



УДК 621.793.74: 303.447.3

**Г.И. Трифонов**  
Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил  
«Военно-воздушная академия имени  
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
г. Воронеж, Россия  
E-mail: trifonov\_gi@mail.ru  
Дата поступления 09.12.2022

## ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ НАПЫЛЕНИЯ

### Аннотация

В работе показана возможность применения математического планирования эксперимента при исследовании пористости покрытий, полученных при применении технологии плазменного напыления. Экспериментально получены уравнения регрессии, позволяющие регулировать основные свойства наносимых покрытий в зависимости от режимов процесса напыления. По итогу проведенного планирования получены адекватные и рабочие уравнения зависимости пористости покрытия, во-первых, от силы тока и гранулометрического состава напыляемого функционального порошка, во-вторых, от дистанции и угла напыления. Составлены и представлены графики полученных зависимостей.

**Ключевые слова:** плазменное напыление, покрытие, пористость, сила тока, дистанция и угол напыления, гранулометрический состав порошка, регрессионный анализ, многофакторный эксперимент.

### Введение

Известно, что на ремонтно-восстановительных производствах весьма активно эксплуатируется в производственных целях специальное оборудование [1]. В ходе активной эксплуатации происходит интенсивный износ рабочих агрегатов и механизмов, при этом поверхности деталей могут достигать такого состояния, при котором будет необходимо их восстанавливать путем использования специальных технологий, например, таких как плазменное напыление, лазерное упрочнение, нанесение гальванических покрытий и т.д. Следовательно, проведение капитального ремонта производственного оборудования предопределяется конкретным периодом времени его эксплуатации, причем проведение ремонтных работ с экономической точки зрения вопроса обосновано возможностью использования до 30 % деталей без значительных дефектов и до 60 % деталей, которые после оценки эксперта можно восстановить. Так, исследуя современные производственные линии и статистические данные заводских предприятий,

был сделан вывод о том, что затраты на деталь, которая не требует ремонта, составляют до 10 % от стоимости новой (запасной) детали [2]. При этом основываясь на экономической обоснованности проведения восстановительных операций, затраты могут составлять до 70 % от стоимости новой (запасной) детали. Необходимо отметить, что вторичная эксплуатация деталей после их восстановления позволяет значительно экономить производственные средства и ресурсы.

В России в рамках программы импортозамещения уделяется большое внимание проблемам восстановления и ремонта машин и специального оборудования. При восстановительных операциях уделяется повышенное внимание таким характеристикам деталей и машин, как долговечность и надежность. Технологии восстановления развиваются на основе передовой отечественной науки и техники. Одной из самых экономически выгодных и универсальных технологий, направленных

на восстановление и упрочнение изношенных поверхностей деталей машин, является плазменное напыление [3].

Функциональные покрытия, нанесенные с помощью технологии плазменного напыления, обладают значительной пористостью, что оказывает существенное влияние их на физико-механические и эксплуатационные свойства [3-5]. Следовательно, возможность регулирования указанного параметра с помощью вариации величин технологических режимов имеет важное практическое значение. Однако, на процесс формирования покрытий оказывает большое существенное число факторов, что создает сложность получения зависимостей между пористостью и режимами процесса напыления [6].

В данной работе для установления закономерностей влияния таких режимов напыления как сила тока, дистанция и угол напыления, а также такой параметр наносимого материала как гранулометрический состав порошка, на пористость формируемого покрытия использовалось математическое планирование экспериментов. Поскольку многофакторные системы с применением регрессионного анализа позволяют существенно сократить число опытов, получить количественную оценку влияния каждого режимного параметра исследуемого процесса на пористость покрытия, а также оценить точность полученных результатов и ослабить влияние случайных ошибок.

**Цель исследования.** Исследование физико-механического параметра покрытия, такого как пористость, в зависимости от назначаемых технологических параметров: силы тока, дистанции и угла напыления, а также от параметра материала напыления – гранулометрического состава функционального порошка. Проведение экспериментальных исследований и регрессионного анализа влияния указанных технологических режимов и параметров на пористость формируемого покрытия.

### **Материалы исследования**

Проводимые экспериментальные исследования проводилось с использованием порошка окиси алюминия, наносимого на

подложку образцов, изготовленных по ГОСТ 103-2006 толщиной 20 мм и шириной 75 мм из стали 12Х18Н10Т. При этом напыление производилось с помощью плазмотрона ПНК-50 с межэлектродной вставкой, входящего в комплект установки УПУ-3Д.

Пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания по ГОСТ 15139 (СТ СЭВ 891), сущность которого заключается в сравнении масс одинаковых объемов испытуемого вещества и жидкости известной плотности [7, 8]. Взвешивание проводили на аналитических весах ВЛА-200 (АДВ-200М).

Обработка экспериментальных данных по определению пористости нанесенного материала, описывающих и оценивающих процесс нанесения покрытий плазменным напылением, производится с помощью методов статистической обработки [9]. При этом использовалось планирование многофакторного эксперимента, поскольку многофакторный план эксперимента позволяет получить уравнения с независимыми оценками всех коэффициентов, входящих в уравнение и определяющих оптимальные условия необходимого нам процесса, что и является конечным результатом проводимых исследований [10].

При подборе оптимальных технологических режимов и материала для плазменного напыления целесообразно выяснить, какое воздействие оказывают на физико-механические и эксплуатационные свойства получаемого покрытия следующие технологические режимы: сила тока дуги плазмотрона, дистанция и угол наклона плазмотрона при осуществлении напыления, а также фракционный состав материала напыления. При проведении данных исследований сила тока изменялась в пределах 300-400 (А); дистанция напыления в пределах 100-150 (мм), угол напыления в пределах 70-90 (град), и гранулометрический состав наносимого порошка в пределах 60-100 (мкм). Остальные параметры данного процесса во всех опытах поддерживались постоянными [6]: напряжение дуги –  $U=60-62$  (В); расход плазмообразующих газов –  $g_1=1,8-2$  (м<sup>3</sup>/ч); соотношение газов в смеси – 75 % N<sub>2</sub>

+ 25 % Ar; расход транспортирующего газа –  $g_2=0,2$  (м<sup>3</sup>/ч); расход порошка –  $G=1$  (кг/ч).

В данном случае необходимо проанализировать влияние сразу нескольких факторов на один, который может существенным образом повлиять на физико-механические свойства покрытия. С данной целью используем планирование многофакторного эксперимента. В ходе проведения регрессионного анализа будут реализованы простые двухуровневые планы. Такие модели описывают достаточно верно изучаемый процесс только в указанных диапазонах изменения факторов. А за пределами диапазонов линейные уравнения будут неверно определять характер поверхности отклика. Поэтому для более точного описания исследу-

емого процесса дополнительно будет использоваться план второго порядка – более сложный план. План второго порядка позволяет получить модели в виде полного квадратного уравнения (полинома второй степени) и определить оптимальные условия функционирования процесса на заключительном этапе исследования [9-11].

На первом этапе для сокращения числа опытов были отобраны те факторы, которые оказывают наибольшее влияние на пористость плазменных покрытий и устанавливаются на требуемом уровне с заданной точностью. В таблице 1 представлены натурные и кодированные значения выбранных факторов, а также определены уровни и интервалы варьирования.

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы варьирования

Варьируемые факторы	Обозначение фактора		Интервал варьир.	Нижний уровень	Основной уровень	Верхний уровень
	натуральн.	кодированн.				
Дистанция напыления	$L$ , мм	$X_1$	25	100	125	150
Ток дуги	$I$ , А	$X_2$	50	300	350	400
Гранул. состав порошка	$Q$ , мкм	$X_3$	20	60	80	100
Угол напыления	$\alpha$ , град.	$X_4$	10	70	80	90

Таблица 2

Результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента

Номер опыта	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$
1	15,8	17,1	17,2
2	15,6	13,9	14,9
3	15,1	16,6	16,2
4	13,7	12,6	14
5	14,6	15,6	16,1

Необходимо отметить, что пределы изменения переменных факторов ограничивали возможностью применяемого оборудования, физико-химическими свойствами используемых материалов, и выбирали из соображений оптимальности ведения процесса.

#### Результаты исследования и их обсуждение

*Исследование влияния дистанции и угла напыления на пористость.* Рассмотрим план полного факторного эксперимента ПФЭ 2<sup>n</sup>, конкретнее ПФЭ 2<sup>2</sup>, так как факторов у нас будет два – это угол наклона плазмотрона и дистанция напыления. Центр эксперимента соответствует нуле-

вому уровню (основной уровень), следующие уровни определяются с помощью интервалов варьирования. Опыты первой части плана проводились при сочетании величин исследуемых факторов на двух уровнях: верхнем (+1) и нижнем (–1). В таблице 2 представлены результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента типа  $N=2^2$ . Экспериментальные значения открытой пористости, полученные в каждом параллельном опыте (таблица 2), обозначены  $y_1, y_2, y_3$ .

Перед построением регрессионного уравнения необходимо проанализировать данные эксперимента с помощью критерия Кохрена [12], то есть оценить дисперсию результатов наблюдений (ошибок наблюдений). Рассчитанный критерий Кохрена

(0,29) сравниваем с выбранным значением из таблицы для уровня значимости  $\alpha=0,05$  с числом степеней свободы 2 и количеством наблюдений 4. Табличный критерий Кохрена (0,7679) больше рассчитанного, следовательно, процесс и опыты воспроизводимы. Иначе говоря, результаты наблюдений независимы, подчинены нормальному закону распределения, имеют одну и ту же дисперсию, и математические ожидания значений (отклика выходной переменной) будут равны истинным значениям целевой функции. Уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные и удовлетворительно характеризующее внутреннюю область изучаемого факторного пространства

$$p_1 = 15,58 - 0,48L - 1,13\alpha. \quad (1)$$

Полученное уравнение регрессии (1) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера  $F_{рас} = 2,974$  меньше табличного  $F_{табл}=5,32$  [9, 10] ( $F_{рас} < F_{табл}$ ). Критерий Стьюдента составил 2,31. Уравнение (1) можно считать оптимальной математической моделью, так как оно работоспособно, и адекватно.

Графическая интерпретация исследуемых зависимостей представлена на рисунках 1 и 2.

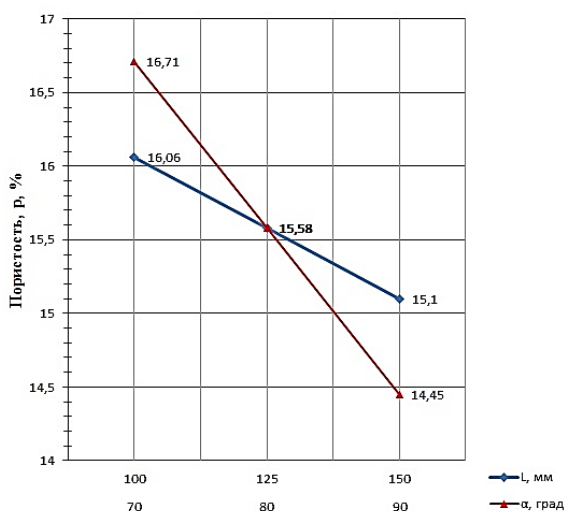


Рисунок 1. График зависимостей пористости покрытия от технологических параметров плазменного напыления (угла и дистанции напыления)

Из рисунка 2 видно, что по итогу исследований экспериментальные данные практически совпадают с фактическими показателями. Максимальная погрешность по

плану ПФЭ  $2^2$  составила 4 %, что говорит об адекватности и целесообразности проведенных исследований и расчетных операций [9, 10].

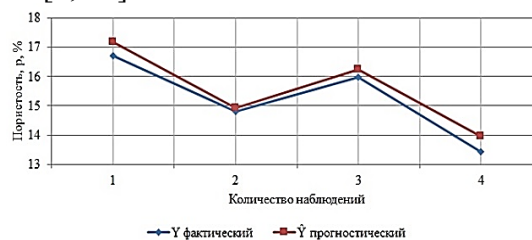


Рисунок 2. График зависимостей величины пористости от количества проводимых опытов (наблюдений)

### Исследование влияния силы тока и гранулометрического состава порошка напыления

Экспериментальные значения пористости, полученные в каждом параллельном опыте (таблица 3), обозначены  $y_4, y_5, y_6$ .

Рассчитанный критерий Кохрена (0,32) сравниваем с выбранным значением из таблицы для уровня значимости  $\alpha=0,05$  с числом степеней свободы 2 и количеством наблюдений 4. Табличный критерий Кохрена (0,7679) больше рассчитанного, следовательно, процесс и опыты воспроизводимы. Иначе говоря, результаты наблюдений независимы, подчинены нормальному закону распределения, имеют одну и ту же дисперсию, и математические ожидания значений (отклика выходной переменной) будут равны истинным значениям целевой функции.

Таблица 3

Результаты опытов двухфакторного (дистанция и угол напыления) эксперимента

Номер опыта	$y_4$	$y_5$	$y_6$
1	15,6	13,9	14,9
2	14,6	15,6	16,1
3	16,7	17,8	17,4
4	18,7	18,5	17,2
5	15,8	17,1	17,2

Уравнение регрессии, адекватно описывающее экспериментальные данные и

удовлетворительно характеризующее внутреннюю область изучаемого факторного пространства:

$$p_2 = 16,4 + 0,9I - 0,25Q. \quad (2)$$

Полученное уравнение регрессии (2) адекватно описывает экспериментальные данные, так как расчетное значение критерия Фишера  $F_{рас} = 3,693$  меньше табличного  $F_{табл} = 5,32$  [9, 10] ( $F_{рас} < F_{табл}$ ). Критерий Стьюдента составил 2,23. Уравнение (2) можно считать оптимальной математической моделью, так как оно работоспособно, и адекватно.

Графическая интерпретация исследуемых зависимостей представлена на рисунках 3 и 4.

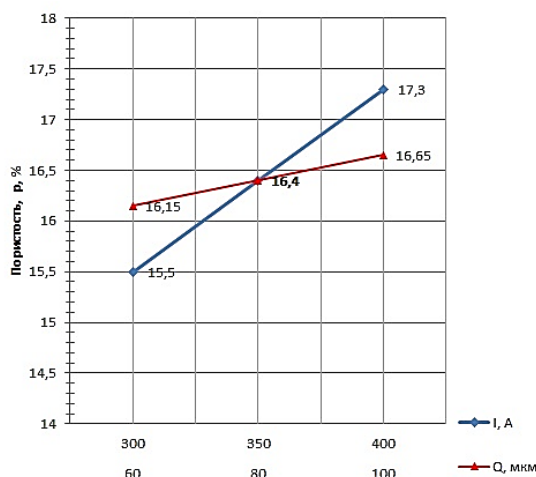


Рисунок 3. График зависимостей пористости покрытия от технологических параметров плазменного напыления (сила тока и гранулометрический состав порошка)

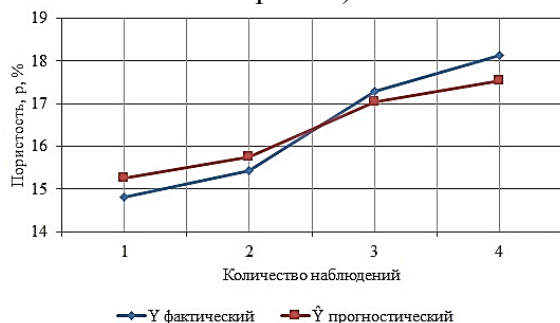


Рисунок 4. График зависимостей величины пористости от количества проводимых опытов (наблюдений)

Из рисунка 4 видно, что по итогу исследований экспериментальные данные практически совпадают с фактическими показателями. Максимальная погрешность по плану ПФЭ  $2^2$  составила 3,2 %, что говорит

об адекватности и целесообразности проведенных исследований и расчетных операций [9, 10].

## Выводы

Исследован физико-механический параметр покрытия, такой как пористость, в зависимости от назначаемых технологических параметров, таких как сила тока, дистанция и угол напыления, а также параметра материала напыления – гранулометрический состав порошка.

Проведен регрессионный анализ влияния технологических режимов и параметров на пористость формируемого покрытия, в частности, проведено планирование двухфакторных экспериментов для исследования зависимости пористости формируемого покрытия от дистанции и угла напыления, силы тока и гранулометрического состава порошка напыления.

Получены уравнения регрессии, описывающие влияние на пористость покрытия указанных технологических параметров. Составлены графики полученных зависимостей и графики, обосновывающий адекватность проводимых исследований согласно критериям Кохрена, Фишера и Стьюдента.

## Библиографический список

1. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин / В.И. Черноиванов В.И. // М.: Агропромиздат, 1989. – 334 с.
2. Лебедев В.А. Принципы разработки ответственных деталей с учётом их напряженного состояния в процессе обработки / В.А. Лебедев, А.С. Кукаренко // Перспективные направления развития финишных и виброволновых технологий: сборник трудов научного семинара технологов-машиностроителей. Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2021. – С. 510-513.
3. Соснин Н.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров / Н.Е. Соснин, С.А. Ермаков, П.А. Тополянский // СПб: Изд-во Поли-техн. ун-та, 2013. – 406 с.

4. Li R.I. Conditions for Forming a Uniform Polymeric Coating on the External Surface of a Rotating Cylinder. ISSN 1995\_4212, Polymer Science, Series D. Glues and Sealing Materials. 2016. Vol. 9. No. 1. – pp. 27-30.
5. Farrokhpanah A., Coyle T.W., Mostaghimi J. Numerical study of suspension plasma spraying // Journal of Thermal Spray Technology. 2017. V. 26. № 1-2. pp. 12-36. doi: 10.1007/s11666-016-0502-9.
6. Пузряков А.Ф. Исследование свойств плазменных покрытий на основе применения регрессионного анализа / А.Ф. Пузряков, И.Н. Кравченко, А.В. Коломейченко, И.Е. Пупавцев // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2015. № 10. – С. 28-32.
7. Mauer G., Schlegel N., Guignard A., Jarligo M.O. et al. Plasma spraying of ceramics with particular difficulties in processing // Journal of thermal spray technology. 2015. V. 24. №. 1–2. pp. 30-37. doi: 10.1007/s11666-014-0149-3.
8. Sharifullin S.N., Trifonov G.I., Vyachina I.N. Calculation of parameters of particles in a plasma jet and modeling of kinematic models of spraying of wear resistant material // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. V. 1058. (012047). doi: 10.1088/1742-6596/1058/1/012047.
9. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев, Ю.М. Плаксин // Москва: ДеЛи принт, 2005. – 296 с.
10. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский // Издание второе, переработанное и дополненное. М.: Наука, 1976. – 279 с.
11. Кукарских Л.А. Разработка математической модели теплофизического процесса сухого трения / Л.А. Кукарских, Г.И. Трифонов // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоемких технологических систем формирования и сборки изделий: сборник трудов научного симпозиума технологгов-машиностроителей. Донской государственный технический университет. Текст: электронный. Ростов-на-Дону: ДГТУ. 2021. – С. 241-245.
12. Ильин П.А. Использование критерия Кохрена для определения объема выборки данных при стендовых испытаниях на примере подшипниковых узлов дисковой бороны. Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. № 36. 2014. – С. 201-205.

---

*Information about the paper in English*

**G.I. Trifonov**

Air Force Military Educational and Scientific Center  
Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy  
Voronezh, Russia

E-mail: trifonov\_gi@mail.ru

Receipt date: December 09, 2022

MULTIPLE-FACTOR EXPERIMENTS APPLIED TO STUDY PROPERTIES OF COATINGS APPLIED BY PLASMA SPRAYING

**Abstract**

The paper describes a potential application of the mathematical experiment planning, when studying porosity of coatings applied by plasma spraying. The regression equations obtained by experiments contribute to controlling main properties of the applied coatings depending on spraying modes. The implemented planning resulted in appropriate and working equations, showing dependence between the coating porosity on, firstly, current and a granulometric composition of sprayed functional powder, and, secondly, distance and angle of spraying. The paper includes the calculated dependency diagrams.

**Keywords:** plasma spraying, coating, porosity, current, distance and angle of spraying, granulometric composition of powder, regression analysis, multiple-factor experiment.

---