

Т. Божко

*Луцький державний технічний університет***ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПРИ ШЛІФУВАННІ ПОРИСТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ**

*Наведено результати експериментального визначення сил різання при шліфуванні пористих порошкових матеріалів. Встановлено регресивну залежність для визначення сил різання з уточненими коефіцієнтами від параметрів, що на неї впливають.*

Т. Bozhko

**RESEARCH OF FORCES OF CUTTING AT POROUS POWDER MATERIALS**

*Results experimental forces of cutting are resulted at grinding porous powder materials. It is offered mathematical law for research of forces of cutting with specified coefficient from parameters, that it influence.*

Процес шліфування супроводжується дією значних силових факторів, які викликають фазові та структурні зміни в поверхневому шарі деталі та впливають на шорсткість оброблюваних поверхонь.

Питанням визначення сил різання під час шліфування компактних матеріалів займалися багато вчених, серед яких Алексєєв П.Г, Резников А.Н., Якимов А.В. [1, 2, 3] та інші. Однак сили різання при шліфуванні порошкових матеріалів з пористістю 20-40% на сьогодні мало вивчені.

**Метою дослідження** є експериментальне обґрунтування математичної моделі для визначення сил різання при шліфуванні пористих порошкових матеріалів, а також підтвердження адекватності отриманої математичної моделі реальному технологічному процесу.

Основні фактори, що впливають на сили різання при шліфуванні пористого матеріалу, залежать від подачі  $S$ , швидкості шліфування  $V$ , пористості матеріалу  $\theta$ , глибини різання  $t$ . Враховуючи, що 60% силового впливу припадає на радіальну силу різання  $Ry$ , тоді:

$$Ry = f(S, V, \theta, t). \quad (1)$$

У першому наближенні функцію (1) можна представити у такому вигляді:

$$Ry = C \cdot S^a \cdot V^b \cdot \theta^c \cdot t^d, \text{ мкм.} \quad (2)$$

Необхідно зазначити, що математична модель не описує систему в цілому, а лише окремий комплекс факторів, які є визначальними при шліфуванні пористих порошкових матеріалів.

В логарифмічному представленні рівняння (2) буде поліномом першого степеня:

$$\ln Ry = \ln C + a \ln S + b \ln V + c \ln \theta + d \ln t. \quad (3)$$

При переході до безрозмірних величин у загальному вигляді рівняння (3) запишемо:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4. \quad (4)$$

Експерименти проводили, використовуючи методику багатофакторного аналізу [4], тобто одночасного варіювання усіх змінних факторів,  $x_1(S)$ ,  $x_2(V)$ ,  $x_3(\theta)$ ,  $x_4(t)$ . Кожна з цих змінних варіюється на двох рівнях ( $2^k$ ), де  $k$  – число змінних. Визначили невідомі  $b_0$  і коефіцієнти  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_4$ . Експерименти проводились на зразках із порошків заліза марки ПЖР-3. Для дослідів використовувались зразки пористістю 24%,

28% та 32%, які виготовлялись методом гідростатичного формування та спікалися при температурі 1050С° у захисному середовищі. Шліфування зразків проводилося без охолодження на універсальному плоскошліфувальному верстаті марки 3Г71. Застосовувався шліфувальний круг марки 24А20СМ2К.

Вибір режимів обробки проводився таким чином, щоб спростити кодування із врахуванням можливостей обладнання і граничних режимів обробки, як це показано в таблиці 1.

Таблиця 1 - Режими шліфування і кодові позначення

| Рівень   | Режими шліфування |               |              |          | Кодові позначення |       |       |       |
|----------|-------------------|---------------|--------------|----------|-------------------|-------|-------|-------|
|          | $S$ ,<br>мм/хід   | $V$ ,<br>м/хв | $\theta$ , % | $t$ , мм | $x_1$             | $x_2$ | $x_3$ | $x_4$ |
| Верхній  | 0,4               | 12            | 32           | 0,04     | 1                 | 1     | 1     | 1     |
| Середній | 0,3               | 9             | 28           | 0,03     | 0                 | 0     | 0     | 0     |
| Нижній   | 0,2               | 6             | 24           | 0,02     | -1                | -1    | -1    | -1    |

Ці рівні закодовані таким чином, щоб верхній рівень відповідав +1, а нижній –1.

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\ln S - \ln 0,4)}{(\ln 0,4 - \ln 0,2)} + 1 \\ x_2 &= \frac{2(\ln V - \ln 12)}{(\ln 12 - \ln 6)} + 1 \\ x_3 &= \frac{2(\ln \theta - \ln 32)}{(\ln 32 - \ln 24)} + 1 \\ x_4 &= \frac{2(\ln t - \ln 0,04)}{(\ln 0,04 - \ln 0,02)} + 1 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

В таблиці 2 наводяться результати 16 дослідів зі шліфування зразків із порошків заліза марки ПЖР-3.

Таблиця 2 - Умови різання, кодові значення і сили різання

|    | Умови і режими шліфування |            |      |       | Кодові позначення |                |                |                | Ry,<br>H | y=lnRy |
|----|---------------------------|------------|------|-------|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------|--------|
|    | S,<br>мм/хід              | V,<br>м/хв | θ, % | t, мм | x <sub>1</sub>    | x <sub>2</sub> | x <sub>3</sub> | x <sub>4</sub> |          |        |
| 1  | 0,2                       | 6          | 24   | 0,02  | -1                | -1             | -1             | -1             | 68       | 4,22   |
| 2  | 0,4                       | 6          | 24   | 0,02  | 1                 | -1             | -1             | -1             | 82       | 4,4    |
| 3  | 0,2                       | 12         | 24   | 0,02  | -1                | 1              | -1             | -1             | 72       | 4,27   |
| 4  | 0,4                       | 12         | 24   | 0,02  | 1                 | 1              | -1             | -1             | 85       | 4,44   |
| 5  | 0,2                       | 6          | 32   | 0,02  | -1                | -1             | 1              | -1             | 62       | 4,12   |
| 6  | 0,4                       | 6          | 32   | 0,02  | 1                 | -1             | 1              | -1             | 76       | 4,33   |
| 7  | 0,2                       | 12         | 32   | 0,02  | -1                | 1              | 1              | -1             | 70       | 4,24   |
| 8  | 0,4                       | 12         | 32   | 0,02  | 1                 | 1              | 1              | -1             | 78       | 4,35   |
| 9  | 0,2                       | 6          | 24   | 0,04  | -1                | -1             | -1             | 1              | 84       | 4,43   |
| 10 | 0,4                       | 6          | 24   | 0,04  | 1                 | -1             | -1             | 1              | 91       | 4,51   |
| 11 | 0,2                       | 12         | 24   | 0,04  | -1                | 1              | -1             | 1              | 89       | 4,48   |
| 12 | 0,4                       | 12         | 24   | 0,04  | 1                 | 1              | -1             | 1              | 95       | 4,55   |
| 13 | 0,2                       | 6          | 32   | 0,04  | -1                | -1             | 1              | 1              | 85       | 4,44   |
| 14 | 0,4                       | 6          | 32   | 0,04  | 1                 | -1             | 1              | 1              | 90       | 4,49   |
| 15 | 0,2                       | 12         | 32   | 0,04  | -1                | 1              | 1              | 1              | 87       | 4,46   |
| 16 | 0,4                       | 12         | 32   | 0,04  | 1                 | 1              | 1              | 1              | 96       | 4,56   |

**Оцінка параметрів.**

На основі результатів дослідів оцінювали чотири коефіцієнти в емпіричній формулі (4), використовуючи метод найменших квадратів і властивості скалярного добутку основних векторів.

Відповідно до способу найменших квадратів необхідно, щоб сума квадратів відхилень фактичних значень функції у від формальних, отриманих за рівнянням (5)  $y_{x_1, x_2, x_3, x_4}$ , була найменшою, тобто:

$$\sum (y - y_{x_1, x_2, x_3, x_4})^2 = \min. \tag{6}$$

Ліву частину виразу (4) позначимо буквою f (f – функція від невідомих параметрів  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4$ ).

Мінімум цієї функції знаходили із рівнянь [4]:

$$\frac{df}{db_0} = 0; \frac{df}{db_1} = 0; \frac{df}{db_2} = 0; \frac{df}{db_3} = 0; \frac{df}{db_4} = 0. \tag{7}$$

Продиференціювавши, запишемо систему цих рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \sum y &= nb_0 + b_1 \sum x_1 + b_2 \sum x_2 + b_3 \sum x_3 + b_4 \sum x_4 \\ \sum yx_1 &= b_0 \sum x_1 + b_1 \sum x_1^2 + b_2 \sum x_1x_2 + b_3 \sum x_1x_3 + b_4 \sum x_1x_4 \\ \sum yx_2 &= b_0 \sum x_2 + b_1 \sum x_1x_2 + b_2 \sum x_2^2 + b_3 \sum x_2x_3 + b_4 \sum x_2x_4 \\ \sum yx_3 &= b_0 \sum x_3 + b_1 \sum x_1x_3 + b_2 \sum x_3x_2 + b_3 \sum x_3^2 + b_4 \sum x_3x_4 \\ \sum yx_4 &= b_0 \sum x_4 + b_1 \sum x_1x_4 + b_2 \sum x_4x_2 + b_3 \sum x_4x_3 + b_4 \sum x_4^2 \end{aligned} \right\}. \tag{8}$$

Рівняння (6) дають можливість визначити

$$b_0 = \frac{\sum y}{n}, \tag{9}$$

де n – число дослідів; n=16.

$$\begin{aligned}
 b_1 &= \frac{\sum yx_1}{\sum x_1^2} = \frac{\sum yx_1}{16}; & b_2 &= \frac{\sum yx_2}{\sum x_2^2} = \frac{\sum yx_2}{16}; \\
 b_3 &= \frac{\sum yx_3}{\sum x_3^2} = \frac{\sum yx_3}{16}; & b_4 &= \frac{\sum yx_4}{\sum x_4^2} = \frac{\sum yx_4}{16}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Необхідно додати, що інші члени рівнянь (8) дорівнювали нулю, оскільки вектори  $x_1, x_2, x_3, x_4$  є ортогональними і  $\sum x_i = 0$ .

З іншого боку, для визначення коефіцієнтів  $b_0 \dots b_4$  можливо використати матриці  $(x'x)$  і  $(x'x)^{-1}$ :

$$x'x = \begin{vmatrix} 16 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 16 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 16 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 16 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 \end{vmatrix}, \quad (x'x)^{-1} = \begin{vmatrix} \frac{1}{16} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{16} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{16} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{16} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{16} \end{vmatrix}.
 \tag{11}$$

Залежності для визначення коефіцієнтів  $b_0 \dots b_4$ , згідно з рівняннями (11), будуть мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 b_0 &= 1/16(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16}) \\
 b_1 &= 1/16(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6 - y_7 + y_8 - y_9 + y_{10} - y_{11} + y_{12} - y_{13} + y_{14} - y_{15} + y_{16}) \\
 b_2 &= 1/16(-y_1 - y_2 + y_3 + y_4 - y_5 - y_6 + y_7 + y_8 - y_9 - y_{10} + y_{11} + y_{12} - y_{13} - y_{14} + y_{15} + y_{16}) \\
 b_3 &= 1/16(-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 + y_5 + y_6 + y_7 + y_8 - y_9 - y_{10} - y_{11} - y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16}) \\
 b_4 &= 1/16(-y_1 - y_2 - y_3 - y_4 - y_5 - y_6 - y_7 - y_8 + y_9 + y_{10} + y_{11} + y_{12} + y_{13} + y_{14} + y_{15} + y_{16})
 \end{aligned} \right\}.
 \tag{12}$$

Тут індекси при  $y$  визначають номери дослідів (табл. 2).

Підставляючи в останні рівняння (12) значення дослідів із таблиці 2, отримали:

$$b_0 = 4,39; \quad b_1 = 0,06; \quad b_2 = 0,025; \quad b_3 = -0,019; \quad b_4 = 0,096.$$

Для конкретних умов шліфування отримуємо формулу для визначення сили різання:

$$\ln Rz = 4,39 + 0,06x_1 + 0,025x_2 - 0,019x_3 + 0,096x_4.
 \tag{14}$$

Формулу (14) необхідно записати відповідно до рівнянь (5), тобто:

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{2(\ln S - \ln 0,4)}{(\ln 0,4 - \ln 0,2)} + 1 = \frac{2(\ln S + 0,91)}{(-0,91 + 1,6)} + 1 = 2,89 \ln S + 3,64; \\
 x_2 &= \frac{2(\ln V - \ln 12)}{(\ln 12 - \ln 6)} + 1 = \frac{2(\ln V - 2,48)}{(2,48 - 1,79)} + 1 = 2,89 \ln V - 6,18; \\
 x_3 &= \frac{2(\ln \theta - \ln 32)}{(\ln 32 - \ln 24)} + 1 = \frac{2(\ln \theta - 3,46)}{(3,46 - 3,17)} + 1 = 6,89 \ln \theta - 22,86; \\
 x_4 &= \frac{2(\ln t - \ln 0,04)}{(\ln 0,04 - \ln 0,02)} + 1 = \frac{2(\ln t + 3,21)}{(-3,21 + 3,91)} + 1 = 2,85 \ln t + 10,17.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Підставивши значення  $x_1, x_2, x_3, x_4$ , в рівняння (15), отримали уточнену формулу для визначення логарифма сили різання при шліфуванні:

$$\ln R_y = 4,39 + 0,06(2,89 \ln S + 3,64) + 0,025(2,89 \ln V - 6,18) - 0,019(6,89 \ln \theta - 22,86) + 0,096(2,85 \ln t + 10,17) = 5,86 + 0,17 \ln S + 0,07 \ln V - 0,13 \ln \theta + 0,27 \ln t.$$

Отже, кінцева формула для визначення сили різання в процесі шліфування набуде вигляду:

$$R_y = e^{5,86} \frac{S^{0,17} \cdot V^{0,07} \cdot t^{0,27}}{\theta^{0,13}} = 350,7 \frac{S^{0,17} \cdot V^{0,07} \cdot t^{0,27}}{\theta^{0,13}}. \quad (16)$$

Для оцінки адекватності регресивної моделі проведені контрольні досліди з використанням інших режимів різання ( $V\partial=9\text{м/хв}$ ,  $V_{кр}=35\text{м/с}$ ,  $t=0,02\text{мм}$ ,  $\theta=30\%$ ).

На рис. 1 для прикладу наведено співставлення розрахункових даних за формулою (16) і експериментальних результатів у залежності від подачі.

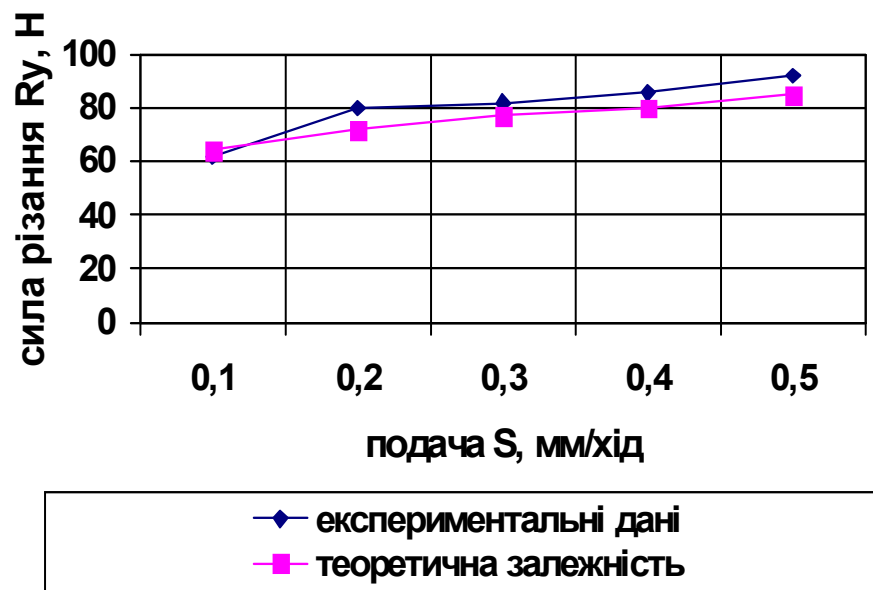


Рисунок 1 - Вплив подачі на силу різання, при  $V\partial=9\text{м/хв}$ ,  $V_{кр}=35\text{м/с}$ ,  $t=0,02\text{мм}$ ,  $\theta=30\%$

Наведені дані показують, що при збільшенні подачі сила різання  $R_y$  збільшується. Отримана теоретична залежність в цілому підтверджує експериментальні результати.

**Висновки.** В результаті проведених експериментів було запропоновано регресивну модель для визначення радіальної складової  $R_y$  сили різання при шліфуванні пористих порошкових матеріалів. Розрахункові значення сили різання  $R_y$  залежні відносно експериментальних. Найбільше відхилення розрахункових значень від експериментально зазначених не перевищує 9%.

#### Література

1. Алексеев П.Г. Влияние процесса резания на качество и износостойкость поверхностного слоя. В кн.: Упрочнение деталей машин механическим наклепыванием. - М.: Наука, 1965. - С.135-141.
2. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / Под ред. проф. А.Н.Резникова. - М.: Машиностроение, 1977. - 390с.
3. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования.-М: Машиностроение,1975. - 175с.
4. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1971. - 283с.

Одержано 20.02.2008 р.