

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ТВЕРДОСТИ ПРИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОМ АЗОТИРОВАНИИ

Введение

Все более активное развитие и распространение современных технологий повышения износостойкости деталей, к которым относится технология ионно-плазменного азотирования требуют увеличения эффективности работы установок и технологического процесса. С целью прогнозирования поверхностной твердости материалов при ионно-плазменном азотировании была разработана математическая модель приведенная в данной работе.

Моделирование

При исследовании методов ионно-плазменного азотирования для получения оптимальных значений поверхностной твердости в планировании эксперимента были приняты такие независимые факторы, как температура азотирования и время насыщения поверхностных слоев стали атомарным азотом.

Для каждого фактора (температуры, времени) выбираем два уровня, на которых он будет варьироваться в эксперименте, а именно верхний и нижний уровни. За верхний уровень принимаем тот, который соответствует большему значению фактора. Масштабы по осям выбираем так, чтобы верхний уровень соответствовал + 1, нижний – 1, а основной – нулю.

Для факторов с непрерывной областью определения это делаем с помощью преобразования

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{I_i} \quad (1)$$

где x_i – кодированное значение фактора, \tilde{x}_i – натуральное значение фактора, \tilde{x}_{i0} – натуральное значение основного уровня, I_i – интервал варьирования, i – номер фактора.

Так как число уровней каждого фактора равно двум, то имеем полный факторный эксперимент типа $N=2^k$, а именно $N=2^2$. Матрица планирования для двух факторов приведена в табл. 1 в алгебраической форме, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы – значениям факторов.

Таблица 1

Матрица планирования эксперимента 2^2

Номер опыта	x_1	x_2	y
1	– 1	– 1	y_1
2	+ 1	– 1	y_2
3	– 1	+ 1	y_3
4	+ 1	+ 1	y_4

Для геометрической интерпретации полного факторного эксперимента 2^2 найдем в области определения точку, соответствующую основному уровню, и проведем через нее новые оси координат, параллельные осям натуральных значений факторов. Далее выбираем масштабы по новым осям так, чтобы интервал варьирования для каждого фактора равнялся единице. Тогда условия проведения опытов соответствуют вершинам квадрата, центром которого является основной уровень, а каждая сторона параллельна одной из осей координат и равна двум интервалам (рис. 1). Номера вершин квадрата соответствуют номерам опытов в матрице планирования. Площадь, ограниченная квадратом, соответствует области эксперимента, а, следовательно, области предсказываемых значений y .

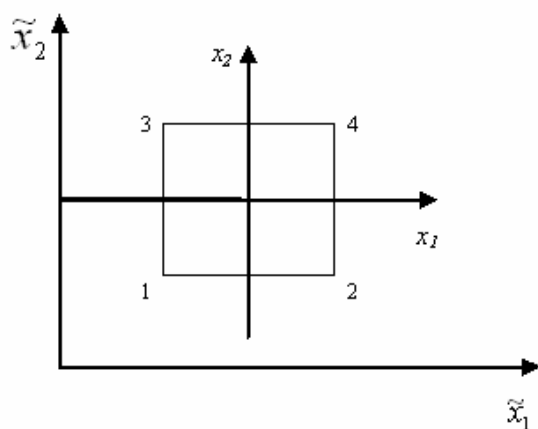


Рисунок 1 – Геометрическая интерпретация полного факторного эксперимента 2^2

Математическая линейная модель получения оптимальной поверхностной твердости и глубины диффузионного слоя при двух принятых факторах (температуры T и времени t) в общем виде записывается формулой

$$y = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2, \quad (2)$$

где коэффициент b_0 представляет собой среднее арифметическое значение параметра оптимизации, а коэффициенты b_1 и b_2 вычисляем по формулам

$$b_1 = \frac{(-1) \cdot y_1 + (+1) \cdot y_2 + (-1) \cdot y_3 + (+1) \cdot y_4}{4}, \quad (3)$$

$$b_2 = \frac{(-1) \cdot y_1 + (-1) \cdot y_2 + (+1) \cdot y_3 + (+1) \cdot y_4}{4}, \quad (4)$$

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad (5)$$

где N – количество опытов.

Матрица планирования эксперимента 2^2 для оптимальных значений поверхностной твердости представлена в табл. 2.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента 2^2

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	y
1	+ 1	- 1	- 1	830
2	+ 1	+ 1	- 1	570
3	+ 1	- 1	+ 1	580
4	+ 1	+ 1	+ 1	520

Найдем значения коэффициентов b_1 , b_2 и b_0 по формулам 3 – 5. Тогда уравнения регрессии для кодированных значений поверхностной твердости с учетом вычисленных коэффициентов примет вид (6)

$$y_{HV} = 625 - 80 \cdot x_1 - 75 \cdot x_2 \quad (6)$$

Известно, что коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор. Если коэффициент имеет знак плюс, то с увеличением значения фактора параметр оптимизации увеличивается, а если минус, то уменьшается.

Таким образом, исходя из уравнения регрессии для кодированных значений, видим следующее:

- 1) на поверхностную твердость стали при ионно-плазменном азотировании в большей степени влияет первый фактор – температура (так как $b_1 = -80$), чем второй фактор – время (так как $b_2 = -75$).
- 2) с повышением температуры азотирования поверхностная твердость уменьшается.

Процесс изменения поверхностной твердости определяется двумя факторами. Основной уровень и интервалы варьирования факторов выбраны таким образом (табл.3).

Таблица 3

Уровень и интервалы варьирования параметров

	\tilde{x}_1 (температура T , °C)	\tilde{x}_2 (время t , ч)
Основной уровень	530	36
Интервал варьирования	30	12

Согласно формулы (2) перейдем от кодированных значений факторов x_i к натуральным \tilde{x}_i , учитывая натуральные значения основного уровня \tilde{x}_{i0} и интервалы варьирования I_i

$$x_1 = \frac{T - 530}{30} \quad \text{и} \quad x_2 = \frac{t - 36}{12} \quad (7)$$

Подставляя формулы (7) в уравнение регрессии для кодированных значений (6), получим уравнение регрессии для натуральных значений поверхностной твердости.

Таким образом, математическая модель натуральных значений поверхностной твердости при варьировании температуры азотирования

и продолжительности процесса насыщения азотом описывается уравнениями регрессии полинома первой степени

$$HV = 2263 - 2,67 \cdot T - 6,25 \cdot t \quad (8)$$

Объемная модель приведена на рис. 2.

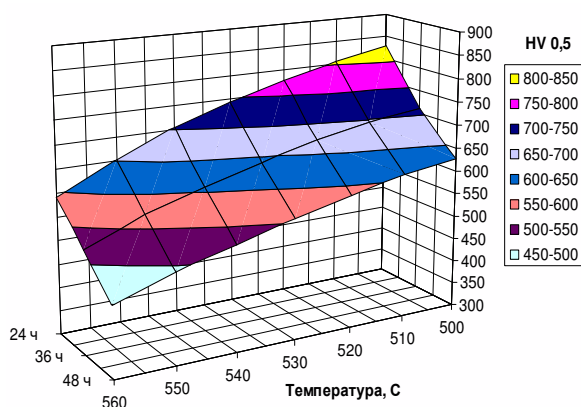


Рисунок 2 – Объемная модель твердости поверхностного слоя при ионно-плазменном азотировании в интервале температур 500...560°C в течение 24 – 48 ч

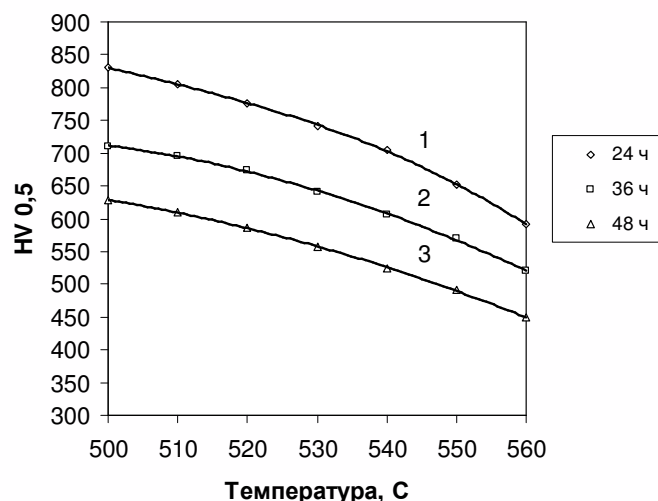


Рисунок 3 – Зависимость глубины азотированного слоя от времени

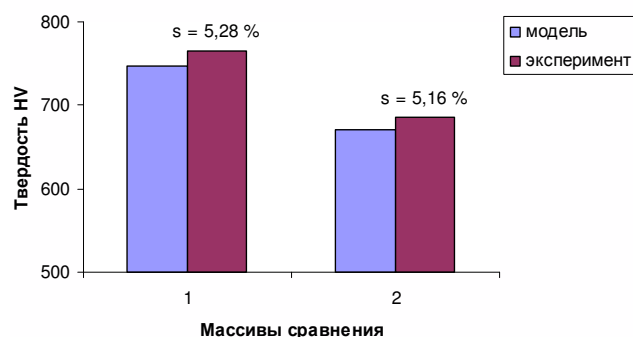


Рисунок 4 – Сравнительный анализ полученной математической модели с экспериментальными данными:

- 1 – первый массив сравнения модели с экспериментальными данными,
- 2 – второй массив сравнения модели с экспериментальными данными,
- s – погрешность значений модели и экспериментальных данных

Зависимость поверхностной твердости азотированного слоя от температуры при разных длительностях процесса насыщения показана на рис. 3, где кривые 1, 2 и 3 описываются уравнениями регрессии полинома второй степени:

1 – после 24 часов:

$$HV = -3,5833 \cdot T^2 - 10,369 \cdot T + 842,14;$$

2 – после 36 часов:

$$HV = -2,9643 \cdot T^2 - 8,1071 \cdot T + 722,86;$$

3 – после 48 часов:

$$HV = -2,0952 \cdot T^2 - 13,024 \cdot T + 643,57.$$

Сравнение полученной математической модели с экспериментальными данными показано на рис. 4.

Выводы

Полученная математическая модель позволяет найти значения поверхностной твердости с точностью до 5,22 % после ионно-плазменного азотирования в интервале температур от 500 до 560 °С при длительности ХТО в диапазоне 24 – 48 часов и спрогнозировать значения поверхностной твердости при увеличении или уменьшении технологических параметров диффузионного насыщения.

Список использованных источников

1. Мустафин К.А. Комбинированная технология ионно-плазменного азотирования и создания приработочного слоя с применением скрещенных Е, В полей / К.А. Мустафин // Вісті Академії інженерних наук України: наук.-техн. та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип. 3 (30). – К., 2006. – С. 222 – 231.
2. Мустафин К.А. Влияние параметров комбинированной технологии ионно-плазменного азотирования и создания приработочного слоя с применением скрещенных Е, В полей на характеристики детали / К.А. Мустафин // Вісті Академії інженерних наук України: наук.-техн. та громадський часопис Президії Академії інженерних наук України. – Вип. 3 (33). – К., 2007. – С. 222 – 231.
3. Развитие азотирования в России / О.А. Банных, В.М. Зинченко, В.А. Прусаков, В.Я. Сыропятов. – М.: МГУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 67 с.