

Metodyka modelowania powierzchni czynnej ściernic

Methods for modeling the active surface of grinding wheels

WOJCIECH KACALAK
FILIP SZAFRANIEC
DARIUSZ LIPIŃSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.160>

W artykule przedstawiono różne metody generowania topografii powierzchni ściernicy oraz metodykę oceny zgodności modeli z powierzchnią narzędzi rzeczywistych – według tej metodyki decydujące są określone cechy dotyczące kształtu i położenia najwyższych wierzchołków powierzchni. Zwrócono uwagę na znaczenie postaci rozkładu wysokości wierzchołków ziaren, fragmentu funkcji gęstości prawdopodobieństwa odnoszącego się do wierzchołków najwyższych oraz autokorelacji położenia wierzchołków – najważniejszej cechy, która jednak często jest pomijana w modelach opisywanych w literaturze.

SŁOWA KLUCZOWE: czynna powierzchnia ściernicy, model czynnej powierzchni ściernicy, weryfikacja modelu ściernicy

This paper many different methods of generating the topography of the grinding wheel surface and the methodology for assessing the compatibility of models with the surface of real tools was presented. The methodology was indicated that certain features regarding the shape and position of the highest vertices are decisive for assessing the model's conformity with the real surface of the grinding wheel. The significance of not only the form of the distribution of the vertices of the grains was emphasized, but also the significance of the fragment of the probability density function relating to the highest vertices and the autocorrelation of the vertex position as the most important feature, which often are overlooked in the models described in the literature.

KEYWORDS: grinding wheels active surface, grinding wheel model, verification of the grinding wheel model

Obecny etap rozwoju przemysłu (nazywany umownie czwartą rewolucją przemysłową i oznaczany jako Przemysł 4.0) jest opisywany przez zbiór założeń dotyczących integracji inteligentnych systemów produkcyjnych, charakteryzujących się:

- zdolnością komunikowania się systemów cybernetycznych i ludzi,
- globalną digitalizacją i wirtualizacją z wykorzystaniem wielkiej liczby modeli obiektów oraz procesów,
- decentralizacją podejmowania decyzji,
- przetwarzaniem danych w czasie rzeczywistym,
- elastycznym dostosowywaniem inteligentnych fabryk do zmieniających się wymagań odbiorców.

Dawniej to empiryzm był podstawą poszukiwania i podejmowania decyzji uznawanych za optymalne w zbiorze dość ograniczonych danych. Skłonność do empiryzmu wynikała głównie z trzech przesłanek. Pierwsza była związana z postępowaniem w metodach badań, druga – z rosnącym udziałem prac inżynierskich w tworzeniu postępu technologicznego, a trzecia – z nadmiernym zainteresowaniem badaczy skutkami zjawisk, a nie ich przyczynami

(wynikami procesu, a nie mechanizmami kumulacji i współzależności elementarnych oddziaływań zjawisk w analizowanych procesach). Obecnie empiryzm często jest jedynie metodą weryfikacji decyzji, których słuszność wynika z zastosowanych modeli. Ważne staje się więc wnioskowanie na podstawie wielkich zbiorów informacji, podobnie jak wcześniej – na podstawie niepełnych, niepewnych i nieściślych, ale w innej skali.

W tworzeniu modeli zachodzi potrzeba znalezienia kompromisu między szczegółowością i uniwersalnością modelu. Zwiększanie szczegółowości, bez dążenia do uogólnienia i znalezienia konkluzji, bywa jedynie opisywaniem problemu, a nie jego rozwiązywaniem.

Symulacja procesu szlifowania coraz częściej jest uznawana przez środowiska naukowe [1, 7–10, 12, 21, 24–27] i przemysłowe za cenne narzędzie do pozyskiwania informacji na temat różnych zjawisk towarzyszących temu procesowi [4–6, 17, 18, 24] i mających związek z kształtowaniem warstwy wierzchniej obrabianego przedmiotu oraz zmianami topografii powierzchni czynnej ściernicy [1, 2, 19–23] – również w tych obszarach, które mogą być obecnie niedostępne z poziomu badań empirycznych.

Istotnym elementem systemów do symulacji procesów szlifowania jest tworzenie poprawnych modeli czynnej powierzchni ściernicy (CPS), ponieważ od nich zależy dokładność prognozowania wyników procesu obróbki. Nie jest to łatwe zadanie, zwłaszcza że liczba cech mających wpływ na proces szlifowania jest wielka, liczba zdarzeń (w jednostce czasu) w postaci oddziaływań poszczególnych wierzchołków ziaren na obrabianą powierzchnię często przekracza 10^6 , a mechanizm kumulacji skutków jest złożony i ma charakter losowy.

Modelowanie CPS jest również użyteczne w pracach naukowych, których celem jest opracowanie nowych metod i parametrów do oceny cech stereometrycznych narzędzi ściernych.

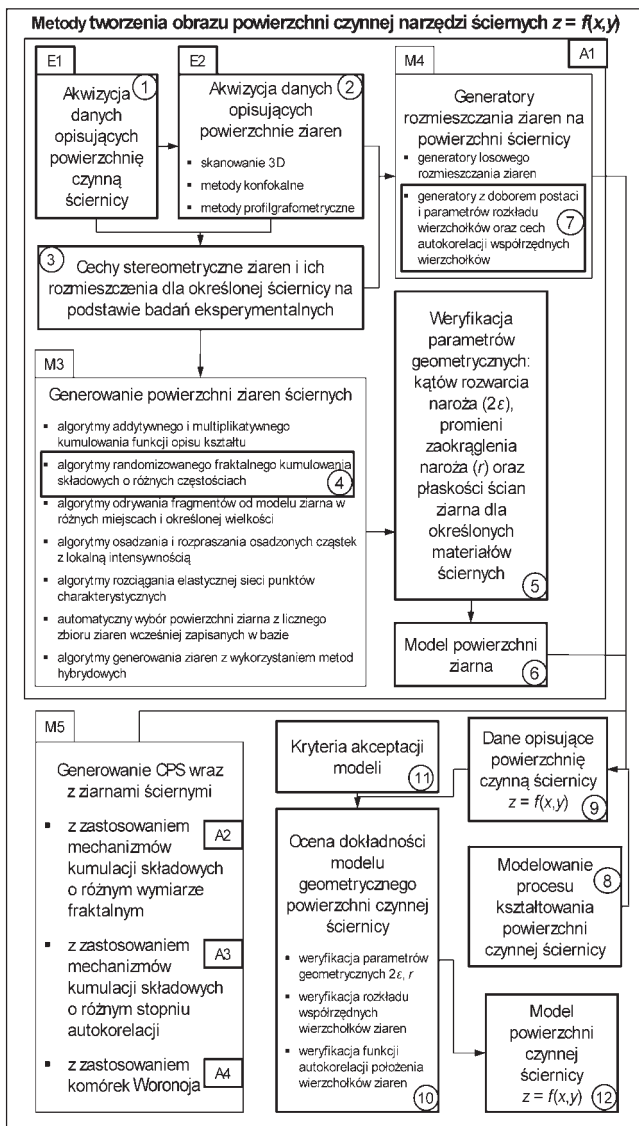
Metody modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych

Metody modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych przedstawiono na rys. 1. W dalszej części artykułu zaprezentowano algorytmy oraz wyniki modelowania CPS opracowane w Katedrze Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych Wydziału Mechanicznego Politechniki Koszalińskiej (metody A1–A4).

Można wyróżnić dwie zasadnicze strategie prowadzące do sformułowania numerycznych opisów topografii powierzchni czynnej ściernicy. Pierwsza polega na wykorzystaniu danych zawierających współrzędne punktów, wyznaczonych z określonym krokiem dyskretyzacji, rzeczywistej powierzchni ściernicy [3, 12, 14, 16] (metoda E1). Druga strategia wymaga generowania topografii powierzchni ściernicy z wykorzystaniem procedur uwzględniających wyróżnione, charakterystyczne dla danej metody

* Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak (wk5@tu.koszalin.pl), dr inż. Filip Szafraniec (filip.szafraniec@tu.koszalin.pl), dr inż. Dariusz Lipiński (dariusz.lipinski@tu.koszalin.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Koszalińskiej

cechy topografii narzędzi ściernych, mające charakter probabilistyczny (metody A1–A4). W tej strategii można wyróżnić dwie metody tworzenia modelu czynnej powierzchni ściernicy. Pierwsza polega na generowaniu całej powierzchni ściernicy, czyli ziaren wystających ponad spoiwo, powierzchni spoiwa i wgłębień, będących zewnętrznymi porami (metody A2–A4). Zaletą takiego podejścia w modelowaniu CPS jest szybki proces tworzenia modelu powierzchni, natomiast wadą – brak dokładnych informacji o położeniu ziaren ściernych w modelu ściernicy (metody A2 i A3), ponieważ nie są one wydodrębnione. Wady tej nie ma metoda wykorzystująca komórki Woronoja (metoda A4), w której obszary komórek i położenie wierzchołków ziaren są znane przed wygenerowaniem ziaren zajmujących część obszaru określonych komórek.



Rys. 1. Metody modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych wraz z określoną kolejnością operacji realizowanych w algorytmie A1; E1, E2 – etapy akwizycji danych, M3–M5 – etapy modelowania; A1–A4 – algorytmy generowania CPS

Cechami, które wyróżniają poszczególne metody, są:

- Generowanie składowych powierzchni ziarna o różnym stopniu płaskości, ich kumulowanie i weryfikacja powierzchni ziaren ściernych, a następnie rozmieszczenie ziaren na powierzchni z uwzględnieniem dwóch cech – postaci i parametrów rozkładu położenia wierzchołków oraz autokorelacji wysokości wierzchołków (A1).

- Randomizowany, niesymetryczny mechanizm kumulacji składowych elementarnych powierzchni o różnym wymiarze fraktalnym, w którym kolejne składowe mają coraz większy wymiar fraktalny z przedziału 2...3 i coraz mniejszą amplitudę oraz są dołączane addytywnie do aktualnego wyniku kumulacji w randomizowanym stopniu – w pełnej wartości na szczytach wierzchołków i w coraz mniejszej na niższych poziomach (A2).

- Randomizowany, niesymetryczny mechanizm kumulacji składowych elementarnych powierzchni o różnym stopniu autokorelacji, w którym kolejne składowe mają coraz mniejszą długość autokorelacji i coraz mniejszą amplitudę oraz są dołączane addytywnie do aktualnego wyniku kumulacji w randomizowanym stopniu – w pełnej wartości na szczytach wierzchołków i w coraz mniejszej na niższych poziomach (A3).

- Randomizowany sposób generowania komórek Woronoja i pewnej liczby punktów wewnątrz tych komórek, przy czym liczba komórek Woronoja odpowiada – po eliminacji pól zbyt małych – liczbie ziaren na powierzchni określonego fragmentu ściernicy; następnie, po dodaniu losowym dodatkowych punktów w otoczeniu punktu centralnego komórki, który będzie odpowiadać położeniu najwyższego wierzchołka ziarna, następuje utworzenie powierzchni narzędzia z uwzględnieniem randomizowanych zależności między wysokością punktu i jego odległością od wierzchołka (A4).

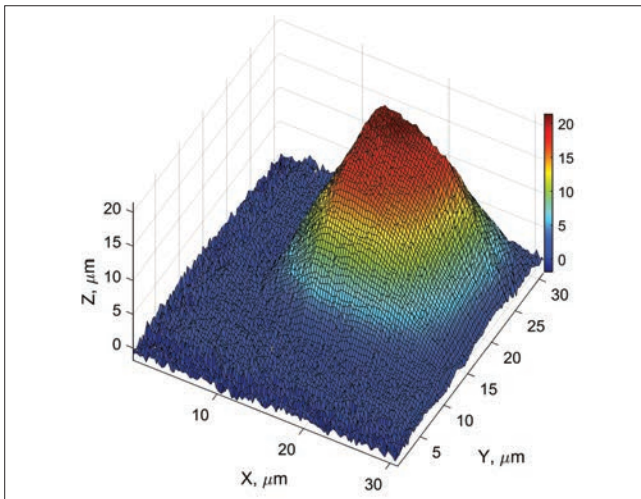
Inne podejście do generowania powierzchni ściernicy podano w [2, 26, 27] – zgodnie z nim w pierwszej kolejności tworzone są obiekty, które reprezentują ziarna ściernic, a następnie te obiekty są umieszczane w przestrzeni, co daje całościowy opis czynnej powierzchni ściernicy (A1).

Metodyka generowania czynnej powierzchni ściernicy z uwzględnieniem autokorelacji przestrzennego rozmieszczenia wierzchołków

Metodyka algorytmu A1 została szczegółowo opisana w artykule [12]. Algorytm ten obejmuje zadania, które na rys. 1 zostały ponumerowane zgodnie z kolejnością ich realizacji.

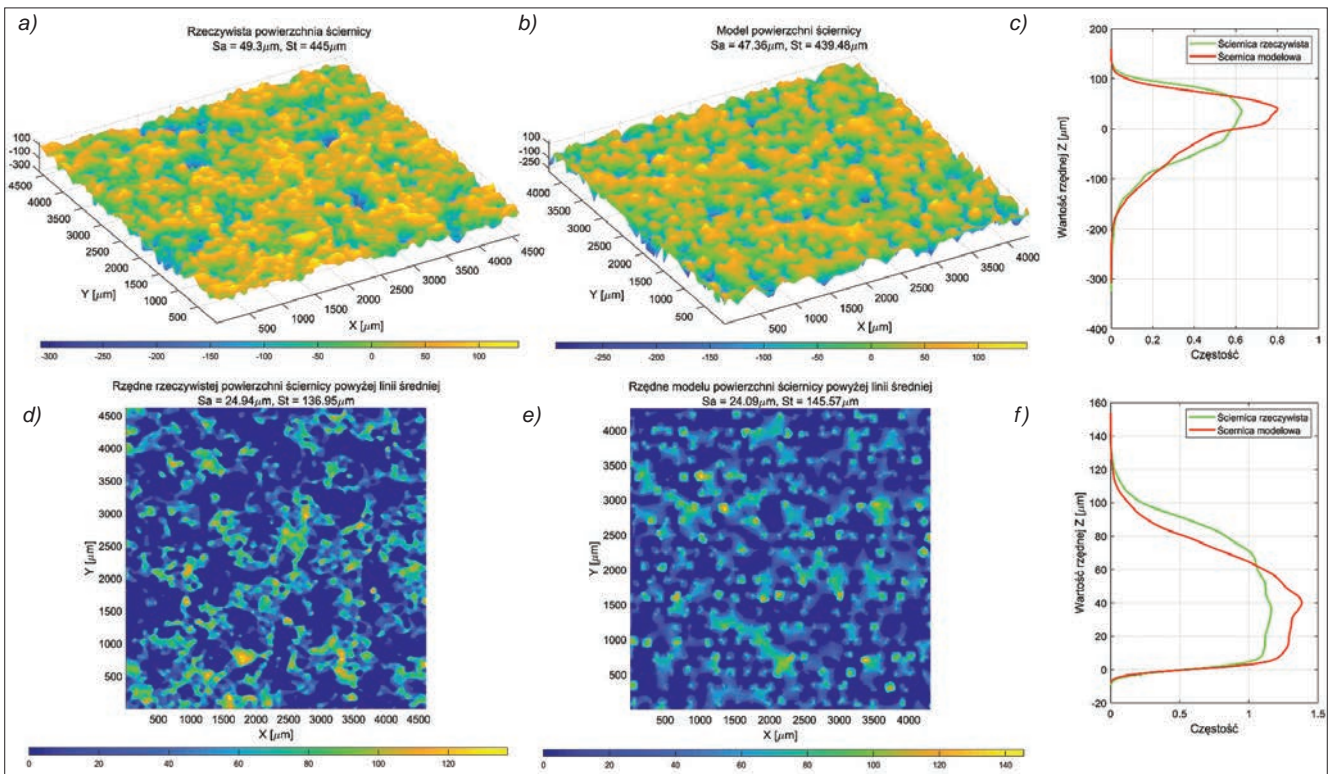
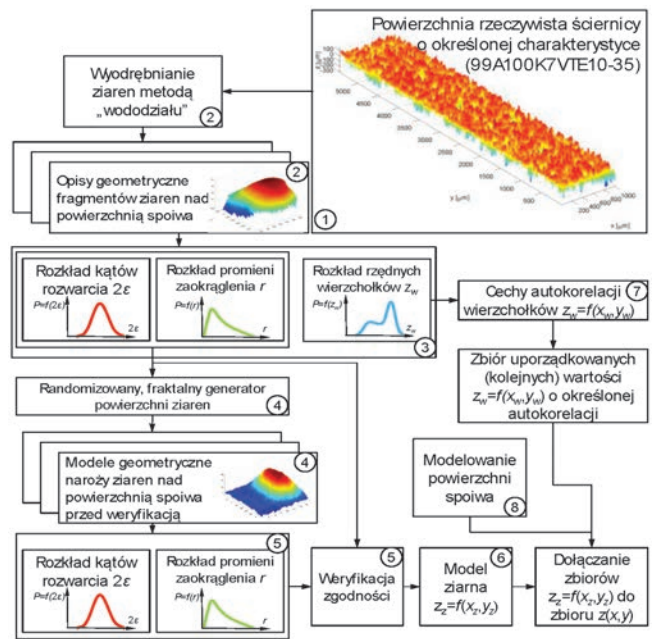
Na pierwszym etapie jest przeprowadzana akwizycja danych rzeczywistej powierzchni ściernicy określonego typu (E1), a następnie – z zastosowaniem metody wododziału – z tych danych zostają wydodrębnione obszary odpowiadające ziarnom ściernym tworzącym tę strukturę. Tak uzyskany opis liczbowy tworzy zbiór rzeczywistych ziaren ściernych oraz umożliwia określenie ich statystycznych cech geometrycznych, którymi są: wartości kątów wierzchołkowych 2ϵ , promienie zaokrąglenia r oraz maksymalne wartości rzędnych naroży ziaren ściernych. Na podstawie tych statystycznych cech geometrycznych rzeczywistych naroży ziaren ściernych można opracować modelowe naroża ziaren ściernych z zastosowaniem randomizowanego fraktalnego generowania ich powierzchni [14] (rys. 2). Maksymalne wartości rzędnych (wierzchołków) ziaren rzeczywistych umożliwiają natomiast dołączenie modelowych ziaren ściernych do budowanego modelu powierzchni ściernicy zgodnie z funkcją ich autokorelacji.

Najnowsze modyfikacje algorytmu polegają na uwzględnieniu cech geometrycznych powierzchni spoiwa oraz zewnętrznych porów (rys. 3). Na rys. 4 pokazano wynik działania algorytmu generowania powierzchni ściernicy (A1) – na rysunku zestawiono opracowany model wraz z widokiem rzeczywistej powierzchni ściernicy.



Rys. 2. Przykład modelowego naroża ziarna ściernego, wygenerowanego z zastosowaniem randomizowanego fraktalnego algorytmu do tworzenia powierzchni

Rys. 3. Algorytm modelowania powierzchni narzędzi ściernych o określonej charakterystyce (A1)



Rys. 4. Widoki czynnych powierzchni ściernic: a) powierzchnia rzeczywista, b) powierzchnia modelowa, c) porównanie częstości występowania wartości rzędnych dla powierzchni a) i b); widoki czynnych powierzchni ściernicy powyżej linii średniej: d) powierzchnia rzeczywista, e) powierzchnia modelowa, g) porównanie częstości występowania wartości rzędnych dla powierzchni d) i e)

Model powierzchni ściernic, opracowany według algorytmu A1, zweryfikowano przez porównanie [12]:

- pół obszarów wyznaczonych przez komórki Woronoja na podstawie współrzędnych najwyższych wierzchołków ściernicy, usytuowanych powyżej ustalonego poziomu;
- wartości wskaźnika opisującego efektywny zarys ściernicy powyżej ustalonego poziomu powierzchni ściernicy;
- pół obszaru pod funkcją gęstości dla rozkładu wysokości wierzchołków, wyznaczanych dla wysokości wierzchołków powyżej ustalonego poziomu (wierzchołków potencjalnie aktywnych).

Dla każdego modelu topografii powierzchni ściernicy utworzonego z zastosowaniem algorytmu A1 znane są położenie i cechy geometryczne każdego ziarna na tej

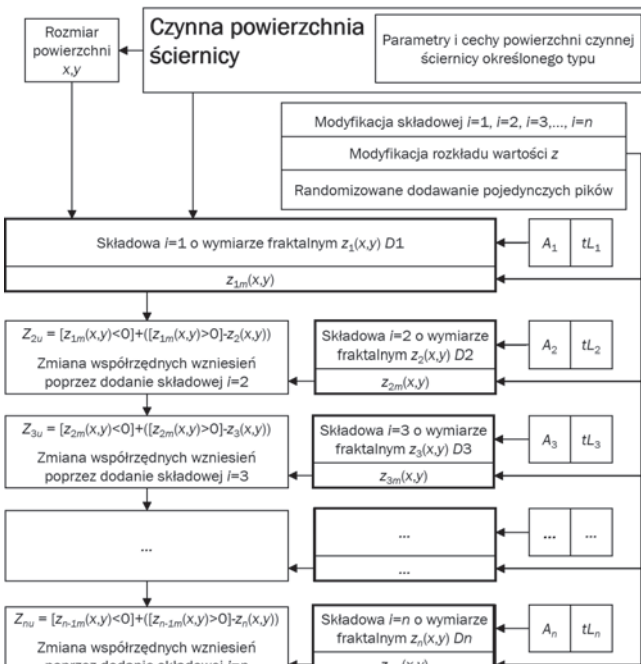
powierzchni, więc podczas symulacji procesu szlifowania możliwe jest analizowanie kontaktów poszczególnych ziaren z powierzchnią obrabianą w strefie szlifowania. Pozwala to na modelowanie zużycia aktywnych ziaren ściernych [11] oraz na uzyskiwanie szczegółowych informacji o: obciążeniach ziaren w strefie szlifowania [7], przewyższeniach poziomu obciążenia przypadających na jedno ziarno ściernic [11] w jednostce czasu, chwilowych i średnich parametrach geometrycznych każdego kontaktu (szerokości, zagłębieniu ziarna, długości drogi kontaktu) [8], chwilowych i średnich wartościach sił szlifowania [10], czasach kontaktów ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą oraz wpływie poszczególnych cech geometrycznych topografii powierzchni ściernicy na przebieg i efekty procesu obróbki.

Generowanie czynnej powierzchni ściernic z zastosowaniem kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

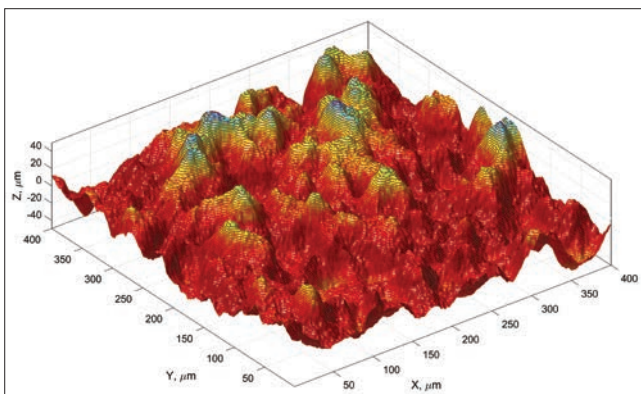
Pierwsze zastosowania tego algorytmu (A2) opisano w pracy [9], a jego rozszerzoną i zmodyfikowaną wersję oraz zastosowanie do modelowania topografii powierzchni po procesie szlifowania szczegółowo omówiono w publikacji [15]. W niniejszym artykule autorzy przytoczyli wyniki modelowania powierzchni narzędzi ściernych.

Topografia powierzchni ściernic różni się bardzo wieloma cechami od topografii powierzchni po obróbce ściernej. Z tego powodu opracowano nowy model, w którym uwzględniono, że ziarna ściernic mają fragmenty ścian płaskich, przy czym ich rozmiar jest zależny od rodzaju materiału ściernego. Powierzchnie narzędzi ściernych mają cechy izometryczne, a kierunkowość struktury może być jedynie wynikiem procesu kształtowania ściernicy. Ziarna ściernic na powierzchni narzędzia są częściowo pokryte spoiwem, które często ma strukturę proszkową.

Przez dobór amplitudy oraz wymiaru fraktalnego i liczby poszczególnych składowych (rys. 5) można uzyskać model powierzchni zgodny z cechami ściernicy rzeczywistej określonego typu (rys. 6).



Rys. 5. Schemat do analizy algorytmu generowania CPS z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

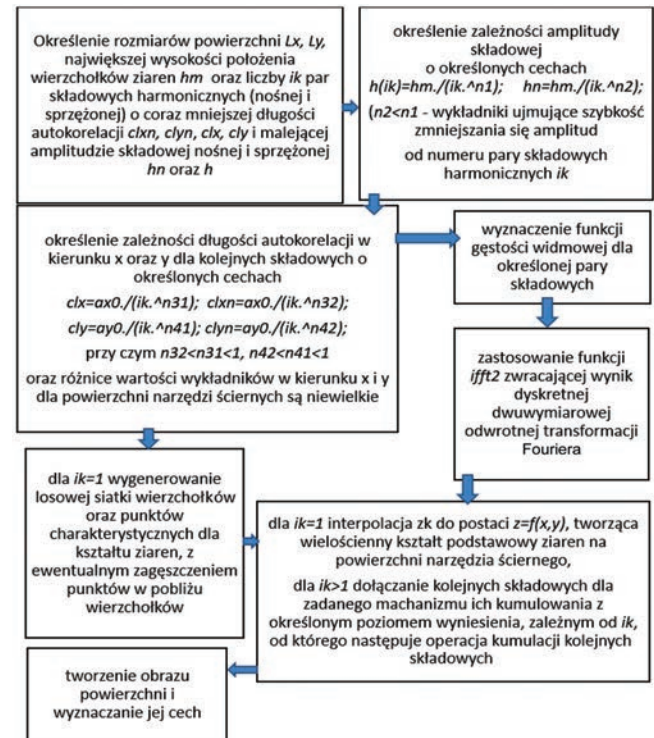


Rys. 6. Obraz powierzchni ściernicy wygenerowany z zastosowaniem algorytmu z mechanizmem kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym

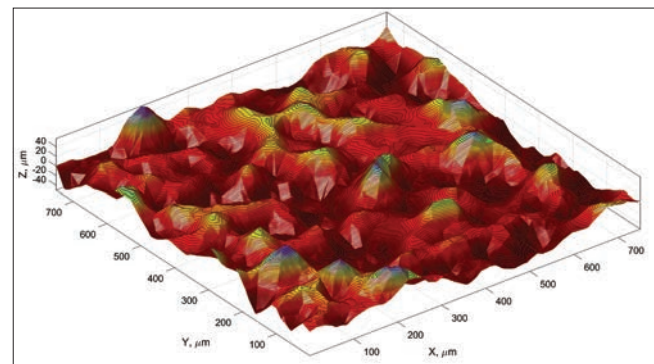
Zaletą tej metody jest możliwość modelowania powierzchni ściernic zawierających – obok ziaren podstawowych – mikroagregaty złożone z ziaren o małych rozmiarach.

Generowanie czynnej powierzchni ściernicy z zastosowaniem kumulacji składowych o różnym stopniu autokorelacji

Randomizowany, niesymetryczny mechanizm kumulacji składowych elementarnych powierzchni o różnym stopniu autokorelacji, w którym kolejne składowe mają coraz mniejszą długość autokorelacji i coraz mniejszą amplitudę oraz są dołączane addytywnie do aktualnego wyniku kumulacji w randomizowanym stopniu – w pełnej wartości na szczytach wierzchołków i w coraz mniejszej na niższych poziomach (A3) – przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Schemat do analizy metodyki generowania powierzchni ściernicy z zastosowaniem algorytmu kumulacji składowych o różnym stopniu autokorelacji



Rys. 8. Obraz powierzchni ściernicy wygenerowany z zastosowaniem algorytmu kumulacji składowych o różnym stopniu autokorelacji

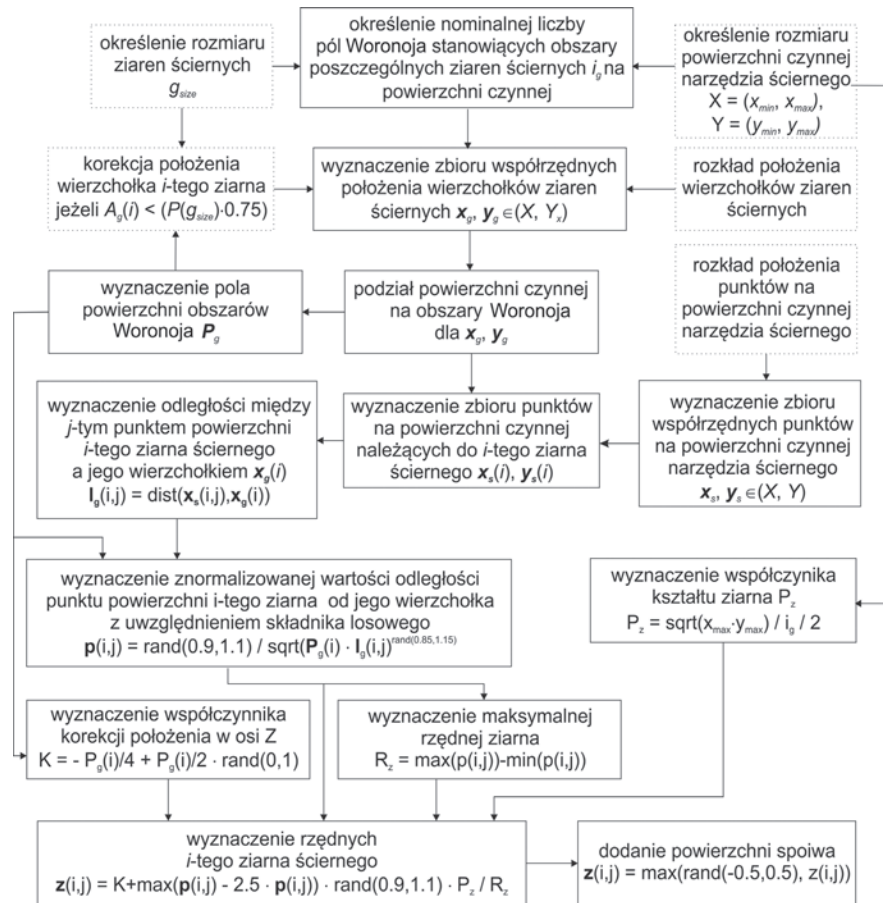
Ten algorytm wykorzystuje znane cechy powierzchni na zasadzie, że zawierają one składowe różniące się częstością, amplitudą i długością autokorelacji. Jednakże parametry statystyczne wysokości i zmienności pochylenia zboczy nierówności, jakimi są wystające nad powierzchnię fragmenty ziaren ściernych, są zmienne

w kierunku prostopadłym do powierzchni nominalnej narzędzia, co oznacza, że kumulacja składowych nie jest zwykłą sumą, lecz w większym stopniu odnosi się do wierzchołków niż wgłębień będących porami, w których przez pewien czas w strefie obróbki pozostają produkty mikroskrawania (rys. 8).

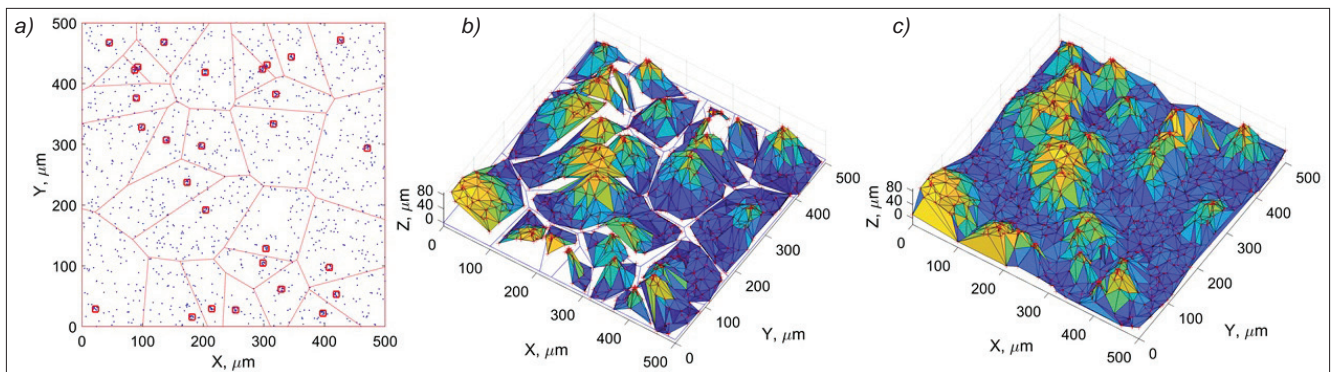
Metodyka tworzenia CPS z zastosowaniem komórek Woronoja

W pracy [16] wykazano, że komórki Woronoja pozwalają na proste wyznaczenie średnich odległości między ziarnami sąsiednimi na powierzchni czynnej ściernicy. Na podstawie tych wniosków opracowano algorytm tworzenia CPS z zastosowaniem komórek Woronoja (rys. 9).

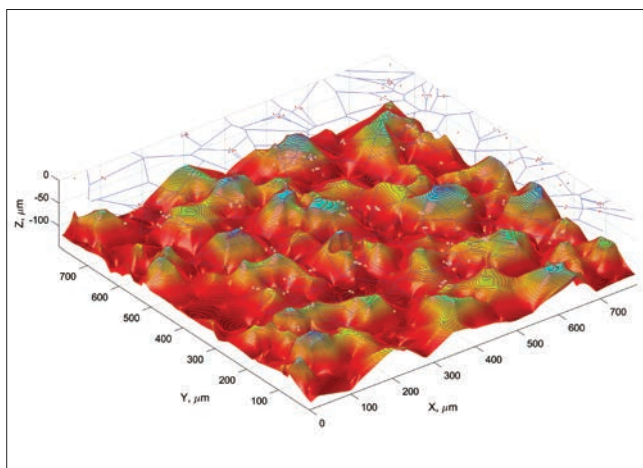
Algorytm dokonuje podziału powierzchni czynnej narzędzia ściernego na wieloboki Woronoja zgodnie z losowym rozmieszczeniem potencjalnych wierzchołków ziaren ściernych na powierzchni ściernicy. Gdy powierzchnia komórek Woronoja jest mniejsza niż przyjęta minimalna wielkość ziarna ściernego, następuje agregacja i korekta położenia wierzchołków sąsiednich ziaren (rys 10a).



Rys. 9. Schemat do analizy algorytmu generowania modelu CPS z zastosowaniem komórek Woronoja



Rys. 10. Schemat do wizualnej analizy etapów tworzenia CPS z zastosowaniem komórek Woronoja: a) wyznaczanie zbioru współrzędnych położenia wierzchołków ziaren ściernych, b) widok powierzchni ziaren ściernych, c) widok modelu CPS



Rys. 11. Wynik modelowania powierzchni ściernicy z zastosowaniem komórek Woronoja

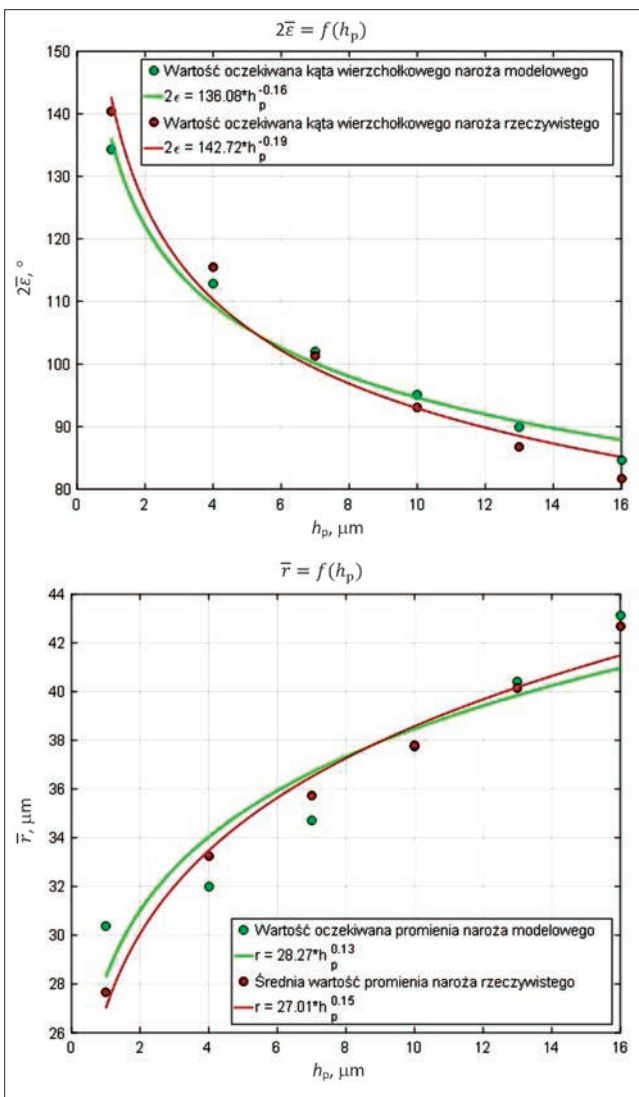
Powierzchnia ziarna ściernego jest tworzona z wykorzystaniem randomizowanych zależności, uwzględniających położenie punktów (niebieskie punkty na rys. 10a) należących do danej komórki (czerwone linie) z jej punktem centralnym (punkt oznaczony czerwony kwadratem na rys. 10a), który odpowiada położeniu najwyższego wierzchołka ziarna ściernego (rys 10b). W końcowej fazie do powierzchni ziaren ściernych dodawana jest powierzchnia spoiwa (rys. 10c).

W wyniku działania algorytmu uzyskiwana jest powierzchnia czynna narzędzia ściernego ze zidentyfikowaną liczbą ziaren ściernych oraz z ich wyodrębnionymi granicami (rys. 11). Dzięki temu możliwe jest wyznaczenie parametrów opisujących zarówno rozmieszczenie, jak i kształt ziaren ściernych, co znacząco ułatwia weryfikację opracowanego modelu powierzchni czynnej narzędzia ściernego z zapisem cyfrowym powierzchni rzeczywistej.

Metody weryfikacji modelu CPS

W algorytmie A1 przed opracowaniem modelu CPS należy opracować modele naroży ziaren ściernych, których cechy geometryczne będą zgodne z cechami ich rzeczywistych odpowiedników. To wymaga weryfikacji modeli naroży ziaren ściernych. Opracowano więc metodykę weryfikacji zgodności modelowych naroży ziaren ściernych z narożami rzeczywistymi, która polega na analizie rozrzutu oraz wartości oczekiwanej kątów 2ε i promieni zaokrąglenia r naroży w funkcji hipotetycznego zagłębienia ziarna w materiał obrabiany h_p [12, 14].

Na rys. 12 przedstawiono porównanie cech geometrycznych (wartości oczekiwanych kąta wierzchołkowego 2ε i promienia zaokrąglenia \bar{r}) naroży ziaren ściernych modelowych z rzeczywistymi, z elektrokorundu 99A o numerze 100, w funkcji zagłębienia naroża w materiał obrabiany h_p .



Rys. 12. Porównanie cech geometrycznych (wartości oczekiwanych kąta wierzchołkowego 2ε i promienia zaokrąglenia \bar{r}) naroży ziaren ściernych modelowych z rzeczywistymi w funkcji zagłębienia naroża w materiał obrabiany h_p

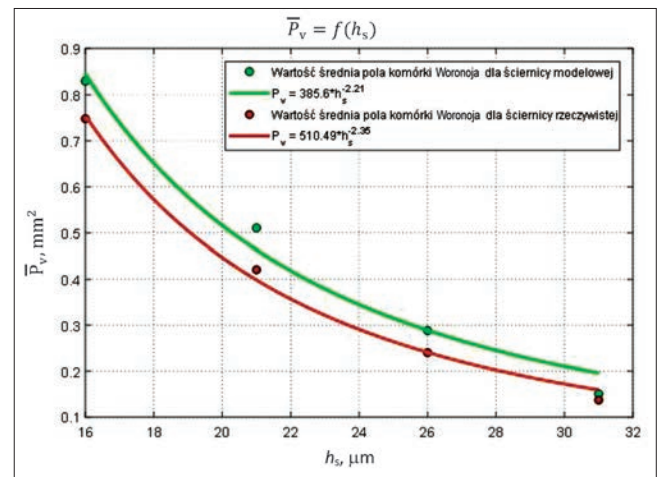
Do porównania powierzchni modelowej (opracowanej z zastosowaniem algorytmów A1–A4) z powierzchnią rzeczywistą narzędzia ściernego można zastosować zaproponowane tu metody. Pierwsza polega na porównaniu wartości średniej pól komórek Woronoja, wyznaczonych na określonych poziomach od najwyższego wierzchołka

analizowanej powierzchni. W drugiej metodzie można porównywać pola funkcji częstości rzędnych wierzchołków dla ziaren ściernych potencjalnie aktywnych.

■ **Weryfikacja modelu CPS z zastosowaniem komórek Woronoja.** Metodykę oceny powierzchni narzędzi ściernych z zastosowaniem dekompozycji badanego obszaru na komórki Woronoja opracowano na Politechnice Koszalińskiej w Katedrze Inżynierii Systemów Technicznych i Informatycznych [17].

Na pierwszym etapie weryfikacji dla analizowanej powierzchni modelowej i rzeczywistej wyznacza się wartości najwyższego wierzchołka Sp , a następnie określa się poziomy potencjalnego kontaktu h_s powierzchni czynnej ściernicy z powierzchnią obrabianą. Następnie dokonuje się przecięć analizowanej powierzchni płaszczyzną oddaloną od najwyższego wierzchołka Sp o wartość h_s . Nad płaszczyzną na określonym poziomie h_s wyznacza się wyniesienia, których najwyższe punkty są elementami wejściowymi do algorytmu umożliwiającego wyznaczenie komórek Woronoja. Wyniesienia na każdym z poziomów h_s zlicza się (Li_w) i oblicza ich pola powierzchni P_w oraz ich wartości średnie \bar{P}_w .

Dla wyznaczonych komórek Woronoja na określonych poziomach h_s obliczono wartości ich pól powierzchni P_v oraz wartość średnią tych pól \bar{P}_v (rys. 13).



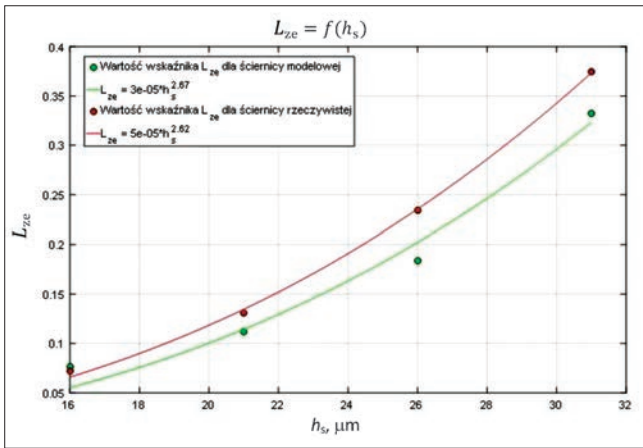
Rys. 13. Porównanie wartości średniej pola komórki Woronoja \bar{P}_v ściernicy modelowej ze ściernicą rzeczywistą w funkcji zagłębienia naroża w materiał obrabiany h_s

Dodatkowo opracowano bezwymiarowy wskaźnik L_{ze} do oceny efektywnego zarysu narzędzia ściernego:

$$L_{ze} = \frac{\sqrt{|\bar{P}_w|_{h_s} * Li_{w|h_s}}}{L_p}$$

gdzie: $|\bar{P}_w|_{h_s}$ – wartość średnia pola wyniesienia na określonym poziomie potencjalnego kontaktu h_s powierzchni czynnej ściernicy z powierzchnią obrabianą, $Li_{w|h_s}$ – liczba wyniesień na określonym poziomie potencjalnego kontaktu h_s dla całej powierzchni czynnej ściernicy z powierzchnią obrabianą, L_p – szerokość analizowanej powierzchni ściernicy.

Porównanie wartości wskaźnika L_{ze} zarysu efektywnego ściernicy modelowej ze ściernicą rzeczywistą w funkcji zagłębienia naroża w materiał obrabiany h_s pokazano na rys. 14.

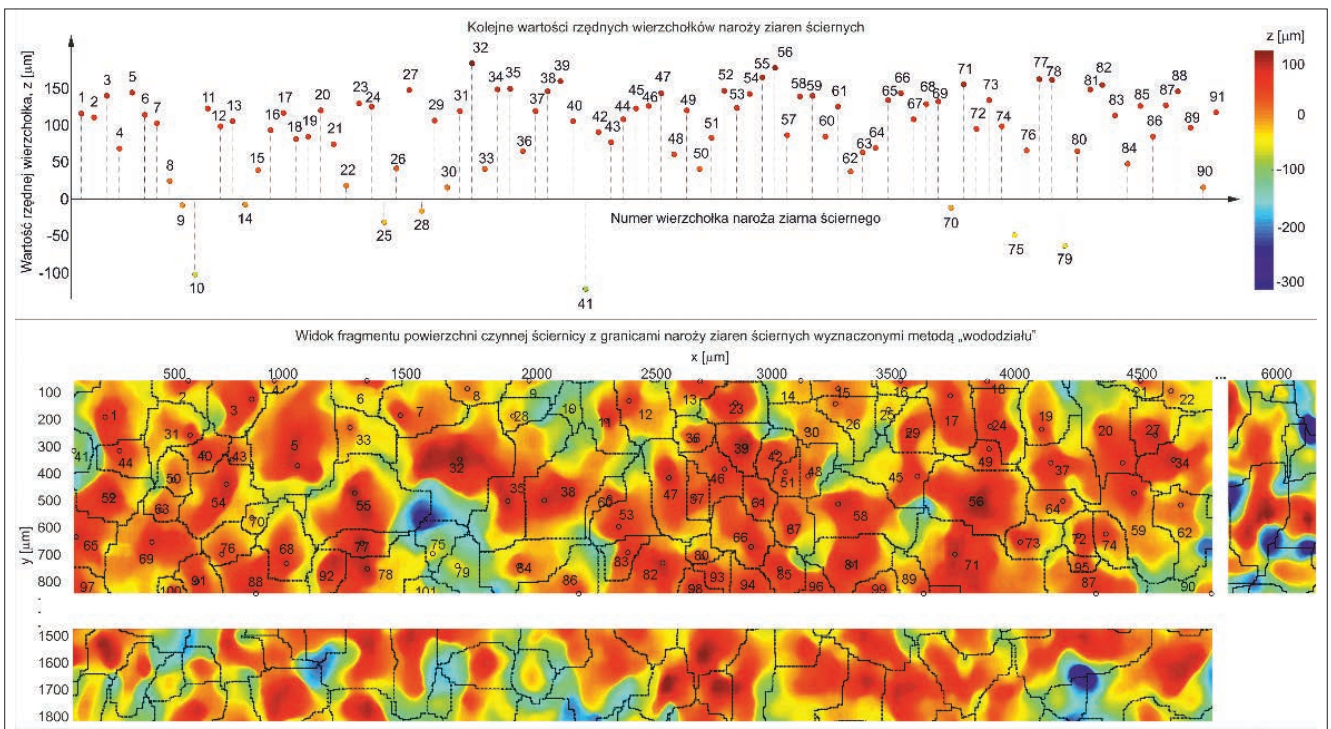


Rys. 14. Porównanie wartości wskaźnika L_{zc} zarysu efektywnego ściernicy modelowej ze ściernicą rzeczywistą w funkcji zagłębienia naroża w materiał obrabiany h_s

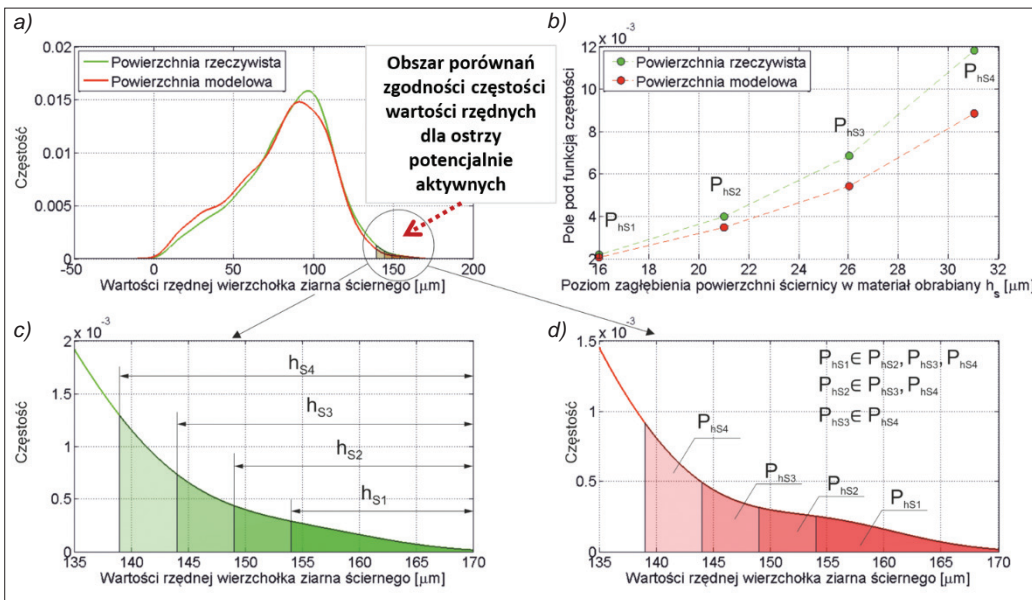
■ Weryfikacja modelu CPS z zastosowaniem funkcji gęstości dla rozkładu wysokości wierzchołków.

Metoda weryfikacji modelu czynnej powierzchni ściernicy z powierzchnią rzeczywistą o określonej charakterystyce polegała na porównaniu częstości wartości rzędnych wierzchołków ziaren ściernych, które zliczono z wykorzystaniem metody wododziału (rys. 15). Na rys. 16 przedstawiono schemat do analizy częstości wartości maksymalnych wysokości poszczególnych ziaren ściernych. Porównano wartości pól pod funkcją częstości dla powierzchni modelowej i rzeczywistej, które wyznacza się dla określonych poziomów potencjalnego kontaktu h_s powierzchni czynnej ściernicy z powierzchnią obrabianą.

Z przedstawionych analiz wynika, że model ściernicy opracowany według algorytmu A1 cechuje się wysoką zgodnością z porównywaną powierzchnią ściernicy rzeczywistej w zakresie liczebności ziaren potencjalnie aktywnych.



Rys. 15. Wartości rzędnych kolejnych wierzchołków naroża ziaren ściernych zliczanych metodą wododziału



Rys. 16. Schemat do analizy częstości wartości rzędnych wierzchołków ziaren ściernych: a) rozkłady częstości wartości rzędnych wierzchołków oraz wyróżniony obszar dalszych porównań; b) porównanie skumulowanych częstości wartości rzędnych wierzchołków ziarna dla ściernicy rzeczywistej (kolor niebieski) i modelowej (kolor czerwony); c) częstość wartości rzędnych wierzchołków ziaren w obszarze wierzchołków najwyższych dla ściernicy rzeczywistej; d) częstość wartości rzędnych wierzchołków ziaren w obszarze wierzchołków najwyższych dla ściernicy modelowej

Podsumowanie

Przedstawiono metody generowania topografii powierzchni ściernicy oraz metodykę oceny zgodności modeli z powierzchnią narzędzi rzeczywistych. Wykazano, że w tej ocenie decydujące są określone cechy dotyczące kształtu i położenia najwyższych wierzchołków. Udowodniono, że opracowanie poprawnego modelu wymaga uwzględnienia nie tylko postaci rozkładu wysokości wierzchołków ziaren, lecz także określonego fragmentu funkcji gęstości prawdopodobieństwa, który odnosi się do wierzchołków najwyższych. Ponadto konieczne jest zapewnienie zgodności autokorelacji położenia wierzchołków ziaren według wyników modelowania z autokorelacją położenia wierzchołków ziaren na rzeczywistej powierzchni ściernicy o danej charakterystyce.

Omówione metody różnią się sposobem zapewniania zgodności modelu z rzeczywistą powierzchnią narzędzi. W pierwszej metodzie następuje generowanie składowych powierzchni ziarna o różnym stopniu płaskości, ich kumulowanie i weryfikacja powierzchni ziaren ściernych, a następnie rozmieszczanie ziaren na powierzchni z uwzględnieniem dwóch cech: postaci i parametrów rozkładu położenia wierzchołków oraz autokorelacji wysokości wierzchołków. W drugiej metodzie wykorzystywany jest randomizowany, niesymetryczny mechanizm kumulacji składowych elementarnych powierzchni o różnym wymiarze fraktalnym, w którym kolejne składowe mają coraz większy wymiar fraktalny i coraz mniejszą amplitudę oraz są dołączane addytywnie do aktualnego wyniku kumulacji w randomizowanym stopniu – w pełnej wartości na szczytach wierzchołków i w coraz mniejszej na niższych poziomach. W trzeciej metodzie stosowany jest randomizowany, niesymetryczny mechanizm kumulacji składowych elementarnych powierzchni o różnym stopniu autokorelacji, w którym kolejne składowe mają coraz mniejszą długość autokorelacji i coraz mniejszą amplitudę oraz są dołączane addytywnie do aktualnego wyniku kumulacji w randomizowanym stopniu – w pełnej wartości na szczytach wierzchołków i w coraz mniejszej na niższych poziomach. W czwartej metodzie dominuje randomizowany sposób generowania komórek Woronoja i pewnej liczby punktów wewnątrz tych komórek, przy czym liczba komórek, po eliminacji pól zbyt małych, odpowiada liczbie ziaren na powierzchni określonego fragmentu ściernicy; następnie, po dodaniu losowym dodatkowych punktów w obszarze centralnym komórki, który będzie odpowiadać położeniu najwyższego wierzchołka ziarna, następuje utworzenie powierzchni narzędzia z uwzględnieniem randomizowanych zależności między wysokością punktu i jego odległością od wierzchołka.

W każdej z metod można zapewnić wysoki poziom zgodności modelu z rzeczywistymi cechami topografii powierzchni ściernic przez odpowiedni dobór jego parametrów. Poziom zgodności cech powierzchni narzędzia według modelu i powierzchni danej ściernicy można oceniać łącznie przez porównanie średniej geometrycznej obliczanej z wartości względnych cech uznanych za ważne.

LITERATURA

- Aurich J.C., Kirsch B. "Kinematic simulation of high-performance grinding for analysis of chip parameters of single grains". *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 5, 3 (2012): s. 164–174.
- Gołąbczak A., Gołąbczak M., Świątek R., Galant M., Kaczmarek D. „Ocena właściwości użytkowych ściernic supertwardych ze spoiwem metalowym na podstawie stereometrycznych parametrów CPS”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 117–121.
- Inasaki I., Science F. "Grinding process simulation based on the wheel topography measurement". *CIRP Annals*. 45, 1 (1996): s. 347–350.
- Kacalak W., Lewkowicz R., Krzyżyński T. "Random components auto-correlation and its influence on estimation of grinding process models". GAMM Annual Meeting, Metz 1999. *Zeitschrift f. angew. Math. Mech.* 80 (2000).
- Kacalak W., Lipiński D., Bałasz B., Rypina Ł., Tandecka K., Szafranec F. "Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 94 (2018): s. 301–314.
- Kacalak W., Szafranec F. "Metodyka i algorytmy modelowania i symulacji oraz badań i analizy procesów obróbki ściernic". *Problemy i tendencje rozwoju obróbki ściernic*. Prace naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Politechniki Wrocławskiej. 2012, s. 205–234.
- Kacalak W., Szafranec F. „Modelowanie obciążeń ziaren aktywnych i sił w procesie szlifowania”. *Mechanik*. 8–9 (2013).
- Kacalak W., Szafranec F. „Topografia śladów skrawania tworzonych przez ziarna na czynnej powierzchni ściernicy podczas szlifowania płaszczyn”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 712/164–168.
- Kacalak W., Szafranec F., Kunc R., Remelska H., Hanna R. „Zastosowanie teorii fraktali do tworzenia i wizualizacji powierzchni o określonej topografii”. *Podstawy i Technika Obróbki Ściernic* (red.: A. Gołąbczak, B. Kruszyński). XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic. Łódź: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Łódzkiej, 2010, s. 500–512.
- Kacalak W., Szafranec F., Lipiński D. „Metodyka analizy i modelowania sił w procesie szlifowania płaszczyn dla małych głębokości obróbki”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 1194–1195.
- Kacalak W., Szafranec F., Lipiński D. „Probabilistyczna analiza aktywności ziaren na czynnej powierzchni ściernicy”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 176–184.
- Kacalak W., Szafranec F., Tandecka K. „Metodyka modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z uwzględnieniem korelacji przestrzennej rozmieszczenia ich wierzchołków dla określonych ściernic rzeczywistych”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 185–192/724.
- Kacalak W., Szafranec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz. „Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni”. *Pomiary Automatyka Kontrola*. 5 (2011).
- Kacalak W., Szafranec F., Tomkowski R. „Metodyka modelowania powierzchni ziaren określonych materiałów ściernych”. *Innovative Manufacturing Technology* (red. P. Rusek). 2 (2012): s. 555–562. Kraków: Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania.
- Kacalak W., Szafranec F. „Modelowanie topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 711/152–158.
- Kacalak W., Tandecka K. „Metodyka badań rozmieszczenia ziaren ściernych na foliach do mikrowyglądania”. *Współczesne problemy obróbki ściernic*. Koszalin 2009, s. 215–224.
- Kacalak W., Tandecka K. "Basics of the superfinishing results prognosis by the diamond lapping films". *Journal of Machine Engineering*. 12 (2012): s. 49–62.
- Kacalak W. „Modelowanie, diagnostyka i optymalizacja procesów obróbki ściernic”. *Zbiór prac XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernic*, Rzeszów–Myczkowce, wrzesień 2000, s. 76–88.
- Kawalec A., Bazan A., Krok M., Chmielik I. „Analiza wybranych parametrów ziaren ściernych CBN na podstawie pomiarów topografii”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 49–52/721.
- Kawalec A., Bazan A., Krok M., Chmielik I.P. „Porównanie wyników badań stykowych dotyczących parametrów topografii CPS ściernic z CBN zmieniających się wraz z jej zużyciem w kontekście wyboru istotnych parametrów”. *Mechanik*. 8–9 (2015): s. 190–193.
- Li H. N., Yu T.B., Da Zhu L., Wang W.S. "Analytical modeling of ground surface topography in monocrystalline silicon grinding considering the ductile-regime effect". *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 17, 4 (2017): s. 880–893.
- Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R. "Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscope". *SCANNING*, 2013.
- Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R. "Application of the laser scanning microscopy to evaluation of abrasive tool wear". *Journal of Machine Engineering*. 12, 4 (2012): s. 99–105.
- Nguyen T.A., Butler D.L. "Simulation of precision grinding process. Part 1: Generation of the grinding wheel surface". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 45, 11 (2005): s. 1321–1328.
- Stępień P. "Applied a probabilistic model of the grinding process". *Mathematical Modelling*. 33 (2009): s. 3863–3884.
- Wang X., Yu T., Dai Y., Shi Y., Wang W. "Kinematics modeling and simulating of grinding surface topography considering machining parameters and vibration characteristics". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 87, 9–12 (2016): s. 2459–2470.
- Zhang Y., Li C., Ji H., Yang X., Yang M., Jia D., Wang J. "Analysis of grinding mechanics and improved predictive force model based on material-removal and plastic-stacking mechanisms". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 122 (2017): s. 81–97. ■