

Wśród wielu optycznych metod oceny SGP można wyróżnić dwie grupy, mające zastosowanie do oceny stanu i jakości powierzchni wyrobów walcowanych: metody triangulacyjne, służące przede wszystkim do oceny wymiarów i kształtu powierzchni, oraz metody skaterometryczne, wykorzystujące zjawisko rozpraszania światła, przeznaczone głównie do oceny chropowatości i wykrywania wad powierzchni.

### Metody triangulacyjne

Metody triangulacyjne zazwyczaj bazują na wykorzystaniu triangulacji laserowej. W najprostszym przypadku polega ona na pomiarze odległości między punktem

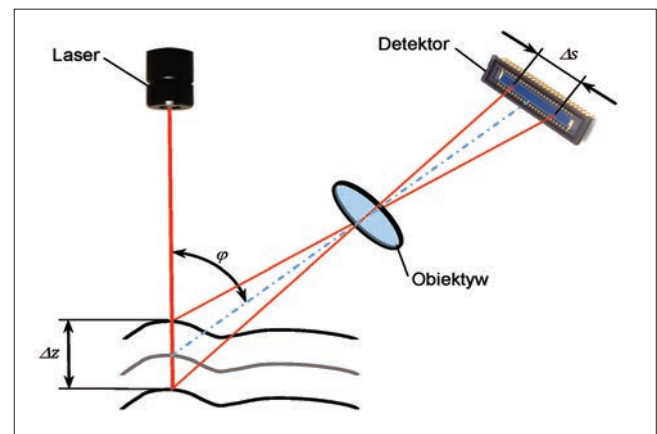
położonym na powierzchni obiektu a źródłem światła laserowego lub wybraną płaszczyzną odniesienia. Powierzchnia obiektu jest oświetlana wiązką laserową o niewielkiej średnicy. Plamka światła laserowego, widoczna na powierzchni obiektu, jest rzutowana za pomocą obiektywu na powierzchnię światłoczułą detektora fotoelektrycznego, który generuje sygnał pomiarowy zależny od położenia plamki świetlnej. Kąt nachylenia osi optycznej obiektywu w stosunku do wiązki laserowej skierowanej na powierzchnię jest stały i znany. Stałe jest również położenie lasera względem obiektywu i detektora fotoelektrycznego. Zmiana położenia powierzchni mierzonego obiektu wzdłuż kierunku propagacji wiązki laserowej o  $\Delta z$  wywołuje zmianę położenia obrazu plamki świetlnej na powierzchni światłoczułej detektora o  $\Delta s$ . W tym przypadku (rys. 1) można zmierzyć zmianę położenia powierzchni obiektu w stosunku do ustawienia początkowego na podstawie wartości sygnału generowanego przez detektor fotoelektryczny:

$$\Delta z = \frac{\Delta s}{M \sin \varphi} \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta z$  – zmiana położenia powierzchni wzdłuż kierunku propagacji wiązki laserowej,  $\Delta s$  – sygnał odpowiadający zmianie położenia obrazu plamki laserowej na powierzchni światłoczułej detektora fotoelektrycznego,  $M$  – powiększenie obiektywu,  $\varphi$  – kąt między kierunkiem wiązki laserowej i osią optyczną obiektywu.

Taki pomiar może być traktowany jako pomiar wzdłuż kierunku propagacji wiązki laserowej, tj. jednowymiarowy.

Zarys powierzchni obiektu metodą triangulacyjną można wyznaczyć za pomocą skanowania powierzchni wiązka laserową w danym przekroju. Skanowanie wymaga kontrolowanego przemieszczenia powierzchni względem układu pomiarowego.

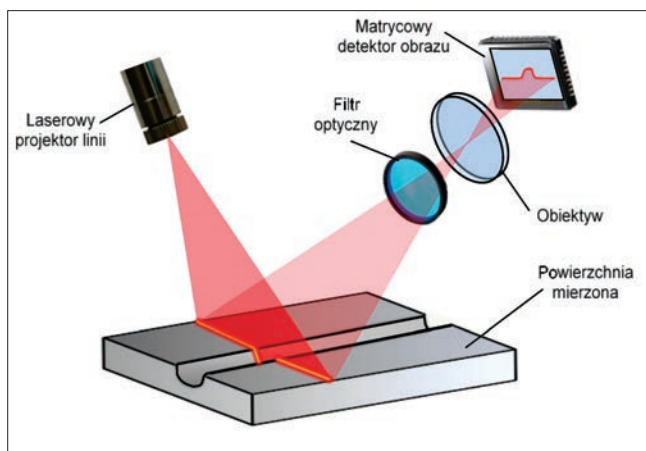


Rys. 1. Pomiar zmiany położenia zarysu powierzchni metodą triangulacji laserowej

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

W tym przypadku podczas skanowania mierzona jest odległość poszczególnych punktów profilu powierzchni od laserowego źródła światła (lub płaszczyzny odniesienia) w funkcji drogi skanowania. Taki pomiar można traktować jako dwuwymiarowy.

Innym sposobem uzyskania zarysu powierzchni w wybranym przekroju obiektu jest rzutowanie na jego powierzchnię światła laserowego w postaci odcinka linii prostej, a następnie – zarejestrowanie i przeanalizowanie kształtu obrazu tej linii przez skomputeryzowany system wizyjny, ustawiony pod znanym kątem w stosunku do powierzchni. Jest to również pomiar dwuwymiarowy. Jego ideę zilustrowano na rys. 2. W odróżnieniu od skanowania powierzchni ta metoda nie wymaga wzajemnego przemieszczania powierzchni i układu pomiarowego, co stanowi jej zaletę. Metoda jest podobna do znanej od dawna tzw. metody przekroju świetlnego.

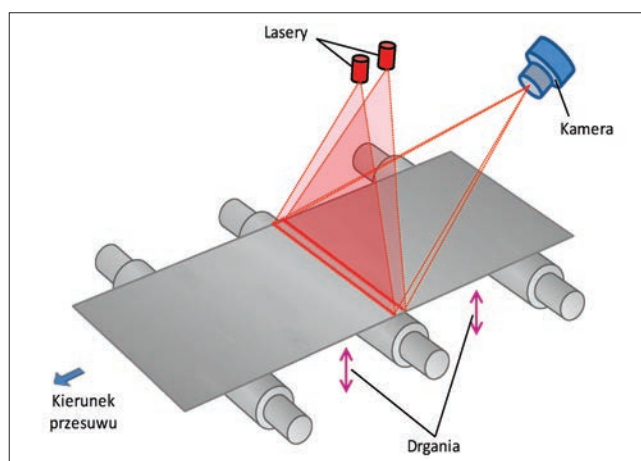


Rys. 2. Odzworowanie zarysu powierzchni metodą triangulacji laserowej

Triangulacja laserowa może także służyć do przestrzennych, trójwymiarowych pomiarów kształtu powierzchni obiektu. W tym celu przeprowadza się pomiary 2D, ze skanowaniem lub z rzutowaniem linii świetlnej, w wielu kolejnych, dostatecznie blisko siebie położonych przekrojach równoległych. Najczęstszy wariant tej metody (w zastosowaniu do oceny SGP wyrobów walcowanych) polega na skanowaniu powierzchni obiektu przez rzutowaną na powierzchnię pojedynczą linię świetlną (lub zbiór takich linii). W tym przypadku w procesie skanowania wykorzystuje się ciągle lub sekwencyjny ruch obiektu (wyrobu walcowanego) w linii technologicznej. Rekonstrukcja powierzchni obiektu jest dokonywana programowo, na podstawie sekwencji cyfrowo zarejestrowanych obrazów. Ten sposób kontroli jest powszechnie stosowany do oceny kształtu i wad powierzchni długich obiektów, np. taśm, blach, kształtowników lub szyn.

W przemyśle stalowym do kontroli SGP wyrobów walcowanych stosuje się różne sensory i systemy pomiarowe [6]. Przykładem jest seria układów pomiarowych do oceny SGP, szwedzkiej firmy Shapeline AB, które są przeznaczone do stosowania w hutach, walcowniach, galwanizerniach itp. Tego typu rozwiązania są przewidziane dla określonej branży i mogą być adaptowane do indywidualnych potrzeb klienta.

W pracy [7] szczegółowo omówiono przyczyny powstawania typowych odchyłek kształtu i wad powierzchni wyrobów walcowanych, a ponadto w skrócie przedstawiono działanie i parametry zintegrowanego systemu pomiarowego VeriFlat firmy Shapeline AB. W tym systemie na powierzchnię badaną rzutowane są dwie linie laserowe,



Rys. 3. Schemat układu triangulacji laserowej z projekcją dwóch linii, przeznaczony do kontroli SGP wyrobów walcowanych

co schematycznie pokazano na rys. 3. W pracy [8] wykazano, że taki układ pozwala na korygowanie błędów pomiarowych spowodowanych drganiami systemu transportowego.

Oryginalny system kontroli SGP i wad powierzchniowych wyrobów walcowanych ze stali i aluminium proponuje niemiecka firma IMS Messsysteme GmbH. Ten system zapewnia zwiększenie dokładności pomiarów triangulacyjnych dzięki projekcji na powierzchnię obiektu kilku par linii laserowych i zastosowaniu w układzie detekcyjnym zespołów CCS (*camera cluster systems*) z dużą liczbą specjalnych, miniaturowych kamer wideo [9].

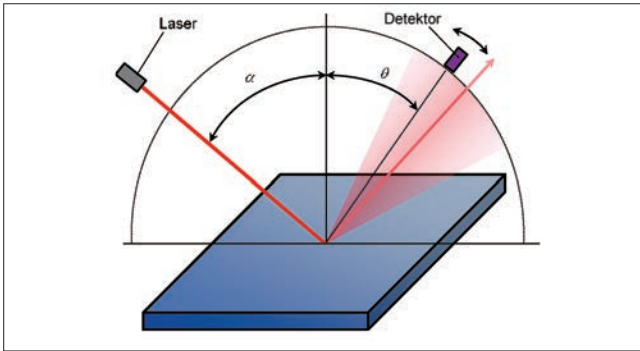
### Metody skaterometryczne

Nazwa tych metod oceny SGP pochodzi od angielskiego terminu *light scattering*, oznaczającego rozpraszanie światła. Są to metody bezstykowe, pozwalające na szybką i aktywną kontrolę SGP podczas ruchu mierzonego przedmiotu. Ich zaletą jest również to, że pomiarem jest na ogół objęty określony obszar powierzchni przedmiotu, a nie tylko wybrany pojedynczy profil.

Metody te charakteryzują się dostatecznie wysoką czułością i stosunkowo szerokim zakresem pomiarowym. Umożliwiają one pomiary i ocenę nierówności o wysokości od pojedynczych nanometrów do nawet kilkunastu mikrometrów. W tym drugim przypadku czułość metod jest nieco niższa, dlatego są one mniej wrażliwe na drgania i inne czynniki występujące w procesach produkcyjnych, zakłócające przebieg pomiaru.

Spośród metod skaterometrycznych stosowanych do oceny SGP w przemyśle najczęściej wykorzystuje się różne warianty tzw. metod różniczkowych, w których dokonywany jest pomiar kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przez powierzchnię. Te metody nazywa się także metodami goniofotometrycznymi, a języku angielskim określa się je terminami *angle-resolved scattering* lub *differential scattering* i oznacza odpowiednio akronimami ARS lub DS. Szerszy opis metod skaterometrycznych zawarto m.in. w pracy [10].

Pomiary kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego przez niektóre powierzchnie mogą być dokonywane w płaszczyźnie padania – tak jak pokazano na rys. 4. W tym przypadku natężenie światła rozproszonego jest funkcją jednej zmiennej – kąta rozproszenia  $\theta$ . Graficzny obraz tej funkcji nazywa się niekiedy krzywą kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego lub indykacją rozproszenia.



Rys. 4. Zasada wyznaczania kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego w metodach różniczkowych

W przypadku analizy w przestrzeni 3D rozkład natężenia światła jest funkcją dwóch zmiennych. Dwukierunkową funkcję rozkładu reflektancji *BRDF* (*bidirectional reflectance distribution function*) definiuje się jako stosunek luminancji energetycznej  $L_e$  w kierunku rozproszenia do mocy promienistej, padającej na jednostkę powierzchni.

Luminancję energetyczną  $L_e$  w określonym kierunku rozproszenia wyznacza się wewnątrz kąta bryłowego  $d\Omega$ . Funkcja *BRDF* jest opisana zależnością:

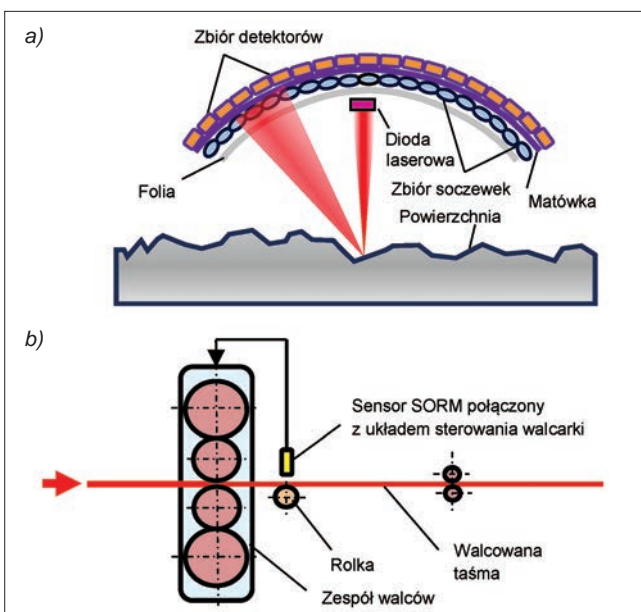
$$BRDF = \frac{L_e}{P_i/S_0} = \frac{dP/d\Omega}{P_i \cos \theta} \quad (2)$$

przy czym:

$$L_e = \frac{dP}{S_0 d\Omega \cos \theta} \quad (3)$$

gdzie:  $L_e$  – luminancja energetyczna powierzchni oświetlonej w określonym kierunku rozproszenia,  $P_i$  – moc promienista padająca na powierzchnię,  $S_0$  – pole powierzchni oświetlonej,  $dP$  – moc promienista rozproszona wewnątrz elementarnego kąta bryłowego,  $d\Omega$  – elementarny kąt bryłowy,  $\theta$  – kąt rozproszenia.

Pomiary kąowego lub przestrzennego rozkładu natężenia światła rozproszonego nie zawsze wymagają skanowania ruchomym detektorem. Jeśli zakres kątów rozproszenia jest niewielki, można zastosować wieloelementowe, liniowe lub matrycowe detektory fotoelektryczne.



Rys. 5. Sensor SORM: a) schemat ilustrujący zasadę działania sensora, b) usytuowanie sensora w systemie produkcji taśm walcowanych na zimno

Dobłą ilustracją zastosowania skaterometrycznych metod różniczkowych do oceny SGP wyrobów walcowanych jest sensor SORM 3plus (*superfast optical roughness measurement*), opracowany przez niemiecką firmę EMG Automation GmbH. Na rys. 5a pokazano zasadę działania tego układu.

Działanie sensora SORM polega na szybkim przesuwaniu układu względem powierzchni mierzonej oraz wyznaczeniu – na podstawie analizy światła rozproszonego przez powierzchnię – zarysu powierzchni wzdłuż kierunku przesuwu.

Omawiany układ znalazł zastosowanie m.in. w przemyśle metalowym, w tym w ocenie SGP taśm walcowanych na zimno [11].

Usytuowanie sensora w systemie produkcyjnym pokazano na rys. 5b.

Inny przykład wykorzystania metod skaterometrycznych do oceny stanu powierzchni taśm walcowanych podczas wytwarzania ostrzy technicznych podano w pracy [12].

## Podsumowanie

Kontrola i ocena SGP stanowią ważny element procesów wytwarzania wyrobów walcowanych. Zastosowanie do tego celu metod optycznych sprzyja zapewnianiu jakości produkowanych wyrobów, a także zwiększa wydajność i obniża koszty produkcji. Systemy przeznaczone do oceny SGP wyrobów walcowanych metodami optycznymi mają na ogół postać układów specjalizowanych, przeznaczonych do określonego systemu produkcyjnego.

## LITERATURA

- Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, fałistość i chropowatość”. Warszawa: WNT, 2008.
- Wieczorowski M. „Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy”. Szczecin: ZAPOL, 2013.
- PN-EN 10029:2011 Blachy stalowe walcowane na gorąco grubości 3 mm i większej – Tolerancje wymiarów i kształtu.
- PN-EN 13674-1+A1:2011 Kolejnictwo – Tor – Szyna – Część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej.
- Id-106 – Warunki techniczne wykonania i odbioru szyn kolejowych – Wymagania i badania. Nr ILK3d/518/3/07, Warszawa 2010.
- Molleda J., Usamentiaga R., Garcia D.F. “On-Line Flatness Measurement in the Steelmaking Industry”. *Sensors*. 13, 8 (2013): s. 10245–10272.
- Kierkegaard P. “Developments and Benefits from Optical Flatness Measurement in Strip Processing Lines”. *Congreso y Exposición Nacional de la Industria del Acero, CONAC 2016*, Monterrey, Mexico, s. 1–15, [www.shapeline.com/wpcontent/uploads/Shapeline-paper-CONAC-2016-A.pdf](http://www.shapeline.com/wpcontent/uploads/Shapeline-paper-CONAC-2016-A.pdf) (dostęp: 12.10.2018 r.).
- Usamentiaga R., Molleda J., Garcia D.F., Bulnes F.G. “Removing vibrations in 3D reconstruction using multiple laser stripes”. *Optics and Lasers in Eng.* 53, 2 (2014): s. 51–59.
- Busch J., Blonski J. “Optical Measuring Systems Based on Camera Cluster Systems”. *SEASI Conference & Exhibition*, Singapore, 22–25 May 2017, s. 1–7, <http://seasi.org/seasi2017/file/file/full-paper/12A-4%20Optical%20Measuring%20System%20Based%20on%20Camera%20Cluster%20Systems.pdf> (dostęp: 12.10.2018 r.).
- Kapłonek W. „Teoretyczne i doświadczalne podstawy zastosowania optycznych metod pomiarowych wykorzystujących analizę światła rozproszonego w ocenie stanu powierzchni przedmiotów i narzędzi ściernych w procesach obróbki ściernych”. Koszalin: Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, 2017.
- Holz R., Hoen K., Weiss K. “Advanced technology in skin pass rolling”. *Millennium Steel*, 2010, s. 82–88.
- Łukianowicz C., Kapłonek W., Radomska E. „Wykorzystanie zjawiska rozpraszania światła do oceny stanu powierzchni tnących ostrzy technicznych”. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 3–4 (2017): s. 36–39. ■