

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОПЛАМЕННОЙ УСТАНОВКИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

М.В. Радченко, Т. А. Мошкина, К. А. Бежанов

Задача нанесения высокопрочного напыления возникла в результате необходимости повышения механических свойств изделия. Метод газопламенного напыления имеет высокую производительность, большой коэффициент использования напыляемого материала и позволяет наносить покрытия толщиной от десятых долей до нескольких миллиметров. Для осуществления газопламенного напыления не требуется дорогостоящего оборудования со сложными системами обеспечения. Само оборудование может легко транспортироваться, для его установки в производственном помещении требуются минимальные затраты. Газопламенное напыление может использоваться в мелкосерийном производстве при изготовлении и восстановлении единичных изделий, включая крупногабаритные и металлоёмкие, и в ремонтном производстве, в первую очередь для восстановления изношенных поверхностей детали.

Проведение большого количества опытов для определения параметров газопламенного напыления порой экономически нецелесообразно, а зачастую и невозможно из-за недостатка времени, персонала или ресурсов. Методы прогнозирования экспериментов [1] могут значительно уменьшить число проводимых опытов, поэтому их актуальность в современном мире только возрастает.

Выберем параметр оптимизации для данной задачи. Общими и существенными характеристиками газопламенного напыления являются износостойкость, толщина покрытия и коэффициент использования порошка.

Рассмотрим все существенные факторы, которые могут влиять на процесс. В качестве наносимого материала будем использовать порошок двух типов: ПГСР – 2 и ПГСР – 4. Приведём варьируемые факторы и области их определения в (табл. 1).

Выберем план проведения эксперимента. В нашем случае для снижения количества опытов (в полном факторном эксперименте 2^8 пришлось бы ставить 256 опытов) применим полуреплику 2^{8-4} ($1/16$ -реплика от 2^8), которая снижает их количество до 16 и относительно линейной

модели сохраняет оптимальные свойства полного факторного эксперимента. Присвоим значению $x_1x_2x_3 - x_5$, $x_1x_2x_4 - x_6$, $x_1x_3x_4 - x_7$, $x_2x_3x_4 - x_8$. Подставив эти значения, приведём матрицу планирования и результаты опытов в табл. 2.

Произведём обработку результатов экспериментов. Для получения линейной модели вида $y = b_0x_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + \dots$ рассчитаем коэффициенты уравнения, используя матрицу планирования и результаты опытов (см. табл. 2), по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ji} y_i}{N}, \quad (1)$$

где $j = 0, 1, \dots, k$.

Рассчитав коэффициенты составим уравнения:

$$y_1 = 0,825 + 0,175x_4, \quad (2)$$

$$y_2 = 0,4875 + 0,0375x_1 + 0,0125x_2 - 0,0125x_3 + 0,0125x_4 - 0,0375x_5 + 0,0375x_6 + 0,0125x_7 + 0,0375x_8, \quad (3)$$

$$y_3 = 0,1484 - 0,0047x_1 - 0,0016x_2 - 0,0016x_3 + 0,0078x_4 + 0,0141x_5 + 0,0172x_6 + 0,0109x_7 + 0,0078x_8, \quad (4)$$

Проанализируем полученные нами уравнения. Имеется 3 уравнения и 12 неизвестных, что создаёт значительные затруднения при их рассмотрении. В результате эксперимента нам необходимо получить максимальную износостойкость y_1 , максимальный коэффициент использования порошка y_2 и минимальную толщину покрытия y_3 . Для этого примем максимальное значение (+1) для факторов x_1 и x_2 и минимальное значение (-1) для x_5 , так как это способствует увеличению y_2 и уменьшению y_3 . Фактор x_3 примем минимальным – он увеличивает значение y_2 . Коэффициент при x_3 в уравнении (4) на порядок меньше остальных коэффициентов в этом уравнении, поэтому примем его равным нулю, а значение x_3 не окажет влияния на y_3 . Значение x_4 выберем максимальным из-за увеличения им значений двух параметров оптимизации y_1 и y_2 , пренебрегая увеличением значения y_3 (так как увеличение двух параметров оптимизации

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ГАЗОПЛАМЕННОЙ УСТАНОВКИ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

более важно, чем одного). Дальнейшая минимизация представляется невозможной, так как для увеличения y_2 необходимо принимать x_6 , x_7 и x_8 максимальными, а для уменьшения y_3 – наоборот. В итоге уравнения примут следующий вид:

$$y_1 = 1, \quad (5)$$

$$y_2 = 0,6 + 0,0375x_6 + 0,0125x_7 + 0,0375x_8, \quad (6)$$

$$y_3 = 0,1358 + 0,0172x_6 + 0,0109x_7 + 0,0078x_8, \quad (7)$$

Проанализировав эти уравнения видно, что в результате для любого из опытов нет чётко выраженного соотношения экстремумов для y_2 и y_3 . Для нахождения оптимального значения для двух параметров оптимизации (y_1 и y_2) найдём разность между значениями к которым необходимо стремиться (максимумом для y_2 и минимумом для y_3) и остальными значениями параметров оптимизации:

$$\Delta(y_2)_i = y_{2\max} - y_{2i}, \quad (8)$$

$$\Delta(y_3)_i = y_{3i} - y_{3\min}, \quad (9)$$

где: $i = 1 \dots 8$,

$y_{2\max}$, $y_{3\min}$ – соответственно максимальное значение второго и минимальное значение третьего параметров оптимизации.

Результаты вычислений занесём в табл. 3. По результатам этой таблицы построим графики зависимостей разности параметров оптимизации от опыта (рис. 1).

По этому графику видно, что оптимальное соотношение максимума для y_2 и минимума для y_3 наблюдается в шестом опыте при температуре в ядре пламени 2200°C , гранулометрическом составе 160 мкм и давлении транспортирующего газа 1,5 атм. Если нам необходимо понизить толщину покрытия y_3 , то понизится и коэффициент использования порошка y_2 , что приведёт к увеличению экономических затрат. Если же толщина покрытия не имеет важного значения, тогда целесообразно повышать коэффициент использования порошка, что снизит затраты на порошок, но увеличит толщину покрытия.

Таблица 1

Факторы, влияющие на процесс газопламенного напыления

Обозначение	Наименование	Области определения	Единицы измерения
x_1	Давление рабочих газов: пропан	1 – 1,5	атм.
x_2	Давление рабочих газов: кислород	4 – 6	атм.
x_3	Дистанция напыления	100 – 300	мм
x_4	Тип порошкового материала	–	–
x_5	Расход порошкового материала	0,5 – 1,5	кг/ч
x_6	Температура в ядре пламени	1600 – 2200	$^\circ\text{C}$
x_7	Гранулометрический состав	160 – 220	мкм
x_8	Давление транспортирующего газа	0,5 – 1,5	атм.

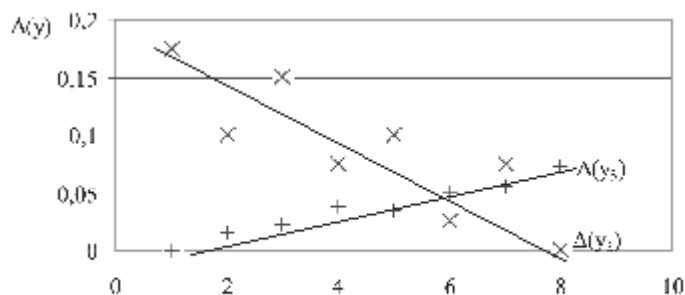


Рисунок 1 - График разности параметров оптимизации

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов

№	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	y ₁ [*]	y ₂ ^{**}	y ₃ ^{***}
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0,65	0,4	0,1
2	-1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	0,6	0,25
3	-1	-1	1	-1	1	-1	1	1	0,65	0,4	0,15
4	-1	-1	1	1	1	1	-1	-1	1	0,4	0,175
5	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1	0,65	0,4	0,15
6	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	0,4	0,125
7	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	0,65	0,6	0,15
8	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	0,4	0,125
9	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,65	0,4	0,175
10	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	0,6	0,15
11	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,65	0,6	0,1
12	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	0,4	0,1
13	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,65	0,6	0,125
14	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	0,6	0,125
15	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	0,65	0,4	0,175
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,6	2

* - износостойкость, отн. ед.,

** - коэффициент использования порошка отн. ед.,

*** - толщина покрытия, мм.

Таблица 3

Разность параметров оптимизации

№	$\Delta(y_2)$	$\Delta(y_3)$
1	0,175	0
2	0,1	0,0156
3	0,15	0,0218
4	0,075	0,0374
5	0,1	0,0344
6	0,025	0,05
7	0,075	0,0562
8	0	0,0718

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.