

Kierunki rozwoju i podstawy optymalizacji procesów obróbki ścierniej

The directions of development and the basis for process optimization abrasive machining

WOJCIECH KACALAK
FILIP SZAFRANIEC
KATARZYNA TANDECKA *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.380

Przedstawiono metodykę analiz i modelowania procesów obróbki ścierniej, wynikające z tego podstawy optymalizacji procesów obróbki ścierniej oraz wyniki badań prowadzące do nowych metod i zastosowań. Określono kierunki rozwoju szlifowania oraz mikro- i nanoobróbki ścierniej.

SŁOWA KLUCZOWE: obróbka ścierna, kierunki rozwoju, modelowanie

In the paper a method of analysis and modeling abrasive machining and a resulting base abrasive machining process optimization and results of studies leading to new methods and applications presented. The directions for the development of grinding and micro- and nano-machining of abrasive was indicated.

KEYWORDS: Abrasive processing, development directions, modeling

Procesy obróbki ścierniej znajdują powszechnie zastosowanie w produkcji precyzyjnych elementów maszyn i urządzeń. Obrabiane materiały stanowią bardzo zróżnicowany zbiór – są to stale i stopy metali, w tym stopy metali lekkich, ceramika, węgliki spiekane, materiały kompozytowe, minerały, szkło, beton, drewno, tworzywa sztuczne, a także materiały supertwarde, ponadto monokryształy krzemu i wiele innych materiałów o wysokiej twardości i odporności na ścieranie.

Odpowiednio do powszechności zastosowań i różnorodności obrabianych materiałów wykorzystuje się narzędzia o bardzo zróżnicowanej budowie i strukturze, z zastosowaniem różnych materiałów ściernych oraz spoiw [8]. Popularne stosowane są narzędzia zawierające ziarna diamentowe i z regularnego azotku boru. Często wykorzystywane są również narzędzia z różnych odmian elektrokorundów mono – i polikrystalicznych, korundów spiekanych oraz z węglika krzemu [1].

Rozmiary ziaren ściernych najczęściej zawierają się w zakresie od 0,5 μm (folie ściernie, pasty do docierania i polerowania) do 300 μm (ściernice do wydajnego szlifowania dokładnego). Liczba ziaren w objętości 1 mm^3 zawiera się w zakresie od 3^3 do 10^6 .

Energia właściwa w procesach obróbki ścierniej i erozyjnej wynosi zazwyczaj 10–1000 J/mm^3 . Temperatura przekracza w mikroobjętościach 1200 $^{\circ}\text{C}$, gradienty temperatur sięgają do 10^6 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ i 10^3 $^{\circ}\text{C}/\text{mm}$. Skutkiem wysokiej energochłonności procesów wytwarzania są znaczne siły oraz zjawiska termiczne, powodujące odkształcenia przedmiotu i narzędzia. Na niedokładność wytwarzania mają wpływ nie tylko energochłonność procesów i moc obróbki, ale także koncentracja lokalna energii, kształt

i położenie strefy obróbki. Zjawiska zachodzące w strefie szlifowania, są opisywane przez cechy o krótkim czasie występowania (około kilku milisekund) i obejmują obszary o małych powierzchniach lokalnych oddziaływań (o wielkości kilkunastu μm^2) oraz występują z wielką częstotliwością (0,3–10 MHz), co sprawia, że są trudne do eksperymentalnego obserwowania.

Liczby zdarzeń losowych w jednostce czasu

Modelowanie i symulacja procesów obróbki ścierniej to złożone zadania ze względu na potrzebę generowania w czasie rzeczywistym modeli geometrycznych ziaren ściernych w ilości, zależnie od rozmiarów ziaren oraz rozmiarów strefy szlifowania, od 10^6 do 10^{10} na jedną sekundę realnego procesu. Złożoność zjawisk towarzyszących procesom oddziaływania ziaren ściernych na materiał obrabiany [6] oraz procesów zużywania się narzędzi [7] powoduje, że w tworzeniu podstaw modelowania wykorzystuje się wiele metod analizy [2].

Dla przykładowych danych: średnica ściernicy $D = 400$ mm, wysokość ściernicy $H = 50$ mm, rozmiar ziarna $a_z = 120$ μm , na powierzchni ściernicy znajduje się około 3×10^6 ziaren ściernych. Dla folii ściernych z ziarnami diamentowymi o wymiarze 0,5 μm , na powierzchni o wymiarach 500×20 mm znajduje się 10^{10} ziaren.

Każde z tych ziaren w procesie symulacji charakteryzowane jest przez powierzchnię utworzoną ze zbioru wielu punktów i musi spełniać warunki dotyczące rozkładu rzędnych oraz autokorelacji wierzchołków, kształtu typowego dla określonego materiału ściernego, a następnie tworzyć ślad obróbkowy i wpłytki boczne zależne od warunków mikroskrawania.

Analizując liczby zdarzeń w jednostce czasu, można zauważyć, że dla powyższego przykładu ściernicy, gdy prędkość obwodowa wynosi 60 m/s, to liczba ziaren przemieszczających się nad powierzchnią przedmiotu w czasie jednej sekundy przekracza $1,5 \times 10^7$. W czasie obróbki trwającej 60 sekund nad powierzchnią przedmiotu przemieszcza się około miliarda ziaren. Dla ziaren o rozmiarze $a_z = 45$ μm trzeba powyższe wartości jeszcze powiększyć dziesięciokrotnie. To stwarza olbrzymie zapotrzebowanie na moc obliczeniową i pamięć operacyjną. Szacowana liczba operacji matematycznych podczas jednej symulacji wynosi 10^{15} – 10^{18} .

W okresie od 1800 do 2014 r. nastąpił wzrost wydajności obróbki ścierniej o 100 000 razy, przy czym względne roczne przyrosty wydajności wynosiły 10–50 %.

W tym okresie nastąpił nieomal trzystukrotny wzrost prędkości obwodowej ściernic, przy czym względne przyrosty roczne wynosiły kilka procent. Nie oznacza to jednak ciągłości w rozwoju technologii, można bowiem wyróżnić wiele etapów, których efektem był skokowy wzrost prędkości szlifowania.

* Prof. dr hab. inż. Wojciech Kacalak (wojciech.kacalak@tu.koszalin.pl), mgr inż. Filip Szafraniec (filip.szafraniec@tu.koszalin.pl), dr inż. Katarzyna Tandecka (katarzyna.tandecka@tu.koszalin.pl) – Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki Precyzyjnej

Probabilistyczne cechy procesów i kumulowanie zakłóceń

W rozwiązywaniu wielu zadań z wykorzystaniem modeli określonego procesu obróbki ścierniej, ze względu na duży stopień losowości, ważnym zagadnieniem jest poszukiwanie modelu najbardziej zgodnego z mechanizmem zmienności analizowanych wielkości wejściowych i wyjściowych. Ma to duże znaczenie dla diagnostyki procesów i prognozowania ich wyników [4].

W mikroobróbce ścierniej, a także w różnych odmianach precyzyjnego szlifowania, zagłębienie ostrza w materiał obrabiany, jest znacznie mniejsze od promieni zaokrąglenia jego naroży i jest porównywalne z wysokością nierówności powierzchni w strefie obróbki.

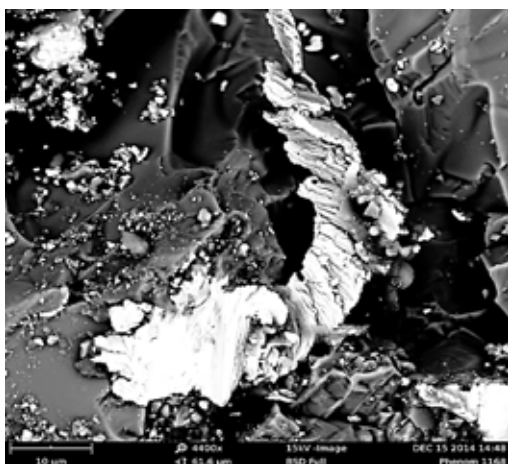
Energia właściwa obróbki zależy nie tylko od średnich wartości parametrów warstw skrawanych poszczególnymi ostrzami, ale także od zakresu zmienności i rozkładu wartości tych parametrów.

Siły tarcia, jakie występują między rozpatrywaną cząstką materiału a powierzchnią ostrza, są jedynie częścią składową oporów skrawania. Rozpatrywana cząstka w swym ruchu stycznym do powierzchni ostrza poddawana jest ponadto oddziaływaniom cząstek sąsiednich. Ten mechanizm kumulacji wpływów decyduje o kierunkach przemieszczeń materiału.

W procesie mikroskrawania o niekorzystnym zjawisku występowania wypływek na bokach rowka, tworzonego narożem ziarna ściernego, decyduje relacja między oporem bocznym przepływu materiału a oporem przemieszczania materiału wzdłuż powierzchni natarcia ostrza.

Na podstawie obserwacji budowy wiórów (rys. 1) wykazano, że częstotliwość mikronieciągłości procesu tworzenia wióra w procesach szlifowania sięga kilku MHz, a więc przekracza częstotliwości uzyskiwane przez wymuszenie w układach mechanicznych [5]. Może się to przyczyniać do korzystnego lokalnego obniżenia granicy wytrzymałości obrabianego materiału. Ten kierunek badań zapewne będzie ważny dla rozwoju nanoobróbki ścierniej.

W procesach obróbki ścierniej następujących z mniejszymi prędkościami ruchu głównego, np. w procesach mikrowygładzania, częstość tworzenia nanopłytek, z których składają się mikrowióry, jest mniejsza, ale samo zjawisko nieciągłości procesu jest podobne. W procesach mikroskrawania, gdy ziarna są umieszczone na podatnym nośniku lub w podatnym spoiwie, rozmiary motywów dna śladu obróbkowego (odległości lokalnych wgłębień i wyniosłości) są zgodne z częstością nieciągłości procesu.



Rys. 1. Płytkowa budowa wiórów w procesie szlifowania stopu tytanu z prędkością 35 m/s

Kierunki rozwoju szlifowania oraz mikro- i nanoobróbki ścierniej

Kierunki prac badawczych zmierzających do opracowania nowych metod intensyfikacji i optymalizacji procesów wytwarzania w mikro- i nanoskali, na podstawie analizy programów badawczych wielu organizacji naukowych, można sformułować następująco:

- Nanometrologia, metrologia powierzchni, metrologia topografii nanoelementów, zaawansowane technologie optyczne w metrologii.
- Mikro- i nanourządzenia technologiczne.
- Integracja nano- i mikrotechnologii.
- Elastyczne i inteligentne systemy wytwarzania.
- Inteligentne, otwarte systemy nadzorowania i kontroli procesów, nanosensory.
- Kompensacja niedokładności w procesach wytwarzania.
- Symulacja i wizualizacja procesów wytwarzania.
- W zakresie metod precyzyjnej obróbki ścierniej należy wyróżnić następujące kierunki:
 - Doskonalenie metod szlifowania z dużą prędkością obrotową ściernicy lub głowicy z segmentami ściernymi.
 - Szlifowanie z dużymi głębokościami z zastosowaniem specjalnych narzędzi o strefowo zróżnicowanej budowie.
 - Stosowanie dużej prędkością posuwu przedmiotu zwłaszcza w szlifowaniu materiałów o małej przewodności cieplnej.
 - Szlifowanie z zastosowaniem specjalizowanych zautomatyzowanych urządzeń do obróbki ścierniej.
 - Szlifowanie ze wspomaganiami laserowym, ultradźwiękowym, kriogenicznym lub chemicznym.
 - Szlifowanie zrobotyzowane dużych powierzchni oraz małych elementów o złożonych kształtach.
 - Doskonalenie materiałów ściernych, narzędzi ściernych oraz tworzenie podstaw stosowania wbudowanych systemów diagnostycznych.
 - Badania procesów mikro- i nanoszlifowania z zastosowaniem nowych narzędzi ściernych o zróżnicowanej strefowo strukturze.
 - Analizy i badania dotyczące procesów mikroskrawania w bardzo niskich temperaturach oraz w próżni [3].
 - Badania dotyczące możliwości i celowości integracji procesów kształtowania materiałów i wygładzania oraz ochrony powierzchni.
 - Badania procesów nanoobróbki z wykorzystaniem nanoproszków ściernych i specjalnych narzędzi.
 - Badania nad nowymi zastosowaniami folii ściernych i mikrotępał ściernych.
 - Badania dotyczące wytwarzania i zastosowań nanomateriałów ściernych.

LITERATURA

1. Borkowski J.A. „Życie i trwałość ściernic”. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1990, Warszawa.
2. Inasaki I. “Grinding process simulation based on the wheel topography measurement”. *CIRP Ann. Manuf. Technol.* Vol. 45(1), 1996: 347-350.
3. 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*. VDI Verlag, Düsseldorf (1996): pp. 617-640.
4. Kacalak W., Lipiński D. “Adaptive system of quality supervising in technological processes”. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. Vol. 28, No 2 (2004): pp. 7-16.
5. 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*. Vol. 15, No. 4 (2015): pp. 59-68.
6. Liu X., DeVor R.E., Kapoor S.G., Ehmann K.F. “The Mechanics of Machining at the Microscale: Assessment of the Current State of the Science”. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. Vol. 126/4 (2004): pp. 666-678.
7. Marinescu I.D., Rowe W.B., Dimitrov B., Inasaki I. “*Tribology of Abrasive Machining Processes*”. William Andrew Publishing, New York, 2004.
8. Oczko K., Porzycki J. „*Szlifowanie. Podstawy i technika*”. WNT Warszawa 1986. ■