

УДК 621.793.7

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ И ПАРМЕТРОВ ИГЛОФРЕЗЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ МАКСИМАЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ГАЗОПЛАМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ**

Полянський А.С., д.т.н., професор

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

Лузан С.А., к.т.н

Дерябкина Е.С., ассистент

*Украинская инженерно-педагогическая академия*

***Аннотация*** - установлено оптимальное количество оборотов иглофрезы, диаметр игловок, их длина и плотность расположения, обеспечивающие максимальную прочность сцепления газопламенного покрытия со стальной основой при комбинировании способа газопламенного напыления с иглофрезированием.

***Ключевые слова*** - газопламенное напыление, прочность сцепления, иглофреза, покрытие, основа.

*Постановка проблемы.* Тенденции развития современного машиностроения – увеличение мощности машин, используемых в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Это в свою очередь ставит задачу обеспечения эффективной защиты поверхности деталей машин и конструкций от износа и коррозии, поскольку применение традиционных материалов и методов химико-термического упрочнения не всегда удовлетворяет комплексу требований, предъявляемых к машинам и механизмам. Применение технологий нанесения защитных покрытий, среди которых газотермические процессы занимают значительное место, является одним из кардинальных путей решения данного вопроса.

Способ газопламенного напыления покрытий выгодно отличается от других газотермических процессов простотой, компактностью и мобильностью применяемого оборудования. Возможностью производить работы по восстановлению деталей непосредственно в производственных цехах и местах эксплуатации транспортной техники. Однако, существенным недостатком этого способа является недостаточная прочность сцепления напыленного покрытия с основой, что существенно

ограничивает его область применения по упрочнению новых и ремонту изношенных деталей транспортной техники.

*Анализ основных исследований и публикаций.* Современный этап развития газотермических способов напыления характеризуется совершенствованием технологии нанесения покрытий и комбинированием его с другими технологическими процессами для обеспечения возможности получения покрытий с требуемым уровнем свойств: прочностью сцепления покрытия с основой, пористостью, износостойкостью и др. Предпочтительным вариантом такого комбинирования является применение при напылении таких процессов, которые не вносят существенных изменений в схему процесса напыления покрытий.

Известны работы в этом направлении, выполненные в МГТУ имени Н.Э. Баумана по плазменному напылению покрытий [1]. Основные из них: нанесение покрытий путем наложения электрической дуги пульсирующей мощности, плазменное напыление с совмещенной электроискровой обработкой подложки, напыление покрытий с наложением колебаний на деталь. Однако, первые две технологии не применимы для газопламенного напыления, где в качестве источника тепла для расплавления напыляемого материала применяется смесь рабочего газа (ацетилен, пропан, водород) и кислорода. Наложение же колебаний на заготовку требует применения специальных вибраторов, причем различных в зависимости от массы и конфигурации детали, поскольку обработку необходимо производить на резонансных или близких к резонансным частотам.

*Формулировка целей статьи.* Целью исследования является определение оптимальной скорости обработки напыляемой поверхности и наносимых слоев, а также параметров иглофрезы (диаметр игловок, их длина и плотность расположения) при которых прочность сцепления напыленного покрытия с основой максимальная.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи исследования:

- разработать установку, обеспечивающую изменение скорости вращения иглофрезы и напыляемой детали;
- определить методику определения прочности сцепления покрытия с основой;
- произвести напыление опытных образцов при различных скоростях вращения иглофрезы и выполнить математическую обработку полученных результатов, определив обороты и параметры иглофрезы при которых обеспечивается максимальная прочность сцепления покрытия с основой.

*Основная часть.* Для проведения эксперимента были изготовлены цилиндрические образцы  $\varnothing 22$  мм,  $l=70$  мм из стали 45, на которые газопламенным способом наносилось покрытие из самофлюсующегося сплава порошком марки ПГ-10Н-01. Поверхность образцов

предварительно обрабатывалась иглофрезированием до  $Ra=6-7$  мкм. Процесс напыления осуществляли на разработанной установке, изменяя обороты вращения иглофрезы в интервале от 400 до 2000  $\text{мин}^{-1}$  при постоянной скорости вращения напыляемых образцов, равной 60  $\text{мин}^{-1}$  [2].

Оценку прочности сцепления покрытия с основой производили путем испытания на сдвиг. Испытания на сдвиг осуществляли за счет создания касательных напряжений на границе раздела покрытия с основой. Напряжения  $\sigma_{сц}$ , возникающее в покрытии касательно к поверхности, выражаются уравнением

$$\sigma_{сц} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot l},$$

где  $P$  - усилие срезающей нагрузки;

$D$  - диаметр цилиндрического образца;

$l$  - длина напыляемой поверхности.

Для достижения поставленной цели определения оптимальной скорости обработки напыляемой поверхности и наносимых слоев, а также параметров иглофрезы воспользуемся приемами, которые существуют в теории планирования эксперимента [3] и позволяют найти зависимость прочности в виде полиномиальной модели. Так как нам необходимо найти оптимальные значения факторов то область оптимума должна описываться как минимум уравнением второго порядка

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{j,i=1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

Для получения математической модели области оптимума в виде уравнения (1) используются специальные планы [4]. Применим композиционный план ортогонального эксперимента для четырёх факторов ( $X_1$  - диаметр иголок, мм;  $X_2$  - свободная длина иглы, мм;  $X_3$  - количество оборотов металлической щетки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $X_4$  - плотность расположения игл, шт/ $\text{см}^2$ ), который имеет вид, приведённый в таблице 1.

Адекватность уравнения (1) определяется с помощью критерия Фишера [3]

$$F_p = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2}, \quad (13)$$

где условие адекватности  $F_p < F_T(\alpha, N - l, N_0 - 1)$ ;

$F_T$  - табличное значение критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha$ .

Для нахождения экстремальных значений  $x_i$  по модели (1) с оставшимися членами необходимо найти частные производные этой модели и приравнять их к нулю.

Таблица 1 - Композиционный план ортогонального эксперимента для четырёх факторов

Наименование		Факторы				Переменное состояние у
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
Нулевой уровень		65	50	1650	30	
Интервал варьирования		30	20	850	10	
Опыты	$x_0$	План				
		$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	
1	+1	-1	-1	-1	-1	22
2	+1	+1	-1	-1	-1	22,8
3	+1	-1	+1	-1	-1	21
4	+1	+1	+1	-1	-1	21,5
5	+1	-1	-1	+1	-1	23,2
6	+1	+1	-1	+1	-1	26,1
7	+1	-1	+1	+1	-1	21,8
8	+1	+1	+1	+1	-1	22,6
9	+1	-1	-1	-1	+1	22,3
10	+1	+1	-1	-1	+1	23,3
11	+1	-1	+1	-1	+1	21,5
12	+1	+1	+1	-1	+1	21,9
13	+1	-1	-1	+1	+1	23,6
14	+1	+1	-1	+1	+1	26,8
15	+1	-1	+1	+1	+1	22,3
16	+1	+1	+1	+1	+1	23,1
17	+1	-1,414	0	0	0	23,2
18	+1	+1,414	0	0	0	26,6
19	+1	0	-1,414	0	0	26,4
20	+1	0	+1,414	0	0	23,6
21	+1	0	0	-1,414	0	23,5
22	+1	0	0	+1,414	0	26,7
23	+1	0	0	0	-1,414	25,5
24	+1	0	0	0	+1,414	26,5
25	+1	0	0	0	0	26,4

Решая полученную систему, находятся стационарные точки  $x_i^*$ . Подставляя эти значения  $x_i^*$  во вторые частные производные модели (1) с оставшимися членами и вычисляя определители

$$a_{11}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{vmatrix}, \quad (14)$$

где элементами служат значения вторых частных производных в стационарных точках

$$\tilde{y}''_{x_i x_k}(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) = a_{ik} \quad (i, k = 1, 2, \dots, n),$$

определяя знаки этих определителей.

По знакам определителей (14) можно сказать есть экстремум или нет [4]. Если все определители (14) положительны, то в стационарных точках достигается минимум. В том случае, если имеются чередующиеся знаки, начиная с минуса, то в стационарных точках  $x_i^*$  имеется максимум функции регрессии.

Используя данную теорию, найдём оптимальные значения параметров металлической щётки и скорость её вращения для получения максимальной прочности сцепления газопламенного покрытия.

Предварительно проделанные эксперименты показали, что такая случайная характеристика как прочность сцепления приближённо может быть описана нормальным распределением, и область максимума прочности сцепления может находиться при значениях диаметра игловок  $x_1$  от 0,35 до 0,95 мм со свободными длинами иглы  $x_2$  от 30 до 70 мм и при количестве оборотов  $x_3$  от 800 до 2500 мин<sup>-1</sup>, а также при плотности расположения от 20 до 40 шт/см<sup>2</sup>. Имея такие данные, были рассчитаны нулевой уровень и интервал варьирования, а также значения в звёздных точках. Проведя эксперименты в этих точках по плану, приведенному в табл. 1, были получены значения прочности сцепления покрытия с основой.

Для данного центрального композиционного ортогонального планирования второго порядка по четырём факторам в системе Mape была создана программа, позволяющая решить задачу по определению максимальной прочности покрытия. Использование данной программы позволило не только построить многофакторную регрессионную модель второго порядка, но оценить значимость коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента при уровне значимости 0,05 и числе степеней свободы  $N_0 - 1 = 3$ , проделав предварительно 4 эксперимента в нулевом уровне результаты которых: 25,4 МПа, 26,0 МПа, 26,7 МПа, 26,5 МПа.

Данные эксперименты позволили найти ошибку опыта (10)  $s_0^2=0,336667$ , дисперсии коэффициентов регрессии (6), (7), (8), (9) и расчётные значения критерия Стьюдента  $t_{ij}$ .

$$\begin{aligned} t_0 &= 204,815; & t_1 &= 5,861; & t_2 &= -7,075; & t_3 &= 6,831; & t_4 &= 2,009; \\ t_{12} &= -2,327; & t_{13} &= 2,154; & t_{14} &= 0,172; & t_{23} &= -2,327; & t_{24} &= 0,0; \\ t_{34} &= 0,172; & t_{11} &= -6,071; & t_{22} &= -5,827; & t_{33} &= -5,583; & t_{44} &= -3,390; \end{aligned}$$

Из проведенного исследования следует, что при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  коэффициенты,  $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$ , значимы, так как для них  $|t_i| > t_T = 3,18$ , остальные незначимы.

С помощью программы данная модель была приведена к обычной форме записи:

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= -0,49206 + 21,06752x_1 + 0,32232x_2 + 0,00638x_3 + 0,43316x_4 - 0,05625x_1x_2 + \\ & 0,00123x_1x_3 + 0,00833x_1x_4 - 0,00002x_2x_3 + 0,000003x_3x_4 - 13,84025x_1^2 - 0,00299x_2^2 - \\ & 0,000002x_3^2 - 0,00696x_4^2. \end{aligned}$$

Данная модель была проверена на адекватность с помощью критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha = 0,05$ . Для этого были найдены значения функции  $\tilde{y}$  во всех 25 точках данного плана. Определена дисперсия адекватности уравнения регрессии (12) при числе членов в уравнении регрессии  $l=14$  и  $N=25$ . Программный расчёт показал, что наша нелинейная модель  $\tilde{y}$  адекватна, так  $F_p < F_T$  ( $0,97 < 8,79$ ). Отсюда следует, что данную модель можно применить для нахождения оптимальных точек, в которых достигается максимум прочности сцепления. Нахождение оптимальных точек с использованием составленной программы в системе Maple позволило найти эти точки, а также найти значение  $\tilde{y}$  в этих точках и показать с использованием значений определителей (14) в этих точках, что найденные точки есть точки максимума. И так, нами были найдены оптимальные значения диаметра игловок  $x_1 = 0,78$  мм, со свободной длиной иглы  $x_2 = 39,6$  мм при оптимальном количестве оборотов  $x_3 = 2097$  мин<sup>-1</sup> и с плотностью расположения  $x_4 = 32$  шт/см<sup>2</sup>. Данная максимальная прочность сцепления покрытия с основой при указанных оптимальных значениях составляет  $y_{\max} = 27,86$  МПа.

Ниже на рис. 1 - 4 приведены зависимости прочности сцепления покрытия с основой от двух факторов. Из анализа рис. 1-4 видно, что есть точка максимума прочности сцепления покрытия с основой, зависящая от параметров  $x_1, x_2, x_3, x_4$ .

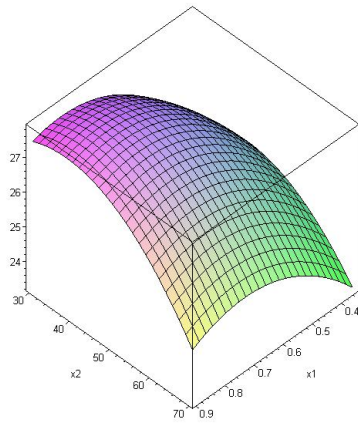


Рис. 1

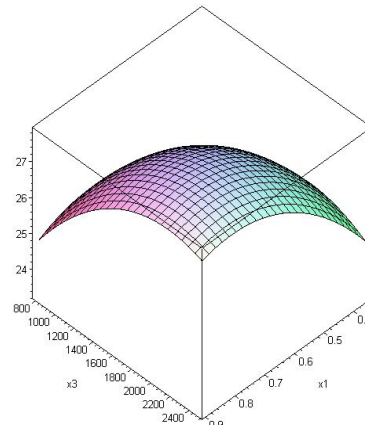


Рис. 2

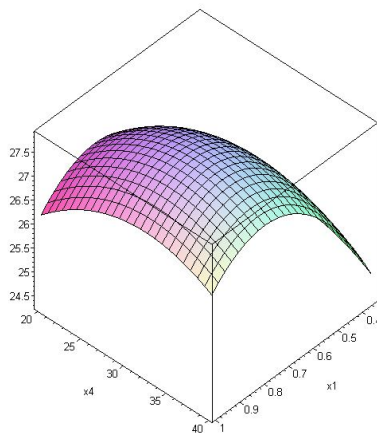


Рис. 3

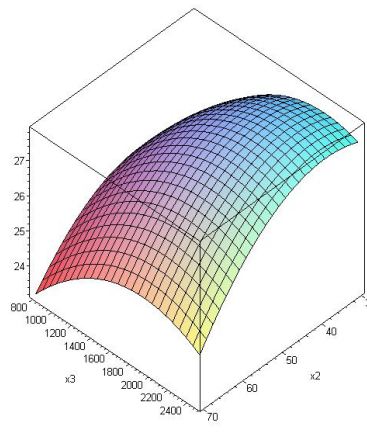


Рис. 4

Рис. 1. Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от диаметра  $x_1$  и свободной длины иголок  $x_2$  при оптимальном количестве оборотов иглофрезы  $x_3 = 2097 \text{ мин}^{-1}$  и с плотностью расположения игл  $x_4 = 32 \text{ шт/см}^2$ .

Рис. 2 - Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от диаметра иголок  $x_1$  и оборотов иглофрезы  $x_3$  при оптимальной свободной длине иглы  $x_2 = 39,6 \text{ мм}$  и с плотности расположения игл  $x_4 = 32 \text{ шт/см}^2$ .

Рис. 3 - Зависимость прочности сцепления покрытия с основой при от диаметра  $x_1$  и плотности расположения иголок  $x_4$  при оптимальном количестве оборотов иглофрезы  $x_3 = 2097 \text{ мин}^{-1}$  и свободной длиной иглы  $x_2 = 39,6 \text{ мм}$ .

Рис. 4 - Зависимость прочности сцепления покрытия с основой от свободной длины иголок  $x_2$  и оборотов иглофрезы  $x_3$  при оптимальном значении диаметра иголок  $x_1 = 0,78 \text{ мм}$  и плотности расположения иголок  $x_4 = 32 \text{ шт/см}^2$ .

*Выводы.* Определена оптимальная скорость обработки напыляемой поверхности и покрытия, а также параметры иглофрезы, обеспечивающие максимальную прочность сцепления газопламенных покрытий с основой.

## Литература

1. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу "Технология конструкций из металлокомпозитов"/ А.Ф. Пузряков - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. - 360 с.
2. Лузан С.А. Повышение прочности сцепления газопламенных покрытий/ С.А. Лузан, Е.С. Дерябкина//Сборник докладов IX Международного научно-технического конгресса термистов и материаловедов. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов. - Т. 1. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2008. - С. 334-337.
3. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В.Маркова, Ю.В. Грановский М.: Наука, 1976. - 312 с.
4. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях/ М.С. Винарский, М.В. Лурье. - Киев: Техника, 1975. - 168 с.

**ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ШВИДКОСТІ ОБРОБКИ  
ПОВЕРХНІ І ПАРАМЕТРІВ ГОЛКОФРЕЗИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ  
МАКСИМАЛЬНУ МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ГАЗОПОЛУМ'ЯНИХ  
ПОКРИТТІВ**

Полянський О.С., Лузан С.О., Дерябкина Є.С.

*Анотація*

Встановлена оптимальна кількість оборотів голкофрези, діаметр голок, їх довжина і щільність розташування, забезпечуючі максимальну міцність зчеплення газополум'яного покриття із сталеву основою при комбінуванні способу газополум'яного напылення з голкофрезеруванням.

**DETERMINATION OF OPTIMUM SPEED OF TREATMENT OF  
SURFACE AND PARAMETER OF MILLING BY A NEEDLE,  
PROVIDING MAXIMAL DURABILITY OF COUPLING OF  
GAZOFLAME COVERAGES**

A. Polyanskiy, S. Luzan, E. Deryabkina

*Summary*

The optimum amount of turns of milling by a needle, diameter of needles, their length and closeness of location, is set, providing maximal durability of coupling of gazoflame coverage with steel basis at combining of method of gazoflame coverage with of milling by a needle.