

**Tomasz KRÓLIKOWSKI, Błażej BAŁASZ**  
POLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, KATEDRA MECHANIKI PRECYZYJNYEJ

## Ocena i modelowanie składowych sił mikroskrawania pojedynczym ziarnem

Dr inż. Tomasz KRÓLIKOWSKI

Urodzony 20 października 1971 roku w 2004 roku obronił pracę doktorską i do dnia dzisiejszego pracując w Katedrze Mechaniki Precyzyjnej przygotował 86 publikacji, które zostały wydrukowane w czasopiśmie krajowych i zagranicznych. Obecnie prowadzi prace nad „Teoretyczne i Doświadczalne Podstawy Minimalizacji Energii w Procesach Szlifowania” oraz uczestniczy w realizacji 4 grantów naukowych z dziedziny Mechaniki i Budowy Maszyn.



e-mail: tomasz.krolikowski@tu.koszalin.pl

Dr inż. Błażej BAŁASZ

Urodzony 23 listopada 1969 roku. W 2003 roku obronił pracę doktorską z wyróżnieniem. Obecnie pracownik Katedry Mechaniki Precyzyjnej. W pracy badawczej zajmuje się zagadnieniami modelowania i symulacji procesów obróbkowych oraz wytwórczych. Współautor ponad 70 publikacji w czasopiśmie krajowych i zagranicznych. Członek komitetów programowych konferencji krajowych i zagranicznych z zakresu metod symulacji komputerowych. Brał udział w pracach badawczych w ramach 9 grantów.



e-mail: blazej.balasz@tu.koszalin.pl

### Streszczenie

Artykuł przedstawia wyznaczanie i modelowanie składowych sił szlifowania i na ich podstawie analizę zjawisk energetycznych towarzyszących szlifowaniu. Obecnie wiele mówi się o globalnej oszczędności energii. Ograniczenie wydatkowania energii w trakcie procesu szlifowania nawet w niewielkim procencie, w skali makro może przynieść bardzo wysokie korzyści. Z obszernej literatury dotyczącej tematu artykułu przeanalizowano publikacje znaczące dla rozwoju technologii obróbki ściernicy, zwłaszcza dotyczące aspektów energetycznych tego procesu. Szczególny nacisk położono w artykule na procedury wyznaczania kontaktów ziaren podczas szlifowania, wynikiem czego jest pomiar sił w warunkach laboratoryjnych. Autorzy artykułu przedstawiają modele wyznaczania sił składowych szlifowania pojedynczym ziarnem ściernym oraz przedstawiają, wyznaczone metodami symulacji komputerowej, najefektywniejsze rozwiązania obniżenia energii w procesie szlifowania, przy zachowaniu znormalizowanej jakości wyrobu końcowego.

**Słowa kluczowe:** symulacja, szlifowanie, analiza procesu.

### Modeling and evaluation of grinding force components during the cutting process with single grain

#### Abstract

The paper presents the method of modeling and determining the components of grinding forces based on the analysis of energetic phenomena accompanying grinding. The global energy-saving manufacturing is the most important problem to be solved nowadays. Limitation of energy consumption during grinding process, even in a small percentage, could be highly profitable in macro scale. From among the numerous publications dealing with the subject of the paper there were selected and analyzed those concerning the development of grinding technology, especially describing energetic aspects of the process. The paper focuses on the detailed procedure of determining grain contact with the material machined, the result of which is possibility of measuring the grinding forces in a laboratory. The procedure of determining a single grain contact profile is described. The paper presents a new concept of the analytical procedure for calculating the grain load in the grinding zone by taking into account the process of ploughing and side pile-up formation on the lengthwise of the cut. The authors also took into consideration random character of the grain contact by introducing empirical coefficients defining the probability of chip formation. There are presented the models of calculating the single grain cutting force components and the most efficient solutions, determined from computer simulations, for reducing the energy consumption during grinding when keeping the final quality of the workpiece surface.

**Keywords:** simulation, grinding process.

### 1. Wstęp

Duży postęp techniczny i rozwój nowych technologii wytwarzania powoduje potrzebę poszukiwania lepszych narzędzi i metod obróbki. Wykorzystywanie metod symulacji [1, 2, 4] komputerowej coraz częściej staje nieodzowną metodą wzbogacania wiedzy

na temat procesu skrawania pojedynczymi ziarnami ściernymi a w końcowym efekcie daje wiedzę o całym procesie szlifowania.

### 2. Mikrogeometria powierzchni ściernicy

Z mikrogeometrią powierzchni ściernicy, związane są właściwości skrawne ściernicy, jak również diagnozowane parametry procesu szlifowania takie jak, siły czy moc szlifowania. Zmiany w mikrogeometrii ściernicy wpływają także na intensywność zjawisk cieplnych w strefie obróbki oraz na jakości warstwy wierzchniej powierzchni obrobionej. Podstawą oceny mikrogeometrii ściernicy jest przestrzenne losowe rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej ściernicy [5], oraz usytuowanie wierzchołków skrawających. W badaniach procesu szlifowania, zwłaszcza w aspekcie opisu charakterystyki pracy ściernicy i obciążenia poszczególnych ziaren oraz mikrogeometrii powierzchni ściernicy, dla optymalizacji i oceny wyników procesu szlifowania istotne jest wyznaczenie parametrów opisujących rozmieszczenie ziaren na powierzchni czynnej ściernicy. Podstawowym parametrem oceny stanu topografii powierzchni czynnej ściernicy jest gęstość ostrzy statycznych, przypadająca na jednostkę powierzchni ściernicy:

$$c_{st}(z) = \left(\frac{1}{L}\right) \cdot \sum N_{st}(z) [mm^{-1}] \quad (1)$$

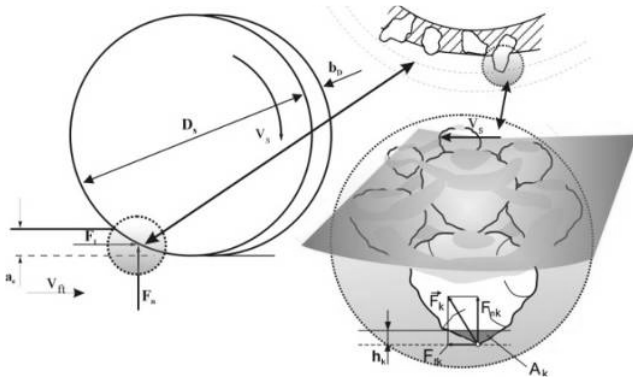
gdzie:  $\bar{L}$  – średni odstęp między ostrzami,  $N_{st}$  – ilość statycznych krawędzi skrawających

Istotną w pomiarach mikrotopografii powierzchni ściernicy jest także interpretacja. Zbiór danych otrzymanych z profilografowania powierzchni ściernicy może stanowić zbiór rzędnych zarysu oraz rzędnych powierzchni ściernicy. Nie są jednak one równoznaczne z rzędnymi wierzchołków zarysu i powierzchni ściernicy. Dokonując wydzielenia tych rzędnych z całego zbioru danych i wyznaczeniu rozkładów ich wartości, można ocenić także różnicę jakie występują między nimi, z których wynika, że wartość średnia rzędnych wierzchołków powierzchni jest większa od średniej rzędnych wierzchołków zarysu. Ze względu na losowy charakter rozmieszczenia wierzchołków ziaren ostrzy na powierzchni czynnej ściernicy bardzo ważnym elementem oceny mikrotopografii ściernicy jest określenie charakteru rozkładów ziaren na jej powierzchni i wpływu tych zmian na jakość i wyniki procesu szlifowania. Proces szlifowania jest addytywnym złożeniem poszczególnych kontaktów ziaren skrawających, istotne więc jest przeanalizowanie zjawisk przy skrawaniu pojedynczy ziarnem ściernym.

### 3. Siły szlifowania

Siły szlifowania, są jednym z ważniejszych i najczęściej stosowanych wskaźników procesu [3]. Ich wartość wpływa na energię, moc oraz temperaturę przedmiotu w procesie obróbki. Zmienność

sił w strefie szlifowania, jak i ich zmienność w czasie obróbki, skłania wielu autorów do opracowania metod badawczych, które pozwolą uzyskać informację o zmianach obciążeń ziaren w strefie szlifowania i ich skutkach. Znajomość wartości siły szlifowania, będącej sumą składowych przypadających na ziarna aktywne w strefie obróbki, pozwala bezpośrednio wyznaczyć energię szlifowania, będącą ważnym wskaźnikiem charakteryzującym proces i oczekiwane rezultaty obróbki (rys. 1). Najważniejsze zatem staje się opracowanie metod wyznaczania sił dla pojedynczych ziaren skrawających, co metodami tradycyjnymi jest bardzo trudne.



Rys. 1. Składowe sił skrawania pojedynczym ziarnem ściernym  
Fig. 1. Grinding force components of single grain cutting process

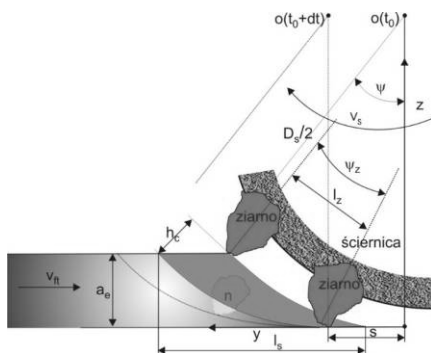
#### 4. Modelowanie procesu skrawania pojedynczym ziarnem

W opracowanym modelu symulacji procesu wykorzystuje się zależności pomiędzy przemieszczeniami ziarna ściernego względem powierzchni przedmiotu obrabianego w metodzie obwodowego szlifowania płaszczyzn w kartezjańskim układzie współrzędnych.

Podstawę opisu modelu procesu szlifowania stanowią matematyczne równania opisujące trajektorię ruchu pojedynczego ziarna na drodze skrawania w strefie szlifowania. Uwzględniając złożenie ruchu obrotowego ściernicy i ruchu posuwowego przedmiotu wypadkowy tor ruchu pojedynczego ziarna względem obrabianej powierzchni ma kształt hipocykloidy (rys. 2), natomiast równania ruchu opisujące położenie ściernicy w układzie współrzędnych związanym z przedmiotem obrabianym można opisać równaniem.

$$y = \left(\frac{D_s}{2}\right) \cdot \sin \psi \pm \left(\frac{D_s}{2}\right) \cdot \left(\frac{v_{ft}}{v_s}\right) \cdot \psi; z = \left(\frac{D_s}{2}\right) \cdot (1 - \cos \psi) \quad (2)$$

Znak plus występuje dla szlifowania przeciwbieżnego, znak minus dla szlifowania współbieżnego.



Rys. 2. Tor ruchu ziarna  
Fig. 2. Trajectory of the grain movement

Opracowany model symulacji szlifowania uwzględnia wzajemną relację przenikania określonych profili powierzchni czynnej

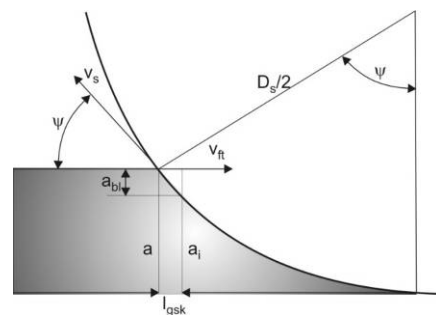
ściernicy i powierzchni szlifowanego przedmiotu w strefie szlifowania. Wychodząc z geometrycznych i kinematycznych zależności tej relacji można wyznaczyć kolejne przekroje warstw skrawanych, wyznaczyć siły działające na określone ziarno, pracę wykonaną podczas skrawania danym ziarnem, a także ich sumę na którą składają się ziarna kontaktujące się z przedmiotem obrabianym w strefie szlifowania. W tym celu wyznaczono jednostkowe przemieszczenie  $S$ , o które przemieszcza się określony przekrój przedmiotu obrabianego, poruszając się z prędkością  $V_{ft}$ , w czasie skrawania przez jedno ostrze. Przemieszczenie jednostkowe wyznacza się dla średniej odległości między kolejnymi ziarnami na powierzchni ściernicy:

$$S = l_s \cdot v_{ft} / (v_s \pm v_{ft}) \quad (3)$$

Przyjmując, że kolejno następujące po sobie ziarna na drodze skrawania są oddalone o  $l_z$  można wyznaczyć przemieszczenie przedmiotu  $S_z$  przypadające na jedno ziarno, a tym samym po przekształceniach otrzymujemy zależność na maksymalną grubość wióra  $h_c$  dla każdego ziarna.

$$\sin(\psi) = \frac{h_c}{S_z} \Rightarrow h_c = \frac{v_{ft} \cdot l_z}{v_s \pm v_{ft}} \Rightarrow S_z = l_z \frac{v_{ft}}{v_s \pm v_{ft}} \quad (4)$$

Wyznaczone zależności są podstawą do określania kolejnych położeń ziaren ściernych w strefie szlifowania podczas symulacji, oraz pozwalają wyznaczyć położenia kolejnych profili powierzchni szlifowanej w strefie obróbki. Obliczenia symulacyjne dokonywano w dyskretnych odstępach czasu  $\Delta t$ , których przyrost był stały  $\Delta t_s$ . Wielkość przyrostu  $\Delta t_s$  określano z uwzględnieniem parametrów geometrycznych i kinematycznych procesu (dla ściernicy o 200mm i prędkości szlifowania 30m/s). Dyskretyzacja obliczeń symulacyjnych, polegała na wyznaczeniu kolejnych punktów w strefie szlifowania, dla których dokonywano obliczenia kontaktów ziaren z powierzchnią obrabianą. W opracowanej metodzie przyjęto, iż w kolejnych krokach procesu symulacji zarysy powierzchni przedmiotu obrabianego materiału oznaczane jako  $p_{mat}$  przemieszczają się wzdłuż drogi posuwu z prędkością  $V_{ft}$  o stałą odległość  $l_{gsk}$ , której wartość dobierano uwzględniając parametry geometryczne ( $D_s, a_c$ ) i kinematyczne procesu ( $V_{ft}, V_s$ ).



Rys. 3. Dyskretyzacja symulacji – ustalenie kroku symulacji  
Fig. 3. Simulation discretization – determining the simulation step

Krok czasu symulacji  $\Delta t_s$  jest czasem potrzebnym na przemieszczenie się jednego przekroju przedmiotu obrabianego  $p_{mat}$  poruszającego z prędkością posuwu wzdłużnego  $V_{ft}$  o odcinek drogi  $l_{gsk}$ .

$$\Delta t_s = l_{gsk} / v_{ft} \quad (5)$$

Podczas przemieszczania się przedmiotu (jednego przekroju przedmiotu obrabianego  $p_{mat}$ ) na drodze  $l_{gsk}$  następuje obrót ściernicy o kąt  $\psi$  oraz przemieszczenie się  $l_{wsc}$  pasm elementarnych ziaren na powierzchni czynnej ściernicy  $w_{sc}$ . Ze względu na konieczne ograniczenie liczebności zbioru danych w obliczeniach symulacyjnych przyjęto, że  $l_{gsk}$  jest wielokrotnością jednostkowego przemieszczenia  $S$ . Ilość pasm elementarnych na powierzchni

ściernicy  $i_{wsc}$  mających kontakt z jednym przekrojem przedmiotu obrabianego materiału  $p_{mat}$ , który w czasie  $\Delta t_s$  przemieści się o na drodze  $l_{gsk}$ , jest wyznaczana z zależności:

$$i_{wsc} = \frac{l_{gsk}}{S} = (l_{gsk} / l_z) \cdot (v_s \pm v_{fi}) / v_{fi} \quad (6)$$

Proces symulacji dokonywany jest w kolejnych krokach oznaczanych jako  $i_{ks}$  i rozpoczyna się od kontaktu pierwszego przekroju przedmiotu z pierwszym elementarnym pasmem wierzchołków ziaren ściernicy, wynikającego z założonej głębokości szlifowania  $a_e$ . W stałych odstępach czasu  $\Delta t_s$  następuje przemieszczanie się kolejnych przekrojów powierzchni przedmiotu  $p_{mat}$  o odległość  $l_{gsk}$ . Oznacza to przypisanie określonego zarysu przedmiotu przekrojowi w strefie szlifowania według zależności:

$$X_{ss}(i_{ps}) = p_{mat} \cdot (i_{ks} - i_{ps} + 1) \quad (7)$$

W każdym etapie symulacji  $i_{ks}$  wyznaczany jest fragment powierzchni  $w_{sc}$  mający kontakt w danym przekroju strefy szlifowania  $x_{ss}(i_{ps})$  z zarysem powierzchni przedmiotu według zależności:

$$w_{sc} \cdot [i_{wsc} \cdot (i_{ks} - 1) + j]; j \in \langle 1, i_{ks} \rangle \quad (8)$$

Dla każdego przekroju strefy skrawania wysokościowe położenie wierzchołków w określonym paśmie powierzchni czynnej ściernicy  $a(i_{ps})$  określono z uwzględnieniem równania opisującego trajektorię ruchu ziarna według zależności:

$$a(i_{ps}) = (D_s / 2) - \sqrt{(D_s / 2)^2 - (l_g - i_{ps} \cdot l_{gsk})^2} \quad (9)$$

## 5. Warunki tworzenia rysy i oddzielenia materiału

Ważnym elementem symulacji było określenie rodzaju kontaktu ziarna z materiałem obrabianym. Kształtowanie powierzchni obrabianej podczas symulacji procesu szlifowania następuje w wyniku wystąpienia warunków geometrycznych umożliwiających oddzielenie materiału w postaci wiórow lub jego przemieszczenia w postaci wyływek. Parametrem określającym rodzaj występującej obróbki dla danego ziarna jest współczynnik zdolności skrawnej  $k$ , którego wartość uzależniona jest od zagłębienia wierzchołka ziarna  $h_k$ , szerokości kontaktu wierzchołka z powierzchnią obrabianą  $b_k$  oraz od umowną długością pola styku  $l_k$  jak również rodzajem materiału.

$$k = (\sqrt{h_k \cdot b_k}) / l_k \quad (10)$$

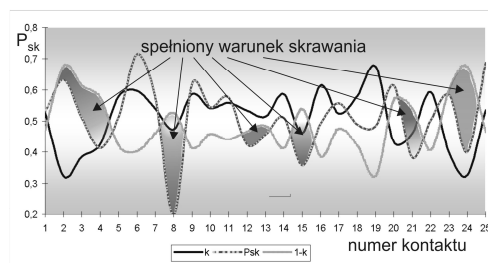
Wartość współczynnika  $k$  jest obliczana dla każdego kontaktu ziarna z powierzchnią obrabianą co pozwala na określanie rodzaju oddziaływania wierzchołka ziarna na powierzchnię szlifowanego przedmiotu i wyznaczenie obciążeń na tworzenie wióra, odkształceń sprężystych oraz przemieszczanie materiału na boki w postaci wyływek. Model pozwala uwzględniać tworzenie wyływek, które są niesymetrycznie rozłożone po obu stronach śladów skrawania wierzchołka ziarna, zależnie od jego kształtu.

Uwzględniając losowość procesu szlifowania wprowadzono dodatkowo parametr określający prawdopodobieństwo skrawania  $P_{sk}$  dla kontaktów, gdzie warunek współczynnika  $k$  wskazuje na powstawanie rysy. Parametr  $P_{sk}$  oznacza, że nastąpi oddzielenie materiału wtedy gdy spełniony zostanie warunek

$$P_{sk}(\min, \max) > 1 - k \quad (11)$$

Jeżeli warunek nie jest spełniony, następuje jedynie powstanie wyływki. Wartość prawdopodobieństwa skrawania jest losowana

z zakresu (min, max). Przykład rozkładu prawdopodobieństwa skrawania w kolejnych kontaktach przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Schemat wyznaczania prawdopodobieństwa skrawania  $P_{sk}$  wg. (9)  
Fig. 4. Determination of cutting probability based on equation (9)

## 6. Model powstawania wyływek

Uwzględniając warunek określający prawdopodobieństwo skrawania  $P_{sk}$  możemy wyprowadzić zależność na pole przekroju wyływek bocznych powstających podczas skrawania. W opracowanej metodzie symulacji powierzchnia tworzonej wyływek zależna jest od powierzchni przekroju kontaktu ziarna z materiałem obrabianym  $A_k$ .

$$A_w = \begin{cases} A_k(1-k) \Leftrightarrow P_{sk} > 1-k \\ A_k \Leftrightarrow P_{sk} \leq 1-k \end{cases} \quad (12)$$

Kształt wyływek i podział na obie strony zależny jest od położenia najniższego punktu wierzchołka ziarna wyznaczonego w przekroju poprzecznym. Dla każdego kontaktu ziarna z powierzchnią przedmiotu szlifowanego wyznaczone są skrajne punkty kontaktu ziarna z materiałem i oznaczane są, jako  $p_{kw}$ ,  $k_{kw}$ , oraz punkt najniższy położony na obrysie ziarna  $s_{kw}$ .

$$A_{wl} = A_w \left[ \frac{\Delta P_{kw} \cdot S_{kw}}{\Delta P_{kw} \cdot k_{kw}} \right]; A_{wp} = A_w \left[ \frac{\Delta S_{kw} \cdot k_{kw}}{\Delta P_{kw} \cdot k_{kw}} \right] \quad (13)$$

Tak wyznaczone pola wyływek pozwalają wyznaczyć dla każdego ziarna siły składowe szlifowania, przyjmując, że składowe normalna  $F_n$  i styczna  $F_t$  oddziaływująca na ziarna podczas kontaktu, zależą od jednostkowego oporu skrawania  $k_1$  i pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej  $A_k$ . Natomiast jednostkowy opór skrawania uzależniony jest od przekroju warstwy skrawanej  $A_k$ , promienia zaokrąglenia wierzchołka ziarna  $\rho$ , kąta wierzchołkowego  $\varepsilon$ , właściwości materiału obrabianego  $C_p$  i zużycia ziarna.

$$F_{nk} = k_1(A_k, \rho, \varepsilon, C_p); F_{tk} = k_\mu(v_s, \rho, \varepsilon); \frac{F_{nk}}{F_{tk}} = [k_\mu(v_s, \rho, \varepsilon)]^{-1} > 1 \quad (14)$$

Zmienność przekrojów warstwy skrawanej  $A_k$  w czasie  $t_{pz}$  pracy ziarna jest uzależniona między innymi od cech geometrycznych ziarna, parametrów obróbki i rodzaju ściernicy oraz od kształtu powierzchni przedmiotu obrabianego. Do systemu symulacji wykorzystano wyprowadzenia na siły skrawania następującej postaci.

$$F_{nk} = k_1 \cdot A_{ki}^n \xrightarrow{\Delta} A_{kmax} = \left[ \frac{v_{fi} \cdot l_s}{v_s \pm v_{fi}} \right] \cdot \sin(\psi) \cdot b_k \quad (15)$$

Korzystając z poprzednich (10, 11) zależności chwilowa wartość  $A_k$  przy dyskretyzacji elementarnej szerokości kontaktu ziarna  $b_k$  wyniesie.

$$A_k = \Delta b \cdot \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk} \quad (16)$$

Na podstawie otrzymanych wyników symulacji i podstawieniu tych wartości do opisanych zależności sił skrawania możemy określić ich wartości dla każdego kontaktu ziarna z materiałem, a także znając ich ilość w określonym czasie ustalić średnią wartość przypadającą na kontakt.

$$\overline{F_{nk}}(\Delta t) = k_1 \cdot \left[ \Delta b \cdot \sum_{i=1}^{n_k} \left( \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk} \right) / n_k \right]^n \quad (17)$$

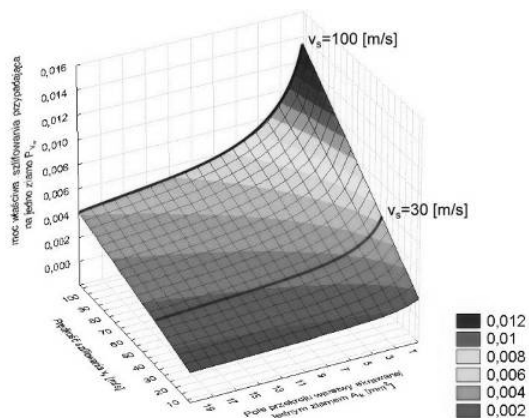
$$\overline{F_{ik}}(\Delta t) = k_\mu \cdot k_1 \cdot \left[ \Delta b \cdot \sum_{i=1}^{n_k} \left( \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk} \right) / n_k \right]^n \quad (18)$$

Wyznaczając natomiast składową styczną siłę skrawania przypadającą na ziarno możemy określić moc  $P_{nk}$  oraz pracę  $E_k$  szlifowania przypadającą na ziarno ściernie podczas kontaktu.

$$P_{nk} = k_\mu \cdot k_1 \cdot (\Delta b \cdot \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk})^n \cdot v_s \quad (19)$$

$$E_k = k_\mu \cdot k_1 \cdot (\Delta b \cdot \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk})^n \cdot v_s \cdot \Delta t \quad (20)$$

Dane z symulacji po podstawieniu do zależności (19) pozwoliły wyznaczyć wpływ prędkości obrotowej ściernicy i przekroju warstwy skrawanej pojedynczym ziarnem ściernym na moc skrawania.



Rys. 5. Zależność mocy skrawania jednym ziarnem ściernym w funkcji pola przekroju warstwy skrawanej i prędkości ziarna.

Fig. 5. Dependence of single grain cutting grinding power on cutting area cross-section and cutting speed

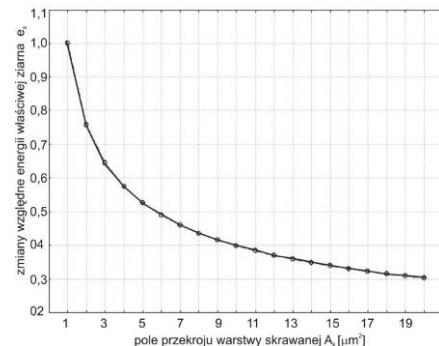
Wyznaczając pracę (20) wykonaną przez ziarno można następnie określić efektywność skrawania danego ziarna, a mając dane o skuteczności skrawania tak optymalizować proces by efektywność była jak najwyższa.

Korzystając z wcześniejszych wyprowadzeń możemy wyznaczyć taką pracę właściwą dla poszczególnych ziaren kontaktujących się z materiałem.

$$e_k = \frac{E_k}{V_k} = \frac{\left[ k_\mu \cdot k_1 \cdot (\Delta b \cdot \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk})^n \cdot v_s \cdot \Delta t \right]}{(\Delta l_k \cdot \Delta b \cdot \sum_{j=1}^{n_h} h_{jk})} \quad (21)$$

Praca właściwa szlifowania stanowi pośrednią miarę intensywności występowania zjawisk fizyko-mechanicznych w strefie szlifowania [5]. Wykorzystując dane zebrane w trakcie symulacji procesu szlifowania na rysunku 6 wyznaczono zależność, między energią właściwą szlifowania, a wielkością pola przekroju po-

przecznego warstwy skrawanej przez aktywne ziarna w strefie szlifowania.



Rys. 6. Zmiany względne energii właściwej mikroskrawania ziarnem ściernym w funkcji pola przekroju warstwy skrawanej

Fig. 6. Variation of the single grain cutting specific energy in the function of cutting layer cross-section area

Na dzień dzisiejszy system ma dopracowane modele zużycia ziaren w trakcie procesu obróbki, a kolejna faza prac nad systemem zakończy się opracowaniem zachowań materiałów trudno-obrabialnych takich jak inconnel czy tytan. Autorzy artykułu obecnie pracują nad rozszerzeniem systemu o możliwość analizy procesu szlifowania powierzchni swobodnych przy pomocy robotów przemysłowych. Wyznaczone wartości poboru energii procesu szlifowania opracowane w pierwszych pracach autorów [1, 6] pomogą udoskonalić system symulacji i doprowadzić do efektywnego wykorzystania energii w trakcie procesu szlifowania powierzchni swobodnych.

## 7. Wnioski

Metody symulacji komputerowych są coraz częściej stosowane w rozwiązywaniu zaawansowanych problemów inżynierskich [7, 8] różnych dziedzin. Modelowanie cech energetycznych procesów szlifowania pozwala wyznaczać, metodami symulacji, wpływ parametrów obróbki na efektywność procesu szlifowania. Uwzględnianie odkształceń plastycznych materiału wzdłuż toru ruchu ziarna diametralnie zmieniają wartości efektywnej energii szlifowania. Udział odkształceń plastycznych w procesie jest na tyle znaczący, że nieuwzględnianie go w badaniach powoduje duże wypaczenie ich wyników. Wyznaczenie stosunku pracy wykonanej przez ziarna na odkształcenia plastyczne do pracy ziaren tworzących rysy w warunkach laboratoryjnych jest prawie niemożliwe. Konieczne zatem staje się rozwijanie metod analitycznych wraz z symulacją procesu szlifowania [6].

## 8. Literatura

- [1] Bałasz B., Królikowski T.: Advanced Kinematic-Geometrical Model Of Grinding Processes. Delft, Holand 2007. pp. 137-141.
- [2] Badger J.A., Torrance A.: A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography. Int. J. of Mach. Tools a. Manuf., 40/8/2000, s. 1099-1120.
- [3] Guo C., Malkin S.: Analysis of Energy Partition in Grinding. ASME Journal of Engineering for Industry, 1995, t. 117, nr 1, s. 55-61.
- [4] Inasaki I.: Grinding Process Simulation Based on the Wheel Topography Measurement. Annals of the CIRP 45/1/1996. s. 347-350.
- [5] Koziarski A.: Czynna powierzchnia ściernicy, Monografie Politechnika Łódzka, 1996.
- [6] Królikowski T., Bałasz B.: Numerical Model of Material – a Concept of a FEM System Based on Neuron Networks. Journal of Machine Engineering. Vol. 8, No. 2, 2008. s. 79-86
- [7] Kubisa S. Intuicja i symulacja Monte Carlo podstawą analizy niedokładności pomiaru. PAK 2007 nr 09, s. 03-08.
- [8] Rogowski K., Kaczorek T. Symulacja singularnych liniowych układów ciągłych. PAK 2008 nr 09, s. 620-622.