

И. Р. Асланян, В. И. Семенов, Л. Ш. Шустер

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТОРОВ, СУЩЕСТВЕННО ВЛИЯЮЩИХ НА ФРЕТТИНГ-ИЗНАШИВАНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ NiP ПОКРЫТИЙ

Изучено влияние параметров структуры электролитических NiP покрытий (количества упрочняющих добавок SiC и термической обработки), а также условий изнашивания (нагрузки и амплитуды сдвига) на их износостойкость при фреттинге. Установлено, что основным параметром, негативно влияющим на износостойкость покрытий при фреттинге, является количество упрочняющих добавок SiC. *Факторный эксперимент; матрица планирования; фреттинг-изнашивание*

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных задач, которые решают инженеры при анализе прочности и выборе средств предотвращения разрушения конструкции, является установление наиболее вероятных видов механических разрушений в процессе эксплуатации.

Явление фреттинг-изнашивания и возникающие при этом разрушения представляют опасность для многих механических систем. И хотя изучению фреттинга посвящено много исследований, до сих пор существует очень мало данных для проведения количественных расчетов и не создано метода прогнозирования разрушения в условиях фреттинга, обладающего достаточной общностью [1]. Также известно, что на процесс фреттинга оказывает влияние большое число факторов.

Для повышения эффективности экспериментальных исследований и инженерных разработок применяют математические методы планирования экспериментов. Использование математико-статистических методов при постановке задачи, эксперименте и при обработке полученных данных существенно сокращает сроки решения, снижает затраты на исследования и повышает качество полученных результатов.

Данная работа посвящена исследованию влияния параметров структуры электролитических никель-фосфорных (NiP) покрытий (количества упрочняющих добавок SiC и термической обработки), а также условий фреттинга (нагрузки и амплитуды сдвига) на их изнашивание с целью выявления определяющих факторов, влияющих на износостойкость этих покрытий.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

NiP покрытия осаждали на стальную подложку в электролитической ванне. Использовали электролит Уоттса, содержащий также 20 г/л фосфористой кислоты  $H_3PO_3$  и суспензию карбидов кремния в количестве 0 и 200 г/л со средним диаметром частиц 600 нм. Часть образцов отжигали при температуре 420 °С в течение 1 часа.

Трибологические испытания проводились по схеме «шар – диск» при нормальном нагружении 1 и 5 Н, частоте колебаний 2 Гц и тангенциальном смещении (амплитуде) 100 и 500 мкм. Количество циклов испытаний для всех образцов было 20 000. В качестве контртела использовались корундовые шары (фирма Ceratech, Нидерланды) диаметром 10 мм, с шероховатостью поверхности Ra 0,2 мкм. Испытания проводились без смазки при температуре воздуха 23 °С и относительной влажности 50 %. Результаты трибологических испытаний представляли как усредненное значение, полученное по трем измерениям для каждого типа покрытия. Износ образцов определяли как углубление  $\Delta$  в мкм в поверхности образцов с помощью оптической трехмерной профилирующей системы Wyko NT Series.

Численное моделирование осуществляли с помощью планирования полного факторного эксперимента методом «крутого восхождения» [2]. При этом изучали зависимость износа электролитических NiP покрытий от количества упрочняющих добавок SiC, выделения кристаллической фазы  $Ni_3P$  в результате термической обработки и условий фреттинг-изнашивания (нагрузки и амплитуды сдвига).

В качестве независимых переменных были выбраны: термическая обработка ТО ( $X_1$ ), количество карбидов кремния SiC ( $X_2$ ), давление  $P$  на контакте ( $X_3$ ) и амплитуда  $A$  сдвига ( $X_4$ ).

В качестве зависимой переменной рассматривали износ NiP покрытий, характеризуемый высотой изношенного слоя покрытий ( $y$ ). Каждый из факторов варьировали на двух уровнях. Интервалы варьирования факторов и их значения в натуральном масштабе указаны в табл. 1.

Таблица 1

## Уровни факторов

Факторы	$X_1$ (ТО)	$X_2$ (SiC, г/л)	$X_3$ (P, МПа)	$X_4$ (A, мкм)
Основной уровень ( $X_i$ )	–	100	200	300
Интервал варьирования ( $\Delta X_i$ )	–	100	50	200
Верхний уровень ( $x_i = 1$ )	2	200	250	500
Нижний уровень ( $x_i = -1$ )	1	0	150	100

Кодированные значения количественных факторов ( $x_i$ ) связаны с натуральными ( $X_i$ ) соотношениями:

$$x_2 = \frac{X_2 - 100}{100}; x_3 = \frac{X_3 - 200}{50};$$

$$x_4 = \frac{X_4 - 300}{200}. \quad (1)$$

Поскольку влияние режимов термической обработки на износостойкость NiP покрытий было описано ранее [3], в данной работе будем исследовать влияние термической обработки совместно с другими факторами. Независимую переменную  $X_1$  (термическая обработка ТО) будем считать качественным фактором, т. е. его минимальное значение, равное 1, будет соответ-

ствовать отсутствию термической обработки, а максимальное значение, равное 2, – ее проведению при указанных выше условиях.

Для получения возможно более полной информации об изучаемых зависимостях воспользовались полным факторным экспериментом. Количество опытов  $N$  определяли по количеству факторов  $k$  в соответствии с выражением:

$$N = 2^k = 2^4 = 16. \quad (2)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Математическая модель после реализации опытов полного факторного эксперимента имеет вид:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \dots + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{124}x_1x_2x_4 + \dots + b_{1234}x_1x_2x_3x_4, \quad (3)$$

где  $b_i$  – коэффициенты регрессии.

Для расчета коэффициентов этой модели построили расширенную матрицу планирования и результатов опытов (табл. 2). Коэффициенты регрессии рассчитывали по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad (4)$$

где  $i = 0, 1, 2, \dots, 16$ .

В результате произведенных вычислений получили следующий общий вид линейного уравнения регрессии:

$$y = 1,083 + 0,028x_1 + 0,281x_2 + 0,146x_3 - 0,234x_4 - 0,003x_1x_2 - 0,012x_1x_3 - 0,021x_1x_4 + 0,029x_2x_3 - 0,082x_2x_4 + 0,050x_3x_4 - 0,028x_1x_2x_3 - 0,069x_1x_2x_4 + 0,003x_1x_3x_4 + 0,049x_2x_3x_4 - 0,015x_1x_2x_3x_4. \quad (5)$$

Таблица 2

Расширенная матрица плана 2<sup>4</sup> и результатов опыта

№ опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_1x_4$	$x_2x_3$	$x_2x_4$	$x_3x_4$	$x_1x_2x_3$	$x_1x_2x_4$	$x_1x_3x_4$	$x_2x_3x_4$	$x_1x_2x_3x_4$	$y$
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	1,204
2	+	–	+	+	+	–	–	–	+	+	+	–	–	–	+	–	1,439
3	+	+	–	+	+	–	+	+	–	–	+	–	–	+	–	–	0,880
4	+	–	–	+	+	+	–	–	–	–	+	+	+	–	–	+	0,657
5	+	+	+	–	+	+	–	+	–	+	–	–	+	–	–	–	0,761
6	+	–	+	–	+	–	+	–	–	+	–	+	–	+	–	+	0,788
7	+	+	–	–	+	–	–	+	+	–	–	+	–	–	+	+	0,576
8	+	–	–	–	+	+	+	–	+	–	–	–	+	+	+	–	0,488
9	+	+	+	+	–	+	+	–	+	–	–	+	–	–	–	–	1,843
10	+	–	+	+	–	–	–	+	+	–	–	–	+	+	–	+	1,669
11	+	+	–	+	–	–	+	–	–	+	–	–	+	–	+	+	1,051
12	+	–	–	+	–	+	–	+	–	+	–	+	–	+	+	–	1,089
13	+	+	+	–	–	+	–	–	–	–	+	–	–	+	+	+	1,745
14	+	–	+	–	–	–	+	+	–	–	+	+	+	–	+	–	1,459
15	+	+	–	–	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+	–	–	0,823
16	+	–	–	–	–	+	+	+	+	+	+	–	–	–	–	+	0,853

В дальнейшем определили статистическую значимость каждого из 16 коэффициентов регрессии уравнения (5).

Поскольку в данном случае использовали равномерное дублирование опытов, дисперсию оценок коэффициентов рассчитали по формуле:

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{n \cdot N}, \quad (6)$$

где  $n = 3$  – количество повторений каждого опыта;  $S_y^2 = 0,049$  – дисперсия опыта, рассчитанная по известным методикам [2]. Отсюда  $S_{b_i}^2 = 0,001$ , а среднеквадратичная ошибка  $S_{b_i} = 0,032$ .

При уровне значимости  $\alpha = 0,05$  и числе степеней свободы  $f_1 = N(n - 1) = 32$  табличное значение  $t$ -критерия Стьюдента  $t_{0,05; 32} = 2,04$  [2]. Тогда доверительный интервал коэффициентов регрессии  $\Delta_{b_i}$  равен:

$$\Delta_{b_i} = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} = 0,065. \quad (7)$$

Коэффициенты, абсолютная величина которых равна доверительному интервалу или больше его  $b_i \geq \Delta_{b_i}$ , признаются статистически значимыми [2]. В данном случае  $b_i \geq 0,065$ , т. е. это  $b_2, b_3, b_4, b_{24}, b_{124}$ .

Статистически незначимые коэффициенты  $b_1, b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{34}, b_{123}, b_{134}, b_{234}, b_{1234}$  из уравнения (5) исключили и после реализации полного факторного эксперимента  $2^4$  уравнение регрессии приняло вид:

$$y = 1,083 + 0,281x_2 + 0,146x_3 - 0,234x_4 - 0,082x_2x_4 - 0,069x_1x_2x_4. \quad (8)$$

Гипотезу об адекватности модели проверяли с помощью  $F$ -критерия Фишера. Для этого с помощью уравнения (8) определяли расчетные значения износа  $y_{\text{расч}}$  покрытий и сопоставляли их с экспериментальными значениями  $y_{\text{эксп}}$  (табл. 3).

Поскольку дублирование опытов было равномерным, дисперсию неадекватности определяли по формуле:

$$S_{\text{неад}}^2 = \frac{n \sum_{i=1}^N (y_{i \text{ расч}} - \bar{y}_{i \text{ эксп}})^2}{f_2}, \quad (9)$$

где  $f_2 = N - k'$  – число степеней свободы,  $k'$  – число оставленных коэффициентов уравнения (включая  $b_0$ ). Полученная модель (8) включала 6 коэффициентов, поэтому число степеней свободы  $f_2 = 10$ , а дисперсия неадекватности  $S_{\text{неад}}^2 = 0,039$ .

Таблица 3

## Сопоставление экспериментальных и расчетных данных

№ опыта	$y_{\text{эксп}}$	$y_{\text{расч}}$	$\Delta y$	$\Delta y^2$
1	1,204	1,125	0,079	0,0062
2	1,439	1,263	0,176	0,0310
3	0,880	0,865	0,015	0,0002
4	0,657	0,727	0,07	0,0049
5	0,761	0,833	0,072	0,0052
6	0,788	0,971	0,183	0,0334
7	0,576	0,573	0,003	0,00001
8	0,488	0,435	0,053	0,0028
9	1,843	1,895	0,052	0,0027
10	1,669	1,757	0,088	0,0077
11	1,051	1,031	0,02	0,0004
12	1,089	1,169	0,08	0,0064
13	1,745	1,603	0,142	0,0202
14	1,459	1,465	0,006	0,00004
15	0,823	0,739	0,084	0,0071
16	0,853	0,877	0,024	0,0006

Расчетное значение  $F$ -критерия Фишера определяли по формуле:

$$F_{f_2; f_1}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{неад}}^2}{S_y^2}. \quad (10)$$

$F$ -критерий Фишера представляет собой отношение дисперсии неадекватности к дисперсии опыта и отвечает на вопрос, во сколько раз модель предсказывает хуже по сравнению с опытом.

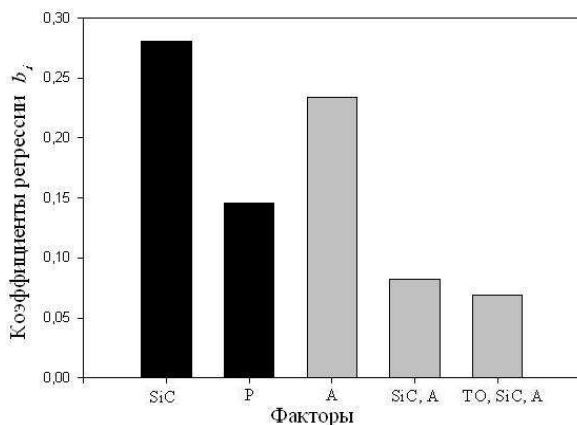
Гипотезу об адекватности уравнения принимают в том случае, когда рассчитанное значение  $F$ -критерия не превышает табличного для выбранного уровня значимости, т. е. когда  $F^{\text{расч}} \leq F^{\text{табл}}$ . Расчетное значение  $F$ -критерия Фишера  $F_{10; 32}^{\text{расч}} = 0,796$ , при уровне значимости  $\alpha = 0,05$  табличное значение  $F$ -критерия Фишера  $F_{0,05; 10; 32}^{\text{табл}} = 2,16$ .

Поскольку  $F^{\text{расч}} < F^{\text{табл}}$  гипотеза об адекватности математической модели (8) при 5 %-ном уровне значимости не отвергается.

Из уравнения (8) видно, что значимое влияние на высоту изношенного слоя NiP покрытий оказывают содержание добавок карбидов кремния, давление и амплитуда сдвига, а также совместное влияние содержания добавок SiC и амплитуды; термической обработки, содержания SiC и амплитуды сдвига. Совместное взаимодействие остальных факторов оказывает незначительное влияние на износ покрытий. С увеличением содержания добавок карбидов кремния и давления износ покрытий возрастает, а с увеличением амплитуды износ покрытий

снижается. Из уравнения (8) следует, что термообработка NiP покрытий практически не влияет на их фреттинг-изнашивание, но в сочетании с добавками SiC и амплитудой сдвига уменьшает износ NiP покрытий. Отсюда следует, что минимальное фреттинг-изнашивание NiP покрытий можно получить при применении термообработанных покрытий, содержащих минимальное количество добавок SiC в условиях больших амплитуд сдвига.

Для анализа полученной математической модели построили диаграмму влияния изученных факторов на износ NiP покрытий (рис. 1).



**Рис. 1.** Влияние значимых факторов и их взаимодействий (черный цвет – положительное значение коэффициентов, серый – отрицательное) на фреттинг-изнашивание NiP покрытий

Из рис. 1 видно, что наибольшее влияние на износ NiP покрытий оказывает количество внедренных карбидов кремния. Карбиды кремния, хотя и увеличивают твердость NiP покрытий, но

препятствуют сцеплению оксидных пленок на поверхности трения. Это обстоятельство, а также растрескивание матрицы NiP вокруг карбидов кремния при термообработке, которое способствует вырыванию частиц SiC при трении, не приводят к существенному уменьшению изнашивания композиционных NiP-SiC покрытий [3]. Термическая обработка увеличивает твердость покрытий за счет выделения кристаллической фазы Ni<sub>3</sub>P, что в сочетании с добавками SiC при больших амплитудах сдвига снижает интенсивность их изнашивания.

Представляет практический интерес решение задачи определения оптимального количества добавок SiC, обеспечивающих минимальный износ покрытий при различных условиях эксплуатации деталей. Эту задачу решали методом крутого восхождения.

Согласно этому методу, движение из некоторой точки внутри изученной области в направлении градиента, т. е. в направлении наибольшей производной функции отклика по направлению – кратчайший путь к экстремуму. При наличии линейной модели для осуществления движения по градиенту значения факторов необходимо изменять пропорционально величинам коэффициентов  $b_1, b_2, b_3, b_4$  с учетом их знака. Шаги в изменении факторов рассчитывали в натуральном масштабе. Для этого вначале определили произведения коэффициентов на соответствующие интервалы варьирования факторов, т. е.  $b_i \Delta X_i$ , затем пропорционально этим произведениям назначили шаги. Последовательность реализации этапов крутого восхождения представлены в табл. 4.

Таблица 4

#### Крутое восхождение

Факторы	$X_2$ (SiC, г/л)	$X_3$ (P, МПа)	$X_4$ (A, мкм)	y (износ, мкм)
$b_i$	0,281	0,146	- 0,234	
$b_i \Delta X_i$	28,1	7,3	- 46,8	
Шаг	20	5,2	- 33,3	
Шаг после округления	20	50	- 200	
Основной уровень ( $X_i$ )	100	200	300	
Мысленный опыт	80	150	500	
Реализованный опыт	80	150	500	0,74
Реализованный опыт	60	150	500	0,914
Мысленный опыт	60	150	100	
Реализованный опыт	80	150	100	2,003
Мысленный опыт	80	150	100	
Мысленный опыт	80	250	500	
Реализованный опыт	80	250	500	1,208
Мысленный опыт	60	250	500	
Мысленный опыт	60	250	100	
Реализованный опыт	80	250	100	2,132
Мысленный опыт	80	250	100	

Так как непосредственно характеристикой покрытий, оказывающей существенное влияние на их износ, является содержание добавок SiC (эффект влияния термической обработки был признан статистически незначимым), а давление и амплитуда – это условия нагружения, то последние два фактора поддерживали на минимальном и максимальном уровнях, а за основной фактор, подлежащий изменению, приняли содержание добавок SiC.

Пользуясь величинами  $b_i \Delta X_i$ , определили шаги в изменении факторов следующим образом. Из технологических соображений выбрали шаг в изменении количества карбидов кремния 20 г/л ( $\Delta_1 = 10$ ). Шаги для остальных факторов получили из пропорций:

$$\frac{b_1 \Delta X_1}{b_2 \Delta X_2} = \frac{\Delta_1}{\Delta_2}; \frac{b_1 \Delta X_1}{b_3 \Delta X_3} = \frac{\Delta_1}{\Delta_3}; \frac{b_1 \Delta X_1}{b_4 \Delta X_4} = \frac{\Delta_1}{\Delta_4}. \quad (11)$$

Поскольку функцией отклика является значение износа, то шаги в обратном направлении их знаков будут уменьшать значение функции у. При назначении условий мысленных опытов учитывали, что при содержании карбидов кремния в электролитической ванне при осаждении менее 40 г/л свойства NiP покрытий с добавками и без добавок практически не изменяются [4].

Некоторые из мысленных опытов реализовали (табл. 4). Планирование эксперимента с использованием метода крутого восхождения показало, что износ NiP покрытий с содержанием карбидов кремния в количестве 80 г/л при осаждении является наименьшим в условиях больших амплитуд (500 мкм) и малых нагрузок (1 Н). Уменьшение содержания карбидов кремния в NiP покрытиях не приводит к существенному улучшению износостойкости покрытий. При уменьшении амплитуды сдвига износ NiP покрытий с содержанием карбидов кремния в количестве 80 г/л увеличивается.

## ВЫВОДЫ

Использование полного факторного эксперимента при разработке электролитических NiP покрытий для защиты деталей от фреттинг-изнашивания позволило определить степень

влияния различных факторов, как внешних условий трения, так и параметров покрытий, на их износостойкость. В результате проведенных экспериментов установлено, что наибольшее негативное влияние на износостойкость NiP покрытий оказывает количество карбидов кремния. С увеличением амплитуды сдвига глубина изношенного слоя NiP покрытий снижается. Метод крутого восхождения позволил установить, что при малых нагрузках и больших амплитудах сдвига оптимальное количество добавок карбидов кремния в NiP покрытиях составляет 80 г/л.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов Д. Н., Мельников Э. Л., Гаврилюк В. С. Триботехника: учеб. пособие. М.: КНОРУС, 2011. 408 с.
2. Славутский Л. А. Основы регистрации данных и планирования эксперимента: учеб. пособие. Чебоксары: изд-во ЧГУ, 2006. 200 с.
3. Асланян И. Р., Селис Ж. П., Шустер Л. Ш. Влияние добавок карбидов кремния SiC на изнашивание электролитических NiP покрытий // Трение и износ. 2010 (31). № 5. С. 353–361.
4. Garcia I., Fransaer J., Celis J.-P. Electrodeposition and sliding wear resistance of nickel composite coatings containing micron and submicron SiC particles // Surface and Coatings Technology. 2001 (148). P. 171–178.

## ОБ АВТОРАХ

**Асланян Ирина Рудиковна**, докторант каф. основ конструирования механизмов и машин УГАТУ, доц. каф. машин и технологии литейного производства. Канд. техн. наук (г. Уфа, ИПСМ РАН, 2000). Иссл. в обл. трибологии.

**Семенов Владимир Иванович**, вед. науч. сотр. НИИ ФПМ. Канд. техн. наук (г. Уфа, ИПСМ РАН, 1995). Иссл. в обл. наноструктурированных металлических материалов и трибологии.

**Шустер Лева Шмульевич**, проф. каф. основ конструирования механизмов и машин. Д-р техн. наук (г. Москва, МГУНиГ, 1990). Иссл. в обл. высокотемпературной трибологии.