

УДК 621.891:621.357

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ

И. Р. Асланян¹, Н. К. Криони², Л. Ш. Шустер³

¹ kmitlp@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступило в редакцию 22.07.2013

Аннотация. В работе на основании результатов экспериментальных исследований приведены данные по влиянию на коэффициент трения и изнашивание электролитических никель-фосфорных покрытий, упрочняющих добавок и термообработки в условиях трения скольжения, фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии.

Ключевые слова: факторный эксперимент; матрица планирования; фреттинг-изнашивание.

ВВЕДЕНИЕ

Одна из самых острых и сложных проблем современного машиностроения – износ механизмов и машин – предполагает ежегодное увеличение расходов на их восстановление. В связи с этим любое продвижение в ее решении дает комплексный результат – это и повышение энергосбережений, и возрастание показателей надежности изделия, и улучшение функциональных характеристик изделия. Одно из перспективных направлений исследований по трибологии состоит в нанесении электролитических покрытий. Износостойкие покрытия, получаемые электролитическим осаждением, отличаются высоким сопротивлением износу, минимальной склонностью к заеданию, высоким сопротивлением коррозии.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Данная работа посвящена изучению трибологических характеристик электролитических никель-фосфорных покрытий с различными термообработкой и количеством упрочняющих добавок карбидов кремния в условиях скольжения, фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии (с учетом амплитуды и нагрузки). Полученные результаты позволяют уточнить механизм изнашивания NiP покрытий в различных условиях трения, повысить эффективность использования электролитических никель-фос-

форных покрытий и увеличить износостойкость деталей машин.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материалов исследования были выбраны никель-фосфорные (NiP) покрытия. NiP покрытия осаждали на стальную подложку в электролитической ванне. Осаждение покрытий проводили на вертикальных электродах с магнитным перемешиванием электролита. Использовали стандартный электролит Уоттса, содержащий также 20 г/л фосфористой кислоты H_3PO_3 и суспензию карбидов кремния SiC в количестве 0,80 и 200 г/л со средним диаметром частиц 600 нм. Часть покрытий отжигали при температуре 420°С в течение 1 ч.

Известно, что никель-фосфорные покрытия работают в различных условиях трения и изнашивания, поэтому в данной работе проводили трибологические испытания покрытий при трении непрерывного скольжения, фреттинг-изнашивании и фреттинг-коррозии. Испытания выполняли по схеме шар–диск на трибометрах фирмы Falex. Для исключения влияния физико-химического взаимодействия между покрытием и контртелом в качестве последнего использовали корундовые шары (фирма Cerasech, Нидерланды) диаметром 10 мм, с шероховатостью поверхности Ra 0,2 мкм. Трибологические испытания на трение скольжения проводились при нормальном нагружении 2 Н и постоянной скорости скольжения 0,15 м/с. Диаметр поверхно-

сти трения на диске составлял 24 мм. Количество циклов испытаний для всех образцов было одинаковое и составляло 100, 1000 и 15000. Трибологические испытания на фреттинг-изнашивание и фреттинг-коррозию проводились при нормальном нагружении 1, 5 и 10 Н, частоте колебаний 2 Гц и тангенциальном смещении (амплитуде) 100 и 500 мкм. Количество циклов испытаний для всех образцов было 20 000. Трибологические испытания на фреттинг-коррозию проводились в растворе NaCl (рН = 5,5) при температуре 22° С. Трибологические испытания на трение скольжения и фреттинг-изнашивание проводились без смазки при температуре воздуха 23° С и относительной влажности 50 %. Тангенциальная сила трения записывалась постоян-

но во время всего цикла испытаний. Результаты трибологических испытаний представляли как усредненное значение, полученное по трем измерениям для каждого типа покрытия.

Сравнение изнашивания покрытий в различных условиях трения (при непрерывном скольжении, фреттинг-изнашивании и фреттинг-коррозии) оценивали по величине k линейной интенсивности:

$$k = \frac{h_r}{N},$$

где N – число циклов воздействий, приводящих к линейному износу h_r , т. е., по существу, величина k представляет собой износ, приходящийся на одно воздействие.

Таблица

Коэффициенты f трения и интенсивность изнашивания k покрытий при непрерывном скольжении, фреттинг-изнашивании и фреттинг-коррозии

Состав покрытий		Трение скольжения, $P = 2$ Н									
		Исходное состояние					После отжига				
		Микротвердость, μHV	Коэффициент трения f	Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм		Микротвердость, μHV	Коэффициент трения f	Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм			
NiP		580	0,71	1,44		1090	0,74	1,27			
NiP-SiC, 80 г/л		700	0,68	1,43		1150	0,78	1,40			
NiP-SiC, 200 г/л		730	0,69	1,55		1450	0,77	1,34			

Состав покрытий		Фреттинг-изнашивание (1) и фреттинг-коррозия (2), $A = 100$ мкм									
		Нагрузка, Н	Микротвердость, μHV	Исходное состояние				После отжига			
				Коэффициент трения f		Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм		Микротвердость, μHV	Коэффициент трения f		Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм
		1	2	1	2	1	2		1	2	
NiP	1	580	0,48	-	2,13	2,80	1090	0,59	0,23	2,06	2,73
	5		0,44	0,19	2,72	4,85		0,4	0,16	2,63	4,45
NiP-SiC, 80 г/л	1	700	0,48	-	4,32	4,83	1150	0,57	0,3	5,01	6,25
	5		0,46	0,2	5,59	5,25		0,45	0,17	5,33	8,50
NiP-SiC, 200 г/л	1	730	0,5	-	3,65	5,35	1450	0,58	0,22	4,36	5,40
	5		0,48	0,23	4,17	6,50		0,46	0,19	4,61	7,25

Состав покрытий		Фреттинг-изнашивание (1) и фреттинг-коррозия (2), $A = 500$ мкм									
		Нагрузка, Н	Микротвердость, μHV	Исходное состояние				После отжига			
				Коэффициент трения f		Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм		Микротвердость, μHV	Коэффициент трения f		Интенсивность изнашивания $k \cdot 10^{-5}$, мкм
		1	2	1	2	1	2		1	2	
NiP	1	580	0,43	-	1,22	2,68	1090	0,57	0,22	1,44	2,30
	5		0,4	-	1,64	6,50		0,38	0,18	2,20	5,50
	10		0,34	0,2	5,38	10,20		0,33	0,16	2,89	7,03
NiP-SiC, 80 г/л	1	700	0,64	-	2,36	3,75	1150	0,67	0,21	1,85	3,68
	5		0,48	-	6,58	6,75		0,39	0,19	3,02	5,68
	10		0,44	0,21	9,86	7,70		0,35	0,18	3,95	9,40
NiP-SiC, 200 г/л	1	730	0,42	-	1,97	3,75	1450	0,46	0,28	1,90	3,70
	5		0,48	-	3,60	5,90		0,44	0,22	3,01	7,13
	10		0,44	0,23	10,84	9,18		0,38	0,19	6,22	9,50

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты в обобщенном виде представлены в таблице.

Из таблицы видно, что интенсивность изнашивания покрытий в сравниваемых условиях в большинстве случаев при фреттинге выше, чем при скольжении. Причем с уменьшением амплитуды колебаний эта разница в изнашивании увеличивается. Полученные результаты можно объяснить следующими факторами:

- при фреттинге касательные напряжения в приповерхностных слоях изменяются по симметричному циклу в отличие от прерывисто-пульсирующего цикла при скольжении. Известно [1], что симметричный характер изменения напряжений уменьшает усталостную прочность материалов и способствует их изнашиванию;

- при фреттинге затруднена эвакуация твердых продуктов изнашивания из контактной зоны, которые дополнительно интенсифицируют абразивное изнашивание. При этом, чем меньше амплитуда колебаний, тем больше продуктов износа остается в зоне контакта, что интенсифицирует изнашивание;

- очевидно, что с изменением условий трения покрытий (при переходе от непрерывного скольжения к фреттингу) изменяются доли производства энтропии во вторичных структурах для образования потоков тепла, массопереноса и физико-химических превращений.

Термообработка покрытий и изменение их состава по концентрации твердых включений в виде карбидов кремния SiC по-разному влияют на интенсивность изнашивания при скольжении и при фреттинге. Например, при трении скольжения покрытия в исходном состоянии с добавками SiC в количестве 80 г/л обеспечивают минимальное изнашивание, а при фреттинге – наоборот, максимальное. После отжига покрытия с добавками SiC в количестве 80 г/л наиболее интенсивно изнашиваются и при трении скольжения, и при фреттинге. Это свидетельствует о том, что факторы изнашивания при фреттинге могут отличаться от факторов изнашивания при скольжении. К числу таких факторов можно отнести предварительное смещение [2], играющее важную роль в процессах фреттинг-изнашивания и практически не имеющее значения при трении скольжения. Сюда же можно отнести структурную неоднородность покрытий, вызванную образованием кристаллической фазы Ni₃P при отжиге и введением добавок SiC.

Термообработка покрытий и введение добавок SiC, с одной стороны, повышает твердость покрытий, повышая их износостойкость, а с

другой стороны, повышает их структурную неоднородность (за счет выделения кристаллической фазы Ni₃P и добавления твердых включений), что, особенно в условиях фреттинга, интенсифицирует изнашивание. Конкретное сочетание этих факторов может либо понизить изнашивание (как это имеет место при изнашивании покрытий с добавками SiC в количестве 80 г/л в исходном состоянии в условиях трения скольжения), либо, наоборот, повысить изнашивание (как во всех остальных исследованных случаях).

Сопоставление интенсивности фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии в идентичных условиях показывает, что:

а) при малых нагрузках фреттинг-коррозия происходит более интенсивно, чем фреттинг-изнашивание;

б) при более высоких нагрузках интенсивности фреттинг-изнашивания и фреттинг-коррозии у всех нетермообработанных покрытий практически одинаковы (в сопоставимых условиях), а у термообработанных покрытий фреттинг-коррозия существенно выше фреттинг-изнашивания.

Эти результаты свидетельствуют об определенном вкладе химической составляющей в результаты фреттинг-коррозии. Очевидно, что термообработка покрытий за счет повышения твердости существенно снижает механическую составляющую изнашивания, но мало влияет на химическую составляющую. Определенное влияние при этом может оказывать нагрузка, изменяющая предварительное смещение при фреттинге и условия попадания коррозионной среды в контакт, что приводит к изменению механической и химической составляющих трения и изнашивания.

Известно [2], что нагрузка оказывает существенное влияние на предварительное смещение контакта при фреттинге: чем меньше нагрузка, тем меньше предварительное смещение. Чем меньше предварительное смещение, тем больше длина пути внешнего трения, на которой происходит удаление продуктов изнашивания из зоны контакта, улучшая условия контактирования. Причем, чем больше длина амплитуды колебаний, тем больше путь внешнего трения и лучше условия для удаления продуктов износа из зоны контакта, что уменьшает фреттинг-изнашивание.

При больших нагрузках предварительное смещение увеличивается, и, очевидно, становится сопоставимым по величине с амплитудой колебаний. Условия удаления продуктов износа

из зоны контакта ухудшаются и становятся практически одинаковыми. Поэтому в этих условиях интенсивность фреттинг-коррозии становится практически независимой от амплитуды колебаний. Практическую независимость фреттинг-коррозии от термообработки можно объяснить существенным влиянием химической составляющей изнашивания, которая, очевидно, не зависит от термообработки покрытия и определяется исключительно составом основы покрытия.

Этим же можно объяснить отсутствие заметного влияния при больших нагрузках SiC добавок и их концентрации на интенсивность фреттинг-коррозии NiP покрытий. При малых нагрузках наличие на фрикционном контакте твердых SiC добавок улучшает условия проникновения коррозионной среды в зону трения, что увеличивает химическую составляющую изнашивания и интенсивность фреттинг-коррозии.

Исключительное влияние SiC добавок с концентрацией 80 г/л при амплитуде колебаний 100 мкм, повышающих фреттинг-коррозию термообработанного NiP покрытия, можно объяснить неблагоприятным сочетанием состава покрытия и условий трения, увеличивающих механическую составляющую изнашивания.

Как отмечалось выше (табл.), в большинстве рассмотренных случаев интенсивность фреттинг-коррозии выше интенсивности фреттинг-изнашивания, что объясняется определенным вкладом коррозионной составляющей в интенсификацию изнашивания. Однако при больших нагрузках механические факторы могут вызывать такие катастрофические явления как схватывание и задир, повышающие фреттинг-изнашивание по сравнению с фреттинг-коррозией. Как это, например, произошло при изнашивании покрытий в исходном состоянии с добавками SiC под нагрузкой 10 Н.

При фреттинг-коррозии несколько отличаются и механизмы изнашивания: на поверхности трения химическая составляющая изнашивания (коррозия) проявлялась в виде питтингов или разъедания поверхности вокруг карбидов кремния, т.е. процесс разрушения был направлен вглубь покрытия, а механическая составляющая изнашивания срезала послойно разрушенные слои покрытия. При фреттинг-изнашивании химическая составляющая проявлялась в виде образования оксидных пленок на поверхности трения, действие механической составляющей при этом было направлено на срез этих пленок. При малых нагрузках (до 5 Н) оксидные пленки оказывали успешное сопро-

тивление износу. При приложении нагрузки 10 Н оксидные пленки разрушались и как абразив интенсифицировали изнашивание.

Полученные результаты по изнашиванию указывают на то, что механические факторы при фреттинг-коррозии оказывают преобладающее влияние на процесс изнашивания по сравнению с влиянием химических факторов. На это указывает идентичный характер влияния различных параметров трения (нагрузки, амплитуды сдвига, термообработки и состава покрытий) на интенсивность изнашивания как при фреттинг-изнашивании, так и при фреттинг-коррозии. Например, если при концентрации карбидов кремния 80 г/л интенсивность фреттинг-изнашивания покрытия максимальна, то при этой же концентрации максимальна и фреттинг-коррозия покрытия.

ВЫВОДЫ

Таким образом, показано, что термообработка и твердые добавки SiC, с одной стороны, как упрочняющие факторы, уменьшают изнашивание NiP покрытий, а с другой стороны, как факторы, повышающие структурную неоднородность поверхностей трения, интенсифицируют изнашивание электролитических NiP покрытий; минимум изнашивания достигается при определенных сочетаниях нагрузки и амплитуды сдвига.

Определяющую роль при фреттинг-коррозии NiP покрытий играет механическая составляющая изнашивания, а степень влияния химической составляющей зависит от сочетания нагрузки и амплитуды сдвига.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крагельский И. В., Комбалов В. С., Добычин М. Н. Основы расчета на трение и износ. Машиностроение, 1977. 526 с.
2. Максак В. И. Предварительное смещение и жесткость механического контакта. М.: Наука, 1975. 60 с.

ОБ АВТОРАХ

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

КРИОНИ Николай Константинович, проф., проректор. Дипл. инж.-мех. по технол. машиностроения (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по трению и износу в машинах (РГУНИГ им. И. М. Губкина, 2005). Иссл. в обл. трибологии, контактного взаимодействия твердых тел.

ШУСТЕР Лева Шмульевич, проф. каф. основ конструирования механизмов и машин. Д-р техн. наук (МГУНИГ, 1990). Иссл. в обл. высокотемпературной трибологии.

METADATA

Title: Tribologic properties electroplating in various conditions of friction.

Authors: I. R. Aslanyan, N. K. Krioni, and L. S. Shuster.

Affiliation: Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: kmitlp@mail.ru

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 17, no. 8 (61, pp. 24-28, 2013. ISSN 2225-2789 (**Online**), ISSN 1992-6502 (**Print**).

Abstract: In this paper based on the results of experimental studies are presented data on the effect on the coefficient of friction and wear of electrolytic nickel-phosphorous coating, hardening additives and heat treatment conditions of sliding friction, fretting wear and fretting corrosion.

Key words: factorial design; planning matrix; fretting wear.

References (English transliteration):

1. I. V. Kragelsky, V. S. Kombatov, and M. N. Dobyshin, *Basis of calculation for friction and wear*. Moscow: Mashinostroenie, 1977.
2. V. I. Maksak, *Pre-displacement and stiffness mechanical contact*. Moscow: Nauka, 1975.

About authors:

ASLANYAN, Irina Rudikovna, doctoral, Dept. design principles of mechanisms and machines. Assoc. dept. machinery and foundry technologies. Candidate. tech. Sciences (Ufa, IMSP, 2000). Research in the field of tribology.

KRIONI, Nikolay Konstantinovich, Professor, Vice-Rector USATU. Dipl. Mechanical engineer in mechanical engineering (AIM, 1971). Dr. techn. Sciences on friction and wear in machines (RGUNiG them. Academician Gubkin, 2005).

SCHUSTER, Loew Shmulevich, prof. Univ. design principles of mechanisms and machines. Dr. techn. Sciences (Moscow, MGUNiG, 1990).