

**ВИСОКОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ  
В ПРИЛАДОБУДУВАННІ**

УДК 621.941.1.015

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАРАМЕТРА ШЕРОХОВАТОСТИ  $Ra$   
ОБРАБОТАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ СВЕРХСКОРОСТНОМ ТОЧЕНИИ**

*Усачев П.А., Барабаш Я.В., Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, г. Киев, Украина*

*В работе разработана математическая модель параметра  $Ra$  шероховатости в зависимости от элементов режима резания при сверхскоростном точении на основе метода характеристических поверхностей*

**Введение. Постановка задачи**

Одним из наиболее важных факторов процесса обработки резанием является скорость резания. Она занимает особенное место с точки зрения экономической эффективности процесса обработки резанием, так как позволяет при неизменном сечении среза увеличивать производительность процесса [1, 2]. Производительность также возможно повысить увеличением подачи, что однако связано с ухудшением качества обработанной поверхности.

Во многих случаях требуемая шероховатость обработанных поверхностей служит ограничивающей функцией при выборе подач и скоростей резания. Поэтому повышению производительности путем увеличения скорости резания уделяется особое внимание. Хотя общее влияние элементов режима резания на шероховатость обработанной поверхности достаточно широко исследовано [3, 4], до сих пор нет достаточно надежных моделей для прогнозирования параметров шероховатости в зависимости от элементов режима резания при сверхскоростном точении. Также не решенным является вопрос подбора параметров режима точения таким образом, чтобы обеспечить наивысшую производительность обработки при заданной шероховатости поверхности.

В данной работе разработана математическая модель параметра  $Ra$  шероховатости в зависимости от элементов режима резания при сверхскоростном точении на основе метода характеристических поверхностей.

**1. Постулирование модели параметра  $Ra$  шероховатости поверхности**

Функциональная зависимость между параметром  $Ra$  шероховатости поверхности и элементами режима резания может быть выражена таким способом [2, 4, 5]:

$$Ra = C \cdot V^p \cdot S^m \cdot t^n, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость резания;  $S$  – подача резания;  $t$  – глубина резания;

$Ra$  – параметр шероховатости поверхности, мкм.

Уравнение (1) можно переписать в форме логарифмического уравнения:

$$\lg Ra = \lg C + p \cdot \lg V + m \cdot \lg S + n \cdot \lg t, \quad (2)$$

которое представляет следующую линейную математическую модель

$$a = a_0 \cdot x_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3, \quad (3)$$

где  $a$  – действительное значение параметра  $Ra$  шероховатости поверхности в логарифмическом масштабе;

$x_0=1$  – фиктивная переменная;

$x_1, x_2$  і  $x_3$  – логарифмические преобразования скорости резания, подачи и глубины резания;

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$  – параметры, которые подлежат оценке.

Уравнение (3) может быть выражено в следующем виде:

$$Y - \Delta = b_0 \cdot x_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (4)$$

где  $Y$  – логарифмическое преобразование неизменной величины параметра  $Ra$  шероховатости поверхности;

$\Delta$  – экспериментальная погрешность;

$b_0, b_1, b_2$  и  $b_3$  соответствующие оценки параметров  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  и  $\alpha_3$ .

Если окажется недостаточность модели первого порядка для шероховатости, то уравнение (3) можно уточнить таким способом:

$$a = a_0 x_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 \quad (5)$$

Уравнение (5) можно заменить уравнением:

$$\bar{Y} = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3, \quad (6)$$

где  $\bar{Y}$  – оценка параметра  $Ra$  шероховатости поверхности в логарифмическом масштабе;

$b_i$  – оценка значений  $a_i$ . Оценки этих последних параметров можно получить методом наименьших квадратов с помощью формулы вида:

$$B = (X^T X)^{-1} X^T \cdot y, \quad (7)$$

где  $B$  – матрица оценок параметра;

$X$  – расчетная матрица;  $X^T$  – транспозиция  $X$ ;

$y$  – матрица измеренных величин шероховатости в логарифмическом масштабе.

## **2. Планирование и условия проведения экспериментов.**

Для разработки модели параметра  $Ra$  шероховатости поверхности первого порядка планировалось провести 12 экспериментов. Восемь экспериментов представляют собой многофакторный комплекс  $2^3$  [6, 7].

Планирование эксперимента предусматривало три уровня для каждой независимой переменной: закодированные “-1” для низкого уровня, “0” - для основного уровня и “+1” для высокого уровня.

Матрица  $X_1$  для планируемого таким способом эксперимента может быть записана в следующем виде

$X_1$	$X_2$	$X_3$	Експеримент №
-1	-1	-1	1
1	-1	-1	2
-1	1	-1	3
1	1	-1	4
-1	-1	1	5
1	-1	1	6
-1	1	1	7
1	1	1	8
0	0	0	9
0	0	0	10
0	0	0	11
0	0	0	12

Для разработки модели второго порядка было проведено 12 дополнительных экспериментов, которые образовали композиционный центральный комплекс (Рис. 1).

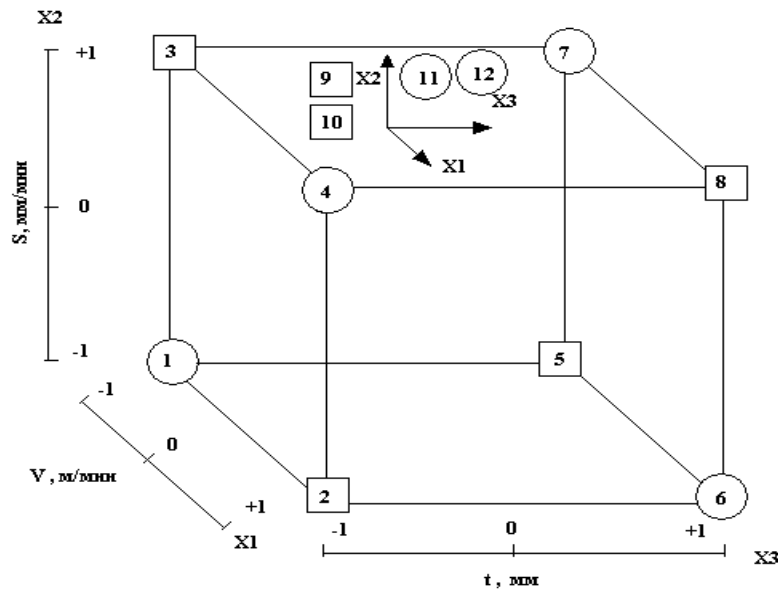


Рис. 1. Композиционный центральный комплекс

Эксперименты проводились двумя группами (блоками) по 6 опытов в каждой группе. В первом блоке находились эксперименты 1, 4, 6, 7, 11 и 12, во втором блоке - опыты 2, 3, 5, 8, 9 и 10.

Дополнительные 12 опытов проводились двумя блоками. Первый блок включил эксперименты 13, 14, 15, 16, 17 и 18, а второй - все другие.

Эксперименты, включенные в каждый из новых блоков, были аналогичны друг другу, чтобы повысить точность оценки параметров.

Запланированные 24 эксперимента охватили по 5 уровней для каждой независимой переменной, как это показано в табл. 1.

Таблица 1. Исследованные уровни независимых переменных

Уровень	Скорость резания $V$ , м/мин	Подача $S_m$ , мм/об	Глубина резания $t$ , мм	Кодирование	Параметр $R_a$ , мкм
Низший	565	0,01	0,2	$-\sqrt{2}$	1,25
Низкий	1083	0,02	0,3	-1	0,8
Основной	1601	0,04	0,5	0	0,6
Высокий	2685	0,06	0,75	1	0,42
Высший	3768	0,08	1,0	$\sqrt{2}$	0,32

Присвоенные экспериментам номера показаны на рис. 1, а закодированная матрица приведена в табл. 1.

Эксперименты по сверхскоростному точению проводились с использованием шпиндельной головки модели WELA-61, типа MAC-75W-S-1 (Япония), которая позволяет получать любую частоту вращения шпинделя с заготовкой в интервале от 0 до 20000 об/мин.

Подача выбиралась из диапазона 2,55...1600 мм/мин. Подача на один оборот определялась из соотношения  $S_o = S_m/n$ , мм/об.

Обрабатывали заготовки из автоматной стали А12, латуни Л62 и алюминиевого сплава Д16. Для обработки использовались стандартные подрезные резцы, оснащенные твердосплавными пластинами Т15К6 и ВК8.

Экспериментальные уровни кодировались для удобства идентификации и для облегчения расчетов.

### 3. Разработка адекватной модели для параметра $R_a$ шероховатости

Параметры модели первого порядка были получены по методу наименьших квадратов с помощью уравнения (6). Результаты первого и второго блоков экспериментов дали возможность получить уравнения, описывающие модели для первого блока, а также доверительные интервалы в 99%, дающие представление о точности и надежности оценок параметра  $R_a$  шероховатости поверхности.

Путем комбинации результатов, полученных для двух блоков экспериментов, и в результате применения метода наименьших квадратов была получена следующая модель первого порядка для параметра  $R_a$  шероховатости поверхности:

$$\lg R_a = 3.89 + 0.56 \cdot \lg V + 0.01 \cdot \lg S + 0.16 \cdot \lg t \quad (8)$$

Уравнение (8), используя формулы преобразования, можно привести к следующему виду:

$$R_a = 46.8 \cdot V^{-0.56} \cdot S^{0.01} \cdot t^{0.16}, \quad (9)$$

где  $R_a$  – параметр  $R_a$  шероховатости поверхности, мкм;

$V$  – скорость резания, м/мин;  $S$  – подача, мм/об;  $t$  – глубина резания, мм.

Уравнение (9) и построенные графики зависимости  $R_a=f(V,S)$  (Рис. 2),

$Ra=f(S,t)$  (Рис.3) и  $Ra=f(V,t)$  (Рис.4) показывають, що зменшення шероховатості поверхності може бути досягнуто підвищенням швидкості різання, зворотний результат досягається при збільшенні подачі или глибини різання, при чому ефект впливу подачі являється домінуючим.

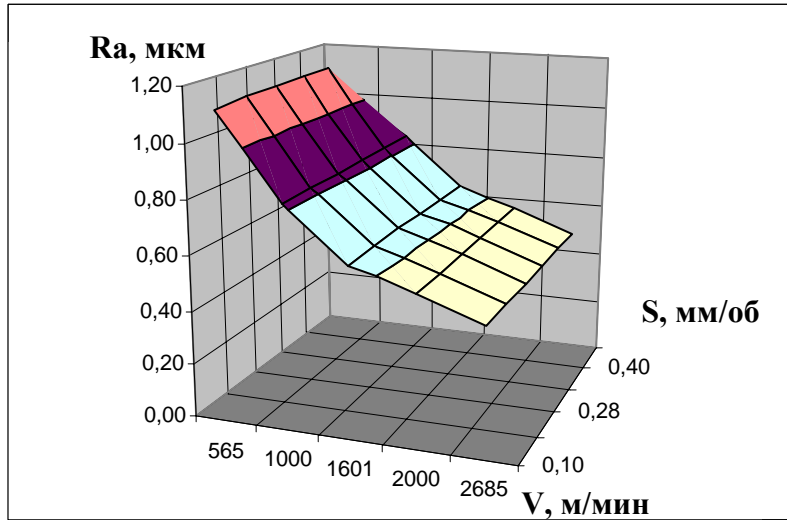


Рис. 2. Зависимость параметра шероховатости от параметров резания материала  $V$  и  $S$  при постоянной глубине резания  $t$

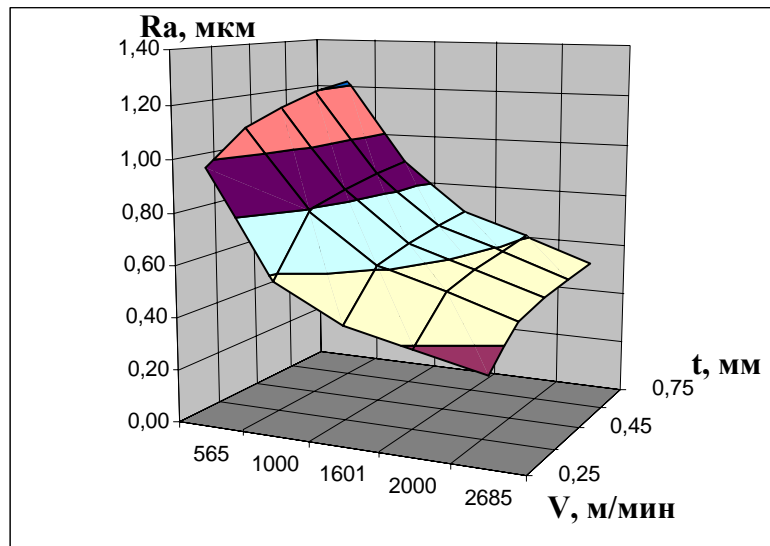


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости от параметров резания материала  $t$  и  $V$  при постоянной подаче резания  $S$

#### 4. Применение полученной модели

Полученная модель параметра шероховатости позволяет управлять заданной шероховатостью обработанной поверхности.

Задача сводится к нахождению такого сочетания скорости резания, подачи и глубины резания, которое позволит увеличить съем металла за единицу времени при сохранении заданной шероховатости обработанной поверхности.

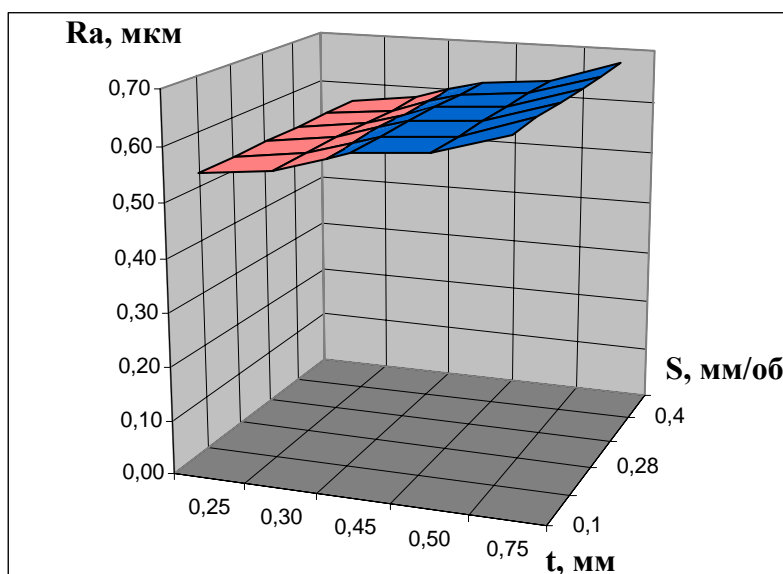


Рис. 4. Зависимость параметра шероховатости от параметров резания материала  $S$  и  $t$  при постоянной скорости резания  $V$ .

Производительность снятия слоя металла  $V$  (см<sup>3</sup>/мин) можно представить следующим уравнением:

$$V = 12 \cdot V \cdot S_M \cdot t \quad (10)$$

Уравнение (10) можно представить в логарифмическом виде

$$\ln V = \ln 12 + \ln V + \ln S_M + \ln t \quad (11)$$

Путем решения уравнение (11) определяется объем металла, снимаемого с заготовки при заданном параметре шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности.

### Выводы

Разработанная математическая модель параметра шероховатости  $Ra$  обработанной поверхности детали при сверхскоростном точении как функция скорости резания, подачи и глубины резания повышает точность процесса механической обработки металлов.

Путем прогнозирования параметра  $Ra$  шероховатости оказалось возможным выбрать параметры режима точения таким образом, чтобы обеспечить наивысшую производительность обработки при заданной шероховатости поверхности, что является перспективным направлением для исследований в области технологии точного приборостроения.

**Литература**

1. Горленко О.А., Бишутин С.Г. Методы управления процессом формирования качества поверхности при механической обработке заготовок деталей машин // Технологическое управление качеством поверхности деталей. – К.: АТМ України, 1998. – С.51-60.
2. Грубый С.В. Оптимизация режимных параметров на операциях механической обработки //Технология металлов, 2002, №11. С. 33-37.
3. Бишутин С.Г. Прогнозирование и обеспечение параметров шероховатости шлифованной поверхности на основе моделирования процессов правки круга и обработки: Диссерт. на соиск. уч.степ. канд. техн. наук. – Брянск, 1998. – 172 с.
4. Поршнева С.В. Вычислительная математика. – СПб: БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.
5. Рыжов Э.В., Горленко О.А. Математические методы в технологических исследованиях. – Киев: Наук. думка,1990. – 184с.
6. Прохоров В.Т. Планирование эксперимента: Учеб. пособие по дисциплине "Основы науч. исслед." / Моск. технол. ин-т. М, 1988. – 64 с.
7. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке: Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

Усачов П.А., Барабаш Я.В. **Математична модель параметру шорсткості  $Ra$  обробленої поверхні при надшвидкісному точінні**

У роботі розроблена математична модель параметра  $Ra$  шорсткості залежно від елементів режиму різання при надшвидкісному точінні на основі методу характеристичних поверхонь.

Usachov P., Barabash Y. **The surface roughness parameter  $Ra$  mathematical model in highspeed turning.**

In this work developed the mathematical model of parameter  $Ra$  depending of the cutting condition high-speed machining as method of characteristic surfaces.

*Надійшла до редакції  
22 червня 2006 року*