УДК 621.7.02.(043.3)

В.А. Сичук, О.В. Заболотний

АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ АБРАЗИВОСТРУМЕНЕВОГО ОБРОБЛЕННЯ ПОВЕРХОНЬ КОРПУСНИХ ДЕТАЛЕЙ

В роботі проведено аналітичне обґрунтування застосування абразивоструменевого оброблення з досягненням заданої точності поверхневого шару деталі ливарного виробництва. Побудовано поверхні відгуку, що відображають зміні таких параметрів, як розмір фракції абразивного матеріалу, тиску основного потоку суміші повітря з абразивом, що поступає в сопло та тривалості оброблення. Оперуючи даними величинами можна прогнозувати якість обробленої поверхні.

Ключові слова: *шорсткість, абразивоструменеве оброблення, обробна поверхня.*

В.А. Сычук, О.В. Заболотный

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ АБРАЗИВОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ

В работе проведено аналитическое обоснование применения абразивоструйной обработки с достижением заданной точности поверхностного слоя детали литейного производства. Построено поверхности отклика, отражающие изменении таких параметров, как размер фракции абразивного материала, давления основного потока смеси воздуха с абразивом, поступающего в сопло и продолжительности обработки. Оперируя данными величинами можно прогнозировать качество обработанной поверхности.

Ключевые слова: *шероховатость, абразивоструйная обработка, обрабатываемая поверхность.*

V. Sychuk, O. Zabolotnyi

ANALYTICAL GROUND OF CAPABILITIES FOR ABRASIVE BLASTING PROCESSING OF CASE DETAILS' SURFACES

In this work it was shown analytical ground of applying abrasive blasting processing with obtaining of specified surface layer accuracy. It was built surfaces of response, reflecting the changing parameters such as a size of fractions of abrasive material, a pressure of main flow of air and abrasive mixture which enter the nozzle and duration of treatment. Operating these data values we can predict the quality of the processed surface.

Keywords: *roughness, abrasive jet processing, processed surface.*

Підвищення ефективності оброблення деталей з забезпеченням заданих характеристик є надзвичайно важливою задачею машинобудівних підприємств. Вирішення та дослідження даного питання значно підвищить продуктивність оброблення, знизить собівартість виготовлення деталей, сприятиме науковому розвитку в даній галузі народного господарства.

Оброблення корпусних деталей ливарного виробництва на даний час не повністю відповідає вимогам сучасних машинобудівних підприємств, які зазвичай використовують класичні методи оброблення, а саме дробоструменеве оброблення, що в свою чергу в теперішніх ринкових умовах не є продуктивними та економічно вигідними. Авторами статті запропоновано застосувати абразивоструменеве оброблення, як сучасний, прогресивний метод оброблення, який стає все актуальнішим в технологічних процесах оброблення різноманітних деталей.

В даній статті наведене аналітичне обґрунтування застосування абразивоструменевого оброблення взамін дробоструменевого. За основу корпусної деталі було обрано внутрішню поверхню водолічильника КВБ-10 (рис. 1). Шорсткість вищезгаданої поверхні водолічильника не повинна бути меншою за Ra10 мкм. Базовим методом дана поверхня оброблялася дрібоструменевим обробленням.

Абразивоструменева обробка внутрішньої поверхні проводиться збірним соплом нової конструкції [1, 2, 5, 6]. Тиск повітря основного потоку з абразивом береться в межах від 5 до 7 атм, час обробки від 5 до 15 секунд, середній розмір абразивних частинок береться в межах від 0,15 до 0,26 мм.

Залежність параметра шорсткості Ra від дослідних факторів: тиску повітря основного потоку P, середнього розміру фракції абразивних частинок $d_{абраз}$, часу абразивоструменевого оброблення поверхні деталі t буде мати вигляд:

$$Ra = C_R \cdot P^{\alpha_1} \cdot d_{абраз}^{\alpha_2} \cdot t^{\alpha_3}, \quad (1)$$

де $P, d_{абраз}, t$ – змінні фактори, відповідно, тиск повітря потоку, розмір фракції абразиву та час абразивоструменевого оброблення;

© В.А. Сичук, О.В. Заболотний

C_R – коефіцієнт, що враховує сумарний вплив неврахованих в рівнянні (1) факторів;

α_1, α_2, α_3 – показники степенів при змінних факторах.

Рис. 1. **Загальний вигляд водолічильника КВБ-10.**

Задача експерименту є встановлення значень коефіцієнта C_R і показників степенів α_1, α_2, α_3 при змінних факторах P, $d_{абраз}$, t.

Для цього рівняння (1) шляхом логарифмування варто привести в більш простий вигляд рівняння лінійної регресії, яке для 3-факторного експерименту матиме вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + +b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \qquad (2)$$

де $y = \lg Ra$ – логарифмічне відображення параметру Ra (відклик моделі);

x_1, x_2, x_3 – зміні фактори в закодованому вигляді, що відповідають параметрам P, $d_{абраз}$, t відповідно;

b_0, b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти регресії при змінних факторах, що являються оцінкою їх важливості;

b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} – коефіцієнти регресії, що враховують важливість взаємного впливу змінних факторів на дослідний процес.

Кодування змінних факторів x_1, x_2, x_3 в рівнянні регресії (2) здійснюється наступними залежностями:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg P - \lg P_{\max})}{\lg P_{\max} - \lg P_{\min}} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg d_{абраз} - \lg d_{абраз\max})}{\lg d_{абраз\max} - \lg d_{абраз\min}} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg t_{\max})}{\lg t_{\max} - \lg t_{\min}} + 1, \end{aligned}\right\}, \qquad (3)$$

де $P_{\max}$, $d_{абраз\max}$, $t_{\max}$ відповідають максимальним їх значенням, а $P_{\min}$, $d_{абраз\min}$, $t_{\min}$ – мінімальним значенням змінних факторів при проведенні дослідів в граничних точках області експериментування.

Після знаходження коефіцієнтів регресії b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} в рівнянні (2) здійснюємо оцінку їх важливості з виключенням з уваги незначних коефіцієнтів. Далі здійснюємо декодування за залежностями (3) змінних факторів x_1, x_2, x_3 з реальним їх виглядом як P, $d_{абраз}$, t відповідно. Перетворене рівняння регресії (2), в якому значення відклику y представляє логарифмічний вигляд параметру Ra, почленно потенціонуємо і в результаті отримаємо степеневу залежність параметру шорсткості Ra від дослідних факторів у вигляді виразу (1).

Адекватність отриманої залежності дослідному процесу оцінюємо за $F-$ критерієм Фішера [3], розрахункове значення якого повинно бути більше його табличного значення для прийнятих умовах експерименту.

Отже необхідно виконати наступні дії:

1. Спланувати експеримент, провести досліди і отримати математичну модель залежності параметру шорсткості поверхні Ra від дослідних факторів: тиску повітря основного потоку, розміру фракції абразивних частинок, часу абразивоструменевого оброблення поверхні деталі у вигляді степеневої залежності (1).

2. На основі отриманої математичної моделі розрахувати і побудувати поверхні відгуку, що є геометричним місцем точок значень параметрів режиму $P, d_{абраз}, t$, що відповідають за загальним впливом одному конкретно заданому рівню параметру Ra шорсткості поверхні, тобто що є номограмами для вибору параметрів режиму при абразивоструменевому обробленні.

Приймемо наступні граничні режими абразивоструменевого оброблення:

– тиск повітря основного потоку $P=(7...5)кгс/см^2$;

– середній розмір фракції абразивних частинок $d_{абраз}=(0{,}15...0{,}26)мм$;

– час абразивоструменевого оброблення поверхні деталі $t=(5...15)с$.

Представимо простір прийнятої області експериментування на рис. 1 у вигляді куба, побудованого на координатних осях змінних факторів P, $d_{абраз}$, t.

Згідно методики проведення експерименту [3] необхідно перенести початок координат в центр куба (на рис. 2 точка 0), далі присвоюємо новим осям значення x_1, x_2, x_3, що відповідають напрямкам векторів $P, d_{абраз}, t$ відповідно. Точка "0" нової системи координат повинна відповідати основному "нуль"-рівню. Тоді максимальне значення змінних факторів $P, d_{абраз}, t$ закодованих як x_1, x_2, x_3, будуть в новій системі координат приймати значення як "+1" або "+", а мінімальні значення як "-1" або "-". Точки вершини куба 1 ... 8, що представляють максимально-мінімальні значення змінних факторів, є граничними точками області експериментування в дослідному просторі.

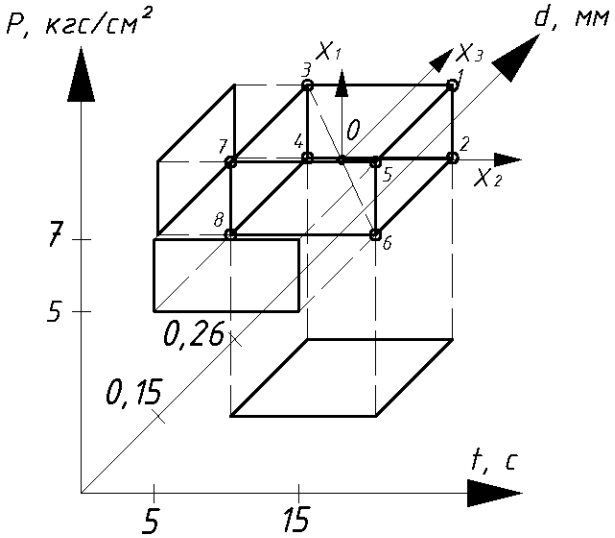

Рис. 2. **Графічна інтерпретація факторного простору з граничними точками (1...8) області експериментування.**

Зведемо в таблицю 1 числові значення рівнів варіювання і коди змінних факторів.

Згідно методики проведення повного факторного експерименту з трьома змінними факторами на двох рівнях (max-min) проведемо 8 дослідів згідно формули $N=2^3$ за [3]. Кожен дослід повинен відповідати граничній точці (1 ... 8 на рис. 2) експерименту.

Таблиця 1.

Рівні варіювання і схема кодових позначень змінних факторів

Рівень варіювання	Тиск повітря основного потоку		Час абразивоструменевого оброблення		Фракційний розмір абразиву x10^{-2}	
	P, кгс/см^2	x_1	t , с	x_2	$d_{абраз}$, мм	x_3
Верхній	7	+1	15	+1	26	+1
Основний	6	0	10	0	21	0
Нижній	5	-1	5	-1	15	-1

Побудуємо таблицю 2, в якій приведемо матрицю плану проведення експерименту, в якій рядки (1...8) відповідають проведеним дослідам, а стовпчики x_j – факторам незалежного і взаємного їх за структурою рівняння (2) впливу. Знаку (+) відповідають максимальне значення фактора в експерименті, знаку (-) – мінімальне значення. Таблиця 2 містить в собі розрахунки які розглядаються далі.

З метою підтвердження достовірності отриманого результату варто проводити не менше $k = 3$ паралельних досліди з заміром кожного разу параметра Ra_{ik} шорсткості поверхні і розраховувати його середньоарифметичного значення, тобто $\overline{Ra_i} = \frac{1}{k}\sum_{k=1}^{3} Ra_{ik}$.

Враховуючи побудову регресивного рівняння (2) в логарифмічних координатах, отриманих експериментальним шляхом значення параметра шорсткості Ra_{ik} варто представити як логарифм їх значень з символом y_{ik} , а середньоарифметичне $\overline{y_i}$.

Оцінка відтворюваності паралельних дослідів в логарифмічному виразі здійснюється за *G*-критерієм Кохерна [3], згідно якому гіпотеза відтворюваності дослідів приймається, якщо розрахункове значення G_P-критерія буде менше його табличного значення, тобто:

$$G_P \le G_T(p, N, f_i), \tag{4}$$

де p – рівень довіри до ймовірності, яка приймається в експерименті;

N – загальна кількість незалежних дисперсій, тобто дослідів;

f_i – число степенів вільності кожної з дисперсій.

Прийняті в експерименті умови: $p = 0{,}95$; $N = 8$; $f_i = k - 1 = 3 - 1 = 2$.

даних умов табличне значення Кохерна з додатка 1 [4] буде:

$$G_T(0{,}95;8;2) = 0{,}5157.$$

Розрахуємо значення G_P-критерія Кохерна за формулою [3]:

$$G_P = S^2_{i\max} / \sum_{i=1}^{N} S_i^2 , \tag{5}$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності *i*-го незалежного дослідження;

$S^2_{i\max}$ – максимальне значення дисперсії відтворюваності з усіх дослідів.

Дисперсія відтворюваності за кожним дослідом визначається як:

$$S_i^2 = \frac{1}{k-1}\sum_{k=1}^{k}(y_{ik} - \overline{y_i})^2 , \tag{6}$$

де $k = 3$– число паралельних дослідів.

Зведемо в таблицю 3 отримані шорсткості та усі розрахунки за вище наведеними формулами. Розрахунок проводився в програмному забезпеченні Excel.

Таблиця 2.

Матриця плану, результати експерименту і їх математична обробка

№ досліду	Матриця плану $N = 2^3$								$\overline{Ra_i}$	$\overline{y_i}$	$\hat{y}_i$	$(\overline{y}-\hat{y}_i)^2_i \times 10^{-4}$	$S_i^2 \times 10^{-4}$
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$					
1	+	+	+	+	+	+	+	+	6.6	0.8213	0.7912	9.0601	5.26
2	+	-	+	+	-	-	+	-	7.1	0.8509	0.9054	29.7025	4.37
3	+	+	-	+	-	+	-	-	14.3	1.1562	1.1268	8.6436	1.57
4	+	-	-	+	+	-	-	+	9.1	0.9589	1.0126	28.8369	1.57
5	+	+	+	-	+	-	-	-	8.6	0.9359	0.9126	5.4289	3.11
6	+	-	+	-	-	+	-	+	10.7	1.0278	1.0268	0.01	2.93
7	+	+	-	-	-	-	+	+	10.7	1.0293	1.0054	5.7121	0.66
8	+	-	-	+	+	+	+	-	7.8	0.8916	0.8912	0.0016	6.41
$\sum_{N=1}^{8}$	7.6719	0.2135	-0.4001	-0.0973	-0.4565	0.1219	-0.4857	0.0027	Рівняння регресії при $\Delta b_j = \pm 0{,}03816$ $y = 0.959 - 0.05x_2 - 0.0571x_1x_2 - 0.0607x_2x_3$			87.3957	25.87
$\frac{1}{N}\sum_{N=1}^{8}$	0.959	0.0267	-0.05	-0.0122	-0.0571	0.0152	-0.0607	0.00034				$S^2_{ад}$	$S^2_{\overline{y}_i}$
	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}				$21.8489 \cdot 10^{-4}$	$25.87 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 3.

Результати досліджень шорсткості поверхонь і оцінка їх відтворюваності в дослідах

№	Параметр Ra_{ik}, мкм				Логарифм параметру шорсткості Ra_{ik}				Дисперсія відтворюваності
	Ra_{i1}	Ra_{i2}	Ra_{i3}	$\overline{Ra_i}$	y_{i1}	y_{i2}	y_{i3}	$\overline{y_i}$	$S_i^2 \cdot 10^{-4}$
1	6.6	7	6.3	6.6	0.8195	0.8451	0.7993	0.8213	5.26
2	6.9	6.9	7.5	7.1	0.8388	0.8388	0.8751	0.8509	4.37
3	14	14.8	14.2	14.3	1.1461	1.1703	1.1523	1.1562	1.57
4	8.9	9.4	9	9.1	0.9494	0.9731	0.9542	0.9589	1.57
5	9	8.6	8.3	8.6	0.9542	0.9345	0.9191	0.9359	3.11
6	11	10.8	10.2	10.7	1.0414	1.0334	1.0086	1.0278	2.93
7	10.5	10.9	10.7	10.7	1.0212	1.0374	1.0294	1.0293	0.66
8	8.3	7.7	7.4	7.8	0.9191	0.8865	0.8692	0.8916	6.41
Сума дисперсій $\sum_{1}^{8} S_i^2$									25.87

З таблиці 3 слідує, що максимальне значення дисперсії складає $S^2_{i\max} = 6.41 \cdot 10^{-4}$ (дослід № 8), а сума дисперсій $\sum_1^8 S_i^2 = 25.87$.

Тоді розрахункове значення G_P-критерія Кохерна складає:

$$G_P = \frac{6.41 \cdot 10^{-4}}{25.87 \cdot 10^{-4}} = 0.2478,$$

Отже $0.2478 < 0.5157$, тобто у нашому випадку забезпечується умова $G_P \le G_T$.

Отже, гіпотеза відтворюваності дослідів в проведеному експерименті приймається і отримані результати можна використовувати для подальших розрахунків параметрів моделі.

Розрахунок коефіцієнтів регресії b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123} в рівнянні (2) здійснюється шляхом додавання за стовпчиками матриці експериментально отриманих значень $\overline{y_i}$ з врахуванням знаку (± 1) при змінних x_{ji} відповідного стовпчика за наступними залежностями:

$$\left.\begin{aligned} b_o &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\overline{y_i}; \\ b_j &= \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_{ji}\overline{y_i}, \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

де $N = 8$ – число незалежних дослідів експерименту.

Наведемо приклад розрахунку коефіцієнта b_o:

$$b_o = \frac{1}{8}(0.8213 + 0.8509 + 1.1562 + 0.9589 + 0.9359 + 1.0278 + 1.0293 + 0.8916) = \frac{7.6721}{8} = 0.959$$

Зведемо результати в таблицю 2.

Оцінимо значимість коефіцієнтів регресії за допомогою *t*-критерію Ст'юдента. Коефіцієнт регресії b_j, статично значимий, якщо виконується умова [3]:

$$b_j \ge \pm t_{T(p, f_{\bar{y}})} S_{b_j}, \qquad (8)$$

де $t_{T(p, f_{\bar{y}})}$ – табличне значення критерію Ст'юдента;

S_{b_j} – середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії.

При рівні довіри ймовірності $p = 0{,}95$ і числу ступенів вільності дисперсії адекватності $f_{\bar{y}} = N(k-1) = 8(3-1) = 16$ табличне значення критерію Ст'юдента складе за додатком 2 [4] $t_{T(p, f_{\bar{y}})} = 2{,}12$.

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії визначимо з підкореневого виразу:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{S^2_{\overline{y_i}}}{N}}, \qquad (9)$$

де $S^2_{\overline{y_i}}$ – оцінка середнього значення дисперсії відтворюваності дослідів, тобто:

$$S^2_{\overline{y_i}} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} S_i^2, \qquad (10)$$

де S_i^2 – дисперсія відтворюваності паралельних дослідів.

Отже, середнє значення дисперсії відтворюваності паралельних дослідів в експерименті склало:

$$S^2_{\bar{y}_i} = \frac{1}{8}(5.26+4.37+1.57+1.57+3.11+2.93+0.66+6.41)\times 10^{-4} = 25.87\cdot 10^{-4}.$$

Середньоквадратичне відхилення коефіцієнтів регресії в нашому випадку буде:

$$S_{b_j} = \sqrt{\frac{25.87\cdot 10^{-4}}{8}} = 1.8\cdot 10^{-2}.$$

Статично значимі коефіцієнти регресії повинні задовольняти вимозі:

$$b_j \geq \pm 2.12\cdot 1.8\cdot 10^{-2} = \pm 0{,}03816.$$

Аналізуючи дані в таблиці 2, даному значенню інтервалу задовольняють 4 коефіцієнти:

$$b_0 = 0{,}959;\ b_2 = -0{,}05;\ b_{12} = -0{,}0571;\ b_{23} = -0{,}0607.$$

Вплив інших коефіцієнтів: b_1, b_3, b_{13}, b_{123}, а відповідно, і взаємний вплив факторів x_1, x_3, x_1x_3, $x_1x_2x_3$ на шорсткість поверхні при абразивоструменевому обробленні деталей ливарного виробництва є незначним і виключаються з рівняння регресії (2).

З врахуванням оцінки значимості коефіцієнтів рівняння регресії (2) набуде вигляду:

$$y = b_0 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3,$$

Звідси,

$$y = 0.959 - 0.05x_2 - 0.0571x_1x_2 - 0.0607x_2x_3. \quad (11)$$

Перевірка адекватності отриманої залежності (11) експериментально отриманими даними про шорсткість поверхні при абразивоструменевому обробленню деталей ливарного виробництва здійснюється за *F*-критерієм Фішера, розрахункове значення якого повинно бути більше або рівне його табличного значення при прийнятих умовах експерименту, тобто:

$$F_P \geq F_T(p;\ f_{ад};\ f_{\bar{y}}), \quad (12)$$

Згідно прийнятих в експерименті відомих $p = 0{,}95$, $f_{\bar{y}} = 16$ і новій умові - числу степенів вільності дисперсії адекватності, що визначається, як $f_{ад} = N-(k+1) = 8-(3+1) = 4$, табличне значення критерію Фішера складає $F_{T(0.95;4;16)} = 3{,}01$ за додатком 3 [4].

Розрахункове значення критерію Фішера визначається з порівняння оцінок дисперсії [3]:

$$F_P = \frac{S^2_{ад}}{S^2_{\bar{y}}}, \quad (13)$$

де $S^2_{ад}$ – дисперсія адекватності;

$S^2_{\bar{y}}$ – середнє значення дисперсії відтворюваності дослідів.

Дисперсію адекватності розрахуємо за формулою:

$$S^2_{ад} = \frac{1}{f_{ад}}\sum_{i=1}^{N}(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2, \quad (14)$$

де $\bar{y}_i$ – експериментально отримане середньоарифметичне значення параметра шорсткості поверхні в *i*-му незалежному досліді;

$\hat{y}_i$ – розраховане за рівнянням (11) значення параметра шорсткості в цьому досліді;

$f_{ад} = N-(k+1)$ – число степенів вільності дисперсії адекватності.

Розрахункові значення відкликів моделі $\hat{y}_i$ визначаються сумуванням в рядках всіх визначальних коефіцієнтів b_j з врахуванням знаку (± 1) при змінних факторах x_{ji}, що обумовлюють режим проведення досліду.

Результати розрахунку відкликів $\widehat{y}_i$ і їх нев'язок з експериментальними даними $(\overline{y}_i - \widehat{y}_i)$ наведемо в таблицю 4.

Таблиця 4.

Розрахункові значення відкликів моделі і їх нев'язок з експериментальними даними

№ досліду	Перетворені коефіцієнти $b_{ij}x_j$				Розрахункове значення відклику $\widehat{y}_i$	Експериментальне значення $\overline{y}_i$	Нев'язка досліду $(\overline{y}_i - \widehat{y}_i)^2 \times 10^{-4}$
	b_0	b_2x_2	$b_{12}x_1x_2$	$b_{23}x_2x_3$			
1	0.959	-0.05	-0.0571	-0.0607	0.7912	0.8213	9.0601
2	0.959	-0.05	0.0571	-0.0607	0.9054	0.8509	29.7025
3	0.959	0.05	0.0571	0.0607	1.1268	1.1562	8.6436
4	0.959	0.05	-0.0571	0.0607	1.0126	0.9589	28.8369
5	0.959	-0.05	-0.0571	0.0607	0.9126	0.9359	5.4289
6	0.959	-0.05	0.0571	0.0607	1.0268	1.0278	0.01
7	0.959	0.05	0.0571	-0.0607	1.0054	1.0293	5.7121
8	0.959	0.05	-0.0571	-0.0607	0.8912	0.8916	0.0016
Сума нев'язок $\sum_{i=1}^{8}(\overline{y}_i - \widehat{y}_i)^2$							87.3957

Дисперсія адекватності математичної моделі буде:

$$S_{ад}^2 = \frac{87.3957 \cdot 10^{-4}}{4} = 21.8489 \cdot 10^{-4},$$

Розрахункове значення *F*-критерію Фішера в нашому випадку буде:

$$F_P = \frac{21.8489 \cdot 10^{-4}}{25.87 \cdot 10^{-4}} = 0.8446, \tag{13}$$

Дана умова задовольняє вимогам оскільки $F_P \le 1$, і може бути основою для прийняття моделі (11) в якості робочої при описі залежності параметру шорсткості *Ra* при абразивоструменевому обробленні деталей ливарного виробництва в дослідному факторному просторі.

Значення змінних факторів x_1, x_2, x_3 в рівнянні (11) знаходиться в закодованому вигляді.

Підставимо в вираз (3) для x_1, x_2, x_3 максимальне і мінімальне значення відповідних їм параметрів P, $d_{абраз}$, t (згідно таблиці 1), отримаємо наступні вирази для x_1, x_2, x_3 в декодованому вигляді:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= \frac{2(\lg P - \lg 7)}{\lg 7 - \lg 5} + 1; \\ x_2 &= \frac{2(\lg d_{абраз} - \lg 26)}{\lg 26 - \lg 15} + 1; \\ x_3 &= \frac{2(\lg t - \lg 15)}{\lg 15 - \lg 5} + 1, \end{aligned}\right\},$$

Після перетворення (15) отримаємо:

$$\left.\begin{aligned} x_1 &= 13.69 \lg P - 10.57; \\ x_2 &= 8.37 \lg d_{абраз} - 10.84; \\ x_3 &= 4.19 \lg t - 3.93, \end{aligned}\right\}, \tag{15}$$

Підставимо отримані значення x_1, x_2, x_3 в (11), отримаємо:

$$y = 0.959 - 0.05 \cdot (8.37 \lg d_{абраз} - 10.84) - 0.0571 \times (13.69 \lg P - 10.57) \times$$
$$(8.37 \lg d_{абраз} - 10.84) - 0.0607 \times (8.37 \lg d_{абраз} - 10.84) \cdot (4.19 \lg t - 3.93).$$

Провівши перетворення даного рівняння отримаємо:

$$y = -7.6274 + 8.4736 \lg P + 2.7566 \lg t + \\ + 6.6299 \lg d_{абраз} (1 - 0.9868 \lg P - 0.321 \lg t), \quad (16)$$

де $y = \lg Ra$ – логарифмічний вираз параметру *Ra* шорсткості поверхні.

Після потенціювання рівняння (16) отримаємо залежність параметру *Ra* шорсткості поверхні при абразивоструменевому обробленні деталей ливарного виробництва у вигляді степеневої функції:

$$Ra = 2.358 \cdot 10^{-8} \cdot d_{абраз}^{6.6299(1-0.9868 \lg P - 0.321 \lg t)} \cdot P^{8.4736} \cdot t^{2.7566}, \quad (17)$$

де $d_{абраз}$ – розмір фракції абразиву;

P – тиск повітря основного потоку;

t – час абразивоструменевого оброблення.

За виведеною формулою побудовано поверхні відгуку, які зображено на рис. 3. та рис. 4.

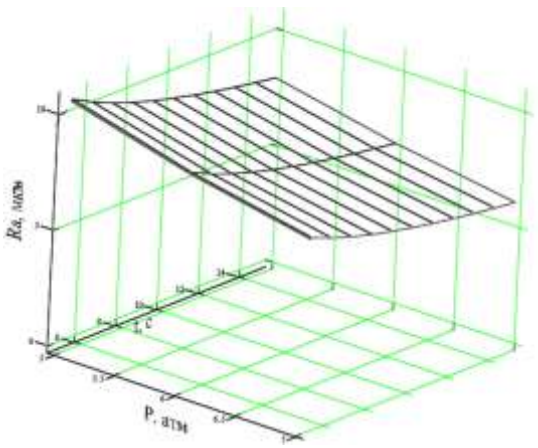

Рис. 3. **Поверхня відгуку при абразивоструменевому обробленні абразивом з середнім розміром фракційного складу** $d_{абраз} = 0{,}26 мм$

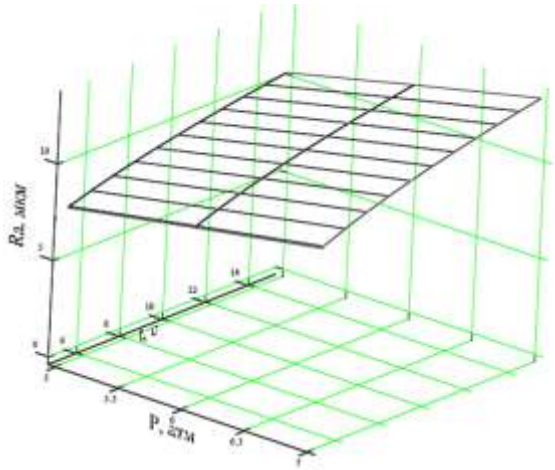

Рис. 4. **Поверхня відгуку при абразивоструменевому обробленні абразивом з середнім розміром фракційного складу** $d_{абраз} = 0{,}15 мм$

Виконаємо перевірку математичної за основним максимальним рівнем факторів, тобто:
- $d_{абраз}$ = 26 х 10^{-2} мм;
- P = 7 кгс/см^2;
- t = 15 с.

Підставимо в (17) :

$$Ra = 2.358 \cdot 10^{-8} \cdot 26^{6.6299(1-0.9868 \lg 7 - 0.321 \lg 15)} \times 7^{8.4736} \cdot 15^{2.7566} \approx 6.3 мкм$$

Експериментальне значення було $\overline{Ra_{\max}} = 6.6 мкм$.

Отже, відносна похибка результатів розрахункового значення та експериментального складає $\xi = 4.54\%$, що знаходиться в межах рівня довіри ймовірності.

Поверхні відгуку (рис. 3, рис. 4) описують зміни шорсткості внутрішніх поверхонь деталей ливарного виробництва на прикладі корпусу водолічильника КВБ-10. Під час абразивоструменевого оброблення при зміні таких параметрів, як розмір фракції абразивного матеріалу, тиску основного потоку суміші повітря з абразивом, що поступає в сопло та тривалості оброблення можна забезпечувати отримання необхідної шорсткості поверхні деталей.

Висновок: доведено можливість використання абразивоструменевого оброблення замість дрібоструменевого для обробки деталей ливарного виробництва для досягнення необхідної точності стану поверхні з підвищенням продуктивності за часовим фактором.

Список використаних джерел:

1. Сичук В.А. Виготовлення та випробування нової конструкції збірного сопла абразивоструменевої машини / В.А. Сичук, О.В. Заболотний // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Випуск 50. – Луцьк: РВВ ЛНТУ, 2015р. – С. 208-212.
2. Victor Sychuk. Functional simulation and manufacturing of porous elements of new design nozzle for sandblasting machines / Oleg Zabolotnyi, Victor Sychuk / Сборник трудов международной конференции «Научные принципы и подходы, методы и технологии, системный анализ и статическая обработка данных о создании, диагностике, модернизации композитных материалов и покрытий с нанодобавками, работающих в условиях динамического и высокоэнергетического нагружения». 26-27 сентября 2013, Москва, РФ. – М.: НИИ радиоэлектроники и лазерной техники МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2013г. – с. 27-38.
3. Адлер Ю.Р. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.Р. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М. : Машиностроение, 1976. – 279 с.
4. Построение номограмм режимов ленточного шлифования на основе математического планирования эксперимента: метод. указ. / сост. Б.Н. Хватов. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. университета, 2007. – 32 с.
5. Сичук В.А. Металографічний аналіз та обробка зображень мікроструктури сопел для піскоструменевої обробки, які виготовляються методами порошкової металургії / О.Ю. Повстяной, В.А. Сичук, А. Макмиллан, В.Д. Рудь, О.В. Заболотний // "Порошковая металлургия" Международный научно-технический журнал. Выпуск 3,4 (502) (март/апрель 2015) – Киев: Институт проблем материаловедения, 2015г. – С. 136-143.
6. Victor Sychuk. Developing new design and investigating porous nozzles for abrasive jet machine / V. Sychuk, O. Zabolotnyi, A. McMillan // "Порошковая металлургия" Международный научно-технический журнал. Выпуск 9,10 (499) (сентябрь/октябрь 2014) – Киев: Институт проблем материаловедения, 2014г. – С. 136-142.

Стаття надійшла до редакції 10.05.2017

© В.А. Сичук, О.В. Заболотний