

УДК 656.13

Быков В.В.

АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», г. Горловка

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ ТОРМОЗНЫХ ДИСКОВ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Приведены результаты экспериментального исследования процесса резания при восстановлении тормозных дисков транспортных средств категории М1. Произведён поиск условий при помощи рототабельного планирования эксперимента второго порядка, обеспечивающих оптимальную шероховатость.

Введение

Наиболее часто встречающимися дефектами тормозных дисков транспортных машин являются биение и неравномерный износ рабочих поверхностей. Устраняются эти дефекты заменой или восстановлением тормозных дисков. Восстановление рабочих поверхностей тормозных дисков является актуальным и его рекомендуют ведущие мировые автопроизводители. Для восстановления рабочих поверхностей применяется малогабаритное токарное оборудование. Оно позволяет производить проточку рабочих поверхностей тормозных дисков одновременно с обеих сторон непосредственно на автомобиле [1].

Целью данного исследования является оптимизация влияния режимов резания на шероховатость рабочей поверхности и параметров процесса резания при проточке тормозных дисков транспортных средств категории М1.

Применение рототабельного планирования второго порядка для оптимизации параметров процесса резания

Эксплуатационные свойства элементов тормозной системы автомобиля во многом определяются качеством поверхностного слоя. Требования к качеству поверхностного слоя устанавливаются конструкторской документацией и техническими условиями автомобиля. Для надежного и безопасного функционирования транспортных машин необходимо повысить эффективность тормозной системы. Этого можно достичь, если в процессе эксплуатации техническое состояние рабочей тормозной системы поддерживать на уровне требований нормативных документов, которые устанавливают требования к техническому состоянию транспортного средства по условиям безопасности. Одним из вариантов поддержания тормозной системы на уровне требований безопасности является восстановление рабочих поверхностей тормозных дисков при каждой замене тормозных колодок [1].

Проточка тормозных дисков транспортных машин категории М1 производится на малогабаритных токарных станках. Выбор рациональных режимов резания влияет на производительность процесса и качество обработанной поверхности. Исследования проводились в АДИ ГВУЗ «ДонНТУ» на кафедре ТЭА с использованием лабораторного оборудования для проточки тормозных дисков непосредственно на автомобиле. В качестве режущего инструмента использовались неперетачиваемые твердосплавные пластинки ВК 6 [3]. Проточке подвергались тормозные диски автомобилей категории М-1 из серого чугуна. На первом этапе исследования был поставлен полный факторный эксперимент типа 2^3 . Уровни факторов и интервалы варьирования выбраны по результатам предварительных поисковых экспериментов [2, 4]. Уровни и интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1. Матрица плана эксперимента и результаты измерений высоты неровностей представлены в табл. 2.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы	Уровни			Интервалы варьирования
	верхний +1	основной 0	нижний -1	
$x_1(v)$ — скорость резания, м/мин	102,64	82,64	62,64	20
$x_2(s)$ — подача, мм/об.	0,15	0,12	0,09	0,03
$x_3(t)$ — глубина резания, мм	0,2	0,15	0,1	0,05

Таблица 2

План эксперимента типа 2^3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$y(Ra)$
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1,44
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,77
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	2,53
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	3,13
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1,48
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1,65
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	2,8
8	1	1	1	1	1	1	1	1	3,26

Для получения схемы центрального композиционного плана второго порядка для трех факторов необходимо к полному факторному эксперименту 2^3 добавить шесть «звездных» точек с координатами $(+\alpha; 0; 0)$, $(-\alpha; 0; 0)$, $(0; +\alpha; 0)$, $(0; -\alpha; 0)$, $(0; 0; +\alpha)$, $(0; 0; -\alpha)$ и некоторое число $n_0 = 6$ точек в центре плана (рис. 1).

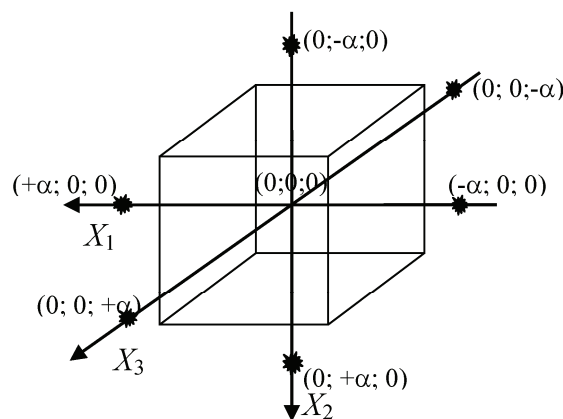


Рис.1. Схема центрального композиционного плана второго порядка для трех факторов

На основании проведенного эксперимента и полученного плана типа 2^3 получаем регрессионное уравнение, позволяющее описать зависимость полученных значений шероховатости от выбранных факторов (скорость резания, подача, глубина резания):

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (1)$$

где y — зависимая переменная;

x — независимая переменная;

b_0 — свободный член;

$b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ — коэффициенты влияния x на y .

После расчета коэффициентов регрессии были получены следующие результаты: $b_0 = 2,258$, $b_1 = 0,195$, $b_2 = 0,6733$, $b_3 = 0,04$, $b_{12} = 0,07$, $b_{13} = -0,0367$, $b_{23} = 0,058$, $b_{123} = 0,00167$.

После подстановки значений коэффициентов уравнение (1) приняло вид

$$y = 2,258 + 0,195x_1 + 0,6733x_2 + 0,04x_3 + 0,07x_1x_2 - 0,0367x_1x_3 + 0,058x_2x_3 + 0,0017x_1x_2x_3. \quad (2)$$

Для проверки адекватности полученного уравнения и определения дисперсий коэффициентов необходимо знать дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента. Находим ее по результатам шести опытов, поставленных в центре плана (опыты 1-6, табл. 3).

Таблица 3

Результаты опытов в центре плана и в «звездных» точках

Содержание плана	Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_1	x_2x_2	x_3x_3	y
Опыты в центре плана	1	1	0	0	0	0	0	0	1,54
	2	1	0	0	0	0	0	0	1,39
	3	1	0	0	0	0	0	0	1,41
	4	1	0	0	0	0	0	0	1,55
	5	1	0	0	0	0	0	0	1,57
	6	1	0	0	0	0	0	0	1,41
Опыты в звездных точках	7	1	-1,682	0	0	2,828	0	0	2,37
	8	1	1,682	0	0	2,828	0	0	3,00
	9	1	0	-1,682	0	0	2,828	0	1,20
	10	1	0	1,682	0	0	2,828	0	3,43
	11	1	0	0	-1,682	0	0	2,828	1,55
	12	1	0	0	0	1,682	0	0	2,828

Дисперсия воспроизводимости эксперимента равна

$$S_y^2 = \frac{1}{n_0 - 1} \sum_{u=1}^{n_0=6} (y_u - \bar{y})^2 = 0,00687,$$

где n_0 — число опытов в центре плана;

y_u — значения параметра оптимизации в центре плана;

\bar{y} — среднее арифметическое значение параметра оптимизации в центре плана.

Разность между значениями параметра оптимизации \bar{y} в центре плана и величиной свободного члена b_0 :

$$|\bar{y} - b_0| = |1,479 - 2,258| = 0,779.$$

Полученная разность во много раз превышает ошибку s_y эксперимента:

$$s_y = +\sqrt{s_y^2} = 0,0829.$$

Из этого следует, что коэффициенты при квадратичных членах существенно отличаются от нуля, а исследуемая зависимость не может быть с достаточной точностью аппроксимирована уравнением (1). Поэтому перешли к планированию второго порядка и аппроксимировали неизвестную функцию отклика полиномом вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3)$$

Эксперимент был поставлен по программе центрального композиционного ротационного планирования второго порядка. Реализованные восемь опытов полного факторного эксперимента 2^3 (табл. 2) и шесть опытов в центре плана (табл. 3) дополнили шестью опытами в «звездных» точках (опыты 7-12, табл. 3). Величина «звездного» плеча a в рассматриваемом случае равна 1,682.

Коэффициенты были рассчитаны по следующим формулам:

$$b_0 = \frac{A}{N} [2\lambda^2(k+2) \sum_{j=1}^N y_j - 2\lambda c \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j], \quad (4)$$

$$b_i = \frac{c}{N} \sum_{j=1}^N x_{ij} y_j, \quad (5)$$

$$b_{il} = \frac{c^2}{N\lambda} \sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j, \quad (6)$$

$$b_{ij} = \frac{A}{N} \{c^2[(k+2)\lambda - k] \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j + c^2(1-\lambda) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^N x_{ij}^2 y_j - 2\lambda c \sum_{j=1}^N y_j\}, \quad (7)$$

где n_c — разница между общим числом опытов и числом опытов в центре плана;

N — общее количество опытов;

k — количество факторов;

A — коэффициент, рассчитываемый по формуле 8;

c — коэффициент, рассчитываемый по формуле 9;

λ — коэффициент, рассчитываемый по формуле 10.

$$A = \frac{1}{2\lambda[(k+2)\lambda - k]}, \quad (8)$$

$$c = \frac{N}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}, \quad (9)$$

$$\lambda = \frac{k(n_c + n_0)}{(k+2)n_c}. \quad (10)$$

Получили следующие значения коэффициентов: $b_0 = 1,4772$, $b_1 = 0,192$, $b_2 = 0,67$, $b_3 = 0,0431$, $b_{12} = 0,070$, $b_{13} = -0,0367$, $b_{23} = 0,058$, $b_{123} = 0,0017$, $b_{11} = 0,428$, $b_{22} = 0,298$, $b_{33} = 0,054$.

После подстановки значений коэффициентов в уравнение (3) оно получило вид

$$y = 1,4772 + 0,192x_1 + 0,67x_2 + 0,0431x_3 + 0,070x_1x_2 - 0,0367x_1x_3 + 0,058x_2x_3 + 0,0017x_1x_2x_3 + 0,428x_1^2 + 0,298x_2^2 + 0,054x_3^2. \quad (11)$$

Доверительные интервалы для коэффициентов рассчитали по формуле

$$\Delta b = \pm ts \{b_0\}, \quad (12)$$

где t — табличное значение критерия при принятом уровне значимости и числе степеней свободы f ;

$s\{b_i\}$ — ошибка в определении i -ого коэффициента регрессии.

Доверительные интервалы для коэффициентов равны: $\Delta b_0 = \pm 0,087$, $\Delta b_i = \pm 0,058$, $\Delta b_{ii} = \pm 0,075$, $\Delta b_{ij} = \pm 0,056$.

В связи с тем, что коэффициенты $b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}, b_{33}$ по абсолютной величине меньше соответствующих доверительных интервалов, их можно признать статистически незначимыми и исключить из уравнения регрессии. Таким образом, математическая модель, полученная в результате рототабельного планирования второго порядка, приняла вид:

$$y = 1,4772 + 0,192x_1 + 0,67x_2 + 0,428x_1^2 + 0,298x_2^2. \quad (13)$$

Для проверки адекватности модели (11) находим дисперсию адекватности по формуле:

$$s_{ao}^2 = \frac{s_R - s_E}{f}, \quad (14)$$

где s_R — сумма квадратов отклонений расчетных значений функции от экспериментальных;

s_E — сумма квадратов, использованная для определения дисперсии параметра оптимизации;

f — число степеней свободы.

Дисперсия равна $s_{ao}^2 = 0,0172$. Расчетное значение F -критерия:

$$F_p = \frac{s_{ao}^2}{s_y^2} = 2,509. \quad (15)$$

При 5 %-ном уровне значимости и числах степеней свободы для числителя 10 и знаменателя 5 табличное значение критерия F_t равно 4,74. Значение $F_p < F_t$, поэтому модель (13) следует признать адекватной. Уравнение (13) неудобно для интерпретации полученных результатов и практических расчетов, поэтому его преобразовали по формулам перехода от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) к натуральным значениям факторов (v, s, t) :

$$x_1 = \frac{v - v_0}{\Delta v}; \quad x_2 = \frac{s - s_0}{\Delta s}; \quad x_3 = \frac{t - t_0}{\Delta t}, \quad (16)$$

где v_0, s_0, t_0 — натуральные значения факторов на основных уровнях;

$\Delta v, \Delta s, \Delta t$ — значения интервалов варьирования.

Таким образом,

$$x_1 = \frac{v - 82,6}{20}; \quad x_2 = \frac{s - 0,12}{0,03}; \quad x_3 = \frac{t - 0,15}{0,05}.$$

Уравнение (13) с учетом отношений (16) можно представить следующим выражением:

$$Ra = 10,07 - 0,167v - 57,08s + 0,0011v^2 + 331s^2. \quad (17)$$

Из приведенного выражения следует, что в области эксперимента ($t = 0,2 \div 0,1$ мм) глубина резания не оказывает влияния на шероховатость обработанной поверхности тормозного диска. Уравнение (13) используем для поиска оптимального режима обработки тормозного диска резцом с заданной геометрией.

Исследование области оптимума, представленной полиномом второй степени

В результате выполнения плана второго порядка получили полином второй степени, адекватно описывающий область оптимума. Однако в таком виде его сложно анализировать, поэтому путем преобразований приводим его к канонической форме путем выбора новой системы координат, путем параллельного переноса старой системы в новое начало и поворота координатных осей относительно этого начала.

На первом этапе канонического преобразования переносим начало координат в центр поверхности отклика. Для определения этой точки уравнение (13) дифференцируем по каждой независимой переменной. Приравнявая частные производные нулю, получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial y}{\partial x_1} = 0,192 + 0,856x_1 = 0; \quad \frac{\partial y}{\partial x_2} = 0,67 + 0,596x_2.$$

При аппроксимации функции отклика полиномом второй степени и дифференцировании его по каждой независимой переменной получаем систему двух линейных уравнений. Если определитель этой системы уравнений равен нулю, то поверхность отклика не имеет центра. В этом случае начало координат не переносят или переносят в точку с наилучшим значением параметра оптимизации.

Если поверхность имеет центр, т.е. определитель системы отличен от нуля, тогда начало координат переносят в центр.

Рассчитываем определитель системы уравнений:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 0,856 & 0 \\ 0 & 0,596 \end{vmatrix} = 0,5.$$

Определитель не равен нулю, следовательно, исследуемая поверхность имеет центр с координатами $x_{1s} = 0,23$; $x_{2s} = 1,13$ (они соответствуют значениям $v = 87,2$ м/мин; $s = 0,15$ мм/об).

При параллельном переносе системы координат в центр s с координатами $x_{1s} = 0,23$, $x_{2s} = 1,13$ — в исходном уравнении исчезают члены, содержащие линейные эффекты, и изменяется свободный член. Коэффициенты при вторых степенях и взаимодействиях интервариантны относительно переноса. Подставляя найденные значения координат центра в исходное уравнение (13), определили значение оптимизации в центре плана $Y_s = 2,68$.

После параллельного переноса координатных осей уравнение имеет вид

$$Y = Y_s + \sum_{l \leq i \leq l \leq k} b_{il} \tilde{x}_i \tilde{x}_l + \sum_{l \leq i \leq k} b_{ii} \tilde{x}_i^2, \quad (18)$$

где Y_s — значение параметра оптимизации в новом начале координат;

$\tilde{x}_i \tilde{x}_l$ — новые координаты.

После подстановки значений уравнение (18) примет вид

$$Y = 2,68 + 0,428\tilde{x}_1^2 + 0,291\tilde{x}_2^2. \quad (19)$$

Вторым этапом канонического преобразования является поворот координатных осей в новом начале координат до совмещения их с главными осями геометрической поверхности. При повороте координатных осей исчезают члены с коэффициентами взаимодействия и изменяются коэффициенты при вторых степенях. В результате поворота осей получили уравнение

$$Y - 2,68 = 0,42X_1^2 + 0,303X_2^2. \quad (20)$$

Выражение (20) является уравнением эллипса в каноническом виде. Так как коэффициенты B_{11} и B_{22} имеют положительные знаки, центр эллипсов ($x_{1s} = 0,23$; $x_{2s} = 1,13$) является

минимумом функции отклика. В этом случае для поиска экстремума достаточно поставить опыт в центре фигуры и проверить, насколько точно значение параметра оптимизации, предсказанное уравнением регрессии, совпадает с экспериментальным.

В дополнительном опыте, поставленном в центре фигуры ($x_{1S} = 0,23$; $x_{2S} = 1,13$), получено значение функции отклика $y = 1,15$. Дальнейшее варьирование скорости и подачи вблизи экстремума не вызвало уменьшения значения y .

Таким образом, подтверждена возможность повышения эксплуатационных свойств тормозных дисков транспортных средств в результате выбора оптимального режима резания при их восстановлении: $v = 87,2$ м/мин, $s = 0,14$ мм/об при $t = 0,2 \div 0,1$ мм.

Выводы

Данное исследование позволяет определить оптимальные режимы резания при восстановлении тормозных дисков транспортных машин с применением малогабаритных токарных станков непосредственно на автомобиле.

Список литературы

1. Мельникова Е.П. Анализ причин выхода из строя элементов тормозной системы автомобилей / Е.П. Мельникова, В.В. Быков // Машиностроение и техносфера XXI века: сборник трудов XIV международной научно-технической конференции. — Донецк: ДонНТУ, 2007.
2. Налимов В.В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. — М.: Наука, 1965. — 340 с.
3. Металлорежущие инструменты: учебник для вузов по специальностям «Технология машиностроения», «Металлорежущие станки и инструменты» / Г.Н. Сахаров, О.Б. Арбузов, Ю.Л. Боровой и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 328 с.
4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. — Свердловск: УПИ Кирова, 1975. — 149 с.

Стаття надійшла до редакції 27.10.09
© Биков В.В., 2009