

**Високоєфективні технологічні процеси в приладобудуванні**

4. Кокаровцев В.В., Румбешта В.А., Нгуен Зунг. Аналого-цифровая система диагностики процесса металлообработки на основе виброакустики резания. / Перспективные технологии и методология подготовки производства. -К.: НТУУ "КПИ", 1997.
5. Румбешта В.А., Кокаровцев В.В. Система технического диагностирования процесса металлообработки / Прогресивна техніка і технологія машинобудування і приладобудування. Т.ІІ. -К.: НТУУ "КПИ", 1998. -С. 301-303.
6. АС. № 986615 СССР Способ контроля процесса резания // Кокаровцев В.В., Воскобийник Ю.И., и др. Оpubл. 7.09.82.
7. АС. № 1757849 СССР Способ управления обработкой материалов резанием. Кокаровцев В.В., Остафьев В.А., и др. Оpubл. 1.05.92.
8. АС. № 793723 СССР Способ контроля процесса резания / Кокаровцев В.В., Воскобийник Ю.И. и др. Оpubл. 8.09.80.
9. Кокаровцев В.В. Методы контроля и управления металлообработкой на основе виброакустического сигнала: Автореф. дис. на соискание степ. канд.техн.наук, Киев, 1994.
10. Румбешта В.А. Основные закономерности разработки системы диагностирования и управления процессом механообработки. Автореф. дис. на соискание степ. д-ра техн.наук, НТУУ "КПИ", Киев, 1994.

<p>Румбешта В.О., Кокаровцев В.В., Романов О.В. <b>Підвищення точності розмірної настройки інструменту на основі віброакустичного сигналу в умовах ГВС.</b></p> <p>В роботі розглядаються основи побудови системи розмірної настройки інструменту в умовах ГВС. Наведено обґрунтування результатів експериментів для конкретного випадку з оцінкою ефективності впровадження настройки на основі віброакустичного сигналу.</p>	<p>Rumbeshta V.A., Kokarovcev V.V, Romanov O.V. <b>The rise precision dimensional instrument adjusting based on vibro-acoustic signal in CNC condition.</b></p> <p>The article deals with base building of dimensional instrument adjusting system in CNC condition. It was given substation results of experiments for particular case with effectiveness assessment of adjusting method introduction on based on vibro-acoustic signal.</p>
--	---

Надійшла до редакції  
6 квітня 2004 року

УДК 621.793

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ НАДШВИДКІСНОМУ ФРЕЗЕРУВАННІ

*Усачов П.А., Іваненко Н.В., Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна*

*У статті розглядається новий підхід до вирішення проблеми знаходження математичної моделі шорсткості обробленої поверхні при надшвидкісному фрезеруванні.*

### Вступ

Виготовлення деталей приладів з дотриманням усіх норм по точності, якості та підвищення продуктивності виготовлення деталей в цілому є основною проблемою сьогоденного приладобудування.

Надшвидкісне фрезерування ( $v = 2000\text{м/хв}$ ,  $n = 20000\text{ об/хв}$ ) дозволяє при

обробці деталей з алюмінію, що використовуються в авіації та в автомобільному виробництві, підвищити продуктивність різання в 2-10 раз і досягти дзеркальної поверхні.

Актуальність проблеми пов'язана з тим, що дослідження характеристик процесу різання при високошвидкісному фрезеруванні дозволяє покращити техніко-економічні показники виробництва в цілому.

Однією зі складових, що впливають на якість обробленої поверхні, є шорсткість отримана в наслідок обробки матеріалу. Відома низка методів, що дозволяють прогнозувати параметр шорсткості поверхні, що є результатом механічної обробки. [1, 2]. Але не вирішеним до цього часу є питання підбору параметрів режиму фрезерування таким чином, щоб забезпечити найвищу трудомісткість обробки при заданій шорсткості поверхні, що обробляється.

Шорсткість обробленої поверхні при надшвидкісному фрезеруванні повинна враховуватися при проектуванні технологічної операції. Вплив елементів режиму швидкості різання, подачі та глибини на шорсткість обробленої поверхні достатньо широко досліджено, але дотепер немає досить надійних моделей для прогнозування параметрів шорсткості при надшвидкісному фрезеруванні в залежності від елементів режиму різання.

### **Обґрунтування моделі шорсткості моделі**

Функціональна залежність між шорсткістю поверхні і незалежними змінними, що підлягають дослідженню, може бути виражена в такий спосіб:

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

де  $v$ - швидкість різання;  $s$  – подача різання;  $t$  – глибина різання;

$r$  – шорсткість поверхні, характеризується параметром  $Ra$ , мкм.

у формі логарифмічного рівняння (1) набуває вигляду:

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

яке представляє наступну лінійну математичну модель

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

де  $a$  – дійсне значення параметра шорсткості поверхні в логарифмічному масштабі;

$x_0=1$  (фіктивна змінна);

$x_1, x_2$  і  $x_3$  – логарифмічні перетворення швидкості різання, подачі та глибини різання;

$a_0, a_1, a_2$  і  $a_3$  – параметри, що підлягають оцінці.

Рівняння (3) може бути отримане в наступному виді:

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

де  $Y$  – логарифмічне перетворення вимірюваної величини шорсткості поверхні;

$\delta$  – експериментальна похибка;

$b_0, b_1, b_2$  і  $b_3$  відповідні оцінки параметрів  $a_0, a_1, a_2$  і  $a_3$ .

Якщо виявиться недостатність моделі першого порядку для шорсткості, то рівняння (3) можна уточнити в такий спосіб:

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

Рівняння (5) можна замінити рівнянням:

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

де  $\bar{Y}$  – оцінка шорсткості поверхні в логарифмічному масштабі;

$b$  – оцінка значень  $\alpha$ .

Оцінки цих останніх параметрів можна одержати методом найменших квадратів за допомогою формули виду:

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

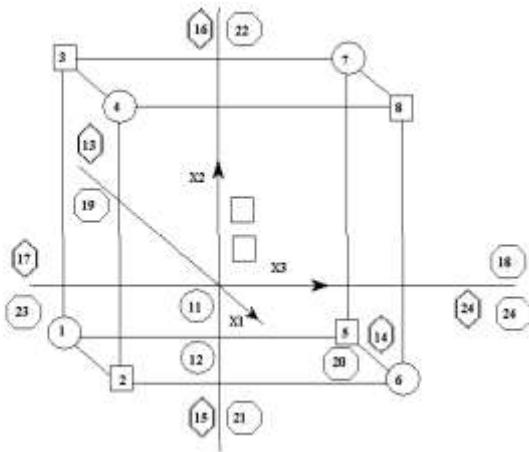
де  $b$  – матриця оцінок параметра;

$x$  – розрахункова матриця;

$x^t$  – транспозиція  $x$ ;

$y$  – матриця вимірюваних величин шорсткості в логарифмічному масштабі.

### Планування експериментів



Для розробки моделі шорсткості поверхні першого порядку планувалося провести 12 експериментів. Вісім експериментів є багатофакторним комплексом  $2^3$  і зображені у вигляді вершин куба (рис. 1). Чотири експерименти відносяться до центральної крапки куба, що повторюється чотири рази для оцінки чистої помилки.

Рисунок 1 – Багатофакторний комплекс експериментів  $2^3$

Планування експерименту передбачало три рівні для кожної незалежної змінної: закодовані “-1” для низького рівня, “0” – для основного (центрального) рівня і “+1” для високого рівня. Матриця  $X_I$  для планованого в такий спосіб експерименту може бути записана в наступному вигляді (рис. 2).

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	Експеримент №
$X_I =$	-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

Рисунок 2 – Матриця експерименту

Для розробки моделі другого порядку було проведено 12 додаткових експериментів, що утворили композиційний центральний комплекс.

### **Проведення експериментів**

Експерименти проводилися двома групами (блоками) по 6 дослідів у кожній групі. У першому блоці знаходилися експерименти 1, 4, 6, 7, 11 і 12, у другому блоці - досліді 2, 3, 5, 8, 9 і 10.

Додаткові 12 дослідів проводилися двома блоками. Перший блок включив експерименти 13, 14, 15, 16, 17 і 18, а другий – всі інші.

Заплановані 24 експерименти охопили по 5 рівнів для кожної незалежної змінної, як це показано в табл.1.

Таблиця 1 – Досліджені рівні незалежних змінних

Рівень	Швидкість різання $V$ , м/хв	Подача $S_M$ мм/хв	Глибина різання $t$ , мм	Кодування
Низький	75	160	1,0	$-\sqrt{2}$
Низький	150	250	1,5	-1
Основний	301	630	2,0	0
Високий	452	1000	2,5	1
Високий	502	1600	3,0	$\sqrt{2}$

Експерименти по надшвидкісному фрезеруванню проводилися на фрезерному верстаті моделі 675, оснащеному фрезерною голівкою.

Обробку проведено кінцевими фрезами - діаметром 8 мм. Частина фрез, що ріже, була виготовлена зі швидкорізальної сталі Р6М5. Обробляли заготовки з автоматної сталі А12, латуні Л62 і алюмінієвого сплаву Д16 без охолодження.

Експериментальні рівні кодувалися для зручності ідентифікації і для полегшення розрахунків.

Кодування велось по формулах:

$$x_1 = \frac{\text{кодування швидкості різання} \quad (\ln V - \ln 301)}{(\ln 452 - \ln 301)}, \quad (V \text{ у м/хв}) \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{\text{кодування подачі} \quad (\ln S_M - \ln 630)}{(\ln 1000 - \ln 630)}, \quad (S_M, \text{ мм/хв}) \quad (9)$$

$$x_3 = \frac{\text{кодування глибини різання} \quad (\ln t - \ln 2,0)}{(\ln 2,5 - \ln 2,0)}, \quad (t, \text{ мм}) \quad (10)$$

де для  $x_1$  – 301 м/хв – середнє значення швидкості різання;  
452 м/хв – максимальнє значення швидкості різання;  
для  $x_2$  – 630 мм/хв - середнє значення подачі;

1000 мм/хв – максимальне значення подачі;  
 для  $x_3 - 2,0$  – середнє значення глибини різання;  
 2,5 – максимальне значення глибини різання;

Всі вищевказані значення взято з експериментальних даних, приведених в табл.2., а їх визначення методом середнього квадратичного.

**Розробка адекватної моделі шорсткості поверхні**

Параметри моделі першого порядку були отримані по методу найменших квадратів за допомогою рівняння (7).

У табл. 2 приведені результати для першого і другого блоків експериментів, на підставі яких були отримані рівняння, що описують модель а також довірчі інтервали в 99%, що дають уявлення про точність і надійність оцінок шорсткості поверхні.

Таблиця 2 – Експериментальні умови

Експ. №	Шорсткість	Швидкість різання $V$ , м/хв	Подача $S_m$ мм/хв	Глибина різання $t$ , мм	Кодування		
	мкм				$x_1$	$x_2$	$x_3$
1	0,25	2	3	4	5	6	7
1	0,08	150	250	1,5	-1	-1	-1
2	0,3	452	250	1,5	1	-1	-1
3	0,15	150	1000	1,5	-1	1	-1
4	0,3	452	1000	1,5	1	1	-1
5	0,09	150	250	2,5	-1	-1	1
6	0,3	452	250	2,5	1	-1	1
7	0,09	150	1000	2,5	-1	1	1
8	0,8	452	1000	2,5	1	1	1
9	0,75	301	630	2,0	0	0	0
10	0,95	301	630	2,0	0	0	0
11	0,8	301	630	2,0	0	0	0
12	1,1	301	630	2,0	0	0	0
13	0,1	75	630	2,0	$-\sqrt{2}$	0	0
14	0,7	502	630	2,0	$\sqrt{2}$	0	0
15	1,2	301	160	2,0	0	$-\sqrt{2}$	0
16	0,9	301	1600	2,0	0	$\sqrt{2}$	0
17	0,85	301	630	1,0	0	0	$-\sqrt{2}$
18	1,15	301	630	3,0	0	0	$\sqrt{2}$
19	0,15	75	630	2,0	$-\sqrt{2}$	0	0
20	0,75	502	630	2,0	$\sqrt{2}$	0	0
21	1,3	301	160	2,0	0	$-\sqrt{2}$	0
22	0,8	301	1600	2,0	0	$\sqrt{2}$	0
23	0,85	301	630	1,0	0	0	$-\sqrt{2}$
24	0,85	301	630	3,0	0	0	$\sqrt{2}$

Шляхом комбінації результатів, отриманих для двох блоків експериментів і в результаті застосування методу найменших квадратів отримана наступна модель першого порядку для шорсткості поверхні:

$$\ln Y = 1.706 - 0.778 \ln V + 0.299S - 0.129t. \quad (11)$$

Рівняння (11), використовуючи формули перетворення (8), (9) і (10), приводиться до наступного виду:

$$R = 5.507 \cdot V^{-0.778} \cdot S^{0.299} \cdot t^{-0.129}. \quad (12)$$

де  $R$  – параметр шорсткості  $Ra$ , мкм;

$V$  – швидкість різання, м/хв;

$S_M$  – подача, мм/хв;

$t$  – глибина різання, мм.

### Застосування отриманої моделі

Підвищення продуктивності обробки при постійній шорсткості обробленої поверхні.

Задача зводиться до знаходження такого сполучення швидкості різання, подачі і глибини різання, що дозволить збільшити знімання металу за одиницю часу при збереженні заданої шорсткості обробленої поверхні.

Продуктивність зняття шару металу  $V$  (см<sup>3</sup>/хв) можна представити наступним рівнянням:

$$V = 12 \cdot V \cdot S_M \cdot t. \quad (1)$$

Рівняння (1) можна представити у вигляді

$$\ln V = \ln 12 + \ln V + \ln S_M + \ln t. \quad (2)$$

Для постійних глибини різання  $t$  і величини  $V$  з'єму металу можна представити прямими лініями в площині швидкість різання  $V$  – подача  $S$ , як це показано пунктирними лініями на рис. 3, 4. Ці графіки отримано накладанням постійних значень  $V$  (ізоліній  $V$ ) на ізолінії шорсткості обробленої поверхні в площинах швидкість різання  $V$ , подача  $S$  відповідно.

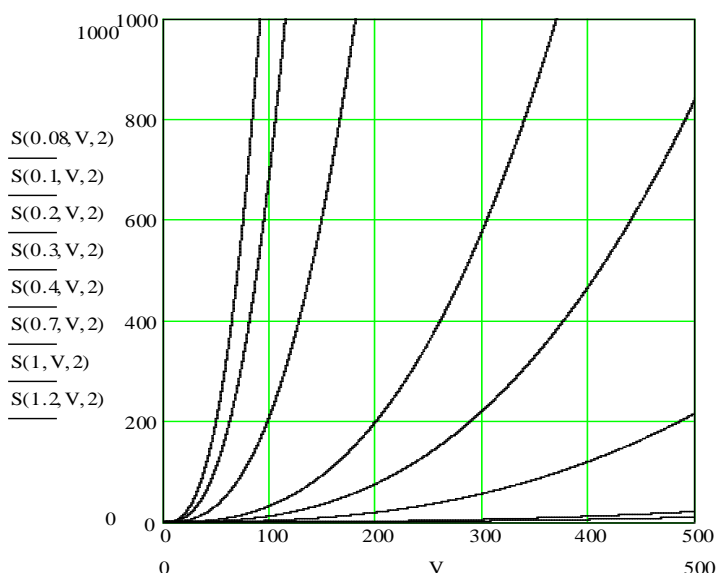
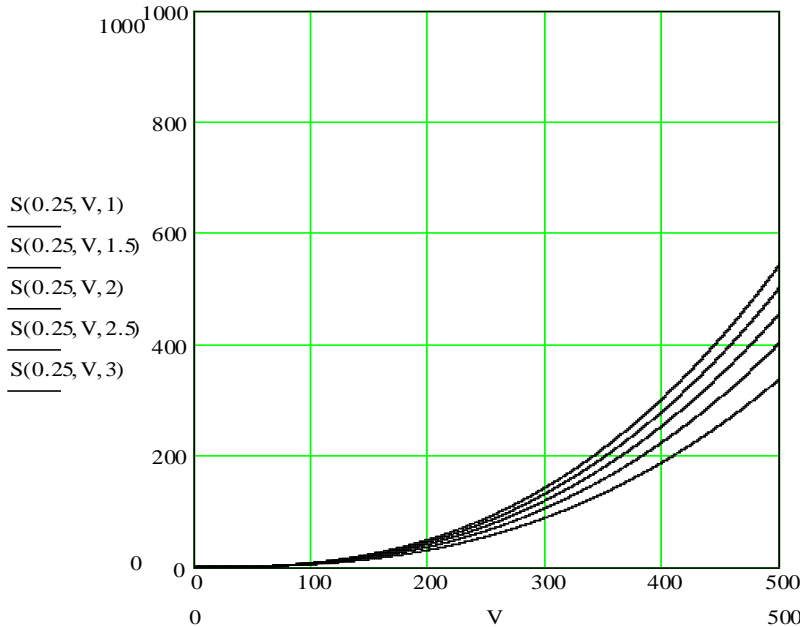


Рисунок 3 – Залежність параметра шорсткості від параметрів різання матеріалу  $V$  та  $S$  при постійній глибині різання  $t$

### Висновки

В роботі при дослідженні характеристичних поверхонь було створено математичну модель параметру  $Ra$  шорсткості обробленої поверхні при надшвидкі-

сному фрезеруванні як функція швидкості різання, подачі і глибини різання. Найбільш адекватною для параметра  $Ra$  шорсткості поверхні виявилась модель другого порядку. Показано, що підвищення швидкості різання зменшує параметр  $Ra$  шорсткості



обробленої поверхні, в той час, як збільшення подачі чи глибини різання діє в зворотному напрямку, причому вплив подачі на параметр  $Ra$  є домінуючим.

Рисунок 4 – Вплив зміни параметра різання  $t$  на шорсткість обробленої поверхні в процесі різання

Шляхом прогнозування параметра  $Ra$  шорсткості виявилось можливим побудувати графіки ізоліній параметра  $Ra$ , що дозволяють обрати параметри режиму фрезерування таким чином, щоб забезпечити найвищу трудомісткість обробки при заданій шорсткості поверхні, що обробляється.

Перспективами подальшої роботи є виведення більш складних математичних моделей шорсткості поверхонь, із врахуванням не тільки режимів різання, а й динаміки різання, для очного врахування всіх складових впливу на процес надшвидкісного фрезерування.

#### Література

1. Владимиров Е.В. Типовые математические модели и алгоритмы расчета оптимальных режимов обработки материалов резанием / Е.В.Владимиров, Г.М. Левин, А.И. Петровский и др. – М., Наука, 1985.
2. Потапов В.А., Айзеншток Г.И. Высокоскоростная обработка. – М., Наука, 1986.
3. Румшиський Л.З. Математична обробка результатів експерименту.- М.:Наука, 1971.
4. Душинський В.В. Основи наукових досліджень. – К. ІЗМН, 1998.- С.180-186.

<p>Усачов П.А., Иваненко Н.В. <b>Математическая модель шероховатости обрабатываемой поверхности при сверхскоростном фрезеровании.</b> В статье рассматривается новый подход к решению проблемы нахождения математической модели обработанной поверхности при сверхскоростном фрезеровании.</p>	<p>Usachov P.A., Ivanenko N.V. <b>Mathematical model of a roughness of a processable surface at superhigh-speed milling.</b> The article deals with the new approach to solving a problem of finding machined surface roughness mathematical model at super-high-speed milling.</p>
--	---

Надійшла до редакції  
24 березня 2004 року