

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И ОПТИМАЛЬНЫЙ СОСТАВ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ

*Институт прикладной физики Академии наук Республики Молдова,
ул. Академическая, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

Процесс формирования электрохимических композиционных материалов заключается в том, что на катодной поверхности вместе с металлом осаждаются (заращиваются) различные дисперсные материалы: оксиды, карбиды, бориды или сульфиды, а также полимеры, металлы и др. [1]. Значения функциональных характеристик композиционных осадков при прочих равных условиях формирования последних зависят в основном от их состава. Кроме этого, при испытании на износ гальванических композиций установлено, что в зависимости от состава композиции их износостойкость проходит через максимум [2, 3]. Показано [4], что независимо от размера частиц дисперсной фазы (ДФ), в условиях трения со скольжением гальванические композиции с высокопрочными микрочастицами ДФ имеют наивысшую износостойкость при одинаковой концентрации ДФ в осадке (12,7–25,5%). Там же приводится и расчет оптимальной концентрации частиц ДФ с наивысшей износостойкостью в железных композициях с окисью алюминия или карбидом бора при нормальном граничном трении сопряженных поверхностей, протекающем без их повреждения. Результат расчета оптимального состава, выраженный в объемных процентах, составляет 20–40%.

Правдоподобность таких утверждений вызывает большие сомнения, так как диапазон варьирования концентрации ДФ в композиции соизмерим с ее расчетной величиной. В связи с этим задача определения оптимального состава износостойких композиций и установления его взаимосвязи с условиями испытания остается весьма актуальной. Одна из трудностей в изучении данного вопроса состоит в выборе способа испытания композиционных материалов на износ.

Известно, что наиболее распространенным, интенсивным и стандартизованным методом, испытания на износостойкость применительно к которому и производится наибольшее количество испытаний, является абразивное изнашивание [5]. При трении по абразивной поверхности изнашивание частично происходит вследствие микрорезания и в результате малоциклового усталости, обусловленной повторным передеформированием [6]. При этом топография поверхностей трения изменяется практически постоянно.

Допустим, что при трении двух структурированных материалов можно сохранять топографию у одной из поверхностей (абразивной), а механизм изнашивания – у другой (композиции). Тогда в величине параметра сопротивления износу другого материала (композиции) могут отражаться характеристики структурообразования его поверхностных слоев. Исходя из этого предложен лабораторный способ испытания на износ, который связывает износостойкость композиционных материалов с их структурообразованием [7].

Методика исследования. В основе методики лабораторных испытаний на изнашивание лежит допущение, что у жесткой абразивной поверхности расстояние между частицами сохраняется постоянным, а за период испытания абразивное свойство контртела в контакте с образцами меняется одинаково или отличается незначительно. Выскабливание частиц из связки абразивной поверхности или прилипание металла к их вершинам считается началом перехода к другому виду изнашивания материала. Исследованные гальванические покрытия формировались в электролите железнения при одинаковых условиях электролиза с диспергированными микрочастицами окиси алюминия одинакового зернового состава и различного размера зерна (М7, М14 и М20).

Для испытания использована машина трения типа СМЦ-2, а в качестве трущего контакта взято сопряжение по схеме вал – цилиндрическая колодка.

На рис. 1 представлена схема лабораторного испытания на износ при трении скольжения жесткой абразивной поверхности с фиксированной геометрией поверхности, где *l* – абразивная по-

верхность, 2 – ролик испытываемого материала, 3 – воронка и пробирка 4 для сбора продуктов износа 5 путем смыва ее дистиллированной водой.

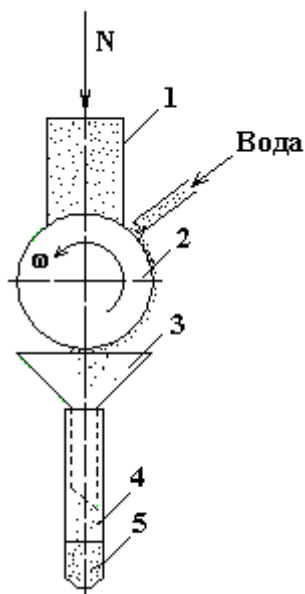


Рис. 1. Схема лабораторных испытаний на износостойкость при трении скольжения жесткой абразивной поверхности с фиксированной геометрической структурой

Процесс протекает следующим образом. Образец в виде ролика диаметром 40 мм и шириной 15 мм устанавливается на валу машины трения. На цилиндрическую поверхность ролика сверху давит абразивная поверхность в виде колодки с контактной поверхностью 10×10 мм, а также подается дистиллированная вода для смыва и последующего сбора продуктов износа посредством воронки и пробирки.

Вид изнашивания определяли по характеру изменения величины момента трения, а также путем исследования продуктов износа. Параметры режима и условий трения выбраны на основе общепринятых величин в триботехнике для такого вида абразивных испытаний:

- скорость скольжения $V_{cp} = 0,27$ м/с;
- усилия нагружения абразивной поверхности: 1; 1,25, 1,5; 1,75; 2,0 МПа.
- износ образцов определялся при постоянном количестве циклов (1000);
- в качестве жесткой поверхности с фиксированной геометрической структурой использован абразивный брусок марки К8 10-125 25А6ПС М19 КБ ГОСТ 2456-82.

Так как абразивную износостойкость определяют путем сравнения результатов испытаний эталонного и испытываемого образцов, то в качестве эталонного применяли сталь 45, нормализованную до $HV = 2$ ГПа ($HRC = 52-55$). Величину относительной износостойкости рассчитывали по формуле

$$K = \frac{\Delta m_{N=1,25}^e}{\Delta m_{N=1-2}^j}, \quad (1)$$

где $\Delta m_{N=1,25}^e$ – потеря веса эталона при нагрузке 1,25 МПа, мг; $\Delta m_{N=1-2}^j$ – потеря веса испытываемого материала при нагрузке от 1 до 2 МПа, мг. Потеря веса эталонного образца при нагрузке 1,25 МПа составляла 312 мг.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Как показали исследования, эталонный образец работает в самом узком диапазоне режима нагрузок (1–1,5 МПа). Кроме того, у эталона оказалось и самое низкое относительное сопротивление износу. Для некоторых исследуемых композиций выявлены лимитирующие пределы сохранения режима изнашивания, однако для всех отмечены общие закономерности (рис. 2). Например, для высококонцентрированных композиций с частицами окиси алюминия М7 (рис. 2,а, кривая 4, концентрация ДФ в осадке $p_v = 22,1\%$) сопротивление износу при нагрузке 2 МПа снижается до уровня износостойкости железных осадков при нагрузке 1,75 МПа (рис. 2,а, кривая 1 – Fe), а для низкоконцентрированных (рис. 2,а, кривая 2, концентрация ДФ в осадке $p_v = 3,46\%$) – режим изнашивания сопровождается отрывом крупных абразивных частиц с поверхности контртела при нагрузках выше 1,75 МПа, как и для железных осадков. Сопротивление износу железных композиций с частицами окиси алюминия М14 представлены на рис. 2,в и г. Результаты показывают, что их сопротивление износу выше, чем у образцов с частицами М7, а режим изнашивания сохраняется во всем диапазоне испытаний. Результаты испытаний железных композиций с ча-

стицами М20, приведенные на рис. 2, *д* и *е*, свидетельствуют о самом высоком уровне сопротивления износу, например для осадка состава, $p_V = 14,6\%$.

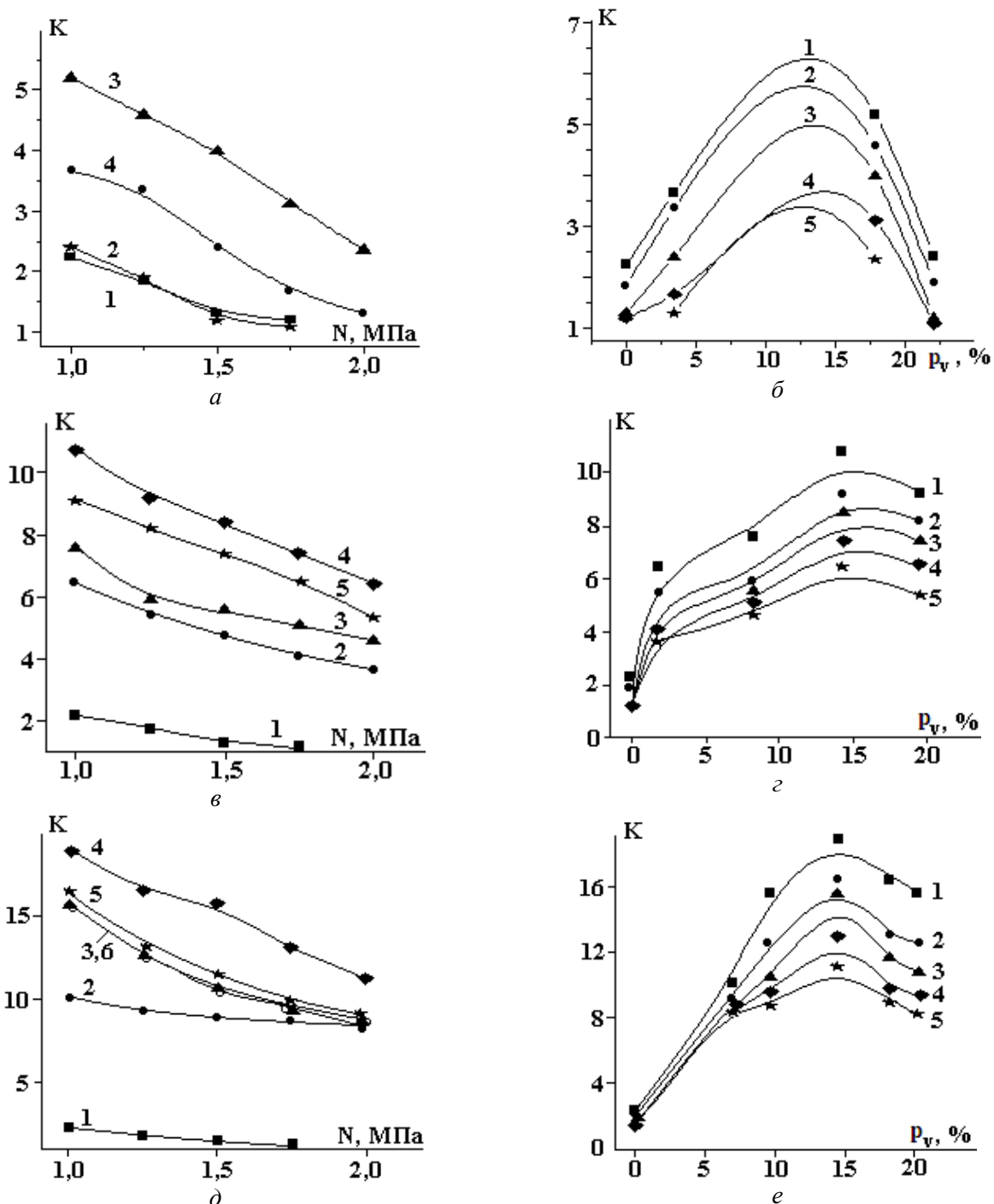


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости K железных композиций от нагрузки N (*а*, *в*, *д*) и концентрации p_V (*б*, *г*, *е*) для частиц дисперсной фазы М7 (*а*, *б*), М14 (*в*, *г*), М20 (*д*, *е*). *а*: 1 – Fe; 2 – 3,46 % М7; 3 – 17,9 % М7; 4 – 22,1% М7; 5 – 2 МПа; *б*: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2 МПа; *в*: 1 – Fe; 2 – 1,8 % М14; 3 – 8,2 % М14; 4 – 14,2% М14; 5 – 19,5% М14; *г*: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2 МПа; *д*: 1 – Fe; 2 – 7,0 % М20; 3 – 9,6 % М20; 4 – 14,5% М20; 5 – 18,2% М20; *е*: 1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2 МПа

Из рис. 2 видно, что кривые зависимостей относительного сопротивления изнашиванию композиций от концентрации ДФ представляют собой не что иное, как параболы, обращенные вогнутой стороной вверх. Если выполнить квадратичную интерполяцию по трем точкам результатов испытаний для одного и того же типа композиции, принадлежащих разным ветвям параболы, то можно определить оптимальный состав наиболее износостойкого осадка. Квадратичную интерполяцию осуществили с использованием системы уравнений вида

$$K(p_{V,i}) = ap_{V,i}^2 + bp_{V,i} + c, \quad (2)$$

где: $K(p_{V,i})$ – относительная износостойкость испытуемого материала; $p_{V,i}$ – концентрация дисперсной фазы в испытуемом материале; a, b, c – коэффициенты уравнения.

Решив систему уравнений (2) методом Гаусса для результатов представленных испытаний, определили коэффициенты уравнения и координаты вершин парабол по оси концентрации ДФ. Результаты расчетов представлены на рис. 3 в виде кривых ($k1-k10$) зависимостей интерполированной координаты вершины парабол (оптимального состава) p_V^{opt} от нагрузки N и размера частиц ДФ. Здесь точки ветвей параболы разделены наклонной чертой. Так, на рис. 3,а приведены кривые, рассчитанные по точкам графиков (ветвей парабол), представленных рис. 2,е, где $k1$ соответствует первой, третьей и пятой (1,3/5) точкам. Наклонная черта разделяет соответствующие ветви параболы. Аналогично $k2 - 1,3/4$, $k3 - 1/4,5$. Все γ – для ДФ М20. На рис. 3,б представлены кривые, рассчитанные по точкам графиков, представленных рис. 2,б, г и е: $k4 - 1,2/3$ (М7), $k5 - 2,3/4$ (М14), $k6 - 1,2/5$ (М20). На рис. 3,в представлены кривые зависимостей по рис. 2,е, где $k8 - 1,2/5$, $k9 - 1,2/4$; $k10 - 2/4,5$ (М20).

Как видно из рис. 3, оптимальная концентрация ДФ в износостойких композициях зависит от величины нагрузки и выбранных точек интерполяционного расчета и может уменьшаться (рис. 3,а), оставаться приблизительно на том же уровне (рис. 3,б) или иметь максимум (рис. 3,в).

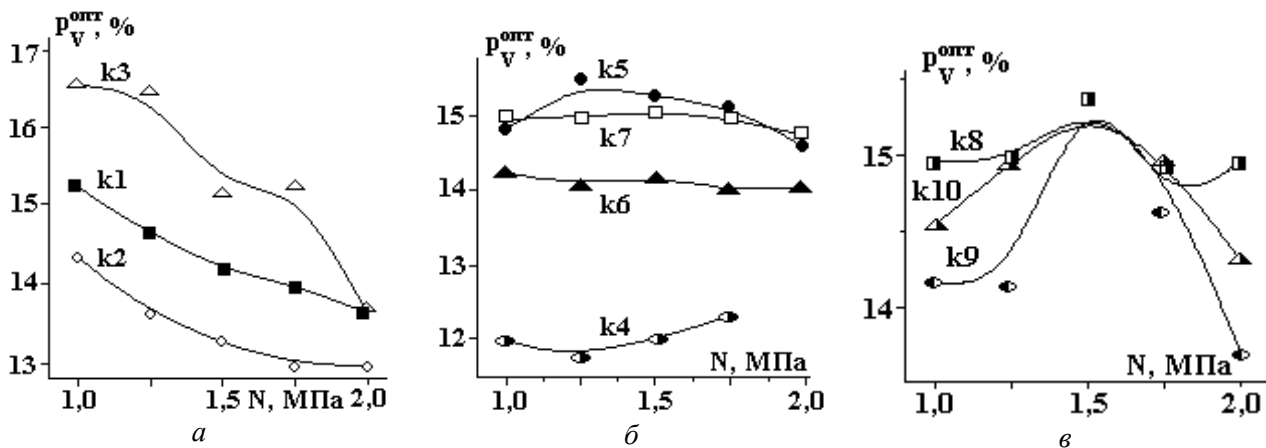


Рис. 3. Зависимость интерполированной координаты вершины параболы по составу композиции p_V^{opt} от нагрузки N для расчетных точек ветвей параболы и размера дисперсной фазы

В работе [4] приводится расчет оптимального состава композиционного осадка и утверждает, что максимальное сопротивление износу достигается, когда частицы ДФ распределены в объеме металла на критическом расстоянии, при котором плоскости касательных напряжений их не пересекают. При этом направление плоскости действия максимальных напряжений от действия внешних сил (тангенциальных и нормальных) определяют по отношению к нормали поверхности трения. Эта плоскость составляет угол, который образован из суммы двух углов: α – угол равнодействующего направления плоскости сечения максимальных касательных напряжений, вдоль которой происходит разрушение матрицы ($\alpha = \pi/4$), и α' – угол равнодействующего направления внешних сил трения F_{Tp} , направленных по касательной к трущейся поверхности, и нормальной нагрузки N ($\alpha' = \arctg(F_{Tp} / N) = \arctg \mu$, где μ – коэффициент трения). Таким образом, с возрастанием нагрузки в испытуемых сопряжениях увеличится коэффициент трения и критическое расстояние между частицами. При этом оптимальная концентрация дисперсной фазы в покрытиях, обеспечивающая максимальную износостойкость, должна уменьшиться. Такую закономерность можно видеть на рис. 3,а. Однако не все приведенные результаты исследуемых параметров имеют подобный характер.

В работе [2] приведено выражение

$$\lambda_{cp} = \left[\left(\frac{\bar{V}_p}{V_p} \right)^{1/3} - 1 \right] d_3, \quad (3)$$

где λ_{cp} – среднее расстояние между частицами дисперсной фазы; $\overline{V_p}$ – относительная характеристика заполнения (отношение объема фазы к объему пространства) при плотной упаковке частиц; V_p – относительная характеристика содержания ДФ в композиции (отношение объема, занимаемого фазой, к общему объему композиции); d_3 – эквивалентный диаметр частиц ДФ.

Из выражения (3) видно, что расстояние между частицами в осадке зависит от величины отношения относительных характеристик концентраций при плотной и реальной упаковке частиц. Поэтому критическое расстояние между частицами ДФ износостойкой композиции также будет зависеть от величины плотности упаковки при их оптимальной концентрации. Однако величины плотности упаковки частиц ДФ в точках расчета могут не совпадать с распределением величин их концентраций. В таком случае их средняя расчетная величина не может соответствовать величине критического расстояния и расчетной оптимальной концентрации.

Можно также допустить, что в результате приложения нормальной нагрузки к композиционному материалу расстояние между частицами меняется. В таком случае величины реальных концентраций частиц ДФ в точках расчета будут зависеть от приложенной нагрузки и не соответствовать первоначальным значениям.

Исходя из вышесказанного можно заключить, что если нам не известны величины плотностей упаковки в точках расчета композиционного материала, а также степень изменения их реальной концентрации в результате приложения нагрузки, тогда трудно оценить степень изменения средней оптимальной концентрации износостойкого осадка с изменением нагрузки при испытании. Поэтому, как видно из рис. 3, в зависимости от выбранных точек расчета, ρ_V^{opt} имеет различные закономерности изменения.

Кажется очевидным, что величина оптимальной концентрации, интерполированной по результатам исследования зависимости износостойкости гальванических композиций от их концентраций, является средней величиной оптимальных концентраций для различных плотностей упаковок частиц ДФ в осадке. Если не известны плотности упаковки частиц ДФ и степень изменения концентрации в результате приложения нагрузки к композиционному материалу, трудно оценить, как будет изменяться средняя оптимальная концентрация износостойкого осадка с изменением нагрузки испытания.

Автор выражает глубокую признательность проф. А.И. Дикусару за полезные советы и существенные замечания при подготовке статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сайфуллин Р.С. Неорганические композиционные материалы. М., 1983.
2. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев, 1985.
3. Астахов Г.А. Восстановление цилиндров двигателей внутреннего сгорания композиционными электрохимическими покрытиями на основе железа проточным электролизом / Автореф. дис. канд. техн. наук. Кишинев, 1989.
4. Астахов Г.А., Гурьянов Г.В. Некоторые аспекты связи износостойкости композиционных электрохимических покрытий с их структурой // Восстановление деталей электролитическим железом. Кишинев, 1987.
5. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах стран мира. М., 1993.
6. Гененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М., 1966.
7. Cerere de brevet. MD. Nr. dep. a 2004 0218, Cl. Int⁷ G01 N 3/56, Metodă de încercare la uzură / T. Borțoi.

Поступила 21.01.05

Summary

The opportunity of an establishment of interrelation between wear resistance and structure of galvanic compositions is investigated. At test for wear resistance the counterbody with the rigid characteristic of a surface is used. It is shown, that the curve of dependence of wear resistance from concentration of particles of a disperse phase in a composition represents a parabola. It is established, that at square-law interpolation of optimum structure on three points of test of a composition depending on loading the size of optimum concentration is average size of optimum concentration of various density of packings of particles of a disperse phase in a deposit.