УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ ПЕТРОЗАВОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Декабрь, № 4 **Технические науки** **2008**

УДК 630.377.44.004.67

ЕВГЕНИЙ НИКОЛАЕВИЧ ВЛАСОВ

кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования специальных лесных машин лесомеханического факультета Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии

vlasov-en@mail.ru

НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ ИВАНОВ

доцент кафедры технологии лесного машиностроения и ремонта лесомеханического факультета Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии

vlasov-en@mail.ru

АНРИ ЯКОВЛЕВИЧ ПЕРЕЛЬМАН

доктор физико-математических наук, профессор кафедры высшей математики лесоинженерного факультета Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии

anri_perelman@mail.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАПЛАВКИ ДЕТАЛЕЙ ЛЕСНЫХ МАШИН В СРЕДЕ ПРОПАН-БУТАНА

На ремонтных предприятиях лесной промышленности и лесного хозяйства можно считать целесообразным внедрение таких способов восстановления, как газоэлектрическая наплавка в пропан-бутане, которая устраняет недостатки широко распространенных способов, может быть внедрена на имеющемся оборудовании с незначительными изменениями и не требует дорогостоящих расходных материалов. Экономический анализ показал экономическую эффективность внедрения наплавки в пропан-бутане на ремонтных предприятиях лесной промышленности.

Ключевые слова: ремонт, газоэлектрическая наплавка, пропан-бутан, планирование эксперимента

На ремонтных предприятиях лесной промышленности и лесного хозяйства при восстановлении деталей наибольшее распространение нашли дуговые способы наплавки: ручная наплавка покрытыми электродами, наплавка под слоем флюса, наплавка в среде углекислого газа и вибродуговая наплавка. Эти способы восстановления не всегда позволяют получить необходимую твердость поверхности, и детали требуется дополнительная термическая обработка, которая обычно возможна на крупных ремонтных заводах.

Внедрение на малых предприятиях дорогостоящих и энергоемких установок, например, таких как плазменная наплавка, нанесение твердых покрытий в высоком вакууме или детонационного напыления, требует больших капитальных вложений, что целесообразно только при больших программах или номенклатурах ремонтируемых деталей. Новые способы восстановления требуют также и более высокой культуры производства. Здесь целесообразны способы восстановления деталей, которые устраняют недостатки широко распространенных способов, могут быть внедрены на имеющемся оборудовании с незначительными изменениями и не требуют дорогостоящих расходных материалов [4].

Целью данной работы является выбор оптимального режима нанесения покрытия газоэлектрической наплавкой в пропан-бутане для повышения эксплуатационных свойств деталей при ремонте лесных машин. В работе определяются условия протекания процесса, при которых ее технологическая производительность оптимальна. В этом смысле выявляется также взаимосвязь качественного формирования шва с технологическими параметрами [2].

В качестве управляемых факторов (контролируемых переменных) используются только взаимно независимые параметры наплавки: x_1 – мощность электрической дуги, x_2 – скорость наплавки, x_3 – расход пропан-бутана, x_4 – расход кислорода, x_5 – расстояние до среза газовой горелки.

Поставленная проблема оптимизации решается на основе методов планирования эксперимента.

В полном факторном эксперименте (ПФЭ) типа 2^k число опытов $N = 2^k$. С ростом k число опытов N быстро растет. Поэтому при больших значениях k реализация ПФЭ типа 2^k становится сложно осуществимой. Одномерная функция отклика имеет вид [1], [7].

$$У = a_O + \sum_{i=1}^{к} a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum_{1 \le i \triangleleft j \le к} a_{ij} x_i x_j + y_*, \quad (1)$$

где y – количество нанесенного металла в единицу времени [*г/ч*], и член y_* содержит произведения контролируемых переменных $x_1, \ldots, x_k$ порядка выше второго. Взаимодействиями называются произведения вида:

$$x_{i_1} \ldots x_{i_m} \; (1 \le i_1 \triangleleft i_2 \triangleleft \ldots \triangleleft i_m \le к). \quad (2)$$

Наряду с ростом числа N опытов происходит увеличение числа взаимодействий и их порядка. В ряде случаев можно априори пренебречь эффектами определенного набора взаимодействий. Кроме того, за счет коррекции матрицы независимых переменных функции отклика часто можно заменить функцией отклика, эквивалентной исходной, но с меньшим количеством взаимодействий. При этом функции отклика считаются эквивалентными, если результаты оптимизации для них практически одинаковы. Отметим, что некоторые взаимодействия принципиально значимы, и их необходимо учитывать для любой допустимой функции отклика. Эти соображения лежат в основе предложенного метода оптимизации производительности нанесения покрытия на изношенные детали.

Любое уменьшение до реально учитываемых взаимодействий приводит к существенному уменьшению числа опытов, необходимых для получения оценок неизвестных коэффициентов (параметров) функции отклика. Это уменьшение достигается с помощью применения дробных факторных планов (ПФЭ), представляющих собой регулярные или нерегулярные дробные реплики. Если в ПФЭ типа 2^k наблюдения проводятся во всех вершинах к-мерного гиперкуба, то при использовании дробных реплик нужно знать результаты экспериментов только в некоторых вершинах этого гиперкуба. При построении полуреплик берутся не произвольные точки полного факторного плана, а только такие, при использовании которых выполняются условия симметрии и нормировки плана и попарной ортогональности его столбцов. Каждому ПФЭ типа 2^k соответствуют две полуреплики 2^{k-1}. Например, в случае к = 4 полуреплики могут строиться с помощью генерирующих соотношений [1]:

$$x_4 = x_1 x_2 \quad (3)$$

и

$$x_4 = -x_1 x_2. \quad (4)$$

Матрица плана полуреплики 2^{4-1} с генерирующим соотношением (3) имеет вид:

$$\begin{array}{cccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{array}$$
$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Матрицы планов двух произвольных полуреплик 2^{4-1}, генерирующие соотношения, отличающиеся лишь знаками, не имеют общих строк. Значит, объединение таких полуреплик представляет собой ПФЭ типа 2^4. Для каждого из двух ПФЭ 2^3 находятся несмещенные оценки по методу наименьших квадратов (МНК-оценки) неизвестных коэффициентов (параметров) функции отклика:

$$У = a_O + \sum_{i=1}^{3} a_i x_i + \sum_{1 \le i \triangleleft j \le 3} a_{ij} x_i x_j + a_{123} x_1 x_2 x_3. \quad (6)$$

Коэффициентам соответствует матрица независимых переменных:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Матрица плана
ПФЭ типа 2^3

Основная задача планирования эксперимента состоит в поиске экстремума функции отклика. Рассмотрим случай, когда экстремум, соответствующий оптимизации производительности покрытия на изношенные детали, лежит во внутренней точке области изменения независимых переменных. В этом случае можно пользоваться классическим методом отыскания экстремума функции нескольких переменных:

1. Необходимое условие: независимые переменные должны удовлетворять системе нормальных уравнений МНК.
2. Достаточное условие: независимые переменные должны удовлетворять теореме Сильвестра [5] (в случае максимума знаки угловых миноров A_K должны чередоваться, причем $A_1 < 0$).

Такая задача имеет смысл, если функция отклика относительно независимых переменных имеет порядок выше первого.

Для изучаемой проблемы, согласно критерию Стьюдента [3], значимы переменные x_1, x_2, x_3, x_5 (ниже переменная x_5 переобозначается через x_4). В свою очередь, в силу критерия Фишера адекватная модель функции отклика записывается в форме:

$$\begin{aligned} У &= a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + \\ &+ a_{11}x_1^2 + a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2. \end{aligned} \tag{8}$$

Данная модель строится по генерирующему соотношению (3) и является минимальной моделью типа (1). Это означает, что функция отклика (8) содержит только одно взаимодействие x_1x_2, совпадающее с генерирующим соотношением. Определим вектор коэффициентов регрессии (параметров) по МНК на основе выбранного плана ДФЭ [1], [7].

$$\vec{a} = (a_O,\ a_1, \dots, a_4,\ a_{11}, \dots, a_{44}), \tag{9}$$

где:

$$\begin{aligned} &a_0 = -49, \\ &a_1 = 3.5\cdot10^{-6},\ a_{11} = -1.4\cdot10^{-10},\ a_{12} = 6.0\cdot10^{-5} \\ &a_2 = -1.6\cdot10^{-5},\ a_{22} = -1.8, \\ &a_3 = 50,\ a_{33} = -0.5, \\ &a_4 = 30,\ a_{44} = -0.2, \end{aligned} \tag{10}$$

Нормальная система МНК, соответствующая функции отклика (8), имеет вид:

$$\begin{cases} a_1 + 2a_{11}x_1 + a_{12}x_2 = 0 \\ a_2 + 2a_{22}x_2 + a_{12}x_1 = 0 \\ a_3 + 2a_{33}x_3 = 0 \\ a_4 + 2a_{44}x_4 = 0. \end{cases} \tag{11}$$

Вектору параметров $\vec{a}$ из (9), (10) соответствует вектор независимых переменных:

$$\vec{x} = (x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4). \tag{12}$$

где $x_1 = -49\cdot10^5$, $x_2 = -84$, $x_3 = 50$, $x_4 = 75$.

Проверим, что вектор $\vec{x}$ действительно доставляет максимум функции отклика (8) с параметрами (10), то есть оптимизация фактически осуществляется. Действительно, критерий Сильвестра выполняется в силу соотношений:

$$A_1 = У_{11} = 2a_{11} = -2{,}8\cdot10^{-10} < 0,$$

$$A_2 = \begin{vmatrix} У_{11} & У_{12} \\ У_{21} & У_{22} \end{vmatrix} = 10^{-10}\cdot(2{,}8\cdot3{,}6-9) \approx 10^{-10} > 0,$$

$$A_3 = \begin{vmatrix} У_{11} & У_{12} & У_{13} \\ У_{21} & У_{22} & У_{23} \\ У_{31} & У_{32} & У_{33} \end{vmatrix} = -A_2 < 0,$$

$$A_4 = \begin{vmatrix} У_{11} & У_{12} & У_{13} & У_{14} \\ У_{21} & У_{22} & У_{23} & У_{24} \\ У_{31} & У_{32} & У_{33} & У_{34} \\ У_{41} & У_{42} & У_{43} & У_{44} \end{vmatrix} = -У_{44}\cdot10^{-10} > 0,\ \textit{если}\ У_{44} < 0,$$

(в данном случае $У_{44}$ = –0.4, так как a_{44} = –0,2), где

$$У_{ij} = 2a_{ii},\ У_{ij} = У_{ji} = 0{,}5a_{ij}. \tag{13}$$

Вычислим фактическое значение максимума функции отклика:

$$У_{\max} = У(\vec{x}), \tag{14}$$

где вектор независимых переменных $\vec{x}$ дается формулой (12).

Имеем:

$$У_{\max} = У_0 + У_1 + У_2 + У_{12}, \tag{15}$$

где

$$\begin{cases} У_0 = a_0 + 0{,}5a_3^2 + 1{,}2a_4^2 \approx 2{,}3\cdot10^3, \\ У_1 = \sum_{i=1}^{4} a_ix_i \approx -1{,}7\cdot10^4 + 4{,}8\cdot10^3, \\ У_2 = \sum_{i=1}^{4} a_{ii}x_i^2 \approx -0{,}8\cdot10^4 - 1{,}5\cdot10^3, \\ У_{12} = a_{12}x_1x_2 \approx 2{,}5\cdot10^4. \end{cases} \tag{16}$$

Из выражений (15) и (16) следует:

$$\begin{aligned} У_{\max} &= 2{,}3\cdot10^3 + 3{,}3\cdot10^3 = \\ &= 5{,}6\cdot10^3 = 5600\ \ г/ч. \end{aligned} \tag{17}$$

Экстремумы во внутренней точке области изменения независимых переменных функции отклика второго порядка существуют не для всех возможных значений коэффициентов регрессии.

Так, для минимальной модели (8) при $a_{11} = -1{,}4 \cdot 10^{-10}$, $a_{12} = 6{,}0 \cdot 10^{-5}$ должны выполняться неравенства:

$$a_{22} < -1{,}7;\ a_{33} < 0{,}9;\ a_{44} < 0. \tag{18}$$

Следует отметить, что рассматриваемая проблема является плохо обусловленной, поскольку малые погрешности коэффициентов регрессии могут привести к существенным ошибкам в $y_{\max}$ (некорректная проблема) [6]. Поэтому формально полученное решение проблемы оптимизации нуждается в регуляризации. В данном случае можно использовать естественную регуляризацию, состоящую в отбрасывании слагаемых типа $10^{K}a$ с $a << 1$ для тех натуральных к, которые по смыслу задачи не соответствуют реальным значениям экстремума функции отклика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Асатурян В. И. Теория планирования эксперимента. М.: Радио и связь, 1983. 248 с.
2. Балихин В. В., Быков В. В., Иванов Н. Ю. Технология ремонта машин и оборудования: Учебник для вузов. СПб.: СПбГЛТА, 2006. 524 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 1998. 575 с.
4. Иванов Н. Ю. Исследование режимов наплавки в пропан-бутане на форму наплавленного покрытия // Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций: Материалы 6-й Всероссийской практ. конференции-выставки. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2004. С. 53–61.
5. Ильин В. А., Позняк Э. Г. Линейная алгебра. М.: Наука, 1984. 294 с.
6. Федоров А. М. Некорректные задачи со случайными ошибками в данных. Новосибирск: Наука, 1990. 279 с.
7. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1984. 312 с.