

2. Рудман М.Д. Методика и результаты экспериментального изучения токораспределения при рельефной сварке сепараторов шаркоподшипников. Куйбышев: Труды КуАИ, вып. 7, 1968.
3. Рудман М.Д. Электрическое сопротивление при рельефной сварке. Известия вузов СССР. - Машиностроение, 1963, № 5.
4. Рудман М.Д. Образование сварного соединения при рельефной сварке сепараторов шаркоподшипников. - Автоматическая сварка, 1960, № 2.
5. Рудман М.Д. Иванин А.С., Курзин В.А. Контроль качества одноточечных соединений, выполненных групповой рельефной сваркой, по скорости теплового расширения металла. - В кн.: Вопросы производства летательных аппаратов. Куйбышев; Труды КуАИ, вып. 64, 1975.
6. Иванин А.С., Курзин В.А., Рудман М.Д. Устройство для определения качества сварного соединения по скорости теплового расширения металла. Авторское свидетельство СССР № 383555. Бюллетень № 24. 1973.

УДК 621.791.75.011

Ф.И.Игтаев, А.С.Нашацкий, А.В.Шавкунов,
А.М.Мирошкеева, М.А.Лавренко -

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА НАПЛИВЕНИЯ НА СВОЙСТВА УПЛОТНЕНИЯ $Al-BN$ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

С целью повышения ресурса работы и технологичности при сборке узлов и агрегатов летательных аппаратов, в которых используются плазменные уплотнительные слои $Al-BN$, авторами проведены эксперименты по определению влияния режимов наплевания на свойства защитного покрытия.

Выполненные ранее исследования показали, что режим наплевания может оказывать значительное влияние на свойства уплотнительного слоя $Al-BN$. К режиму относятся ток дуги, расход аргона, расход водорода. От параметров струи зависят энтальпия, температура и скорость частиц вблизи $Al-BN$ при наплевании, они в конечном счете и определяют свойства уплотнительного слоя.

Экспериментальная оценка влияния тока дуги, расхода аргона и водорода в комплексе на свойства уплотнительного слоя при изменении каждого из указанных факторов в широких пределах представляет значительные трудности, связанные с проведением большого объема исследований. Задача может быть решена путем применения метода математического планирования эксперимента [1,2].

За основной режим напыления (нулевой уровень) был взят следующий: $I = 360\text{А}$; $G_{\text{Ar}} = 3,2\text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{H}_2} = 0,6\text{ м}^3/\text{ч}$. Диапазон варьирования этих факторов был определен, исходя из технических возможностей установки для плазменного напыления и некоторых ограничений, связанных с особенностями работы плазменной горелки. При проведении экспериментов для напыления использовалась нихта АС - 25% ВN одной партии, т.е. нихта постоянного химического и гранулометрического состава.

В первой серии экспериментов был реализован полный факторный план типа 2^3 , т.е. было проведено 8 экспериментов на двух уровнях при трех независимых переменных. Исследуемые факторы, их уровни и интервалы варьирования представлены в табл. I.

Т а б л и ц а I

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни факторов	$I, \text{А}$ x_1	$G_{\text{Ar}}, \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ x_2	$G_{\text{H}_2}, \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$ x_3
Нулевой уровень, "0"	360	3,2	0,6
Интервал варьирования, с	80	0,7	0,3
Нижний уровень, " - "	280	2,5	0,3
Верхний уровень, " + "	440	3,9	0,9

В каждом эксперименте определялись: прочность напыленного слоя при испытании на отрыв σ (y_1), твердость слоя по Бринеллю НВ (y_2) пористость слоя В (y_3), содержание в слое нитрида бора (y_4) и удельная работа врезания $\frac{A_{\text{врез}}}{\Delta m}$ (y_5), удельная работа врезания, - отношение работы, необходимой на врезание резца в уплотнительный слой на заданную глубину, к массе срезанного слоя - определялась при испытании на малтанковом копре.

Для повышения точности результатов в каждой точке плана проводилось по 5 параллельных экспериментов (для пористости - по 3, для содержания нитрида бора - по 3...5 экспериментов).

Переход от натуральных значений факторов к кодированным осуществлялся по соотношению

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\varepsilon_i},$$

где X_i - значения натуральных переменных на верхнем или нижнем уровнях;

X_{i0} - значение натурального переменного на нулевом уровне;

ε_i - интервал варьирования.

После исключения грубых ошибок из результатов экспериментов была проведена проверка однородности дисперсий с помощью статистических критериев Кохрена, когда во всех точках факторного пространства имелось одинаковое число повторных экспериментов, и Бартлетта, когда число повторных экспериментов в планах не одинаково. Проверка показала, что дисперсии удельной работы врезания неоднородны, поэтому удельную работу врезания в дальнейшем как параметр уплотнения не рассматривали.

По результатам первой серии экспериментов (полного факторного плана) построена математическая модель, описывающая зависимость свойств уплотнения от исследуемых факторов в виде неполного квадратного уравнения [2]

$$y_0 = b_0 + \sum_{i=1}^j b_i x_i + \sum_{i < j}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

где b_i - истинные коэффициенты регрессии.

Оценка коэффициентов регрессии производилась по методу наименьших квадратов, т.е. из условия минимизации суммы квадратов отклонений экспериментальных от вычисленных по уравнению регрессии значений параметров уплотнения во всех экспериментальных точках.

Для проверки гипотезы об адекватности выбранной модели использовали F - критерий [1]. Проверкой установлено, что неполное квадратное уравнение (1) адекватно описывает только два параметра уплотнения - пористость и содержание в слое нитрида бора. Математическая модель, описывающая зависимость прочности и твердости уплотнения от исследуемых факторов, оказалась, таким образом, более сложной, чем было принято.

Проверка значимости коэффициентов уравнений регрессии для пористости и содержания в слое нитрида бора по критерию Стьюдента

показала, что значимыми являются только коэффициенты при линейных членах уравнений. Уравнения регрессии для пористости (\hat{Y}_3) и содержания в слое нитрида бора (\hat{Y}_4) в связи с этим упрощаются до линейных

$$\hat{Y}_3 = 29,18 - 1,14 X_1 - 0,39 X_2 - 0,42 X_3, \quad (2)$$

$$\hat{Y}_4 = 14,04 + 0,18 X_1 - 0,36 X_2 + 0,44 X_3. \quad (3)$$

Из анализа уравнений (2) и (3) следует: а) пористость уплотнения уменьшается с увеличением тока дуги, расхода аргона и водорода и будет наименьшей при максимальных значениях этих факторов; б) содержание в уплотнении нитрида бора увеличивается с увеличением тока дуги, расхода водорода и с уменьшением расхода аргона и будет наибольшим при максимальных значениях первых двух и минимальном значении последнего фактора.

Поскольку уравнение (1) inadequately описывает такие свойства уплотнения, как прочность при испытании на отрыв и твердость, был реализован ротатабельный центральный композиционный план (РЦКП), за ядро РЦКП был взят полный факторный план типа 2^3 , реализованный на первом этапе исследования, и к нему было добавлено 6 "звездных" точек с длиной плеча $\alpha = 1,68$ и шесть центральных точек. В качестве матрицы планирования выбрана матрица РЦКП 2-го порядка [2]. Уровни и интервалы варьирования факторов во второй серии экспериментов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Уровни и интервалы варьирования факторов

Уровни факторов	Факторы		
	I, A X_1	$G_{H_2}, \frac{M^3}{ч}$ X_2	$G_{Ar}, \frac{M^3}{ч}$ X_3
Нулевой уровень, 0	360	3,2	0,6
Интервал варьирования, ε	80	0,7	0,3
Нижний уровень, -I	280	2,5	0,3
Верхний уровень, +I	440	3,9	0,9
"Звездные" точки, $+\alpha$	494	4,38	1,1
$-\alpha$	226	2	0,1

Примечание. G_{Ar} - расход аргона; G_{H_2} - расход водорода.

Планы 2-го порядка позволяют получить математическое описание в виде полной квадратичной модели, содержащей кроме основных эффектов β_i все парные взаимодействия β_{ij} и квадратичные эффекты β_{ii} , т.е. всего $(K+1)(K+2)$ эффектов

$$\hat{y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^K \beta_i x_i + \sum_{\substack{i,j \\ i < j}} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^K \beta_{ii} x_i^2 \quad (4)$$

Коэффициенты квадратного уравнения регрессии (4) находятся путем решения на ЭЦМ системы из 10 нормальных уравнений, найденных методом наименьших квадратов при минимизации суммы квадратов отклонений. Полученные по результатам 2-й серии экспериментов уравнения регрессии имеют вид:

для прочности уплотнения

$$\hat{y}_1 = 79,497 + 6,208x_1 + 2,349x_2 + 14,35x_3 + 9,249x_1^2 - 13,692x_1x_2 + 2,148x_1x_3 - 1,791x_2^2 + 5,97x_2x_3 - 4,978x_3^2 \quad (5)$$

для твердости уплотнения

$$\hat{y}_2 = 10,8344 + 0,6379x_1 + 0,613x_2 + 0,5747x_3 - 0,4636x_1^2 - 0,3462x_1x_2 - 0,4288x_1x_3 - 0,6283x_2^2 - 0,2538x_2x_3 - 0,1554x_3^2 \quad (6)$$

В ротатабельном плане некорректно оценивать значимость каждого из коэффициентов уравнений регрессии из-за их взаимной зависимости, в связи с чем был проведен дисперсионный анализ, который показал высокую значимость как линейных, так и нелинейных членов уравнений регрессии (5) и (6). Из анализа следовало также, что эти уравнения адекватно описывают свойства уплотнения - прочность при испытании на отрыв и твердость.

Используя уравнения регрессии (2), (3), (5) и (6), можно определить, при каких значениях факторов (ток дуги, расход аргона и водорода) параметры уплотнения $Al-BN$ (прочность, твердость, пористость, содержание нитрида бора) будут иметь предельную - максимальную или минимальную - величину (табл. 3). Согласно расчетным, а также и экспериментальным данным, при изменении факторов режима напыления в диапазоне: ток дуги от 230 до 490А, расход аргона от

2,0 до 4,4 м³/ч, расход водорода от 0,3 до 1,1 м³/ч параметры уплотнительного слоя могут иметь следующие значения: прочность при испытании на отрыв -5,4...15 МПа, твердость 60...120 МПа, пористость - 27...32%, содержание в слое нитрида бора - 13-16%.

Т а б л и ц а 3

Значения факторов, параметры уплотнения которых имеют предельную (максимальную или минимальную) величину

Параметр уплотнения	Факторы		
	I, A	$v_{H_2}, \frac{M^3}{ч}$	$v_{H_2}, \frac{M^3}{ч}$
$\sigma_{макс}$	↑ +	↓ -	0 ... +
$\sigma_{мин}$	↓ -	↑ +	↑ +
$HV_{макс}$	+	-	-
$V_{макс}$	-	-	-
% $BN_{макс}$	+	-	+
$\sigma_{мин}$	-	-	-
$HV_{мин}$	-	-	-
$V_{мин}$	+	+	+
% $BN_{мин}$	-	+	-

Примечание: + - величина фактора, соответствующая верхнему уровню, 0 - нулевому уровню, - - нижнему уровню. (см. табл. 1); ↑ + - величина фактора больше верхнего уровня; ↓ - - меньше нижнего уровня (см. табл. 2).

Как видно из приведенных данных, наиболее существенно при изменении режима напыления могут изменяться прочность (в 2,5 - 3 раза) и твердость уплотнения (в 2 раза), меньше изменяются содержание в слое нитрида бора (на 25-30%) и пористость (примерно на 10%).

Для оценки связи между параметрами уплотнения был проведен корреляционный анализ по результатам полного факторного эксперимента. Для этого между всеми попарными сочетаниями параметров уплотнения (твердость - прочность, твердость - пористость и прочность - пористость) были вычислены коэффициенты парной корреляции, которые

являются в математической статистике общепринятой характеристикой связи между двумя случайными величинами, и проверена значимость этих коэффициентов сравнением их с табличными (критическими) значениями [2]. Последние брались при числе степеней свободы $f = N - 2$ и принятом уровне значимости, равном 0,05. Результаты сравнения приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Значения коэффициентов парной корреляции

Вычисленное значение Z		Критическое значение Z
$Z(\sigma, HB)$	0,0715	0,707 (при $\alpha = 0,05, Z = 6$)
$Z(\sigma, B)$	0,64	
$Z(HB, B)$	-0,88	

Из таблицы видно, что значения коэффициентов корреляции, наиболее полно характеризующих связь твердости уплотнения с прочностью и пористостью, превышают критическое значение Z , т.е. можно принять гипотезу о корреляционной линейной связи между твердостью и указанными параметрами уплотнения. Знаки коэффициентов парной корреляции показывают, что с возрастанием твердости возрастает прочность уплотнения и наоборот, уменьшается пористость. Указанная зависимость подтверждается многочисленными экспериментальными данными [3]. Между прочностью и пористостью уплотнения тесной линейной связи нет.

Основываясь на данных корреляционного анализа, можно рекомендовать контролировать два параметра уплотнительного слоя - твердость и содержание в слое нитрида бора и исключить контроль прочности и пористости, измерение которых выполнить в производственных условиях более трудно.

Параметры уплотнения $AC-BN$ называются, исходя из условий его работы - прирабатываемости, стойкости против выветривания, прочности при воздействии сил, возникающих в процессе монтажа и эксплуатации. Очевидно, что требования хорошей прирабатываемости и одновременно высокой стойкости уплотнения в условиях эксплуатации является в определенной степени взаимоисключающим. Поэтому должны быть определены значения основных параметров слоя,

обеспечивающие его работоспособность в конкретных условиях. Уравнения регрессии позволяют установить режим напыления, при котором значения основных параметров уплотнения можно получить соответствующие заданным.

В ы в о д ы

1. Метод математического планирования позволяет значительно снизить количество экспериментов для отыскания оптимального сочетания режимов напыления с целью повышения ресурса работы и технологичности при сборке узлов и агрегатов летательных аппаратов.

2. Влияние режима напыления на параметры уплотнительного слоя $AC-BN$ исследуется методом математического планирования.

3. Установлены направления и пределы изменения параметров уплотнения $AC-BN$ при изменении режимов напыления (силы тока, расхода аргона, расхода водорода) в широком диапазоне.

4. Методом корреляционного анализа обоснована возможность принятия гипотезы о линейной прямой связи между прочностью и твердостью и обратной - между пористостью и твердостью уплотнения. При наличии указанной корреляционной связи твердость можно принять за контролируемый параметр уплотнения, измерить который в условиях производства сравнительно легко, и отказаться от контроля прочности и пористости.

5. Разработанная в работе методика позволяет при известных требованиях к параметрам уплотнения $AC-BN$ установить наиболее приемлемый режим его напыления.

Л и т е р а т у р а

1. А д л е р Д.П., М а р к о в а Е.В., Г р а н о в с к и й Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
2. Н а л и м с в В.В., Ч е р н о в а Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. М.: Наука, 1965, 540 с.
3. Разработка технологии получения напыленных уплотнительных слоев для компрессора и турбины на повышенные рабочие температуры. Отчет № Гос. регистрации У12784 - Куйбышев: КуАИ, 1974.