

УДК 621.9.048

А.С. Зуев, аспирант,

И.М. Левинская, аспирант,

С.Н. Ясунник, доцент, канд. техн. наук

Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля

кв. Молодежный, 20-а, г. Луганск, Украина, 91034

tm@snu.edu.ua

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ОБРАБОТКУ ДЕТАЛЕЙ ПСЕВДООЖИЖЕННЫМ СЛОЕМ АБРАЗИВА

В статье получены частные математические модели эффективности обработки деталей псевдоожигенным слоем абразива на основании плана Вох-Бейнке, учитывающие основные технологические параметры процесса.

Ключевые слова: обработка, псевдоожигенный слой абразива, многофакторный эксперимент.

На всех этапах развития современного машиностроения одной из наиболее важных задач является необходимость улучшения качества выпускаемых изделий, что в значительной степени определяется эффективностью проведения отделочно-зачистных операций, трудоемкость которых в различных отраслях промышленности составляет от 10...20 % до 40...70 % общей трудоемкости изготовления деталей и имеет тенденцию к возрастанию [1].

При отделочно-зачистной обработке сложнопрофильных деталей использование традиционных способов обработки практически невозможно из-за затрудненного доступа инструмента к обрабатываемой поверхности. Поэтому особенно широкое распространение для этих целей получили методы обработки деталей в свободных абразивах, так как они позволяют во многих случаях механизировать обработку и повысить качественные показатели рабочих поверхностей, а также исключить или свести к минимуму непроизводительный ручной труд. Одним из них является – обработка деталей псевдоожигенным слоем абразива.

Метод обработки деталей псевдоожигенным абразивом заключается в том, что обрабатываемая деталь помещается в созданный абразивный «кипящий» слой, и в зависимости от ее формы ей задаются различные виды движений (вращательное, планетарное и др.) с высокой скоростью ($v_{ок} \geq 15-20$ м/с). Таким образом, в результате большого числа соударений частиц с поверхностью вращающейся детали происходит интенсивный съем металла и формообразование нового микрорельефа поверхности [1-3].

Как показал анализ, технология обработки деталей псевдоожигенным слоем абразива определяется многими технологическими факторами [1-3] и к наиболее значимым относятся окружная скорость деталей, время обработки, давление воздуха, подающегося в рабочую камеру, а также зернистость абразива.

Для установления функциональной связи технологических факторов с параметром оптимизации для исследования многофакторной системы широкое распространение приобрели математические методы планирования и анализа эксперимента [4].

Как известно, методика многофакторного планирования позволяет количественно оценить влияние как отдельного фактора, так и взаимодействия факторов на параметр оптимизации, а также сократить объем экспериментальных работ и повысить достоверность результатов исследований на основе математического аппарата регрессионного анализа и статистических методов оценки адекватности полученных моделей.

Целью исследования является нахождение аналитических решений задачи моделирования процесса обработки деталей псевдоожигенным слоем абразива.

В качестве параметра оптимизации при исследовании был принят удельный съем металла q (мг/см²). В качестве образцов исследования использовались стальные образцы, выполненные в виде цилиндров, полученные точением фасонным резцом. Наружный диаметр цилиндров $D=76$ мм, высота $h_k=30$ мм, площадь обрабатываемой наружной поверхности $S_H=71,59$ см², исходная шероховатость поверхности $Ra=4,0 \pm 0,05$ мкм.

Для исключения влияния случайных факторов для экспериментов была отобрана партия образцов, изготовленных из металла одной поставки при одинаковых режимах механической обработки.

Массовый съем металла в каждом опыте определяли взвешиванием образцов до и после обработки. Таким образом, среднюю величину съема металла получали как среднее значение пяти измерений. Образцы при обработке устанавливались на оправке с базированием по внутренней и торцевым поверхностям.

Выбор области определения факторов. Основные уровни и интервалы варьирования технологических факторов были определены на основании предварительных однофакторных экспериментов и результатов теоретических исследований, выполненных ранее [3].

Для упрощения записи значения факторов кодируем путем линейного преобразования координат факторного пространства с переносом начала координат в нулевую точку и выбором масштабов по осям в единицах интервалов варьирования факторов. Используем соотношение

$$x_i = \frac{C_i - C_{0i}}{\Delta C}, (i = 1 \dots 4),$$

где x_i – кодирование значение фактора (безразмерная величина); C_i , C_{0i} – натуральные значения фактора (соответственно текущее значение и на нулевом уровне); ΔC – натуральное значение интервала варьирования факторов.

Интервал варьирования определяем как

$$\Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2}.$$

Факторы в натуральном и кодовом виде, а также уровни и интервалы варьирования представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Уровни и интервалы варьирования технологических факторов

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Интервал варьирования факторов	Уровни факторов		
			-1	0	+1
Окр. скорость движения детали V_d , м/с	x_1	6	10	16	22
Время обработки t , мин	x_2	2	2	4	6
Зернистость абразива d_z , мкм	x_3	250	350	600	850
Давление воздуха p , МПа	x_4	0,1	0,2	0,3	0,4

В рассматриваемом процессе аналитическое выражение функции отклика, являющееся критерием оптимизации, неизвестна, поэтому ее зависимость от различных факторов может быть аппроксимирована линейной функцией вида

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i,l=1}^m b_{il} x_i x_l + \sum_{i=1}^m b_{ii} x_i^2. \quad (1)$$

Для нахождения соответствующей аналитической зависимости выбран план Вох-Бехнкен [4]. Преимущество этого плана перед другими центральными планами, которые соответствуют квадратичной модели, заключается в том, что для его реализации требуется только три уровня каждого фактора. Вох-Бехнкен план является ротатабельным, что обеспечивает одинаковую точность прогнозируемых величин параметра оптимизации во всех направлениях на одинаковых расстояниях от центра плана, как показано (на примере трехфакторного плана) на рисунке 1.

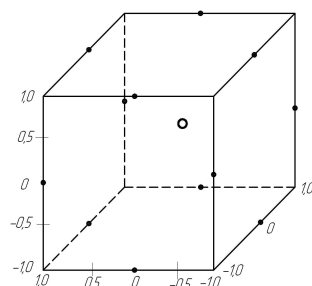


Рисунок 1 – Графическая модель Вох-Бехнкен плана

Для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, постановка опытов, запланированных матрицей, производилась в случайной последовательности. Для этого использовали таблицу случайных чисел. Опыты также были рандомизированы во времени.

Обработка результатов эксперимента. При реализации плана Вох-Бехнкен каждый из 27 опытов пять раз дублировался.

Дисперсия опытов S_j^2 определялась по выражению

$$S_j^2 = \frac{\sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2}{n-1}, \quad (j=1 \dots 27, u=1 \dots 5),$$

где y_{ju} – значение параметра оптимизации (съемка металла) в u -м опыте; $\bar{y}_j$ – среднее арифметическое значение параметра оптимизации; n – число дублирующих опытов.

Ошибка опыта определялась по формуле $S_j = \sqrt{S_j^2}$.

Отсевание сомнительных результатов проводилось по критерию Стьюдента:

$$t_p = \frac{y_{ju} - \bar{y}_j}{S_j},$$

где t_p – критерий Стьюдента, y_{ju} – сомнительный результат в u -том опыте.

Расчетное значение t_p сравнивалось с табличным $t_T = 2,776$ [4] для числа степеней свободы опытов $f_0 = n - 1 = 5 - 1 = 4$.

Дисперсия опытов проверялась также на соответствие однородности по критерию Кохрена, который представляет собой отношение максимальной дисперсии к сумме дисперсий всех опытов N ядра плана.

$$G_p = \frac{S_{j\max}^2}{\sum_{j=1}^N S_j^2} = 0,511.$$

Гипотеза однородности дисперсий подтверждается, так как $G_T = 0,1377$ [4] при 5%-ном уровне значимости для $N = 30$.

Дисперсия S_y^2 параметра оптимизации при равном числе дублирующих опытов вычислялась по формуле:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N S_j^2}{N}.$$

Ортогонализация матрицы планирования обеспечивается преобразованием ее квадратичных членов

$$x_{ij}'^2 = x_{ij}^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 = x_{ij}^2 - \bar{x}_{ij}^2. \quad (2)$$

Тогда соблюдается условие $\sum_{j=1}^N x_0 x_{ij}' = 0$.

С учетом (2) уравнение (1) примет вид

$$\hat{y} = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i x_i + \sum_{i,l=1}^m b_{il} x_i x_l + \sum_{i=1}^m b_{ii} (x_i^2 - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij}^2), \quad (3)$$

где $\hat{y}$ – расчетное значение параметра оптимизации, m – число факторов; b_0 , b_i , b_{il} , b_{ii} – коэффициенты регрессии; x_i , x_j – кодовое значение факторов.

В связи с принятыми преобразованиями величину коэффициента b_0 в уравнении регрессии определяли по формуле

$$b_0 = b_0' - \sum_{i=1}^m b_{ii} \bar{x}_i^2 = b_0' - b_{11} \bar{x}_1^2 - b_{22} \bar{x}_2^2 - \dots - b_{mm} \bar{x}_m^2,$$

$$\text{где } b_0' = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad \bar{x}_{ii}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N x_i'^2}{N}.$$

Остальные коэффициенты регрессии определялись независимо друг от друга следующим образом:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (4)$$

где i, l – номера факторов; j – номер опыта в матрице планирования; x_{ij}, x_{lj} – кодовое значение факторов x_i и x_l в j -м опыте; y_j – значение параметра оптимизации в j -м опыте; N – число опытов.

Проверка значимости коэффициентов проводилась путем сравнения абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом Δb_i :

$$\Delta b_i = \pm t_p S_{b_i}, \quad (5)$$

где S_{b_i} – квадратичные ошибки в определении коэффициентов b_i , t_p – критерий Стьюдента.

Для b_0 дисперсию оценивали следующим образом:

$$S_{b_0}^2 = S_{b_0}^2 + \overline{x_1^2} S_{b_{ii}}^2 + \overline{x_2^2} S_{b_{ii}}^2 + \dots + \overline{x_m^2} S_{b_{ii}}^2. \quad (6)$$

Для остальных коэффициентов модели дисперсии $S_{b_i}^2$ находили по формулам

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (7)$$

где S_y^2 – дисперсия воспроизводимости.

Учитывая, что дисперсии ошибок опытов S_j^2 являются однородными, а опыты дублируются равномерно, то дисперсию воспроизводимости S_y^2 определяли следующим образом [4]:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \overline{y_j})^2}{\sum_{j=1}^N (n-1)}, \quad (8)$$

где n – число наблюдений в отдельном опыте.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2

Таблица 2 – Расчет коэффициентов модели

Таблица 2 Расчет коэффициентов модели															
	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_4^2	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4
b_i	2,93	1,30	0,60	1,97	0,29	-0,19	0,48	1,74	-0,19	0,25	0,36	-0,41	0,36	-0,04	0,11
Δb_i	0,369	0,267				0,358				0,463					

Сравнения абсолютной величины коэффициентов регрессии и соответствующих доверительных интервалов показали, что коэффициенты $x_1^2, x_4^2, x_1 x_2, x_1 x_3, x_1 x_4, x_2 x_3, x_2 x_4, x_3 x_4$ статистически незначимы, и их можно исключить из уравнения регрессии. Это приведет к изменению оценки коэффициента b_0 модели. После перерасчета окончательный вид модели примет вид:

$$\hat{y} = 2.839 + 1.304x_1 + 0.602x_2 + 1.697x_3 + 0.292x_4 - 0.475x_2^2 + 1.744x_3^2. \quad (9)$$

Адекватность математической модели (9) проверялась с помощью критерия Фишера (F-критерия):

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2},$$

где F_p – расчетное значение критерия Фишера; S_{ad} – дисперсия адекватности модели.

Дисперсию адекватности определяли по выражению

$$S_{ad}^2 = \frac{S_R - S_E}{f_{ad}}, \quad S_R = \sum_{j=1}^{27} (y_{\varepsilon} - y_p)^2, \quad S_E = \sum_{j=1}^N \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \overline{y_j})^2,$$

где S_R – сумма квадратов отклонений расчетных y от экспериментальных во всех точках плана; S_E – сумма квадратов отклонений, связанная с дисперсией воспроизводимости; f_{ad} – число степеней свободы для дисперсии адекватности.

Число степеней свободы для дисперсии адекватности находили по выражению

$$f_{ad} = N - \lambda - (n_0 - 1), \quad (11)$$

где N – число опытов; λ – число статистически значимых коэффициентов уравнения.

Табличное значение критерия Фишера при 5%-ном уровне значимости $F_T = 4.74$ [4], а расчетное $F_p = 3.6$. Сравнение показывает, что $F_p < F_T$, следовательно, полученная теоретическая модель (9) адекватна.

Для практического использования удобнее преобразовать модель (9) путем перехода от кодовых переменных к натуральным.

$$q = 2.839 + 1.304V_d + 0.602t + 1.697d_s + 0.292p - 0.475t^2 + 1.744d_s^2. \quad (10)$$

В результате проведенных исследований получено аналитическое решение задачи моделирования процесса обработки деталей псевдооживленным слоем абразива. Установленная полиномиальная зависимость позволяет рассчитывать величину параметра оптимизации (удельный массовый съем металла) в исследованной области варьирования технологических факторов при их произвольном сочетании. Анализ уравнения регрессии (10) показывает, что съем металла определяется главным образом зернистостью применяемого абразива и окружной скоростью вращения детали. Полученные результаты позволяют прогнозировать величину удельного съема металла с учетом основных технологических режимов обработки.

Бibliографический список использованной литературы

1. Мозговой В.Ф. Технология и оборудование для финишно-упрочняющей обработки деталей ГТД свободным абразивом / В.Ф. Мозговой, А.И. Попенко, А.Я. Качан // Технологические системы. — 2001. — № 3. — С. 25–29.
2. Massarsky M. Turbo-abrasive machining and finishing / Michael Massarsky, David A. Davidson // Metal Finishing. — July 1997. — Vol. 95. — Issue 7. — P. 29.
3. Зуев А.С. К вопросу турбоабразивной обработки деталей / А.С. Зуев, И.М. Левинская, Л.М. Лубенская // Автоматизация виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: Український міжвідом. наук.-техн. зб. — Львов, 2011. — № 45. — С. 302–308.
4. Сытник В.Ф. Основы научных исследований / В.Ф. Сытник. — К.: Вища школа, 1988. — 279 с.

Поступила в редакцию 01.03.2012 г.

Зуєв О.С., Левинська І.М., Ясунік С.М. Вплив технологічних параметрів на обробку деталей псевдооживленим шаром абразиву

У статті отримані частні математичні моделі ефективності обробки деталей псевдооживленим шаром абразиву на підставі плану Вох-Behnken, що враховують основні технологічні параметри процесу.

Ключові слова: обробка, псевдооживлений шар абразиву, багатофакторний експеримент.

Zuev A.S., Levinskaya I.M., Yasunik S.N. Influence of technological parameters on treatment of details the pseudofluidized layer of abrasive

The private mathematical models of efficiency of details treatment by pseudofluidized layer of abrasive, based on Box-Behnken and taking into account the basic technological parameters of process, are obtained in the article.

Keywords: treatment, pseudofluidized layer of abrasive, multivariable experiment.