

0.1 Анализ технологического процесса

0.1.1 Краткое описание технологического процесса

0.1.1.1 Схема

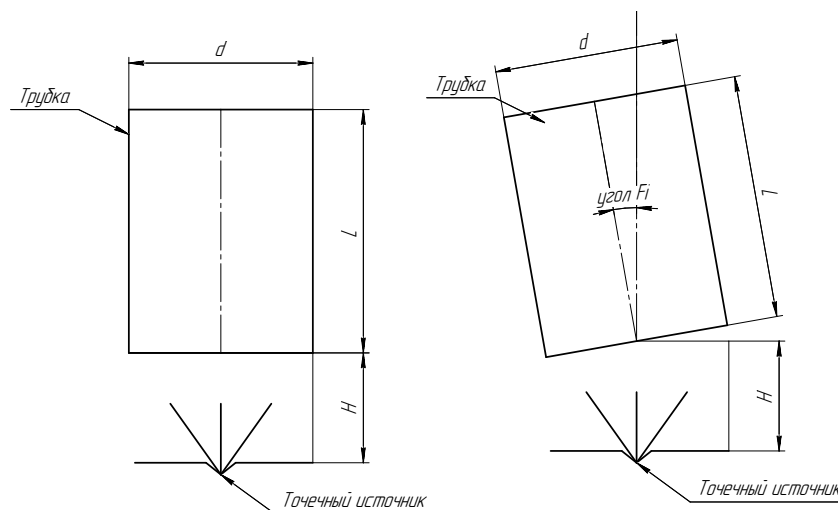


Рис. 1. Расчётная схема

0.1.1.2 Назначение процесса

Тонкопленочные покрытия широко и многообразно применяются в различных сферах деятельности человека. В данном эксперименте на внутреннюю часть тонкой трубки наносился тонкий слой меди.

0.1.1.3 Сущность процесса

Формирование тонкопленочных покрытий методом термического испарения осуществляется при сообщении материалу вещества энергии, которая затрачивается на его нагрев. С увеличением температуры колебательная энергия частиц возрастает и становится больше энергии связи с другими частицами, в результате чего происходит их испускание (испарение) и дальнейшая конденсация на поверхности изделия.

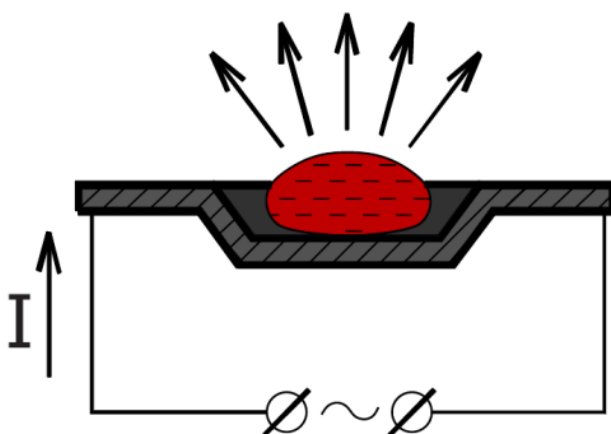


Рис. 2. Схема резистивного термического испарения

При резистивном испарении материал помещается в проводник с высоким электрическим сопротивлением (испаритель). При протекании тока через испаритель происходит его нагрев и передача тепла испаряемому веществу.

0.1.1.4 Этапы

0.1.1.4.1 При моделировании эксперимента

1. Ввод необходимых параметров в исходный код программы;
2. Компиляция и запуск исполняемого файла;
3. Получение результатов в виде текстового файла.

0.1.1.4.2 При проведении эксперимента на практике

1. Подготовка заготовки:
 - Резка исходной трубы на трубы заданных параметров.
2. Очистка заготовки.
3. Нанесение медного покрытия:
 - 3.1. Установка трубки в держатель;

- 3.2. Откачка газа из камеры;
- 3.3. Установка параметров для термического испарения;
- 3.4. Нанесение покрытия;
- 3.5. Остановка насосов, напуск атмосферы;
- 3.6. Изъятие заготовки из камеры.

0.1.1.5 Используемое оборудование

Эксперименты проводились в рамках НИР в лаборатории кафедры «Электронные технологии в машиностроении». Процесс нанесения покрытия был реализован при помощи специально разработанного программного обеспечения, моделирующее нанесение покрытия методом магнетронного распыления.

0.1.2 Сравнительный анализ входных и выходных параметров, присущих данной операции

1. Входные контролируемые и управляемые факторы:

- Расстояние от источника до заготовки;
- Время нанесения;
- Угол наклона заготовки относительно источника;
- Внутренний диаметр трубки.

2. Входные контролируемые и неуправляемые:

- Чистота заготовки;
- Чистота распыляемого материала.

3. Входные неконтролируемые и неуправляемые:

- Квалификация оператора;

- Состояние оператора;
- Калибровка и настройка инструментов измерения.

4. Выходные параметры:

- Отношение толщин нанесённого покрытия на противоположных сторонах стенки (отношение толщины на левой проекции к толщине покрытия на правой).

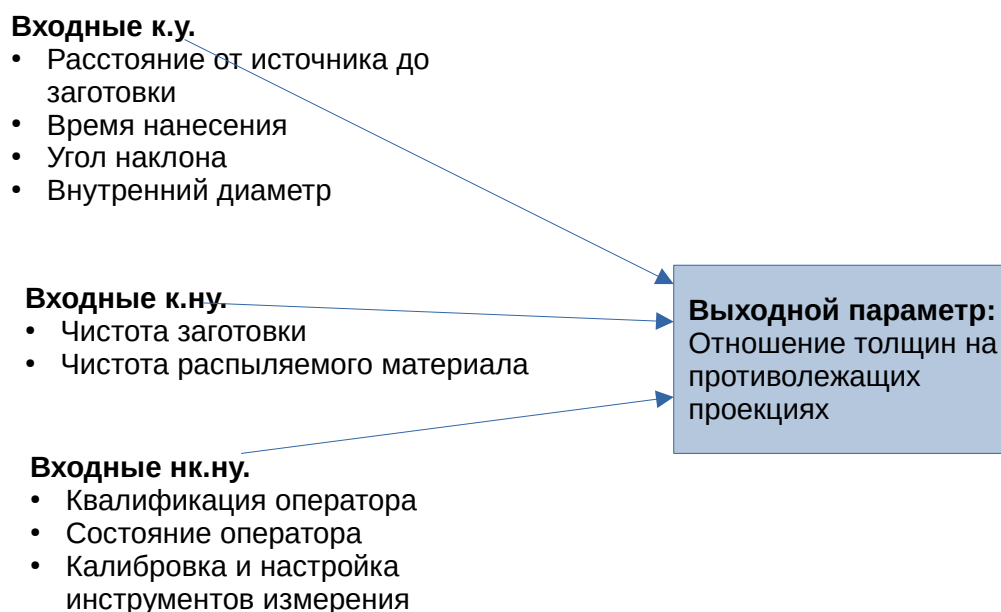


Рис. 3. Схема действия факторов

0.1.3 Выбор наиболее существенных входных и выходных параметров

0.1.3.1 Входные параметры

Поскольку задачей эксперимента является нахождение зависимости отношение толщин (4) напылённого материала от диаметра трубки и угла её наклона относительно источника, в качестве входных параметров были выбраны:

- Диаметр трубки;
- Угол наклона оси трубки относительно нормали к источнику.

0.1.3.2 Выходные параметры

Из-за наклона трубки толщина покрытия на противоположных сторонах будет отличаться, в связи с чем предлагается в качестве выходного параметра взять:

- Отношение толщин покрытий на противоположных стенках (какую долю от толщины покрытия на правой стороне составляет толщина покрытия на левой).

0.2 Построение схемы контроля

Моделирование будет производиться на компьютере и контроль будет осуществляться на нём.

1. Цилиндр высотой L разделяется на 10 равных участков, считается число попавших атомов;
2. Вычисляется средняя толщина покрытия на участке по формуле:

$$\delta = \frac{a \cdot d}{\frac{L}{10}}, \text{ где} \quad (1)$$

- a – количество попавших в данный интервал молекул;
- $\frac{L}{10}$ – длина данного интервала.

0.3 Проведение математического моделирования технологического процесса

0.3.1 Обоснование необходимости проведения процесса

Основной целью проведения эксперимента является разработка математической модели, адекватно описывающей влияние параметров процесса нанесения покрытий ИТО на значение коэффициента отражения. Проведение моделирования выбранного процесса необходимо для того, чтобы определить какие

из входных факторов наиболее существенно влияют на выходной параметр, а какие влияют на выходной параметр в меньшей степени. Математическое описание процесса, обычно, представляется в виде полинома:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{j \neq u}^k b_{ju} X_j X_l + \sum_{j=1}^k b_j X_j^2 + \dots, \text{ где} \quad (2)$$

— X – факторы эксперимента;

— Y – функция отклика.

0.3.2 Разработка плана эксперимента

1. В качестве метода исследования процесса выбран полный факторный эксперимент (ПФЭ). В этом случае учитывается влияние на функцию отклика исследуемого процесса не только каждого рассматриваемого в эксперименте фактора в отдельности, но и их взаимодействий.
2. Планирование эксперимента начнём с предположения о том, что модель имеет вид полинома первого порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j X_j + \sum_{j \neq u}^k b_{ju} X_j X_l \quad (3)$$

3. Определение числа опытов:

$$N = u^k = (1 + 1)^2 = 4, \text{ где} \quad (4)$$

— u – число, на единицу большее порядка полинома

— k – число исследуемых факторов

4. Для линейной модели и 2 факторов достаточно будет провести 4 опыта, модель будет иметь вид:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \text{ где} \quad (5)$$

- b_0 – значение функции отклика в центре плана;
- b_1, b_2 – характеристика степени влияния соответствующих факторов на функцию отклика;
- b_{12} – характеристика влияния взаимодействия факторов.

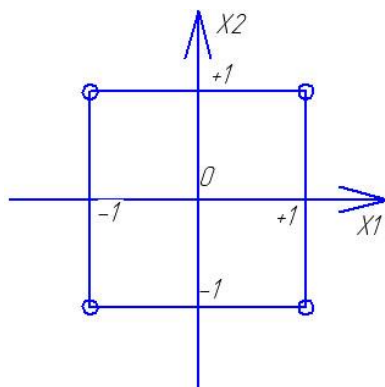


Рис. 4. Геометрическое изображение экспериментальных точек ПФЭ

5. Были выбраны следующие диапазоны варьирования факторов:

Уровень	Угол наклона оси трубки, град	Диаметр трубки, мм	В безразмерной системе координат
Верхний	6	30	+1
Нижний	4	20	–1

Таблица 1. Диапазоны варьирования входных факторов

6. В качестве центра плана принимается центр исследуемой области. Значения входных параметров в центре плана:

- Угол наклона оси трубки $\phi = 5^\circ$;
- Диаметр трубки $d = 25$ мм.

7. Выходной параметр по **0.1.3.2** измеряется в процентах.

0.3.3 Построение математической модели

Матрица планирования эксперименты имеет вид:

№	x_1	x_2	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	\bar{Y}_i	S_i^2
1	4	20	1	-1	-1	1	86.17	84.34	82.82	80.43	75.6	75.52	74.92	74.8	75.35	75.53	78.55	19.75
2	6	20	1	1	-1	-1	78.66	71.49	70.17	68.43	65.82	65.12	66.66	64.85	65.85	66.02	68.31	18.12
3	4	30	1	-1	1	-1	88.3	86.75	85.26	82.65	82.31	82.13	82.08	82.62	82.14	82.79	83.7	5.05
4	6	30	1	1	1	1	82.83	78.04	75.93	75	74.52	74.92	73.99	74.5	74.01	74.86	75.86	7.39

Таблица 2. Матрица планирования ПФЭ

№	x_1	x_2	X_0	X_1	X_2	X_1X_2	Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9	Y_{10}	\bar{Y}_i	S_i^2
5	6	27.5	1	1	0.5	0.5	81.01	76.09	74.10	72.98	73.33	72.34	72.81	72.11	73.02	73.14	74.09	7.15

Таблица 3. Дополнительный опыт для определения дисперсии адекватности

Для исключения влияния систематических погрешностей эксперимент проводился в случайном порядке.

0.3.4 Обработка результатов эксперимента

0.3.4.1 Выборочное среднее и дисперсия

Поскольку в каждом опыте было проведено 10 параллельных наблюдений (отношение толщин на десяти интервалах), определим:

1. **Выборочное среднее:**

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{l=1}^n Y_{il}}{n} \quad (6)$$

2. **Выборочная дисперсия** (число степеней свободы определяется число параллельных наблюдений в каждом опыте):

$$S_i^2 = \sum_{l=1}^n \frac{(Y_{il} - \bar{Y}_i)^2}{n - 1} \quad (7)$$

0.3.4.2 Проверка эксперимента на воспроизводимость

Проверку на воспроизводимость определим по критерию Кохрена:

1. **Экспериментальное значение критерия Кохрена:**

$$G_9 = \frac{\max(S_i^2)}{\sum_{i=1}^N S_i^2} = \frac{19.75}{19.75 + 18.12 + 5.05 + 7.39} = 0.39 \quad (8)$$

2. **Критическое значение критерия Кохрена:**

$$G_{кр} = G(\beta = 0.05, N = 4, n = 10) = 0.5, \text{ где} \quad (9)$$

— β – уровень значимости;

— N – число проведённых опытов;

— n – число параллельных наблюдений.

3. Сравнение экспериментального и критического:

$$G_{\text{э}} < G_{\text{кр}} \quad (10)$$

Таким образом дисперсии являются однородными, а эксперимент – воспроизводимым.

0.3.4.3 Определение коэффициентов полинома

Коэффициенты полинома вычисляются по формуле:

$$b_j = \frac{\sum_{i=1}^N X_{ji} \bar{Y}_i}{N} \quad (11)$$

b_0	b_1	b_2	b_{12}
76.61	−4.52	3.18	0.60

Таблица 4. Значения коэффициентов полинома

0.3.4.4 Оценка значимости коэффициентов

Незначимость коэффициента может быть вызвана следующими причинами:

- интервал варьирования соответствующей переменной мал,;
- уровень базового режима по данной переменной близок к точке частного экстремума;
- данный фактор не влияет на функцию отклика.

Проведём оценку значимости коэффициентов:

1. **Дисперсия воспроизводимости** ((среднее арифметическое группы выборочных дисперсий (т.е. дисперсий функции отклика по каждому опыту))):

$$S^2(Y) = \frac{\sum_{i=1}^N S_i^2}{N} = 12.57 \quad (12)$$

2. **Дисперсия ошибки определения коэффициента:**

$$S^2(b_j) = \frac{S^2(Y)}{nN} = \frac{12.57}{10 \cdot 4} = 0.31 \quad (13)$$

3. **Оценка значимости по критерию Стьюдента**, значение которого рассчитывается по формуле:

$$t_j = \frac{|b_j - 0|}{\sqrt{S^2(b_j)}} \quad (14)$$

4. **Критическое значение критерия Стьюдента:**

$$t_{кр} = t(\beta = 0.05, \nu = N(n - 1)) = t(0.05, 36) = 2.03 \quad (15)$$

5. **Отбрасывание незначимых коэффициентов:**

	b_0	b_1	b_2	b_{12}
t_j	243.67	14.38	10.11	1.91
$t_{кр}$	2.03	2.03	2.03	2.03

Таблица 5. Критерий Стьюдента

Из табл. 5 отбрасываем b_{12} как незначимый.

6. **Окончательный вид модели.** Из (5) и табл. 5:

$$Y = 76.61 - 4.52X_1 + 3.18X_2 \quad (16)$$

0.3.4.5 Проверка модели на адекватность

1. Для оценки адекватности модели необходимо определить **значения функции отклика** в каждом опыте согласно математической модели (16).

\hat{Y}_1	\hat{Y}_2	\hat{Y}_3	\hat{Y}_4
77.95	68.91	84.30	75.26

Таблица 6. Значения функции отклика, рассчитанные по математической модели

2. **Дисперсия адекватности** (оценка отклонения, предсказанного моделью значения выходного параметра (функции отклика) от результатов эксперимента в каждой точке факторного пространства):

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{N - \alpha_{\text{зн}}} n = 14.38, \text{ где} \quad (17)$$

— $\alpha_{\text{зн}} = 3$ – число значимых коэффициентов в полиноме;

— n – число параллельных измерений повторений.

3. **Проверка на адекватность при помощи критерия Фишера.** Сравним дисперсию адекватности (17) с дисперсией воспроизводимости (12):

$$F_9 = \frac{\max(S_{\text{ад}}^2, S^2(Y))}{\min(S_{\text{ад}}^2, S^2(Y))} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S^2(Y)} = \frac{14.38}{12.57} = 1.14 \quad (18)$$

4. **Критическое значение критерия Фишера:**

$$F_{\text{кр}} = F(\beta, N(n-1), N - \alpha_{\text{зн}}) = F(0.05, 36, 1) = 4.11 \quad (19)$$

5. **Сравнение экспериментального и критического:**

$$F_9 < F_{\text{кр}} \Rightarrow \text{модель адекватна} \quad (20)$$

Таким образом, полученная модель имеет вид, показанный в (16)

0.4 Перерасчёт с другим значением критерия Стьюдента

1. В разделе 0.3.4.4 в п.5 коэффициент, отвечающий за взаимодействие факторов был отброшен в связи с выбором уровня значимости $\beta = 0.05$.

Однако, если принять уровень значимости $\beta = 0.1$, значения критерия Стьюдента будет:

$$t_{\text{кр}} = t(\beta = 0.1, \nu = N(n - 1)) = t(0.1, 36) = 1.69 \quad (21)$$

2. Мы получим **таблицу 5** в изменённом виде:

	b_0	b_1	b_2	b_{12}
t_j	243.67	14.38	10.11	1.91
$t_{\text{кр}}$	1.69	1.69	1.69	1.69

Таблица 7. Критерий Стьюдента с $\beta = 0.1$

3. **Модель** примет вид, отличный от (16):

$$Y = 76.61 - 4.52X_1 + 3.18X_2 + 0.59X_1X_2 \quad (22)$$

4. Необходимо будет провести **дополнительный опыт**, поскольку число значимых коэффициентов $\alpha_{\text{зн}}$ стало равно число проведённых опытов. Предлагается провести опыт в центре плана. Результаты опыта см. в таблице 3.

5. Таблица 6 примет вид:

\hat{Y}_1	\hat{Y}_2	\hat{Y}_3	\hat{Y}_4	\hat{Y}_5
78.54	68.31	83.70	75.86	73.97

Таблица 8. Значения функции отклика, рассчитанные по математической модели

6. **Дисперсия адекватности:**

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Y}_i - \hat{Y}_i)^2}{N - \alpha_{\text{зн}}} n = 0.15 \quad (23)$$

Дисперсия адекватности получилась меньше, чем в (17), поскольку значения выходных параметров во всех точках кроме центральной полученные по модели и по опыту совпали.

7. **Проверка на адекватность** (проверка с дисперсией воспроизводимости (12)):

$$S_{\text{ад}}^2 < S^2(Y) \Rightarrow \text{модель адекватна} \quad (24)$$

0.5 Выводы

0.5.1 Выводы по модели с 3 значимыми коэффициентами

Сравнение дисперсии адекватности и дисперсии воспроизводимости показало, что полученная математическая модель адекватно описывает процесс нанесения покрытий на внутреннюю часть трубки.

Проанализировав полученную модель, можно сделать следующие выводы:

1. Угол наклона оси трубки и её диаметр влияют на отношение толщин покрытий на противоположащих стенках;
2. Влияние фактора 1 (угол наклона ϕ) более значимо, чем влияние фактора 2 (диаметр трубки d);
3. Выявлено, что эффект взаимодействия двух факторов является незначимым (эффект взаимодействия был бы значимым при другом значении уровня значимости).

0.5.2 Выводы по модели с 4 значимыми коэффициентами

Полученная математическая модель адекватно описывает зависимость, отношения толщин на левой и правой проекции трубки. Значение дисперсии

адекватности, полученной с 3 значимыми коэффициентами (17) получилось больше, чем в случае с 4 значимыми коэффициентами (23).