W. Kapłonek, L. Żurawski¹

Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Produkcji,
ul. Raławicka 15-17, 75-620 Koszalin, Polska

¹Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Zakład Monitorowania Procesów
Technologicznych, ul. Raławicka 15-17, 75-620 Koszalin, Polska

OCENA MIKRONIERÓWNOŚCI POWIERZCHNI FREZOWANYCH Z ZASTOSOWANIEM OPTYCZNYCH METOD POMIAROWYCH I ANALIZY OBRAZU

STRESZCZENIE

W referacie przedstawiono wyniki badań prowadzonych z wykorzystaniem optycznych metod pomiarowych bazujących na zjawiskach samozacienienia powierzchni i rozpraszania światła połączonych z technikami komputerowego przetwarzania i analizy obrazu przeznaczonych do oceny mikronierówności powierzchni frezowanych. Za pomocą odpowiednio zestawionych stanowisk badawczych rejestrowano obrazy cyfrowe powierzchni, które poddawano przetwarzaniu i analizie za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego. Pozwoliło to na wyznaczenie parametrów geometrycznych, charakteryzujących badane powierzchnie i skorelowanie tych parametrów z uzyskanymi za pomocą profilometru stykowego parametrami chropowatości powierzchni.

Słowa kluczowe: *optyczne metody pomiarowe, analiza obrazu, chropowatość powierzchni, frezowanie*

WPROWADZENIE

Jedną z szeroko stosowanych obecnie obróbek ubytkowych jest frezowanie [1], gdzie ruch główny wykonuje obracające się narzędzie w postaci pojedynczego freza, zespołu frezów, tarczy lub głowicy frezowej, natomiast ruch pomocniczy wykonuje materiał obrabiany przesuwany się ruchem posuwowym. Frezowanie jest obróbką ubytkową o największych wydajnościach stosowaną głównie do obróbki powierzchni płaskich. Jej cechą charakterystyczną jest skrawanie przerywane, podczas którego każde ostrze wykonuje pracę przez pewien określony czas. Na powierzchni powstają wyraźne ślady ostrzy w wyniku kontaktu z materiałem obrabianym. W ten sposób tworzona jest struktura geometryczna powierzchni [2, 3] po frezowaniu. Do jej oceny stosuje się wiele metod pomiarowych m.in. stykowych [4, 5] i optycznych [6, 7].

Metody optyczne wykorzystuje się w nowoczesnych systemach kontrolno-pomiarowych pracujących często w cyklu automatycznym w ramach tzw. kontroli aktywnej [1]. Kontrola taka odbywająca się bez przerywania procesu produkcyjnego pozwala znacznie skrócić jego czas oraz zmniejszyć straty spowodowane brakami.

METODYKA BADAŃ

Prowadzone badania miały na celu sprawdzenie możliwości wykorzystania optycznych metod pomiarowych i komputerowej analizy obrazu do oceny powierzchni obrobionych przez frezowanie. Do badań przeznaczono 8 próbek o wymiarach $100 \times 50 \times 30$ mm wykonanych ze stali EN C 45, aluminium EN AW6082 i mosiądzu EN CW612N. Próbkę poddano obróbce wykorzystując frezarkę pionową o mocy silnika 7,5 kW. Próbkę od 1 do 5 frezowano ostrzami o geometrii: $\kappa = 25^\circ$, $\kappa' = 5^\circ$, $r_\varepsilon = 0,4$ mm, natomiast próbki od 6 do 8 ostrzami o geometrii: $\kappa = 45^\circ$, $\kappa' = 45^\circ$, $r_\varepsilon = 1,5$ mm, $b_s = 2,0$ mm. Po zakończeniu obróbki wszystkie próbki poddano pomiarom stykowym w celu uzyskania podstawowych parametrów chropowatości powierzchni. Pomiar przeprowadzono z wykorzystaniem profilometru stykowego Hommel-Tester T2000 firmy Hommelwerke z zamontowanym czujnikiem pomiarowym TK100 bez ślizgacza z ostrzem odwzorowującym o promieniu zaokrąglenia wierzchołka równym $5 \mu\text{m}$. Pomiar realizowany był z następującymi parametrami: wymiary powierzchni mierzonej $4,8 \times 0,8$ mm, liczba mierzonych profili powierzchni 1, zakres pomiarowy $20 \mu\text{m}$. Parametry obróbki oraz wyniki pomiarów profilometrycznych zestawiono w tabl. 1.

Tablica 1. Parametry procesu i próbek użytych w badaniach

Nr próbki	Materiał obrabiany	Parametry frezowania	Parametry chropowatości powierzchni		
			R_a [μm]	R_z [μm]	R_t [μm]
1	Stal EN C45	$v_c = 100$ [m/min], $f_z = 0,95$ [mm/ostre], $a_p = 0,2$ [mm], $D_c = 70$ [mm]	22	81	86
2		$v_c = 75$ [m/min], $f_z = 0,46$ [mm/ostre], $a_p = 0,2$ [mm], $D_c = 70$ [mm]	9,5	38,0	43,0
3		$v_c = 75$ [m/min], $f_z = 0,31$ [mm/ostre], $a_p = 0,15$ [mm], $D_c = 70$ [mm]	5,5	18,0	21,0
4		$v_c = 180$ [m/min], $f_z = 0,17$ [mm/ostre], $a_p = 0,15$ [mm], $D_c = 170$ [mm]	2,0	11,0	13,0
5		$v_c = 180$ [m/min], $f_z = 0,08$ [mm/ostre], $a_p = 0,15$ [mm], $D_c = 170$ [mm]	1,1	7,5	8,0
6		$v_c = 220$ [m/min], $f_z = 0,08$ [mm/ostre], $a_p = 1$ [mm], $D_c = 125$ [mm]	0,57	4,0	4,33
7	Mosiądz EN CW612N	$v_c = 220$ [m/min], $f_z = 0,08$ [mm/ostre]	0,84	5,79	7,53
8	Aluminium EN AW6082	$a_p = 1$ [mm], $D_c = 125$ [mm]	0,1	1,2	1,5

κ – główny kąt przyłożenia [$^\circ$], κ' – pomocniczy kąt przyłożenia [$^\circ$], r_ε – promień zaokrąglenia ostrza [mm], b_s – długość powierzchni gładzącej ostrza [mm], v_c – prędkość skrawania [m/min], f_z – posuw na ostrze [mm/ostre], a_p – głębokość skrawania [mm], D_c – średnica głowicy frezowej [mm].

Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego do rejestracji cyfrowych obrazów powierzchni frezowanych

Ocenę mikronierówności powierzchni przeprowadzono za pomocą dwóch optycznych metod pomiarowych. W pierwszej metodzie wykorzystano zjawisko tzw. samozacienienia powierzchni [6], [8], czyli zacienienia niektórych obszarów powierzchni przez nierówności, występujące przy dużym gradiencie funkcji opisującej powierzchnię, szczególnie wtedy, gdy kąty padania światła na powierzchnię są duże. W celu akwizycji obrazów cyfrowych powierzchni frezowanych zestawiono odpowiednie stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rys. 1. Oceniane powierzchnie oświetlano światłem monochromatycznym generowanym przez diodę elektroluminescencyjną.

Diodę zamocowano na ramieniu kątomierza warsztatowego w celu wyznaczenia powtarzalnych kątów padania fali świetlnej. Obrazy powierzchni próbki rejestrowano za pomocą układu optycznego zbudowanego z obiektywu, tulejek redukcyjnych i kolorowej kamery z przetwornikiem matrycowym typu CCD o wielkości 1/3 cala. Obraz z kamery przekazywany był do komputera wyposażonego w kartę pomiarową National Instruments IMAQ PCI 1405 oraz oprogramowanie służące do akwizycji obrazu opracowane w środowisku LabView 6.0. [9].

Zarejestrowane obrazy poddano następnie komputerowemu przetwarzaniu i analizie wykorzystując oprogramowanie opracowane w środowisku Matlab 6.1 [10]. Pozwalało ono na oszacowanie długości pojedynczego piksela oraz liczby pikseli na odcinku samozacienienia. W ten sposób wyznaczano długość samozacienienia z uwzględnieniem kąta padania światła, a tym samym wysokość nierówności powierzchni. W celu wyznaczenia wysokości nierówności z rozkładu intensywności światła opracowano model matematyczny, opisany wzorem (1):

$$W_{NP} = 1000 L_p W_p \operatorname{tg} \alpha [\mu m], \quad (1)$$

gdzie:

W_{NP} - wysokość nierówności powierzchni,

L_p - liczba pikseli,

W_p - długość pojedynczego piksela,

α - kąt oświetlenia.

Przykładowe obrazy cyfrowe powierzchni frezowanych dla próbek nr 1 oraz nr 7 wraz z wyznaczoną reprezentacją rozkładu intensywności światła przedstawiono na rys. 2.

Rys. 2. Obrazy cyfrowe powierzchni po frezowaniu wraz z odpowiadającą im reprezentacją rozkładu intensywności światła dla kąta oświetlenia 30° dla: a) próbki nr 1, b) próbki nr 7

Drugą z zastosowanych metod pomiarowych była optyczna metoda skaterometrii laserowej [8], bazująca na zjawisku rozpraszania światła [6]. Ocenę mikronierówności powierzchni za pomocą takiej metody przeprowadza się m.in. na podstawie zarejestrowanych obrazów światła rozproszonego. Obrazy takie muszą być odpowiednio przetworzone i przeanalizowane w celu wyodrębnienia z nich tych cech i właściwości, które są skorelowane z właściwościami i parametrami struktury geometrycznej powierzchni. Wykorzystuje się w tym celu szeroko komputerowe techniki przetwarzania i analizy obrazu.

W celu rejestracji obrazów światła rozproszonego zestawiono stanowisko badawcze, którego schemat pokazano na rys. 3. W skład stanowiska wchodził laser półprzewodnikowy typu CPS182 firmy Thorlabs, Inc., o mocy $4,5\text{ mW}$, emitujący wiązkę światła o długości fali $\lambda = 635\text{ nm}$. Wiązka skierowana pod kątem padania 75° oświetlała badaną powierzchnię równolegle i prostopadłe do śladów obróbki w zależności od ustawienia próbki. Obrazy światła rozproszonego powstające na matowym ekranie, rejestrowano za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus. Aparat wyposażony był w matrycę typu CCD o wielkości $2/3$ cala i efektywnej liczbie 5,24 miliona pikseli. Obrazy rejestrowano z następującymi parametrami: czas ekspozycji $t_{exp} = 5\text{ sek.}$, czułość ISO 80, rozdzielczość obrazu 2592×1944 pikseli, format zapisu pliku JPEG.

Rys.3. Stanowisko badawcze do rejestracji cyfrowych obrazów światła rozproszonego

Do analizy obrazów wykorzystano oprogramowanie komputerowe Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc., (USA) [11]. Posłużyło ono do wyznaczenia parametrów geometrycznych (pole powierzchni, szerokość, długość) oraz przeprowadzenia analizy densytometrycznej analizowanych obrazów. Inne zastosowania tego oprogramowania opisano m.in. w [12], [13], [14] Przykładowe obrazy światła rozproszonego dla próbki nr 5 oraz wyznaczone parametry geometryczne pokazano na rys. 4.

Rys. 4. Wyniki badań skaterometrycznych dla próbki nr 5: a) obrazy światła rozproszonego wraz z mikroskopowym obrazem powierzchni próbki, b) wyznaczone parametry geometryczne analizowanych obrazów za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1

Program Image-Pro® Plus 5.1 posłużył również do przeprowadzenia analizy densytometrycznej. Przykład takiej analizy przeprowadzonej dla próbki nr 5 pokazano na rys. 5.

Rys. 5. Przykład analizy densytometrycznej przeprowadzonej dla obrazu próbki nr 5 w dwóch prostopadłych kierunkach do śladów obróbki za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1

WYNIKI I DISKUSJA

Wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów. Na rys. 6 pokazano wyniki pomiarów mikronierówności powierzchni za pomocą profilometru stykowego Hommel-Tester T2000 i metody optycznej wykorzystującej zjawisko samozacienienia powierzchni.

Rys. 6. Zależność wysokości nierówności W_{NP} od chropowości powierzchni R_t dla próbek poddanych ocenie metodą stykową i optyczną

Natomiast na rys. 7 pokazano zależność pola powierzchni powstającego obrazu skaterometrycznego od chropowatości powierzchni przy równoległym i prostopadłym oświetlaniu badanej próbki.

Rys. 7. Zależność pola powierzchni obrazu od chropowatości powierzchni R_a dla próbek oświetlanych równoległe i prostopadłe do śladów obróbki

WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wykorzystane metody pomiarowe z powodzeniem można zastosować do oceny mikronierówności powierzchni frezowanych. Metody optyczne wykorzystujące zjawisko samozacienienia powierzchni i rozpraszania światła mogą zostać dodatkowo połączone z technikami komputerowego przetwarzania i analizy obrazu. Takie połączenie z racji dużych możliwości wymienionych technik oraz szeroko dostępnego oprogramowania pozwala nie tylko na uzyskanie parametrów charakteryzujących badaną powierzchnię, ale także na analizę, wizualizację i ocenę uzyskanych danych pomiarowych.

BIBLIOGRAFIA

1. Nowicki B.: Struktura geometryczna. Chropowatość i faliistość powierzchni. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1991.
2. Miko E.: Konstituowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrobionych narzędziami o zdefiniowanej stereometrii ostrzy. Monografie, Studia, Rozprawy nr 46, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2004.
3. Oczko K. E., Lubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2003.

4. Dębiński B., Storch B.: Zapis stereometrii obrobionej powierzchni. Sypm. „Makro i Mikro Geometria Powierzchni”, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 1990.
5. Colak O., Kurbanoglu C., Kayacan M. C.: Milling surface roughness prediction using evolutionary programming methods. *Materials and Design* 28 (2007) 657-666.
6. Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiaru nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
7. Storch B.: Zjawiska przykrawędziowe i monitorowanie chropowatości powierzchni po obróbce jednostrzowej. Monografia Wydziału Mechanicznego Nr 124, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2006.
8. Pawlus P.: Topografia powierzchni – pomiary, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2005.
9. LabView 6.0, National Instruments Corporation, Austin, TX, USA.
<http://www.ni.com/labview>
10. Matlab 6.1, The MathWorks, Inc. Natick, MA, USA.
<http://www.mathworks.com/products/matlab>
11. Image-Pro[®] Plus. Start-up Guide for Windows. Media Cybernetics, Inc., Silver Spring, MD, USA, 2004. <http://www.mediacy.com>
12. Kapłonek W.: Ocena topografii arkuszy ściernych z wykorzystaniem światła strukturalnego i komputerowej analizy obrazu. *Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 5 (2006) 38-41.
13. Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: Zastosowanie skaterometrii laserowej i komputerowej analizy obrazu do oceny mikronierówności powierzchni będących w ruchu. XII Konf. "Metrologia w technikach wytwarzania", Augustów, 2007. *Przegląd Mechaniczny* 9 (2007) 119-124.
14. Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: Laser Scatterometry Used for Assessment of Microfinished Shafts. Proc. IV. International Congress on Precision Machining ICPM 2007, Vol.1, Section: Design & Testing II, pp. 291-296.

PODZIĘKOWANIA

Autorzy składają serdeczne podziękowania Panu mgr. inż. Konradowi Klupczyńskiemu z firmy Tu-Pol Tuchenhausen Spółka z o.o. w Koszalinie za przygotowanie próbek do badań oraz Panu Dariuszowi Iwańcowi z Katedry Mechaniki Precyzyjnej Politechniki Koszalińskiej za pomoc w przeprowadzeniu pomiarów profilometrycznych.