

Krzysztof NADOLNY^{*}, Wojciech KAPŁONEK

^{*} POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA INŻYNIERII PRODUKCJI
ul. Raclawicka 15-17, 75-620 Koszalin

Ocena stanu czynnej powierzchni ściernicy z wykorzystaniem skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu**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 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. 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**Streszczenie**

Jednym z niepożądanych zjawisk zachodzących w trakcie obróbki ubytkowej jest powstawanie zalepień na czynnej powierzchni ściernicy (CPS). Ma to znaczący wpływ na przebieg i efekty procesu szlifowania. Ważna jest więc, odpowiednia ocena stanu CPS w celu wykrywania nadmiernego rozrostu zalepień. W artykule przedstawiono propozycję takiej oceny z zastosowaniem skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu. Dokonano krótkiego opisu stosowanych metod oraz przedstawiono wybrane wyniki badań uzyskanych dla powierzchni ściernicy o strefowo zróżnicowanej budowie po jednoprzęciowym szlifowaniu otworów w stali 100Cr6. Stwierdzono dużą użyteczność zastosowanych metod, co może stanowić propozycję rozwiązania problemu diagnostyki narzędzi ściernych w procesach obróbkowych.

Słowa kluczowe: skaterometria laserowa, przetwarzanie i analiza obrazu, czynna powierzchnia ściernicy, zalepienie, narzędzia ściernicze.

Grinding wheel active surface inspection with use of laser scatterometry as well as image processing and analysis techniques**Abstract**

One of the most undesirable phenomena during machining process is forming smears on the grinding wheel active surface. It has the significant influence on grinding process course and effects. That is why the suitable inspection of the grinding wheel active surface in order to detect excessive growth of smears is so important. Such inspection can be carried out by machine vision systems or systems using the optical measuring methods (especially those from a group of light scattering methods). In the paper there is presented and discussed a proposal of optical inspection with use of laser scatterometry as well as image processing and analysis techniques. It consists in acquisition of the image of scattered light created during illumination of a tested surface by the laser light (wavelength $\lambda = 635$ nm). The analysis of such image can enable obtaining the values of geometric and photometric parameters, which can be correlated with e.g. selected parameters of the surface roughness. Experimental investigations were carried out on surfaces of the grinding wheel of diversified zone structure after the single-pass internal cylindrical grinding of 100Cr6 steel. The discussed methods were confirmed to be useful, which could be a good proposal for solving the important problem of diagnostics of abrasive tools in abrasive processing.

Keywords: laser scatterometry, image processing and analysis techniques, grinding wheel active surface, smear, abrasive tools.

1. Wstęp

Przebieg i efekty procesu szlifowania w dużym stopniu zależą od stanu czynnej powierzchni ściernicy (CPS), która kształtuje ostateczną strukturę geometryczną powierzchni (SGP) [1] oraz wpływa na stan naprężeń w warstwie wierzchniej obrobionego przedmiotu. Jednym z najbardziej niepożądanych zjawisk zachodzących w trakcie obróbki jest powstawanie zalepień CPS.

Tworzenie zalepień następuje na skutek zachodzącego w wysokich temperaturach przywierania wiórów do powierzchni ziaren ściernych.

Mogą być one również wywołane zbyt małymi przestrzeniami międzyziarnowymi CPS, które nie są w stanie odprowadzić ze strefy obróbki wszystkich wiórów i produktów zużycia ściernicy. Rozrost zalepień prowadzi do zmniejszenia zdolności skrawnej ściernicy, obniża wydajność, zwiększa siły szlifowania oraz udział tarcia w tym procesie. Powoduje to wzrost temperatury w strefie styku ściernicy z materiałem obrabianym. Zbyt wysoka temperatura sprzyja powstawaniu defektów szlifierskich takich jak np. przypalenia szlifierskie. W tym kontekście bardzo istotna staje się możliwość oceny stanu CPS w trakcie szlifowania, w celu wykrywania nadmiernego rozrostu zalepień. Umożliwiłoby to przerywanie szlifowania w celu regeneracji i ostrzenia ściernicy w zabiegu obciągania. Jednocześnie możliwe byłoby ograniczenie braków wynikających z powstawania defektów szlifierskich.

Istnieje wiele grup metod pomiarowych pozwalających na ocenę stanu CPS [2, 3, 4]. Ogólnie można je podzielić na metody statyczne [5], w których pomiar jest realizowany na nieruchomej ściernicy, oraz metody dynamiczne, umożliwiające przeprowadzenie pomiaru bezpośrednio w czasie pracy ściernicy [6]. Do najczęściej wykorzystywanych metod statycznych należą: metody chemiczne, oparte na fotochemicznej rejestracji obrazu cząstek nalepionego metalu oraz ich chemicznym rozpuszczeniu, metody wykorzystujące techniki izotopowe, polegające na zliczaniu impulsów pochodzących od napromieniowanych zalepień metalicznych oraz metody oparte na pomiarze parametrów wiązki elektronów odbijających od CPS. Największe znaczenie wśród metod dynamicznych zyskały metody z grupy metod elektrycznych, polegające na pomiarze pojemności, lub indukcyjności, oraz metody optyczne, polegające na bezpośredniej obserwacji CPS za pomocą kamery lub pomiarze parametrów światła odbitego i rozproszonego z takiej powierzchni [7].

Jedną z metod optycznych rokujących duże nadzieje na zastosowanie do oceny stanu CPS jest skaterometria laserowa [8]. Prowadzone w Zakładzie Metrologii i Jakości Politechniki Koszalińskiej prace badawcze, wykazały dużą użyteczność i uniwersalność tej metody wykorzystującej zjawisko rozpraszania światła [9, 10].

W niniejszej pracy Autorzy przedstawili propozycję zastosowania skaterometrii laserowej oraz technik przetwarzania i analizy obrazu do optycznej oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy. Tego typu ocena polega na rejestrowaniu obrazu światła rozproszonego powstającego w wyniku oświetlenia badanej powierzchni wiązką światła laserowego [11]. Analiza takiego obrazu może pozwolić na wyznaczenie wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych, które można skorelować m.in. z wybranymi parametrami SGP.

2. Badania doświadczalne

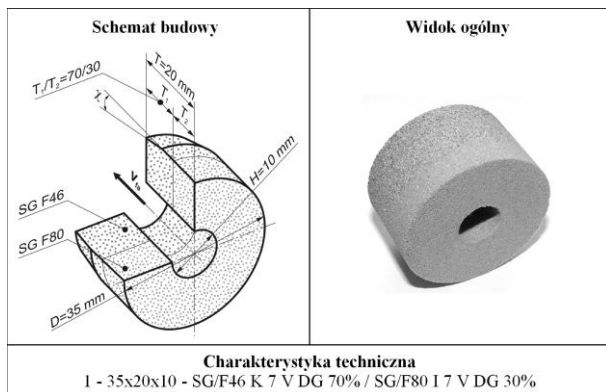
Głównym celem badań doświadczalnych było przeanalizowanie możliwości zastosowania skaterometrii laserowej oraz technik

przetwarzania i analizy obrazu do optycznej oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy. Dodatkowym celem było opracowanie odpowiedniej metodyki badań powierzchni narzędzi ściernych z widocznymi zalepieniami z wykorzystaniem obrazów światła rozproszonego.

2.1. Obróbka w celu uzyskania zalepień

Do badań przeznaczono ściernicę o strefowo zróżnicowanej budowie, charakteryzującą się odmienną budową strefy szlifowania zgrubnego i wykończeniowego. Charakterystykę wykorzystywanej ściernicy przedstawiono w tablicy 1.

Tab. 1. Zastosowana w badaniach ściernica o strefowo zróżnicowanej budowie
Tab. 1. Grinding wheel of diversified zone structure used for investigations



Tego typu ściernice wykorzystywane są w procesie jednoprzęciowego szlifowania otworów, w którym całkowity nadatek obróbkowy usuwany jest w jednym przejściu ściernicy [12, 13, 14]. Nadatek obróbkowy rzędu 0,2 mm rozkładany jest równomiernie na czynnej powierzchni gruboziarnistej strefy szlifowania zgrubnego takich ściernic poprzez ukształtowanie nakroju stożkowego. Wartość kąta nakroju χ i jego szerokość b dobiera się do grubości warstwy szlifowanej oraz szerokości stosowanej ściernicy.

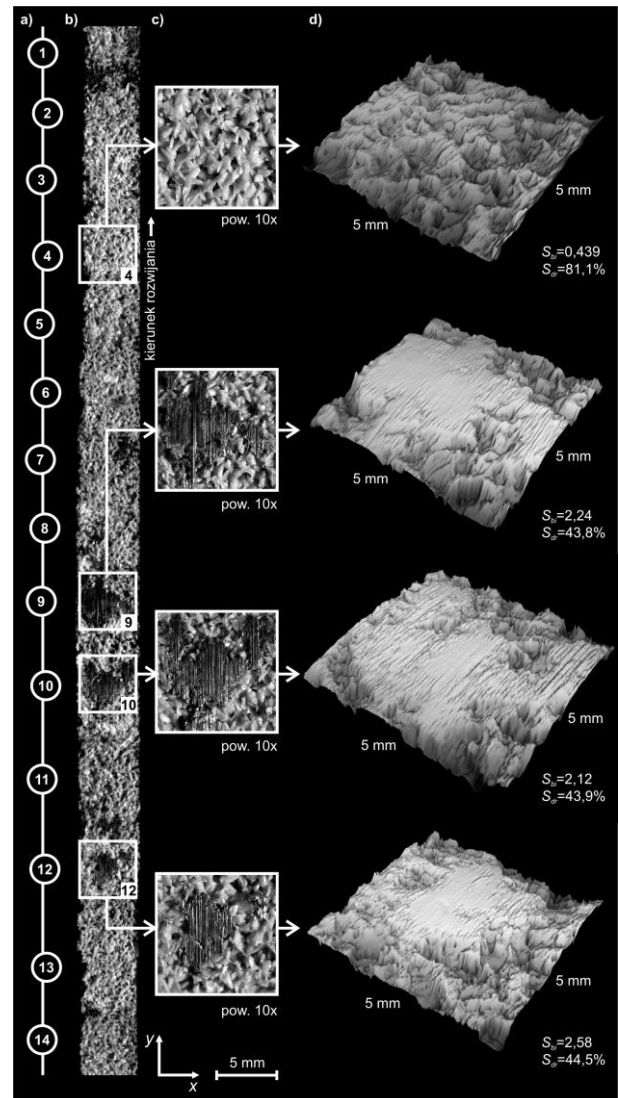
Ściernicę tę użyto do realizacji procesu szlifowania jednoprzęciowego otworów w stali 100Cr6. Zeszlifowano nią materiał obrabiany o objętości wynoszącej 475 mm³, w czasie 19 s, co odpowiadało wydajności ubytkowej szlifowania równej 24 mm³/s. Szlifowanie otworów z tak dużą wydajnością ubytkową doprowadziło do powstania zalepień na czynnej powierzchni badanej ściernicy. Wybrane obszary pozbawione zalepień, oraz z zalepieniami zostały odpowiednio oznaczone. Łącznie do badań przeznaczono 14 obszarów.

2.2. Pomiary mikrotopografii powierzchni

W celu wyznaczenia podstawowych parametrów ocenianych obszarów czynnej powierzchni badanej ściernicy przeprowadzono pomiary mikrotopografii powierzchni. Do pomiarów wykorzystano profilometr Talyscan 150 firmy Taylor Hobson Ltd., z laserową głowicą pomiarową o nominalnej dokładności $\pm 0,15\ \mu\text{m}$. Mikrotopografie powierzchni ściernic rejestrowano dla obszaru o wymiarach $5 \times 5\ \text{mm}$. Pomiar odbywał się w 101 przejściach z krokiem co $50\ \mu\text{m}$. W jednym przejściu rejestrowanych było 500 punktów z prędkością $V = 5\ \text{mm/s}$. Pomiar wykonywany był w trybie dwuprzbiegowym, tzn. rejestracja danych odbywała w obu kierunkach ruchu mierzonej powierzchni.

Do analizy mikrotopografii zastosowano oprogramowanie MountainsMap Universal 3.1.0 firmy Digital Surf. Spośród szeregu wyznaczonych parametrów SGP do analizy wybrano te, które wykazywały się największą czułością na zmiany charakterystyki powierzchni, spowodowane wystąpieniem zalepień. Były to dwa parametry: wskaźnik nośności powierzchni S_{bi} (parametr funkcjonalny) oraz współczynnik rozwinięcia powierzchni S_{dr} (parametr hybrydowy) [15]. Różnica pomiędzy wartością parametru S_{bi} obliczoną dla powierzchni bez ($S_{bi} = 0,439$) i z zalepieniem ($S_{bi} = 2,12 - 2,58$) wyno-

siła od 480 do 580%. Natomiast współczynnik S_{dr} zmniejszył się niemal o połowę, z wartości 81,1% dla powierzchni bez zalepienia, do około 44% w przypadku obszarów powierzchni ściernicy zalepienych materiałem obrabianym. Na rys. 1 przedstawiono zestawienie wyników akwizycji obrazów i mikrotopografii przedstawiających wybrane obszary czynnej powierzchni badanej ściernicy.



Rys. 1. Zestawienie wyników rejestracji obrazów i mikrotopografii wybranych obszarów czynnej powierzchni badanej ściernicy bez zalepień i z widocznymi zalepieniami: a) schemat przedstawiający położenie obszarów przeznaczonych do analizy, b) makrofotografia całkowitej powierzchni ściernicy po rozwinięciu z wybranymi obszarami (4, 9, 10, 12) bez zalepień oraz z widocznymi zalepieniami, c) powiększone obrazy wybranych obszarów z rysunku 1b, d) odpowiadające obrazom z rysunku 1c mikrotopografie powierzchni wraz z wyznaczonymi wartościami parametrów SGP

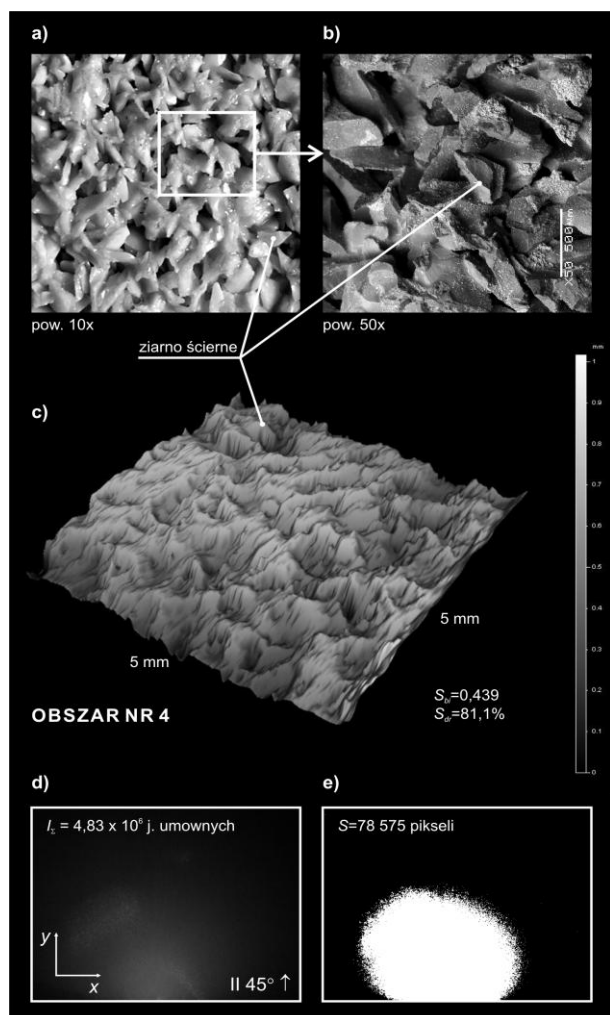
Fig. 1. Investigation results in a form of images and microtopographies of selected areas of grinding wheel active surface with and without visible smears: a) schematic diagram of analysed areas, b) macrophotography of grinding wheel total surface in developed view as well as selected areas (4, 9, 10, 12) with and without visible smears, c) enlarged images of selected areas of Fig. 1b, d) surface microtopographies (with calculated values of surface geometrical structure parameters) corresponding to the enlarged images of selected areas shown in Fig. 1c

2.3. Akwizycja obrazów mikroskopowych

Trzecim etapem prowadzonych badań była akwizycja obrazów mikroskopowych przedstawiających wybrane obszary czynnej powierzchni badanej ściernicy zawierające zalepienia. Do rejestracji obrazów, przy powiększeniach 50 \times , 100 \times , 500 \times , wykorzystano elektronowy mikroskop skaningowy typu JSM-5500LV firmy Jeol.

2.4. Akwizycja obrazów światła rozproszonego

Akwizycja obrazów skaterometrycznych przeprowadzana była na specjalnie zestawionym stanowisku pomiarowym. W jego skład wchodził laser półprzewodnikowy CPS180 firmy Thorlabs, Inc., emitujący w sposób ciągły wiązkę światła z zakresu widzialnego o długości fali $\lambda = 635$ nm. Wiązka skierowana pod kątem padania równym 45° , oświetlała badaną powierzchnię ściernicy, tworząc na niej plamkę o średnicy 1 mm. W wyniku rozproszenia światła z ocenianej powierzchni, w płaszczyźnie obserwacji tworzony był obraz kąтового rozkładu natężenia światła rozproszonego. Rejestrację dokonywano dla wszystkich 14 obszarów wolnych od zalepień i z widocznymi zalepszeniami, gdy płaszczyzna padania była równoległa do osi ściernicy. Światło rozproszone obserwowane było na matowym ekranie, z naniesioną podziałką służącą do wstępnego szacowania wymiarów powstającego obrazu.

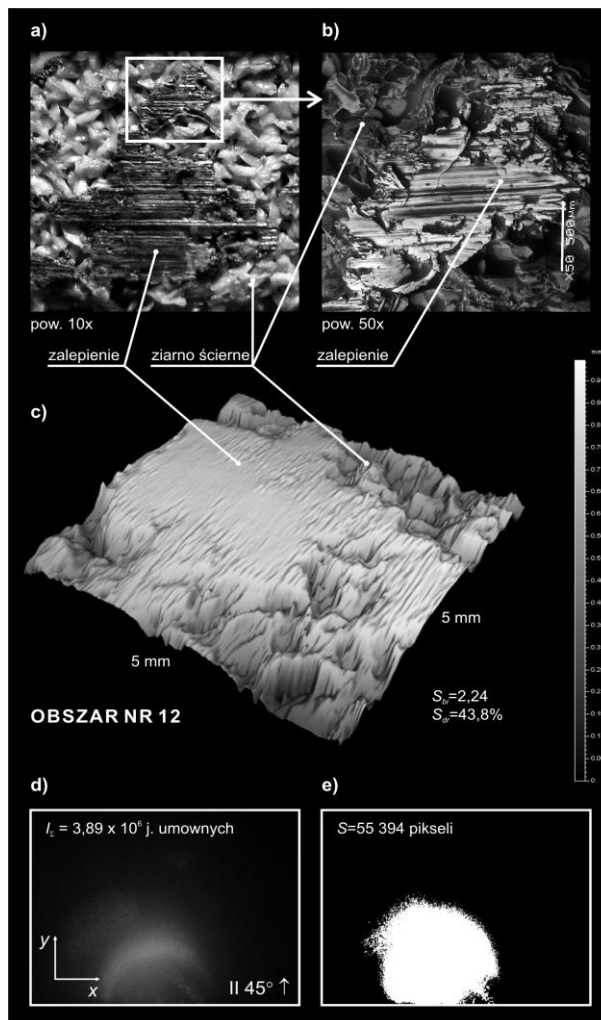


Rys. 2. Zestawienie wyników rejestracji obrazów i mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy dla obszaru nr 4 bez zalepień: a) obraz makroskopowy – pow. 10 \times , b) obraz mikroskopowy – pow. 50 \times , c) mikrotopografia powierzchni (obszar mierzony 5 \times 5 mm), d) obraz światła rozproszonego, e) obraz z rysunku 2d po procesie segmentacji

Fig. 2. Investigation results in a form of images and microtopographies of selected area No. 4 of grinding wheel active surface without smear: a) macrophotography (mag. 10 \times), b) microphotography SEM (mag. 50 \times), c) surface microtopography (measured area 5 \times 5 mm), d) image of scattered light, e) image of scattered light after segmentation process

Akwizycji obrazów światła rozproszonego dokonywano korzystając z cyfrowego aparatu fotograficznego Camedia C-5060WZ firmy Olympus zamocowanego na statywie. Aparat wyposażony był w matrycowy detektor typu CCD o efektywnej liczbie 5,10 miliona pikseli. Obrazy rejestrowano z następującymi parametrami: czas ekspozycji $t_{exp} = 1$ s, rozdzielczość obrazu 2592 \times 1944 pikseli, czułość ISO 400, format zapisu *.jpg. Na rys. 2 oraz 3

przedstawiono zestawienie wyników akwizycji obrazów i mikrotopografii przedstawiających wybrane obszary czynnej powierzchni ściernicy bez zalepień i z widocznymi zalepszeniami.



Rys. 3. Zestawienie wyników rejestracji obrazów i mikrotopografii czynnej powierzchni ściernicy dla obszaru nr 12 z widocznym zalepszeniem: a) obraz makroskopowy – pow. 10 \times , b) obraz mikroskopowy – pow. 50 \times , c) mikrotopografia powierzchni (obszar mierzony 5 \times 5 mm), d) obraz światła rozproszonego, e) obraz z rysunku 3d po procesie segmentacji

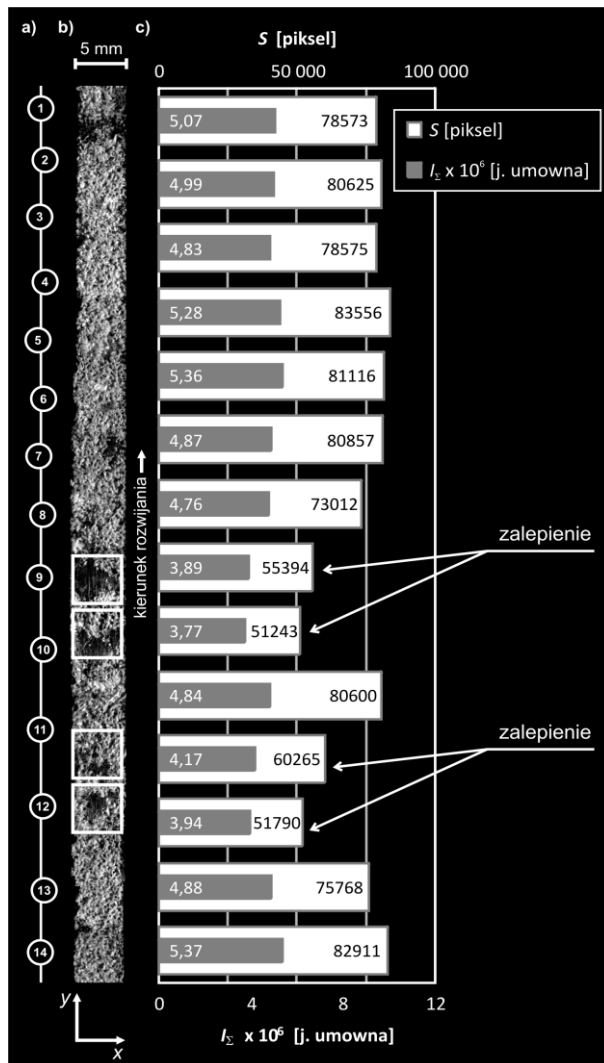
Fig. 3. Investigation results in a form of images and microtopographies of selected area No. 12 of grinding wheel active surface with visible smear: a) macrophotography (mag. 10 \times), b) microphotography SEM (mag. 50 \times), c) surface microtopography (measured area 5 \times 5 mm), d) image of scattered light, e) image of scattered light after segmentation process

2.5. Przetwarzanie i analiza zarejestrowanych obrazów światła rozproszonego

W ostatnim etapie obrazy światła rozproszonego poddano analizie za pomocą oprogramowania Image-Pro[®] Plus 5.1 firmy Media Cybernetics, Inc. Analiza obejmowała wyznaczenie wybranych parametrów geometrycznych i fotometrycznych ocenianych obrazów. Przed przystąpieniem do analizy obrazy poddane zostały wstępnemu przetworzeniu. W celu skrócenia czasu analizy zmniejszono ich rozdzielczość do 640 \times 480 pikseli. Ponadto dokonano korekcji jasności i kontrastu oraz odpowiednio wykadrowano.

Przyjęto, że analiza będzie obejmowała wyznaczenie dwóch parametrów tj. pola powierzchni obrazu skaterometrycznego S oraz sumarycznego natężenia światła jasnych obszarów obrazu I_s . W tym celu oprogramowanie dokonało segmentacji poszczególnych obrazów (w celu uzyskania konturów niezbędnych do wyznaczenia parametrów geometrycznych) lub korekcji tonalnej (poprawy m.in. jasności i kontrastu, w celu uzyskania poprawnych wartości parametrów fotometrycznych). Niezależnie od sposobu wstępnego przetworzenia

obrazów ww. parametry uzyskiwano korzystając z funkcji *Count/Size*. Pozwalała ona na przeprowadzenie analizy ilościowej na podstawie automatycznego zliczania obiektów w ocenianych obrazach. Uzyskane wyniki zestawiono w formie graficznej i pokazano na rys. 4.



Rys. 4. Graficzne przedstawienie wyników analizy obrazów światła rozproszonego prowadzonej za pomocą oprogramowania Image-Pro® Plus 5.1: a) schemat przedstawiający położenie obszarów przeznaczonych do analizy, b) obraz makroskopowy czynnej powierzchni ściernicy z oznaczonymi obszarami (9, 10, 11, 12) na których wystąpiły zalepienia, c) uzyskane wartości parametrów geometrycznych i fotometrycznych w formie wykresu kolumnowego

Fig. 4. Graphic presentations of the scattered light image analysis by Image-Pro® Plus 5.1: a) schematic diagram of analysed areas, b) macroscopic image of grinding wheel active surface with marked areas (9, 10, 11, 12) with visible smears, c) values of geometric and photometric parameters in a form of column graph

Z przedstawionego na rys. 4 zestawienia wynika, że dla czterech obszarów (9, 10, 11, 12) zaobserwowano wyraźny spadek wartości analizowanych parametrów geometrycznych i fotometrycznych. Spadek procentowy wartości dla pola powierzchni S wyniósł odpowiednio (34%, 39%, 28%, 38%), natomiast dla sumarycznego natężenia światła I_{Σ} (27%, 30%, 22%, 27%). Oznacza to, iż w analizowanych obszarach CPS wystąpiły znaczne zalepienia materiałem obrabianym (stal 100Cr6).

3. Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych skłaniają do stwierdzenia, iż opisane w artykule metody mogą być zastosowane do oceny stanu czynnej powierzchni ściernicy. Dotyczy to zarówno jej struktury, jak i elementów niespecyficznych powstałych na powierzchni CPS w wyniku różnego rodzaju oddziaływań. Jednym

z takich niespecyficznych elementów, opisanych w pracy, mogą być zalepienia. Jak wykazały przedstawione wyniki badań metoda skaterometrii laserowej pozwala na precyzyjną ich detekcję. Zlokalizowanie i rozpoznanie zalepień, a w następnej kolejności ich odpowiednia analiza (na podstawie zarejestrowanego obrazu światła rozproszonego) umożliwia uzyskanie pełniejszej informacji o stanie badanej powierzchni. Duża użyteczność wykorzystanych metod może w przyszłości pozwolić na ich aplikację w urządzeniach i systemach pomiarowych. Może to stanowić propozycję rozwiązania problemu diagnostyki narzędzi ściernych w procesach obróbkowych.

Autorzy składają serdeczne podziękowania Panu Andrzejowi Nowickiemu z Zespołu Laboratoriów nr 1 Wydziału Mechanicznego, Politechniki Koszalińskiej za przygotowanie ściernicy do badań, Panu Adamowi Szpakowiczowi z CNTH, za przeprowadzenie pomiarów mikrotopografii powierzchni ściernicy oraz Panu Ryszardowi Gritzmanowi z IMNiTP za wykonanie mikrofotografii powierzchni ściernicy.

4. Literatura

- [1] Adamczak S.: Pomiary geometryczne powierzchni. Zarysy kształtu, falistości i chropowatości. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2008.
- [2] Lachance S., Warkentin A., Bauer R.: Development of an Automated System for Measuring Grinding Wheel Wear Flats. *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 22, No. 2, 2003, pp.130–135.
- [3] Lachance S., Bauer R., Warkentin A.: Application of Region Growing Method to Evaluate the Surface Condition of Grinding Wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, No. 7-8, 2004, pp. 823–829.
- [4] Plichta J.: Zintegrowana metoda diagnostyki i regeneracji ściernicy z monokrystalicznym ziarnem CBN o spoiwie ceramicznym. *Postawy Technologii Maszyn i Urządzeń*, 21(1997)3, str. 71–82.
- [5] Brinksmeier E., Werner F.: Monitoring of Grinding Wheel Wear. *Manufacturing Technology*, Vol. 41, No 1, 1992, pp. 373–376.
- [6] Furutani K., Ohguro N., Hieu N. T., Nakamura T.: In-process Measurement of Topography Change of Grinding Wheel by using Hydrodynamic Pressure. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 42, No. 13, 2002, pp. 1447–1453.
- [7] Hocken R. J., Chakraborty N., Brown C.: Optical Metrology of Surfaces. *Manufacturing Technology*, Vol. 54, No. 2, 2005, pp.169–183.
- [8] Łukianowicz Cz.: Podstawy pomiarów nierówności powierzchni metodami rozpraszania światła. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2001.
- [9] Kapłonek W., Łukianowicz Cz.: Ocena mikronierówności powierzchni obrabianych na podstawie obrazu światła rozproszonego. *Pomiary Automatyka Kontrola*, Vol. 56, nr 1/2010, str. 28–29.
- [10] Kapłonek W., Żurawski Ł.: Ocena mikronierówności powierzchni frezowanych z zastosowaniem optycznych metod pomiarowych i komputerowej analizy obrazu. *Advances in Materiale Science*, Vol. 8, No. 2(16), 2008, pp. 36–43.
- [11] Rao B. C., Raj B.: Study of Engineering Surfaces Using Laser-Scattering Techniques. *Sādhanā*, Vol. 28, Parts 3 & 4, June/August 2003, 739–761.
- [12] Herman D., Plichta J., Nadolny K.: New Ceramic Abrasive Tools for Rough and Finishing Grinding in One Pass. *Materials Science Forum*, Vol. 526 (2006), pp. 163–168.
- [13] Nadolny K., Plichta J., Herman D., Słowiński B.: Single-Pass Grinding – An Effective Manufacturing Method for Finishing. 19th International Conference on Systems Engineering – ICSENG 2008, Las Vegas, USA, pp. 236–241.
- [14] Nadolny K., Plichta J.: Jednoprześciowe szlifowanie otworów ściernicami o strefowo zróżnicowanej budowie. Monografia Wydziału Mechanicznego nr 158, (K. Nadolny, J. Plichta Red.), Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.
- [15] Pawlus P.: Topografia powierzchni – pomiary, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2005.

otrzymano / received: 15.02.2010

przyjęto do druku / accepted: 12.04.2010

artykuł recenzowany