

Metodyka oceny topografii czynnej powierzchni ściernic w aspekcie ich potencjału obróbkowego

The methodology of the grinding wheel active surface evaluation in the aspect of their machining potential

WOJCIECH KACALAK
DARIUSZ LIPIŃSKI
FILIP SZAFRANIEC
KATARZYNA TANDECKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.108>

Ocena potencjału obróbkowego ściernic po procesie kondycjonowania, podczas ich eksploatacji oraz po zakończonych cyklach szlifowania jest ważnym i złożonym problemem. W artykule przedstawiono metodykę oceny topografii ściernic z zastosowaniem nowego wskaźnika zależnego od wysokości i ostrości wierzchołków ziaren ściernych, który umożliwia określanie potencjału obróbkowego badanej ściernicy. Analizy efektywności oceny z zastosowaniem opracowanego wskaźnika oraz innych parametrów przeprowadzono dla trzech różnych ściernic po procesie kondycjonowania oraz po 30 minutach procesu szlifowania. Wykazano, że opracowany wskaźnik integruje wpływ wysokości i ostrości naroży, a analiza jego wartości w odniesieniu do poszczególnych punktów ocenianej powierzchni pozwala określać postać zużycia oraz wnioskować o potencjale obróbkowym narzędzia.

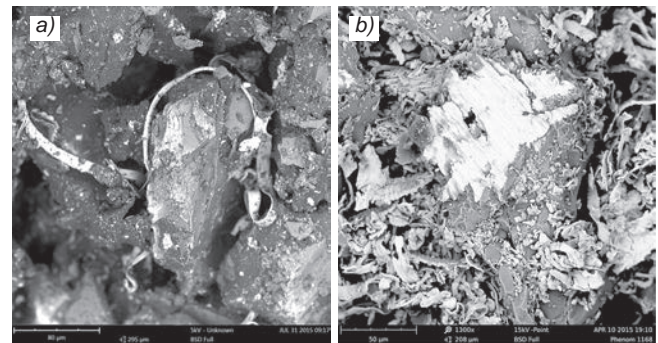
SŁOWA KLUCZOWE: czynna powierzchni ściernicy, parametry oceny czynnej powierzchni ściernicy, potencjał obróbkowy narzędzia, struktura stereometryczna powierzchni ściernicy

Estimation of the machining capacity of grinding wheels after the conditioning process, during their operation and after the grinding process is an important and complex problem. The article presents a methodology for the evaluation of wheel topography using a new height indicator and sharpness of abrasive grains, which enables determination of the machining potential of the wheel to be tested. Analysis of the developed parameter was carried for three different grinding wheels and for two different state after the conditioning process and after 30 minutes of grinding.

KEYWORDS: grinding wheel active surface, grinding wheel active surface evaluation parameters, grinding wheel active surface machining potential, grinding wheel active surface stereometric structure

Potencjał obróbkowy narzędzi ściernych wynika z: cech struktury narzędzi, rodzaju i właściwości materiałów ściernych oraz ich spoiw, parametrów geometrycznych ziaren ściernych oraz topografii powierzchni czynnej [4, 7–9, 11, 15]. Do oceny potencjału obróbkowego mogą być stosowane różne sygnały z realizowanego procesu lub z badań właściwości narzędzi. Zazwyczaj po wstępnej transformacji sygnałów dokonywana jest ocena przydatności miary do oceny stanu narzędzia, uwzględniająca siłę i zgodność zależności miary od zmian stanu narzędzia [5, 10, 12, 16, 22, 24, 25]. Stosowane miary można podzielić na miary w dziedzinie: czasu, częstotliwości oraz czasowo-częstotliwościowej.

Podczas szlifowania właściwości mechaniczne i chemiczne ściernicy nie ulegają wielkim zmianom, natomiast zmienia się – w wyniku procesów zużycia – stan powierzchni czynnej ściernicy [2, 3, 27, 38, 39]. Ścieranie wierzchołków ziaren ściernych (rys. 1a) przyczynia się do wzrostu sił i energii właściwej, wykruszanie wierzchołków ziaren jest procesem odnawiania właściwości skrawnych, a wykruszanie całych ziaren skutkuje odchyłkami wymiarów i kształtu narzędzia. W obróbce stopów metali lekkich może ponadto występować fragmentaryczne zalepanie powierzchni czynnej ściernicy produktami obróbki (rys. 1b) [4, 28].



Rys. 1. Przykłady form zużycia ściernicy: a) obraz początkowej fazy zużycia ściernego wierzchołka ziarna, b) zalepanie na powierzchni ściernicy

W formułowaniu efektywnej metodyki oceny topografii powierzchni czynnej ściernic, w aspekcie wykrywania niekorzystnych zmian jej stanu, rozwiązania wymagają następujące problemy:

- określenie miar przydatnych do oceny potencjału obróbkowego oraz identyfikacji form zużycia [1, 3, 5, 12–14, 18, 37];
- określenie metodyki wyznaczania cyfrowych obrazów powierzchni ściernic (najlepiej bez demontażu z wrzeciona szlifierki – z wykorzystaniem metod skanowania, metod analizy rozpraszania światła [22, 23] lub metody replik [18]), w tym wybór obszarów do pomiaru oraz uwzględnienie zróżnicowania warunków mikroskrawania i cech zużycia ziaren w poszczególnych strefach powierzchni czynnej;
- określenie kryteriów trwałości narzędzi [7, 26, 27, 37, 39].

Podstawy doboru parametrów do oceny stanu topografii powierzchni ściernic są odmienne od podstaw oceny struktury geometrycznej obrobionych powierzchni. Różnice najczęściej wynikają z potrzeby identyfikacji ziaren jako określonych form przestrzennych oraz z potrzeby identyfikacji form zużycia ściernicy. Ponadto powierzchnie narzędzi ściernych i powierzchnie po obróbce tymi narzędziami niewiele się różnią pod względem wartości gradientu i struktury nierówności [13, 16, 37], zatem

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

można stwierdzić, że większość parametrów do oceny cech stereometrycznych przydatnych do oceny topografii powierzchni po obróbce nie jest przydatna do oceny powierzchni czynnej ściernic.

W każdym z tych przypadków inna będzie metodyka doboru parametrów oceny cech stereometrycznych, tworzących komplementarny zbiór, zapewniających wysoką skuteczność klasyfikacyjną oraz łatwość interpretacji ocen i przydatność technologiczną.

Dalej przedstawiono metodykę oceny stanu czynnej powierzchni narzędzi ściernych z wykorzystaniem nowych, efektywnych parametrów pozwalających na: pełniejszą analizę zużywania się narzędzi, ocenę ich stanu i dobór parametrów obróbki, a także określenie trwałości.

Praktyczne znaczenie oceny topografii powierzchni czynnej ściernic

Złożoność oceny stanu powierzchni czynnej ściernic, przeprowadzanej na potrzeby prognozowania rezultatów procesu i trwałości narzędzi, wynika nie tylko z losowości kształtu i położenia ziaren ściernych, lecz także z wielkiej liczby oddziaływań poszczególnych ziaren i ich wpływu na kształtowanie obrabianej powierzchni.

Rozmiary ziaren ściernych najczęściej mieszczą się w przedziale od $0,5 \mu\text{m}$ (folie ścierne, pasty do docierania i polerowania, mikroproszki ścierne) do $300 \mu\text{m}$ (ściernice do wydajnego szlifowania i przecinania). Liczba ziaren w objętości 1 mm^3 waha się od 3^3 do 10^6 .

Energia właściwa w procesach obróbki ściernic i erozyjnej jest znaczna – zazwyczaj wynosi od 10 do 1000 J/mm^3 [13, 20]. Temperatura w mikroobjętościach często przekracza 1200°C , a nawet 1500°C , co skutkuje m.in. tworzeniem się mikrowiórów w postaci kulistych powłok [18] o rozmiarach od kilku do kilkudziesięciu mikrometrów i charakterystycznej postaci, wynikającej z naprężeń w powłokach podczas ochładzania.

Gradyenty lokalne temperatury dochodzą do 10^6°C/s i 10^3°C/mm . Skutkiem wysokiej energochłonności procesów szlifowania są znaczne siły oraz zjawiska termiczne, które powodują odkształcenia przedmiotu, narzędzia i systemu obróbkowego, a także niekorzystne rozkłady naprężeń w warstwie wierzchniej obrabianych przedmiotów.

Na niedokładność wytwarzania mają wpływ nie tylko energochłonność procesów i moc obróbki, lecz także koncentracja lokalna energii, kształt i położenie strefy obróbki oraz szybkość źródła ciepła [2, 6–8, 13, 14, 35]. Z tego wynika, że możliwie dokładna i wszechstronna ocena właściwości narzędzi ściernych jest bardzo ważnym zadaniem o dużym znaczeniu praktycznym.

Probabilistyczne aspekty kształtowania obrabianej powierzchni w procesach szlifowania

Zjawiska zachodzące w strefie szlifowania są opisywane przez cechy o krótkim czasie występowania (wynoszącym ok. kilkadziesiąt mikrosekund), obejmują obszary o małych powierzchniach lokalnych oddziaływań (o wielkości rzędu kilkunastu mikrometrów kwadratowych) i charakteryzują się nieciągłością tworzenia płytkowej postaci elementów usuniętego materiału z wielką częstotliwością ($0,3 \div 10 \text{ MHz}$). Te zjawiska są więc trudne do eksperymentalnego obserwowania.

Przykładowo na powierzchni ściernicy o średnicy $D = 400 \text{ mm}$ i wysokości $H = 40 \text{ mm}$ oraz rozmiarze ziarna $a_z = 120 \mu\text{m}$ znajduje się ponad $2 \cdot 10^6$ ziaren ściernych,

a na powierzchni $500 \times 20 \text{ mm}$ folii ściernic z ziarnami diamentowymi o wymiarze $0,5 \mu\text{m}$ – ok. 10^{10} ziaren.

Od cech ziaren ściernych zależą procesy mikroskrawania, w których występuje duże zróżnicowanie: przepływowi bocznego materiału i tworzenia wypływek, oddzielania materiału i jego usuwania z obrabianej powierzchni oraz sił i temperatury w strefie kontaktu.

Analizując liczby zdarzeń w jednostce czasu procesu szlifowania, można zauważyć, że dla przytoczonego przykładu ściernicy, gdy jej prędkość obwodowa wynosi 60 m/s , liczba ziaren przemieszczających się nad powierzchnią przedmiotu w czasie 1 s przekracza $1,2 \cdot 10^7$. W czasie obróbki trwającej 120 s nad powierzchnią przedmiotu przemieszcza się niemal półtora miliarda ziaren. Te wartości są wielokrotnie większe dla ziaren o mniejszych rozmiarach.

Analiza parametrów geometrycznych ziaren ściernych oraz wielkości charakteryzujących ich rozmieszczenie, w tym zwłaszcza wskaźników charakteryzujących potencjał obróbkowy ściernicy, a także analiza zmian tych wielkości podczas procesu szlifowania jest podstawą analizy zjawisk zachodzących podczas obróbki.

Zagadnienia te nabierają szczególnego znaczenia w odniesieniu do szlifowania nowych, często trudnych w obróbce materiałów, w tym stopów metali lekkich, stosowanych w przemyśle lotniczym i biomedycznym [4, 6–8, 15, 17]. Wraz ze wzrostem zastosowania tych materiałów zachodzi potrzeba projektowania i tworzenia nowych narzędzi o dokładnie określonych i kontrolowanych parametrach, opisujących ukształtowanie i rozmieszczenie ziaren ściernych.

W precyzyjnej obróbce ściernic zjawiska występujące w otoczeniu pojedynczego ostrza ściernego mają – ze względu na masowy charakter i złożony mechanizm kumulacji skutków [13, 14, 17, 35] mechanicznych i cieplnych – decydujący wpływ na technologiczne i ekonomiczne parametry obróbki. Znajomość odkształceń, naprężeń i przemieszczeń materiału obrabianego w procesie mikrooddzielania jest źródłem cennych informacji na temat zjawisk zachodzących w procesie mikroskrawania. Połączenie tych danych z oceną właściwości narzędzia i analizą ich zmian wraz z upływem czasu szlifowania, dokonywaną z wykorzystaniem wskaźników o wysokiej zdolności klasyfikacyjnej, pozwala na optymalizację procesu.

Należy podkreślić, że cechy i rozmiary aktywnych fragmentów powierzchni wierzchołków ziaren są zmienne w strefie kontaktu i zależą od zagłębienia ziarna, zmiennego wzdłuż toru ziarna [17]. Na podstawie analizy mechanizmu oddzielania materiału oraz jego bocznych przemieszczeń można stwierdzić, że orientowanie ziarna względem kierunku ruchu głównego, zwiększające szerokość warstwy skrawanej, jest jednym ze sposobów na ograniczenie niekorzystnych bocznych przepływów materiału [17, 18]. Dotyczy to ziaren mających płaską lub korzystnie wklęsłą powierzchnię natarcia o niewielkim kącie pochylecia γ (zazwyczaj ujemnym w procesach mikroskrawania ściernego). Niekorzystne są takie cechy naroża, jak duże promienie zaokrągleń czy starcia wierzchołków oraz zalepienia powierzchni narzędzia produktami obróbki.

W diagnostyce form geometrycznych niekorzystnych zmian topografii powierzchni czynnej należy uwzględnić, że starcia powierzchni wierzchołków charakteryzują się polem znacznie mniejszym od pola środkowego przekroju ziarna lub pola przekroju na wysokości spoiwa. Pola obszarów płaskich, będących zalepieniami powierzchni narzędzia, charakteryzują się większym rozwinięciem obwodu i polem znacznie większym od największych nawet pól starcia ziaren.

Topografia powierzchni czynnej ściernicy wraz z parametrami procesu szlifowania oraz właściwościami układu technologicznego decyduje o strukturze geometrycznej obrabianej powierzchni. Ta z kolei ma duży wpływ m.in. na:

- procesy tarcia i zużycia skojarzonych powierzchni,
- odkształcenia i sztywność stykową,
- koncentrację naprężeń i wytrzymałość zmęczeniową,
- odporność na oddziaływanie korozyjne,
- szczelność połączeń,
- stykowe przewodnictwo ciepła,
- zjawiska odbicia, pochłaniania i przenikania fal (światlnych, elektromagnetycznych itp.),
- procesy nanoszenia, przyczepność i wytrzymałość powłok uszlachetniających,
- właściwości tekstur wytwarzanych w kolejnych zabiegach,
- właściwości aero- i hydrodynamiczne,
- subiektywne oceny nabywców określonych produktów.

Kształtowanie powierzchni dokładnych elementów często następuje w procesach obróbki ściernicy lub erozyjnej. Takie powierzchnie mają randomizowane cechy fraktalne, niekiedy z „obcą” składową główną [3, 5, 13, 30, 33, 34, 36]. Wiedza o procesach kształtowania struktury geometrycznej powierzchni w procesie szlifowania jest ważna w formułowaniu postaci wskaźników służących do oceny topografii ściernicy.

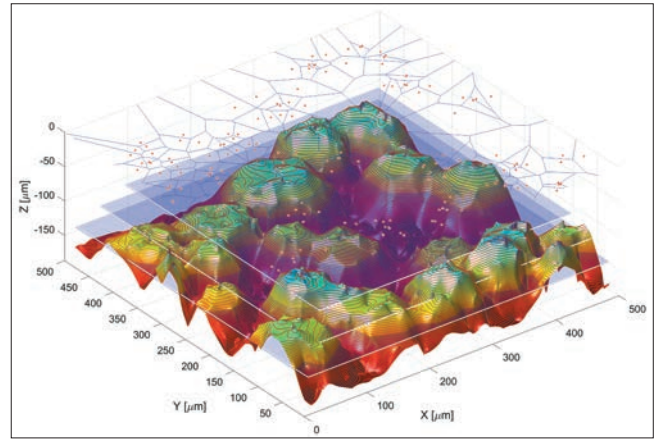
Metodyka tworzenia efektywnych miar i parametrów oceny topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych

Topografia powierzchni narzędzi oraz obrabianych przedmiotów jest tematem badań prowadzonych w wielu ośrodkach naukowych [5, 33, 35, 37–39]. Nadal jednak przeważa podejście, w którym do analizy tych dwóch różnych rodzajów powierzchni stosowane są podobne parametry, przez co ocena ich wzajemnego oddziaływania jest mało precyzyjna.

Celem autorów było wyznaczenie zbiorów parametrów: o maksymalnej przydatności informacyjnej, spełniających warunek komplementarności, zawierających informacje dotyczące rozproszenia i zmienności parametrów geometrycznych, ułatwiających interpretowanie relacji między wartościami parametrów a określonymi cechami powierzchni oraz umożliwiającymi wyznaczenie ewentualnych korekt procesu kształtowania powierzchni. Uwzględniono przy tym, że zbiory parametrów przydatnych do oceny powierzchni narzędzi ściernych będą inne niż w przypadku oceny powierzchni obrobionych.

W analizie topografii powierzchni czynnej narzędzi ściernych szczególną uwagę należy zwrócić na cechy wzniesień wierzchołków ziaren ponad pewną płaszczyznę położoną na różnych poziomach, np. od 0,1 do 0,4 wartości parametru S_t od najwyższego wierzchołka powierzchni (rys. 2). Wynika to z cech procesu, w którym powierzchnia czynna narzędzia kontaktuje się z materiałem obrabianym tylko wierzchołkami ziaren najbardziej wysuniętych w kierunku obrabianej powierzchni. Cenne wnioski dotyczące wyników procesu obróbki ściernicy można wyprowadzić m.in. dzięki dekompozycji powierzchni narzędzia z wykorzystaniem komórek Woronoja.

Pierwszym zadaniem jest wyznaczenie odległości między wierzchołkami wzniesień metodą najbliższych sąsiadów, których centralnymi punktami są wierzchołki ziaren [16]. Pozwala to następnie określić relacje między polem podstawy ziarna a polem komórki Woronoja oraz wyzna-



Rys. 2. Schemat do analizy cech wzniesień wierzchołków ziaren ściernych położonych na różnych poziomach wartości S_t od najwyższego wierzchołka ściernicy

czyć kąty pochylenia linii łączących sąsiednie wierzchołki ziaren.

Ocena rozmieszczenia i kształtu wzniesień wierzchołków ziaren ponad pewien poziom od najwyższego wierzchołka może być m.in. podstawą do:

- oceny aktywności ziaren;
- prognozowania energii właściwej obróbki, zależnej od rozkładu parametrów geometrycznych warstw skrawanych poszczególnymi ziarnami;
- oceny procesów zużycia narzędzi;
- doboru parametrów obróbki.

Opracowane oprogramowanie pozwala wyznaczyć m.in. następujące parametry:

- zbiory $z(x, y)$ dla wzniesień powierzchni;
- pole powierzchni wzniesienia nad określoną płaszczyzną;
- powierzchnię podstawy wzniesienia (wyspy);
- środki geometryczne wzniesień;
- liczbę wzniesień;
- współrzędne x i y najwyższego wierzchołka wzniesienia;
- wysokość i rozproszenie wysokości wierzchołków wzniesień;
- średnią odległość między wierzchołkami wzniesień, wyznaczoną na podstawie dekompozycji powierzchni na komórki Woronoja metodą najbliższych sąsiadów;
- pole powierzchni komórek Woronoja,
- współrzędne x i y wierzchołków komórek Woronoja;
- relacje między polem i obwodem podstawy wzniesienia;
- parametry charakteryzujące rozwinięcie obwodu podstawy wzniesienia;
- wartości i cechy statystyczne rozkładu pierwszej pochodnej zarysu: dz/dx , dz/dy (w tym statystyki wartości zbliżonych do zera);
- zmienność opisanych parametrów w funkcji położenia płaszczyzny odcinającej.

Nowy, efektywny wskaźnik oceny topografii powierzchni czynnej ściernicy i prognozowania potencjału obróbkowego narzędzi

Opisane wcześniej miary oceny stanu czynnej powierzchni narzędzi ściernych charakteryzują ważne cechy, ale ich zawartość informacyjna wzrasta dopiero w odpowiednio dobranym zbiorze kilku miar. Miarą, która w sposób decydujący zwiększa zawartość informacyjną, jest nowy parametr, ujmujący zarówno położenie wysokościowe, jak i ostrość zboczy wierzchołków ziaren. Ten parametr (w_{wozs}), będący cechą powierzchni (3D), został opracowany przez autorów z wykorzystaniem wniosków

z zastosowań w analizie sygnałów AM-FM (2D) operatora energii Teagera–Kaisera (TKEO), przydatnego do demodulacji sygnałów [1, 26, 31].

Operator TKEO – po raz pierwszy zaproponowany przez Teagera, a następnie udoskonolony przez Kaisera [21] – ujmuje poziom i zmienność analizowanego sygnału. Dyskretna wartość TKEO może być oszacowana na podstawie trzech sąsiednich próbek sygnału z_{i-1} , z_i , z_{i+1} (dla wszystkich wartości sygnału z , czyli dla $i = 1 \dots n$).

Kaiser [21] w opisie operatora przytacza analogię do energii drgającego układu sprężyna–masa, w którym całkowita energia jest proporcjonalna do kwadratu prędkości masy oraz jej potencjału.

Operator TKEO jest zdefiniowany następująco:

$$\Psi z(z(x)) = (dz/dx)^2 - z(x) \cdot (d^2z/dx^2) \quad (1)$$

lub formie dyskretnej, wzorem przybliżonym:

$$\Psi z(z(i)) = z(i)^2 - z(i-1)z(i+1) \quad (2)$$

W ocenie cech stereometrycznych powierzchni czynnej narzędzi ściernych ważne są cechy geometryczne obszarów obejmujących wierzchołki ziaren, a więc tych części profilu, które są położone powyżej pewnego poziomu h , $z_h = z - h > 0$, np. powyżej linii średniej $h = 0$, czyli $z_h > 0$.

Warto również zauważyć, że w ocenie wysokości i zmienności zarysu wyniesień, w przypadku narzędzi ściernych (z uwagi na ich cechy eksploatacyjne), uzasadnione jest wyznaczanie wartości bezwzględnej Ψz .

Przydatność wskaźnika Ψz do oceny powierzchni, nawet po jego modyfikacjach, jest ograniczona ze względu na to, że ten wskaźnik odnosi się do profilu, a wnioskowanie o topografii powierzchni narzędzi ściernych na podstawie profilu nie jest wystarczająco dokładne.

W związku z tym autorzy opracowali wskaźnik wysokości i zmienności wysokości (ostrości) wierzchołków ziaren, odnoszący się do powierzchni (3D), o następującej postaci:

$$W_{\text{wozs}}(x, y) = (\text{abs}(fzh(x, y)))^{0,5} \quad (3)$$

gdzie:

$$fzh(x, y) = f_z(x, y) \text{ dla } z(x, y) > h \quad (4)$$

$$f_z(x, y) = z(x, y)^4 + z(x-1, y) \cdot z(x+1, y) \cdot z(x, y-1) \cdot z(x, y+1) \quad (5)$$

$$W_{\text{wozs}} = (\sum W_{\text{wozs}}(x, y)) / (R_x \cdot R_y) \quad (6)$$

przy czym R_x , R_y to rozmiary prostokątnego obszaru powierzchni w kierunku x oraz y , a W_{wozs} jest bezwymiarowym wskaźnikiem.

Metodyka badań

W badaniach oceny efektywności wskaźnika wykorzystano ściernice firmy Andre Abrasive Articles:

- A 1-250×25×76,2-99A100K7VTE10-35 – ściernicę konwencjonalną,
- B 1-250×25×76,2-99A100K7IVTE10-35 – ściernicę o modyfikowanej strukturze przestrzennej (o zwiększonej porowatości),
- C 1-250×25×76,2-99AY100K7VTE10-35 – ściernicę zawierającą ziarno specjalne o budowie przestrzenie rozwiniętej.

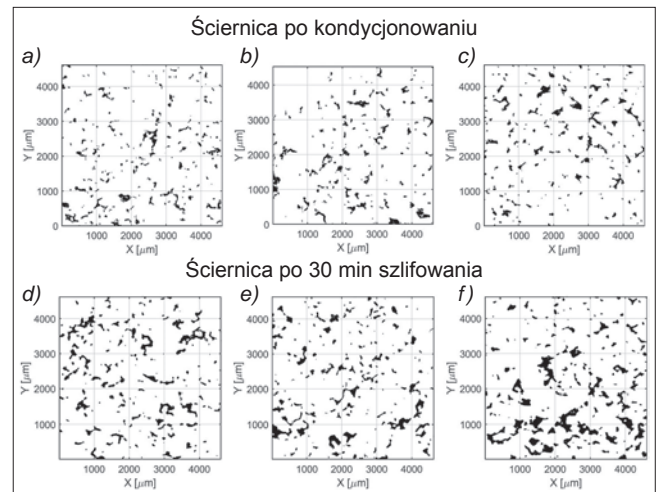
Warunki i parametry badań eksploatacyjnych ściernic zestawiono w tabl. I.

TABLICA I. Warunki badań eksploatacyjnych ściernic

Prędkość szlifowania v_s , m/s	35
Posuw wzdłużny v_{fh} , m/min	25
Posuw poprzeczny a_p , mm/skok	0,5
Dosuw ściernicy a_e , μm	100
Dosuw kondycjonowania a_d , mm	0,1+0,15
Materiał obrabiany	X153CrMoV12 (NC11LV)

Badania topografii narzędzi ściernych przeprowadzono metodą replikacji powierzchni czynnej, z zastosowaniem materiału do replik RepliSet firmy Struers (według producenta rozdzielczość tego materiału wynosi 0,1 μm). Pomiar powierzchni narzędzi po kondycjonowaniu oraz po procesie obróbki (po 20 przejściach i upływie 30 min) wykonano z użyciem systemu pomiarowego LEXT OLS4000 firmy Olympus.

Obrazy obszarów płaskich na powierzchni badanych ściernic (rys. 3) wyznaczono z uwzględnieniem dwóch kryteriów: wartości pierwszej pochodnej wysokości wyniesień powierzchni ziaren nad poziom spoiwa oraz wysokości określonych punktów tych wyniesień. Warunek graniczny dla pierwszego kryterium był następujący: $dz/(dx \cdot dy) < (0,3 \cdot (dz)_{sr})$, przy czym wartość średnia pochodnej dz była ok. 12 razy mniejsza od wartości maksymalnej. Warunek graniczny dla drugiego kryterium był następujący: $z > 0,7 \cdot \max(z)$.

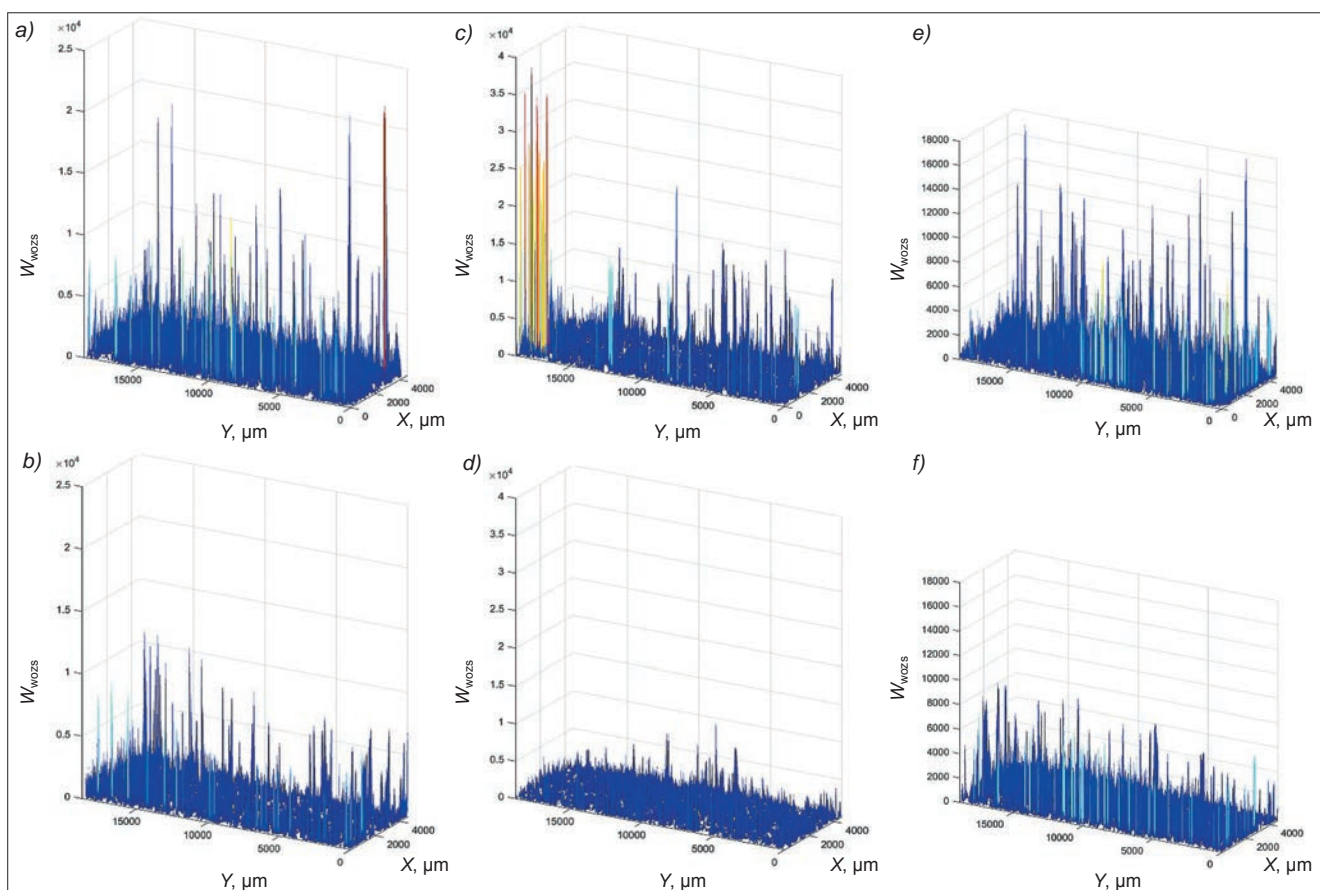


Rys. 3. Widok obszarów płaskich dla ściernicy konwencjonalnej (a, d), indukowanej (b, e) i o przestrzenie rozwiniętej budowie ziaren (c, f) – odpowiednio po kondycjonowaniu oraz po 30 min szlifowania

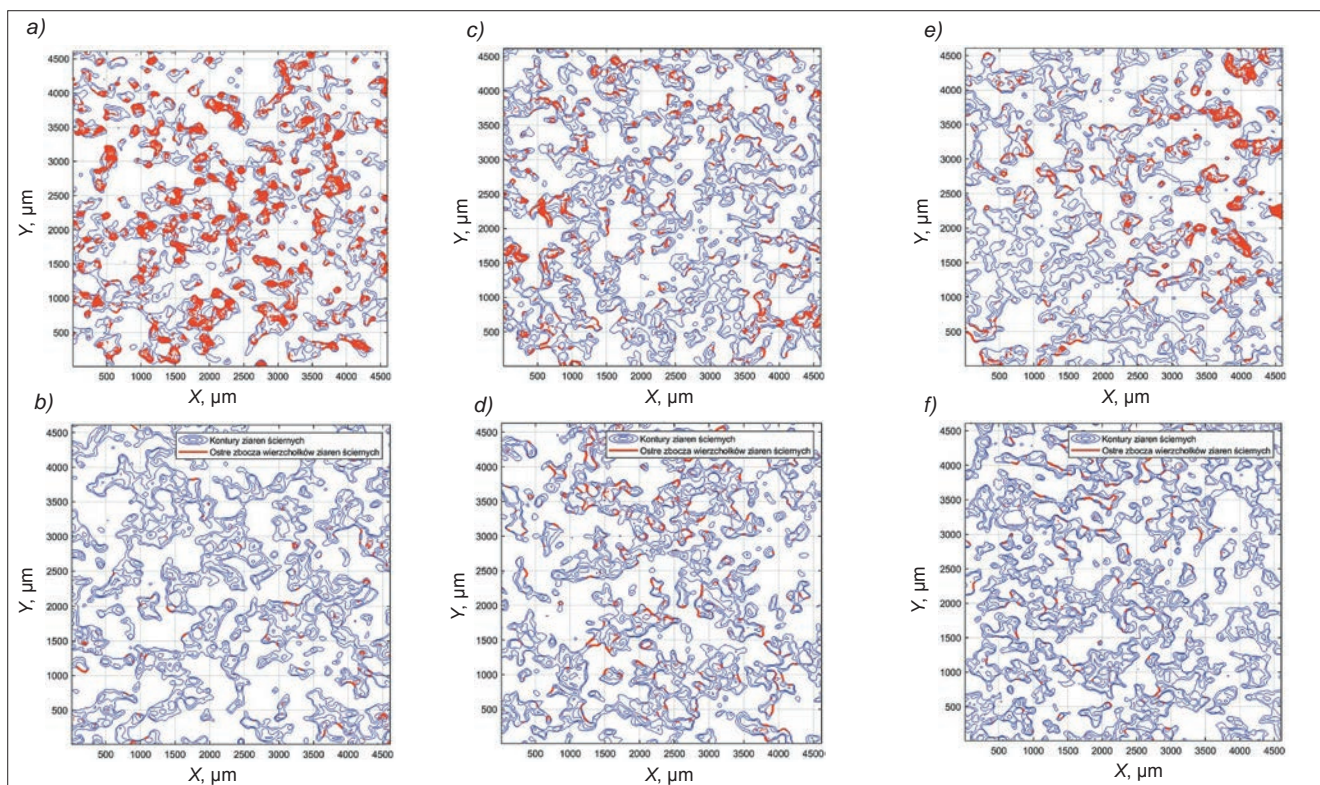
Ocena stanu powierzchni czynnej narzędzi ściernych

Na rys. 4 przedstawiono wyznaczone wartości wskaźnika $W_{\text{wozs}}(x, y)$ dla badanych ściernic po procesie kształtowania ich powierzchni czynnej oraz po szlifowaniu z parametrami podanymi w tabl. I.

Widoczne są znaczące różnice lokalnych wartości tego wskaźnika dla nowej powierzchni czynnej oraz powierzchni zmienionej w wyniku zużycia po 30 min szlifowania – dotyczy to wszystkich trzech badanych ściernic. Przede wszystkim ponad dwukrotnie zmniejsza się wartość maksymalna wskaźnika, co oznacza wysoką czułość tego parametru, zwłaszcza że wartości typowych parametrów oceny topografii powierzchni, wyznaczone w celu porównania przydatności, zmieniają się raczej w małym stopniu albo też ich zmiany nie są skutkiem zużycia. Z analiz wynika, że dobrym parametrem oceny dynamiki zużycia może być średnia z 25% wartości maksymalnych, najlepiej na powierzchni zawierającej nie mniej niż 1000 ziaren.



Rys. 4. Lokalne wartości wskaźnika $w_{wozs}(x, y)$ dla ściernicy po kondycjonowaniu: a) konwencjonalnej, c) o indukowanej porowatości, e) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren, oraz ściernicy po 30 min szlifowania: b) konwencjonalnej, d) o indukowanej porowatości, f) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren



Rys. 5. Widok konturów ziaren i wyróżnionych ostrych zboczy wierzchołków ziaren ściernych dla ściernicy po kondycjonowaniu: a) konwencjonalnej, c) o indukowanej porowatości, e) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren, oraz ściernicy po 30 min szlifowania: b) konwencjonalnej, d) o indukowanej porowatości, f) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren

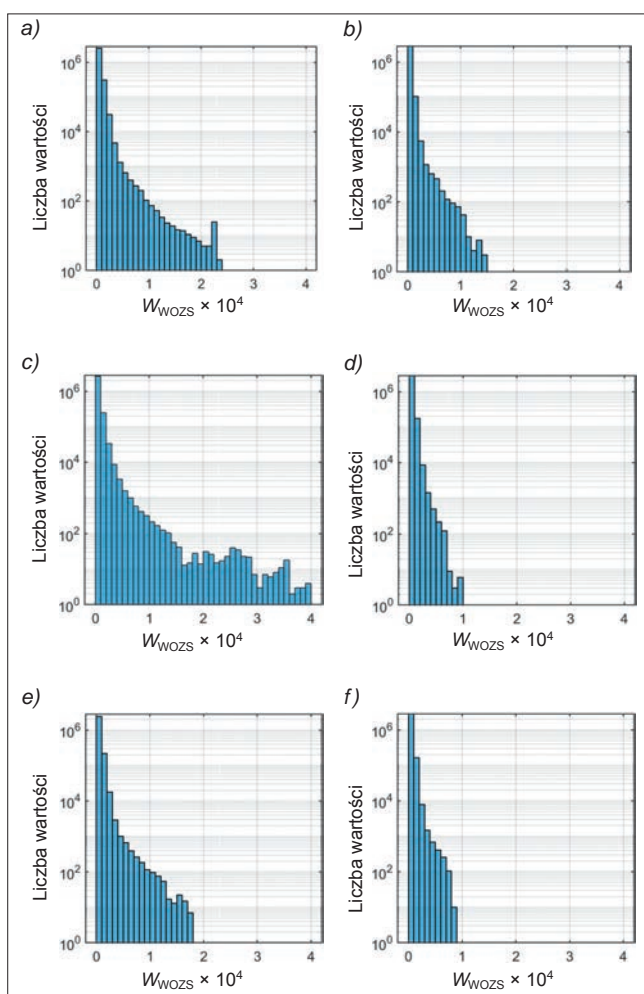
Na rys. 5 przedstawiono widoki konturów ziaren – kolorem czerwonym wyróżniono kontury najwyższych ostrych zboczy. Widoczne jest bardzo duże zmniejszenie wartości wskaźnika w_{wozs} (ostrości najwyższych wierzchołków).

Wyraźne różnice wartości wskaźnika w_{wozs} widać na histogramach (rys. 6), zwłaszcza dla ściernicy o indukowanej porowatości (rys. 6c i d) i większych odległościach między ziarnami aktywnymi, co oznacza ich większe obciążenie

oraz mniejszą energię właściwą szlifowania. Podobnie dla ściernic z ziarnami o rozwiniętej powierzchni (rys. 6e i f) początkowe wartości wskaźnika były mniejsze w porównaniu z pozostałymi ściernicami, co wynikało z wyrównania wysokości wierzchołków po procesie kształtowania powierzchni ściernicy; po szlifowaniu wystąpiło znaczne zmniejszenie liczności dużych wartości wskaźnika. To oznacza, że powstało wiele nowych, małych mikrowierzchołków położonych na zbliżonej wysokości, a zmniejszyła się liczba wierzchołków położonych wysoko nad powierzchnią czynną (co potwierdzają dane w tabl. III).

W tabl. II zestawiono ważniejsze parametry wykorzystane do oceny cech stereometrycznych powierzchni, a w tabl. III – wartości średnie opracowanego wskaźnika wraz z wybranymi innymi wartościami znanych parametrów oceny cech stereometrycznych powierzchni dla trzech badanych ściernic w dwóch analizowanych stanach.

Wartość średnia wskaźnika w_{wozs} dla ściernic zawierających ziarna o rozwiniętej powierzchni zwiększyła się po szlifowaniu, zatem stan powierzchni ściernicy nie pogorszył się, a wręcz przeciwnie – pojawiło się wiele nowych wyrównanych wierzchołków ziaren ściernych. Wartości niektórych parametrów, np. Spq i Sbi , różnicują parametry ściernic przed szlifowaniem i po nim, ale nie są skorelowane ze zmianami właściwości skrawnych, które zależą od ostrości wierzchołków ziaren ściernych o największych promieniach działania.



Rys. 6. Histogram lokalnych wartości wskaźnika $w_{wozs}(x, y)$ dla ściernicy po kondycjonowaniu: a) konwencjonalnej, c) o indukowanej porowatości, e) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren, oraz ściernicy po 30 min szlifowania: b) konwencjonalnej, d) o indukowanej porowatości, f) o przestrzennie rozwiniętej budowie ziaren

TABLICA II. Zbiór ważniejszych parametrów oceny cech stereometrycznych powierzchni

Parametr	Kontekst	Opis
w_{wozs}	$h = 0$ $h = 0,5 \cdot Sp$	wskaźnik wysokości i ostrości wierzchołków ziaren ściernych
$Sq, \mu m$		średniokwadratowe odchylenie powierzchni
Sku		kurtoza (eksczes) powierzchni
$Sp, \mu m$		maksymalna wysokość wzniesienia
$Sv, \mu m$		maksymalna głębokość wgłębienia
$Sa, \mu m$		średnie odchylenie arytmetyczne
$Smc, \mu m$	$p = 10\%$	odwrotny połowy stosunek materiałowy powierzchni
$Sxp, \mu m$	$p = 50\%$ $q = 97,5\%$	skrajna wysokość szczytu
Sdq		średniokwadratowy gradient powierzchni
$Sdr, \%$		współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni
$Spd, 1/\mu m^2$	przycinanie = 5%	gęstość pików powierzchni
$Spc, 1/\mu m$		średnia arytmetyczna krzywizna piku powierzchni
$Sda, \mu m^2$		pole średniej doliny
$Sha, \mu m^2$		obszar średniego wzniesienia
$St, \mu m$		całkowita wysokość
$Sds, 1/\mu m^2$		gęstość wierzchołków
$Ssc, 1/\mu m$		średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołka
Spq	filtr gaussowski, 0,8 mm	średniokwadratowa nierówność płaskowyzu
Svq	filtr gaussowski, 0,8 mm	średniokwadratowa nierówność doliny
Smq	filtr gaussowski, 0,8 mm	stosunek materiałowy na przejściu płaskowyz-dolina
Sbi		wskaźnik udziału materiałowego powierzchni

TABLICA III. Wyznaczone wartości wybranych parametrów oceny cech stereometrycznych powierzchni badanych ściernic

Rodzaj ściernicy	A		B		C	
Czas szlifowania, min	0	30	0	30	0	30
w_{wozs}	14,3	9,66	14,1	11,9	12,0	13,3
$Sq, \mu m$	63,2	56,4	67,2	65,4	62,8	64,8
Sku	3,3	4,49	5,94	7,84	4,84	4,07
$Sp, \mu m$	159	119	232	120	144	107
$Sv, \mu m$	317	356	472	599	484	398
$Sa, \mu m$	51	43,8	51,5	49,7	49,2	51,4
$Smc, \mu m$	76,1	63,5	74	72,9	72,8	73,7
$Sxp, \mu m$	148	146	165	164	155	165
Sdq	1,63	1,32	1,64	1,5	1,56	1,66
$Sdr, \%$	99,4	66,5	99,8	85,1	91	102
$Spd, 1/mm^2$	6,7	6,01	3,42	3,21	3,85	5,14
$Spc, 1/mm$	83,9	53,1	59	57,3	53,3	54,9
Sda, mm^2	0,08	0,10	0,09	0,10	0,11	0,07
Sha, mm^2	0,09	0,11	0,13	0,18	0,13	0,12
$St, \mu m$	475	475	704	719	628	505
$Sds, 1/mm^2$	78,2	119	47,6	77,1	45,6	81,6
$Ssc, 1/mm$	64,1	48,2	51,9	51,4	49,1	52,6
Spq	25,9	29,2	40,3	17,2	23,6	8,45
Svq	79,3	92,9	82,5	84,5	69,3	99,6
Smq	28,1	61,7	48,4	29,8	21,3	34,1
Sbi	0,89	1,21	0,46	1,77	1,05	2,72

Podsumowanie

Potencjał obróbkowy narzędzi ściernych wynika z cech ich struktury, rodzaju i właściwości materiałów ściernych i spoiw, parametrów geometrycznych ziaren ściernych oraz topografii powierzchni czynnej. Podczas procesu szlifowania zachodzi ścieranie wierzchołków ziaren oraz występują mikro- i makrowykruszenia ziaren, co oznacza, że zmienia się głównie topografia powierzchni narzędzia. Za korzystne cechy stereometryczne powierzchni czynnej ściernicy można uznać: utrzymującą się i odnawialną ostrość wierzchołków ziaren, w wielu przypadkach również dużą liczbę mikronarozży, a w precyzyjnej obróbce – małe rozproszenie promieni działania ostrzy aktywnych.

Do oceny potencjału obróbkowego mogą być stosowane różne sygnały wydobywane z realizowanego procesu lub badań właściwości narzędzi. Znanych jest wiele parametrów do oceny cech geometrycznych powierzchni. Parametry przydatne do oceny powierzchni po obróbce nie mają zawartości informacyjnej wystarczającej do dokładnej oceny stanu powierzchni ściernicy i prognozowania wyników obróbki.

Celem autorów było opracowanie metodyki oceny stanu powierzchni czynnej narzędzi ściernych z zastosowaniem nowych parametrów o lepszej przydatności informacyjnej, spełniających warunek komplementarności oraz łatwych do interpretowania relacji między wartościami parametrów a określonymi cechami powierzchni narzędzi – aby ułatwić wyznaczanie ewentualnych korekt procesu kształtowania powierzchni ściernic oraz prognozowanie ich trwałości.

Jednym z nowych parametrów jest wskaźnik w_{wozs} wysokości i zmienności wysokości (ostrości) wierzchołków ziaren, odnoszący się do powierzchni (3D). Wskaźnik ten integruje wpływ wysokości i ostrości narozży, a jego analiza w odniesieniu do poszczególnych punktów ocenianej powierzchni pozwala określić postać zużycia oraz wnioskować o potencjale obróbkowym narzędzia.

Zastosowanie wskazanej metody replik umożliwia dokonywanie oceny stanu ściernicy bez jej demontażu z wrzeczona obrabiarki.

LITERATURA

- Brandt A. "Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures". Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011.
- Gawlik J., Niemczewska-Wójcik M., Krajewska J., Sokhan S.V., Paščenko E.A., Žuk T.S. "The influence of tool composite's structure during process of diamond grinding of ceramic materials". *Management and Production Engineering Review*. 5, 4 (2014): s. 9–17.
- Hecke R.L., Liang S.Y. "Predictive modeling of surface roughness in grinding". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 43 (2003): s. 755–761.
- Kacalak W., Lipiński D., Rypina Ł., Szafranec F., Tandecka K., Bałasz B. "Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. (2017): DOI: 10.1007/s00170-017-0905-x.
- Kacalak W., Szafranec F., Tomkowski R., Lipiński D., Łukianowicz Cz. "Metodyka oceny zdolności klasyfikacyjnej parametrów charakteryzujących cechy stereometryczne nierówności powierzchni". *Pomiary Automatyka Kontrola*. 57 (2011): s. 542–546.
- Kacalak W., Kasprzyk M., Krzyżyński T., Lewkowicz R., Ściegienka R. "Methods and Characteristics of Micro-Cutting and Micro-Smoothing Processes in a Vacuum". *Proc. Third International Conference on Metal Cutting and High Speed Machining*, Metz, France, II (2001): s. 189–192.
- Kacalak W., Lewkowicz R., Bałasz B., Zawadka W. "Optimierung der Schleifprozesse schwer zerspanbarer Werkstoffe bei niedrigen Temperaturen und im Vakuum". *VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996, s. 617–640.
- Kacalak W., Lewkowicz R., Dziura Z. "Methoden und Probleme bei der Präzisionsbearbeitung kleiner Keramikformstücke". *VDI Berichte 1276, Bearbeitung neuer Werkstoffe – 2nd International Conference On Machining Of Advanced Materials*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996, s. 53–74.
- Kacalak W., Lipiński D. "Adaptive system of quality supervising in technological processes". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 28, 2 (2004): s. 7–16.
- Kacalak W., Różański R., Lipiński D. "Evaluation of classification ability of the parameters characterizing stereometric properties of technical surfaces". *Journal of Machine Engineering*. 16, 2 (2016): s. 86–94.
- 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 przestrzennego rozmieszczenia ich wierzchołków dla określonych ściernic rzeczywistych". *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 255–262.

13. Kacalak W., Bałasz B., Tomkowski R., Lipiński D., Królikowski T., Szafranec F., Tandecka K., Rypina Ł. „Problemy naukowe i kierunki rozwoju procesów mikroobróbki ścierniej”. *Mechanik*. 8–9 (2014): s. 157–170.
14. Kacalak W., Szafranec F. „Modelowanie obciążeń ziaren aktywnych i sił w procesie szlifowania”. *Mechanik*. 8–9 (2013).
15. Kacalak W., Tandecka K., Lipiński D., Szafranec F., Rypina Ł., Socha E. „Ocena zużycia promieniowego nowych narzędzi do szlifowania zawierających mikroagregaty ściernie z wykorzystaniem metody skanowania przestrzennego”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1174–1175, DOI 10.17814/mechanik.2016.8-9.304.
16. Kacalak W., Tandecka K., Mathia T.G. “A method and new parameters for assessing the active surface topography of diamond abrasive films”. *Journal of Machine Engineering*. 16, 4 (2016): s. 95–108.
17. Kacalak W., Tandecka K., Rypina Ł., Lipiński D., Szafranec F., Socha E. „Modelowanie i analiza procesów mikroskrawania agregatami ściernymi”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1172–1173.
18. Kacalak W., Tandecka K., Rypina Ł. “Evaluation of micromachining processes using data in the format and geometric characteristics of micro-chips”. *Journal of Machine Engineering*. 15, 4 (2015): s. 59–68.
19. Kacalak W., Tandecka K., Sempruch R. „Badania modelowe procesu mikroskrawania”. *Mechanik*. 8–9 (2013).
20. Kacalak W. „Teoretyczne podstawy minimalizacji energii właściwej w procesach obróbki ścierniej”. *XX Naukowa Szkoła Obróbki Ścierniej*, Poznań 1997, s. 77–81.
21. Kaiser J.F. “On a simple algorithm to calculate the ‘energy’ of a signal. *Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Process*, 1990, vol. 1, s. 381–384.
22. Kapłonek W., Łukianowicz C., Nadolny K. “Methodology of the assessment of the abrasive tool’s active surface using laser scatterometry”. *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*. 36, 1 (2012): s. 49–66.
23. Kapłonek W., Musiał W. „Detekcja i analiza zalepień powierzchni czynnej ściernic diamentowych z wykorzystaniem skaterometrii laserowej oraz komputerowej analizy obrazu. *Podstawy i technika obróbki ścierniej*”. Monografia. Łódź: Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej, 2010, s. 205–216.
24. Lipiński D., Kacalak W., Tomkowski R. “Methodology of evaluation of abrasive tool wear with the use of laser scanning microscopy”. *SCANNING*. (2013): DOI: 0.1002/sca.21088.
25. 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.
26. Lipinski D., Majewski M. “Interactive Hybrid Systems for Monitoring and Optimization of Micro- and Nano-machining Processes”. *ICONIP 2013*, Daegu, Korea. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 8227 – *Neural Information Processing*. Springer 2013, s. 360–367.
27. Lipinski D., Majewski M. “System for Monitoring and Optimization of Micro- and Nano-Machining Processes Using Intelligent Voice and Visual Communication”. *IDEAL 2013*, Hefei, China. *Lecture Notes in Computer Science*. Vol. 8206 – *Intelligent Data Engineering and Automated Learning*. Springer 2013, s. 16–23.
28. Lipiński D., Kacalak W. “Metrological aspects of abrasive tool active surface topography evaluation”. *Metrology and Measurements Systems*. 23, 4 (2016): s. 567–578, DOI 10.1515/mms-2016-0043.
29. Lipiński D., Kacalak W. „Zastosowanie metod analizy obrazu do oceny powierzchni czynnej narzędzia ściernego”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1152–1153, DOI 10.17814/mechanik.2016.8-9.293.
30. Lubimow W., Oczko K.E., Łabudzki R.K. „Klasyfikacja struktur geometrycznych powierzchni (SGP)”. *Obróbka ścierna, podstawy i technika. Zbiór prac XIII Naukowej Szkoły Obróbki Ścierniej*. 2000.
31. Maragos P., Kaiser J.F., Quatieri T.F. “On amplitude and frequency demodulation using energy operators”. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 41, 4 (1993): s. 1532–1550.
32. Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M. “Recent trends in surface metrology”. *Wear*. 271, 3–4 (2011): s. 494–508.
33. Pawlus P. „*Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie*”. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005, s. 165–168.
34. Stachowiak G.W., Posiadło P. “Classification of tribological surfaces”. *Tribology International*, 2004.
35. Stępień P. “Applied a probabilistic model of the grinding process”. *Mathematical Modelling*. 33 (2009): s. 3863–3884.
36. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D. “Evaluation of the surface topography after precision machining”. *Journal of Machine Engineering*. 12, 4 (2012): s. 71–80.
37. Tomkowski R., Kacalak W., Lipiński D. “Methodology of evaluation of extra smooth surfaces with the use of new evaluation parameters”. *Proceedings of the International Conference on Surface Metrology*, France 2012, s. 64–71.
38. Tönshoff H.K., Friemuth T., Becker J.C. “Process monitoring in grinding”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 51, 2 (2002): s. 551–571.
39. Wegener K., Hoffmeister H.W., Karpuschewski B., Kuster F., Hahmann W.C., Rabey M. “Conditioning and monitoring of grinding wheels”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 60, 2 (2011): s. 757–777. ■