УДК 669.018:548.1

**АНАЛИЗ СИНЕРГИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА В КОМПОЗИЦИОННЫХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ НИКЕЛЬ-ФТОРОПЛАСТ**

**Балакай И.В., аспирант; Иванов В.В., доц., к.т.н.,**

**Балакай В.И., зав. каф., проф., д.т.н.**

*(Южно-Российский государственный технический университет*

*(Новочеркасский политехнический институт), г. Новочеркасск, Россия)*

В работе [1] для композиционных электролитических покрытий (КЭП) никель-бор-фторопласт проанализирован синергический эффект, проявляющийся в виде улучшения их износостойких и антифрикционных свойств по сравнению с величинами этих же свойств, рассчитанных по аддитивной модели (положительный синергетический эффект). Для этих КЭП установлено, что синергизм твердой и смазочной компонент заключается в «концентрировании» смазочной фазы фторопласта на поверхности трения, повышающем антифрикционность и износостойкость твердых фаз покрытия, и в наличии наночастиц некоторых твердых фаз (вероятно, боридов Ni3B и Ni2B). Наночастицы характеризуются сферической или цилиндрической формой с диаметром сечения 1,2 – 2,5 нм и проявляют, по-видимому, свойства твердых смазок [1]. С целью проверки предположения о вкладе наночастиц только низкобористых фаз никеля в общий синергический эффект проявления свойств КЭП никель-бор-фторопласт были предприняты аналогичные исследования более простых по составу КЭП никель-фторопласт. Поскольку в них бориды никеля отсутствуют, то эффект синергизма компонент покрытия должен быть обусловлен только «концентрированием» микрочастиц фторопласта на поверхности трения. Расчетные данные для скорости линейного износа Iло и коэффициента трения fо КЭП никель-фторопласт в паре трения КЭП/КЭП были получены в соответствии с двухкомпонентным приближением модели «концентрационной волны» [2] по следующим формулам:

Iло = б <Iл,тв.о> + (1–б) <Iл,см.о> + δ (<Iл,тв.о> – <Iл,см.о>), (1)

fо = б <fтв.о> + (1–б) <fсм.о> – δ (<fтв.о> – <fсм.о>). (2)

Здесь: б = бтв. и (1–б) = бсм. – объемные доли твердой и смазочной компонент КЭП, соответственно; δ = 4 (1 – б) б2 [1 – k(1 – kн)] – величина относительного синергического эффекта; k – размерный параметр, характеризующий степень дисперсности фаз твердой компоненты КЭП и представляющий собой соотношение между средним размером микрочастиц rтв. твердых фаз в поверхностном слое и толщиной этого слоя Δx, т.е. k = rтв. (rтв. + Δx)-1 (при rтв. → Δx параметр k → 0,5); kн – степень наноструктурности твердой компоненты КЭП, характеризующая объемную долю наночастиц твердых фаз в поверхностном слое Δx со сферической или цилиндрической формой (0 ≤ kн < 1); <Iл,тв.о>, <fтв.о>, <Iл,см.о> и <fсм.о> – средние значения соответствующих индивидуальных характеристик фаз твердой и смазочной компонент КЭП [2]. В соответствии с результатами работы [3] влияние характеристик материала контртела (КТ) (в нашем случае – стали марки Ст45) на свойства КЭП учитывали следующим образом:

Iл = Io + (Δα – Δδ)(Iтв.о – Iсм.о) + (α + δ)(IКТ – Iтво), (3)

f = fo + (Δα – Δδ)(fтв.о – fсм.о) + (α + δ)(fКТ – fтво), (4)

где Δδ ≅ 2α (3α – 2) Δα – изменение относительного синергического эффекта [3], а Δα = α\* – α ≅ (αIтв.о + IКТ)(Iтв.о + IКТ)–1 – α = (1 – α)IКТ(Iтв.о + IКТ)–1 – изменение объемной концентрации твердых фаз при переходе от КЭП к продуктам износа пары трения КЭП/КТ (для пары трения КЭП/КЭП величина Δα формально равна нулю) [3]; (α + δ) = α [1 + 2α(1 – α)(1 + kн)]; Iло и fo – скорость линейного износа и коэффициент трения КЭП в паре трения КЭП/КЭП, определенные по формулам (1) и (2).

КЭП с объемными долями фторопласта 4,6, 8,4 и 14,4 % получали из электролита состава, г/л: хлорид никеля шестиводный 200 – 250, сульфат никеля семиводный 2,5 – 5,0, борная кислота 25 – 40, хлорамин Б 0,5 – 2,5, фторопластовая эмульсия 10 – 20. Режимы электролиза: рН 1,0 – 5,5, температура 18 – 30 оС, катодная плотность тока 0,5 – 9 А/дм2.

На основании данных о фазовом составе и концентрации компонент КЭП (табл. 1) и описанным в работах [2, 3] методикам расчета получены концентрационные зависимости Iл(б) и f(б) при фиксированных значениях параметра kн = 0; 0,05; 0,1; 0,15 и 0,2 и парах трения КЭП/КЭП и КЭП/Ст45.

Таблица 1 – Фазовый состав и концентрация компонент композиционных покрытий

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Покрытие | Компонента КЭП | Фазовый  состав | Массовая доля, % | Объемная доля, % | α |
| Ni  Ni-фторопласт (1)  Ni-фторопласт (2)  Ni-фторопласт (3) | Твердая  Смазочная  Твердая  Смазочная  Твердая  Смазочная  Твердая  Смазочная | Ni  Ni  Ni  Ni | 100  0  99,1  0,9  98,3  1,7  96,9  3,1 | 100  0  95,4  4,6  91,6  8,4  85,6  14,4 | 1,00  0,954  0,916  0,856 |

На основе анализа зависимостей Iл(б) в случае трения по идентичному материалу для КЭП установлено, что величина минимума скорости линейного износа 0,673 мкм·ч–1 при kн = 0 достигается при б = 0,86. По мере увеличения параметра наноструктурности kн до 0,20 минимум скорости линейного износа снижается до величины 0,401 мкм·ч–1 при значении координаты б = 0,83. Для зависимостей Iл(б) в случае трения по стали Ст45 наблюдается аналогичная картина. Значение (Iл)min = 0,520 мкм·ч–1 для kн = 0 достигается при б = 0,80, а с увеличением параметра kн до 0,20 значение минимума Iл снижается до величины 0,356 при б = 0,75. Очевидно, что наблюдаемые количественные изменения зависимостей Iл(б) есть следствие возрастания роли наноразмерных частиц никеля в проявлении синергического эффекта анализируемых КЭП.

На основе анализа зависимостей f(б) установлено закономерное снижение коэффициента трения по мере увеличения объемной доли фторопласта и уменьшения величины fКТ во всем интервале изменения б. Однако, максимальный синергический эффект, т.е. максимальное отклонение зависимостей f(б) от значений, рассчитанных по соответствующей аддитивной модели, достигается при б = 0,72 ± 0,02. Расчетные данные могут быть использованы для определения составов КЭП никель-фторопласт с заданными износостойкими и антифрикционными свойствами. По этим же данным может быть определен оптимальный состав износостойкого и антифрикционного покрытия в исследуемой композиции, т.е. состав с минимальной износофрикционностью (Iл f)|kн. Например, при kн = 0 минимум износофрикционности достигается для КЭП при трении по стали Ст45 при значениях объемной доли фторопласта ~ 0,25.

Экспериментальные данные по износостойкости КЭП в парах трения со сталью Ст45 удовлетворительно согласуются с расчетными при значениях параметров k = 0,5 и kн = 0,07 (табл. 2). Значение параметра наноструктурности, равное 0,07 использовано для получения прогнозных данных для анализируемых КЭП по другим трибологическим характеристикам (табл. 2).

Таблица 2 – Износ и антифрикционность никеля и композиционных покрытий в паре трения со сталью марки Ст45

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Покрытие | Скорость линейного износа,  мкм·ч–1 | | Коэффициент трения | |
| Расчет | Эксперимент | Расчет | Эксперимент |
| Ni  Ni-фторопласт (1)  Ni-фторопласт (2)  Ni-фторопласт (3) | 1,20  0,782  0,608  0,455 | 1,20  0,79  0,59  0,46 | 0,24  0,217  0,192  0,156 | 0,24  –  –  – |

Перечень ссылок

1. Иванов В.В., Балакай В.И., Иванов А.В., Арзуманова А.В. Анализ синергического эффекта в композиционных электролитических покрытиях никель-бор-фторопласт // Журнал прикладной химии. – 2006. – Т. 79. – Вып. 4. – С. 619 – 621.

2. Иванов В.В., Щербаков И.Н., Иванов А.В., Башкиров О.М. Синергический эффект в композиционных материалах при трении и износе // Изв. вузов Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2005. – № 5. – С. 42 – 46.

3. Ivanov V.V., Scherbakov I.N. // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. г. Новочеркасск, 4 нояб. 2005 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2005. – С. 25 – 26.