

# Procedura optymalizacyjna skutków szlifowania

## Optimization procedure of grinding effect

JÓZEF ZAWORA  
MIECZYŚLAW MARCINIĄK  
LUCJAN DĄBROWSKI \*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.347

Artykuł omawia potencjał innowacyjny technologii szlifowania, wytyczne doboru parametrów technologicznych szlifowania uwzględniające warunki techniczne i ekonomiczne obróbki, wpływ cech ściernicy na warunki kontaktu czynnej powierzchni ściernicy (CPS) z materiałem obrabianym oraz naciski jednostkowe i efekty wydajnościowe szlifowania. Przedstawiono rezultaty procedury optymalizacyjnej parametrów szlifowania według kryteriów użytkowych tego procesu.

**SŁOWA KLUCZOWE:** szlifowanie, ściernice, optymalizacja, stereometria powierzchni

*The article include: innovative potential of the grinding technique. Recommendation for grinding parameters in view of technological conditions and economic indices. The impact of the grinding wheel features and the ground material properties on the condition of contact between the active wheel surface (AWS) and the machined part implicating forces, productivity and 3-d geometry of the machined surface. The effect of the optimization procedure according to the performance criteria for this manufacturing process.*

**KEYWORDS:** grinding, grinding wheel, optimization, stereometry surface

We wszystkich modelach fizycznych procesu szlifowania przyjmuje się jednakowe założenie co do mechanizmu dekohezji materiału warstwy szlifowanej: czynne ziarna ściernicy naruszają spójność materiału wskutek mikroskrąpania, bruzdowania i tarcia ślizgowego [1].

### Użytkowe cechy ściernic z ziarnami SiC, CrA, CBN

Ziarna ściernic połączone mostkami spoiwa tworzą czynną powierzchnię ściernicy (CPS) o określonym parametrze wysokościowym  $R_t$  profilu chropowatości (1, 2).

**TABLICA. Charakterystyki badanych ściernic**

Kod w planie doświadczeń	Nr ziarna SiC, CrA	Twardość SiC, CrA	Struktura SiC, CrA	Granulacja CBN
+ √2	36	K	4	181
+ 1	60	M	5	151
0	80	O	6	107
- 1	100	Q	7	76
- √2	120	T	8	54

Na fizycznym modelu CPS z rys. 1 poziom spoiwa sięga płaszczyzny X-X, gdyż w spoiwie pojawiają się wgłębienia po ziarnach wyrwanych podczas obciążania bądź szlifowania. Parametry profilu CPS zależą więc od wymiarów i objętościowego udziału spoiwa, a także pośrednio, od odległości między ziarnami odpowiednio do ich udziału objętościowego w ściernicy [2]. Przedstawione wyniki są reprezentatywne dla pełnego zbioru zbadanych 33 nowych

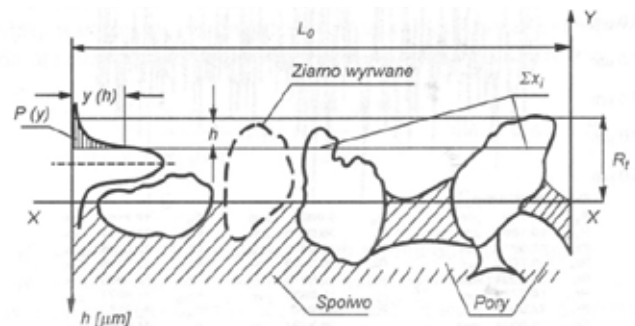
ściernic o spoiwie ceramicznym. Jest to uzasadnienie następującej postaci modelu fizycznego CPS:

$$R_t = k \cdot a^m (V_z/V_{sp})^n \quad (1)$$

gdzie:  $k$ ,  $m$ ,  $n$  – stałe zależne od charakterystyk stereometrycznych ziaren ściernych i właściwości spoiwa.

W opracowanym modelu charakteryzującym maksymalną wysokość  $R_t$  profilu CPS uwzględniono trzy standardowe parametry strukturalne ściernicy: wymiar charakterystyczny ziarna  $a$ , objętość materiału ściernego  $V_z$  i spoiwa  $V_{sp}$  (1). Uwzględnienie w modelu ilorazu  $V_z/V_{sp}$  jest rezultatem obserwacji technologii ściernic: zwiększanie udziału spoiwa w jednostkowej objętości ściernicy powoduje ograniczenie objętości porów i względne zmniejszenie maksymalnej wysokości chropowatości profilu CPS [3, 4].

Parametr ten jest ściśle skorelowany z rodzajem i granulacją ziaren oraz odwrotnie proporcjonalny do udziału objętościowego spoiwa (rys. 1).



Rys. 1. Parametr chropowatości  $R_t$  w funkcji granulacji i koncentracji

Dla badanych nowych ściernic ze spoiwem ceramicznym parametr  $R_t$  wynosi odpowiednio 36,88  $\mu\text{m}$  (SiC), 40,92  $\mu\text{m}$  (CrA) i 33,18  $\mu\text{m}$  (CBN), co w przybliżeniu stanowi 30% wymiaru charakterystycznego  $a$  tych ziaren. Weryfikację doświadczalną zależności (1) przeprowadzono według planu zamieszczonego w tablicy i uzyskano następujące rezultaty:

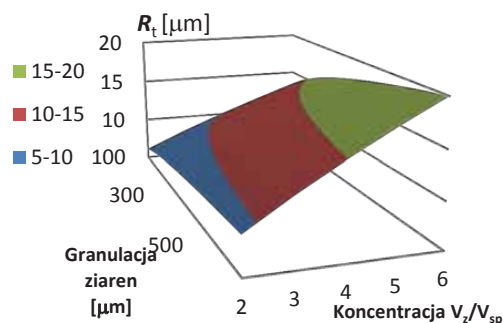
$$\begin{aligned} \text{CrA} \quad R_t &= 1,41 a^{0,74} (V_z/V_{sp})^{0,17} \\ \text{SiC} \quad R_t &= 1,35 a^{0,72} (V_z/V_{sp})^{0,22} \\ \text{CBN} \quad R_t &= 4,6 a^{0,42} \end{aligned} \quad (2)$$

(przy stałej koncentracji CBN wynoszącej 100).

Współczynniki korelacji wielowymiarowej dla równań (2) wynoszą odpowiednio:  $R_{(\text{CrA})} = 0,905$ ;  $R_{(\text{SiC})} = 0,936$ ;  $R_{(\text{CBN})} = 0,991$ . Z testu F-Snedecora uzyskano następujące liczby:  $F_{(\text{CrA})} = 27,129$ ;  $F_{(\text{SiC})} = 42,575$ ;  $F_{(\text{CBN})} = 173,744$ .

Takie wyniki testów statystycznych uwiarygadniają przyjęty model fizyczny CPS opisany zależnościami (2). Graficzną postać pierwszego z równań (2) przedstawiono na rys. 2. Wysokość profilu chropowatości CPS z ziarnem CBN jest tylko funkcją charakterystycznego wymiaru ziarna  $a$ , gdyż dla badanych ściernic  $V_z/V_{sp} = \text{const}$ .

\* Dr hab. inż. Józef Zawora (jzawora@meil.pw.edu.pl), dr hab. inż. Mieczysław Marciniak (mima@meil.pw.edu.pl), dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski (ld@meil.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska



Rys. 2. Wpływ standardowych proporcji ziarna  $V_z$  i spoiwa  $V_{sp}$  oraz granulacji na wysokość  $R_t$  profilu CPS

### Ocena warunków dekohezji szlifowanego materiału

Kontakt czynnego ziarna ściernicy z materiałem obrabianym ma charakter dynamiczny, a czas tego kontaktu przy szlifowaniu obwodowym z prędkością  $30 \div 50$  m/s wynosi  $50 \div 30$  ms. Towarzyszą temu odkształcenia materiału opisywane quasi-statyczną teorią małych deformacji zarówno dla materiałów plastycznych, jak i kruchych, co z różną intensywnością oddziałuje na zużycie ziaren i rezultaty techniczne szlifowania. Przy ocenie tych rezultatów uwzględnia się niezbędne w badaniach cechy procesu jako zmienne niezależne, których postać ma umożliwić wykorzystanie najlepszych wyników. Służy temu optymalizacja wielokryterialna, wymagająca uzasadnionego merytorycznie wyboru funkcji celów, które mają być spełnione jednocześnie. Funkcje te w wielu przypadkach są przeciwstawne. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wartości zmiennych decyzyjnych wartość określonej funkcji celu (od której wymaga się np. maksymalizacji) rośnie, a innej (która również wymaga maksymalizacji) – maleje [5]. Podobne przypadki obserwuje się, kiedy wartości funkcji celu mają być minimalizowane. Równoczesne spełnienie takich idealnych wymagań nie jest fizycznie możliwe, a zatem niezbędna jest potrzeba znalezienia kompromisu. Do wielokryterialnej optymalizacji analizowanego procesu wybrano przykładowo wykładnicze funkcje celu:

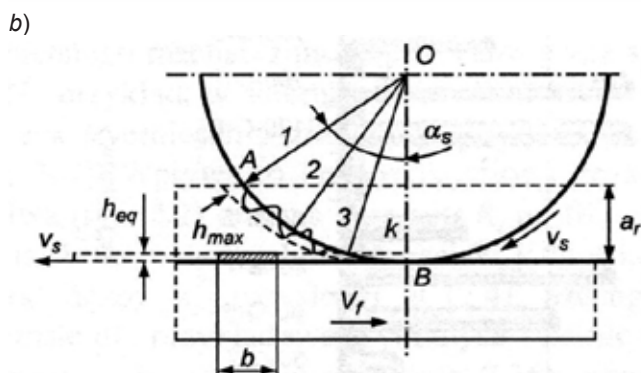
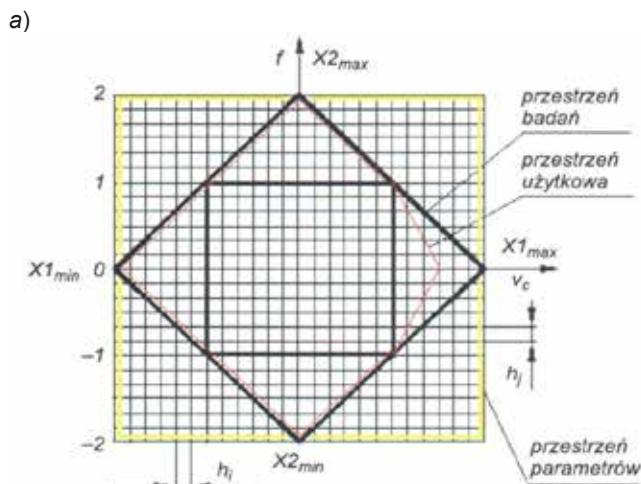
- wydajności właściwej szlifowania  $Q_w'$  mm<sup>3</sup>/mm min,
- naciski jednostkowe profilu CPS na materiał szlifowany zależne od siły normalnej  $F_n$ .

Funkcje te określają efektywność usuwania masy materiału szlifowanego  $m_n$  zależną od jednostkowego obciążenia siłą  $F_n$  liczby czynnych ziaren ściernych  $n_c^2$ , a także od możliwości kontaktu spoiwa z materiałem szlifowanym, odpowiednio do jego objętościowego udziału w spajaniu każdego z  $n$  ziaren występujących w jednostce objętości ściernicy:

$$m_n = CX_1^{c1} X_2^{c2} \quad (3)$$

gdzie:  $X_1 = V_{sp}/n$ ,  $X_2 = F_n/n_c^2$

Maksima i minima przyjętych funkcji wyznacza się w procesie optymalizacji jednokryterialnej. Wartości pojedynczych funkcji celu normalizuje się w zakresie od 0 do 1. Na rys. 3a zamieszczono przykład wyznaczenia możliwej przestrzeni użytkowej z przestrzeni parametrów opisanych na rys. 3b (np.  $X_1 = V_s$ ,  $X_2 = V_f$ ). Wierzchołki ziaren ściernych CPS pracujących w ustalonych warunkach szlifowania, wnikają w materiał obrabiany na głębokość  $h = (0, h_{max})$  w zakresie kontaktu AB (rys. 3b). Zmienność taka cechuje wszystkie sposoby szlifowania odpowiednio do różnicowania wysokościowego naroży ziaren CPS, a także wskutek losowo zróżnicowanych odległości między nimi. Ilustrują to wyniki badań wydajności właściwej szlifowania uzyskane dla stali 100CR.



Rys. 3. Przekrój wielowymiarowej przestrzeni: a) badań i parametrów wejściowych [5] i b) model oddziaływania CPS na przedmiot przy dosuwie  $a_r$ , posuwie  $V_f$  i prędkości szlifowania  $V_s$  [2]

Zważywszy na zróżnicowanie wydajności  $Q_w'$  w kolejnych fazach obróbki, do jej oceny włączono parametr czasu szlifowania  $t$  oraz wskaźnik nacisków jednostkowych  $\frac{F_n}{n_c^2}$ . Uzyskano uwiarogodnione testem F-Snedecora (dla  $\alpha = 0,05$ ) następujące zależności:

- dla ściernic SiC (przy  $F/F_{kr} = 4,415$ )  
 $Q_w' = 0,46 - 0,03R_t + 0,03t + 5,1 \frac{F_n}{n_c^2} - 2,4 \frac{F_n}{n_c^2}$
- dla ściernic CrA (przy  $F/F_{kr} = 3,442$ )  
 $Q_w' = -2,05 + 0,06R_t - 0,0005 + 0,01t + 0,5 \frac{F_n}{n_c^2}$  (4)
- dla ściernic CBN<sup>1)</sup> (dla  $R_z$ , przy  $F/F_{kr} = 5,915$ )  
 $Q_w' = -1,68 + 0,68R_z - 0,06 + 0,014t + 0,74 \frac{F_n}{n_c^2}$

Wykorzystanie parametrów  $R_t$  oraz  $R_z$  przy charakteryzowaniu ściernic CBN jest związane z mniejszą dyspersją rzędnych profilu chropowatości CPS, którą zapewnia ich wytwarzanie. Z powyższych danych wynika, że na usuwanie masy materiału szlifowaniem bezpośredni istotny wpływ mają parametry wysokościowe profilu chropowatości CPS.

### LITERATURA

1. Klocke F. „Manufacturing Processes 2: Grinding, Honing, Lapping”. Springer-Verlag. Berlin 2009.
2. Marciniak M. „Proces szlifowania w ujęciu fenomenologicznym”. OWPW. Mechanika. Z. 178, 1999.
3. Nadolny K., Plichta J. „Jednoprześciowe szlifowanie otworów ściernicą o strefowo zróżnicowanej budowie”. Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej. 2008: s. 222.
4. Dabrowski L., Marciniak M. „Szliferka segmentowa z głowicą planetarną”. Świat Obrabiarek. Nr 5+6. Marcosta, Tarnów 2010: s. 20+22.
5. Zawora J. „Podstawy technologiczne wielokryterialnej optymalizacji procesów toczenia złożonych powierzchni narzędziami punktowymi”. OWPW. Mechanika. Z. 255, 2013.