

Т.В. Борцой

## УПРОЧНЯЮЩИЕ И РАЗУПРОЧНЯЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ В ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ЖЕЛЕЗНЫХ ОСАДКАХ ПРИ ИЗНАШИВАНИИ ТРЕНИЕМ

*Институт прикладной физики АН РМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, М -2028, Республика Молдова, [bortzoi\\_tudor@yahoo.com](mailto:bortzoi_tudor@yahoo.com)*

Одним из важнейших функциональных свойств железных гальванических осадков (а также сплавов железа и композиций) является их износостойкость. В связи с этим для выбора оптимальных составов железных осадков, которые могли бы наилучшим образом работать в заданных условиях эксплуатации, необходимо исследовать отличительные особенности механизма их изнашивания.

Поверхностные слои материала в результате изнашивания претерпевают различные изменения, определяющие его сопротивление к износу. В связи с этим для исследования изнашивания металлических материалов на практике чаще всего применяют косвенные методы: оценку микротвердости, микроструктуры и тонкой структуры в приповерхностных слоях; шероховатость поверхности и другие физико-механические характеристики [1–4 и др.].

Отметим, что процессы, протекающие в приповерхностных слоях, по их влиянию на сопротивление материалов к изнашиванию, подразделяются на две группы: упрочняющие – повышающие износостойкость и разупрочняющие – снижающие износостойкость [3, 4 и др.]. Однако упрочняющие и разупрочняющие процессы по своей природе весьма многообразны, и в реальных условиях возможно одновременное их протекание [3].

Упрочняющие и разупрочняющие процессы, протекающие при трении в приповерхностных слоях в железных гальванических осадках, исследовались в работах [1, 2 и др.]. В [1] установлено, что при трении гальванического железа в приповерхностных слоях протекающие процессы вызывают изменения микротвердости, шероховатости и тонкой структуры. В то же время покрытия, которые в процессе испытания приобретали значительный наклеп, характеризовались большим износом.

Исследование тонкой структуры матрицы железной композиции с высокопрочными частицами дисперсной фазы, такими как окись алюминия и карбид бора, испытанные в разнообразных условиях, показало, что в процессе трения размеры блоков мозаики матрицы практически не изменялись [2]. Таким образом, несмотря на многочисленные исследования в данной области, прямой связи между износостойкостью железных осадков и упрочняющими и разупрочняющими процессами приповерхностных слоев не установлено. В связи с этим исследование механизма изнашивания железных осадков является весьма актуальной задачей и имеет важное теоретическое и прикладное значение.

Исследования, направленные на более глубокое изучение механизма изнашивания, должны позволить обоснованно произвести выбор оптимального состава железных осадков и технологических параметров процессов упрочнения или восстановления трущихся поверхностей деталей машин.

В некоторых работах по трибологии [3–5 и др.] установлено, что при отсутствии в приповерхностных слоях трения каких-либо структурных или иных изменений сопротивление их изнашиванию пропорционально нагрузке. Например, при установившемся режиме абразивного изнашивания материалов каких-либо изменений свойств в приповерхностных слоях не наблюдается, и износ характеризуется равномерной и линейной зависимостью от нагрузки [5 и др.].

Очевидно, проявление неоднородности изменения сопротивления износу металлического материала может указывать на преобладание в приповерхностных слоях трения процессов упрочнения или разупрочнения.

Неоднородность изменения сопротивления износу можно выявить испытанием материалов на изнашивание, задавшись условиями трения, определяемыми: рядом нормальных нагрузок с одинаковым интервалом значений, установившимся режимом и количественным показателем износа. В таком

случае степень и направленность неоднородного изменения сопротивления изнашиванию материала можно установить и оценить на основе анализа значений относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$  статистической совокупности экспериментальных результатов процесса изнашивания [6, 7].

Для статистического ряда значений совокупности  $X$   $\delta_j$  определяются из выражения

$$\delta_j = \frac{(h_j - \bar{h})}{\varepsilon_x}, \quad (1)$$

где  $h_j = x_i - x_{i+1}$  – разница между отклонениями статистической единицы  $x_i$  от рядомстоящей (смежной)  $x_{i+1}$ ;  $\bar{h} = \sum_{j=1}^m [x_i - x_{i+1}] / m = \sum_{j=1}^m h_j / m$  – средняя величина для  $m = n - 1$  отклонений ря-

домстоящих единиц в совокупности  $X$ ;  $\varepsilon_x = \sqrt{\sum_{j=1}^m [x_i - x_{i+1}]^2 / m}$  – среднее квадратичное отклонение рядомстоящих (смежных) единиц совокупности  $X$ , составленной из  $m = n - 1$  рядомстоящих (смежных) отклонений.

Отметим, что относительные отклонения рядомстоящих единиц  $\delta_j$  являются универсальными, так как с их помощью можно сравнивать степень изменения значений единиц разных совокупностей одного параметра (например, сопротивления изнашиванию) или совокупностей различных параметров (микротвердости, шероховатости, значения параметров тонкой структуры и т.д.).

#### Методика исследования

Объектом исследования были гальванические осадки на основе железа, сформированные из различных растворов при оптимальных условиях электролиза, испытываемые при трении скольжения с рядом нормальных нагрузок. Осадки железа и их композиции формировали согласно рекомендациям, представленным в работе [1], сплавов железо-кобальт и железо-никель – в [2, 8]. Дисперсная фаза в железных композициях представляла собой частицы окиси алюминия зернистостью М7, М14 и М20. В качестве эталонного материала была использована закаленная сталь 45.

Железные гальванические осадки подвергались испытанию при трении скольжения способом малоциклового усталостного изнашивания, который характеризуется физической определенностью процесса изнашивания, интенсивностью истирания, хорошей воспроизводимостью и несложной техникой его осуществления [9, 10].

Результаты испытаний обрабатывались общеизвестными в трибологии методами, а также с применением относительных отклонений рядомстоящих единиц для совокупностей значений.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Исследования показали, что характер изменения сопротивления изнашиванию  $K$  от нормальной удельной нагрузки  $N$  для выбранных железных гальванических осадков имеет определенные особенности и различия (см. рис. 1,а – рис. 4,а).

Гальванические сплавы характеризуются тем, что с увеличением нормального удельного давления  $N$  с 1 до 2 МПа их сопротивление изнашиванию (см. рис. 1,а, кривые 2 (железо-кобальт) и 3 (железо-никель)) уменьшается быстрее, чем у чистого железа (кривая 4) и закаленной Ст.45 (кривая 1). Самые низкие значения показателя сопротивления изнашиванию  $K$  имеет Ст. 45 (см. рис. 1,а, кривая 1), которую испытывали до нормального давления 1,5 МПа, так как при более высоких нагрузках изменяется характер изнашивания контртела.

У железных осадков (кривая 4) характер изнашивания контртела также изменяется, но при нагрузках выше  $N=1,75$  МПа. Изнашивание железных осадков при малых условиях нагружения (до  $N=1,25$  МПа) характеризуется меньшим значением показателя сопротивления изнашивания  $K$ , чем у сплавов железо-кобальт (кривая 2) и железо-никель (кривая 3). С увеличением нагрузки ( $N=1,25-1,75$  МПа) сопротивление изнашиванию  $K$  железных осадков становится больше, чем у сплава железо-никель, и достигает значений, равных полученным для сплава железо-кобальт.

Зависимость относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$ , сопротивления изнашивания  $K$  для материалов Ст.45 и осадка железо-никель указывает на то, что направление и характер из-

менения  $\delta_j$  одинаковы – от наибольших значений к наименьшим (см. рис. 1,б, соответственно – кривые 1 и 3).

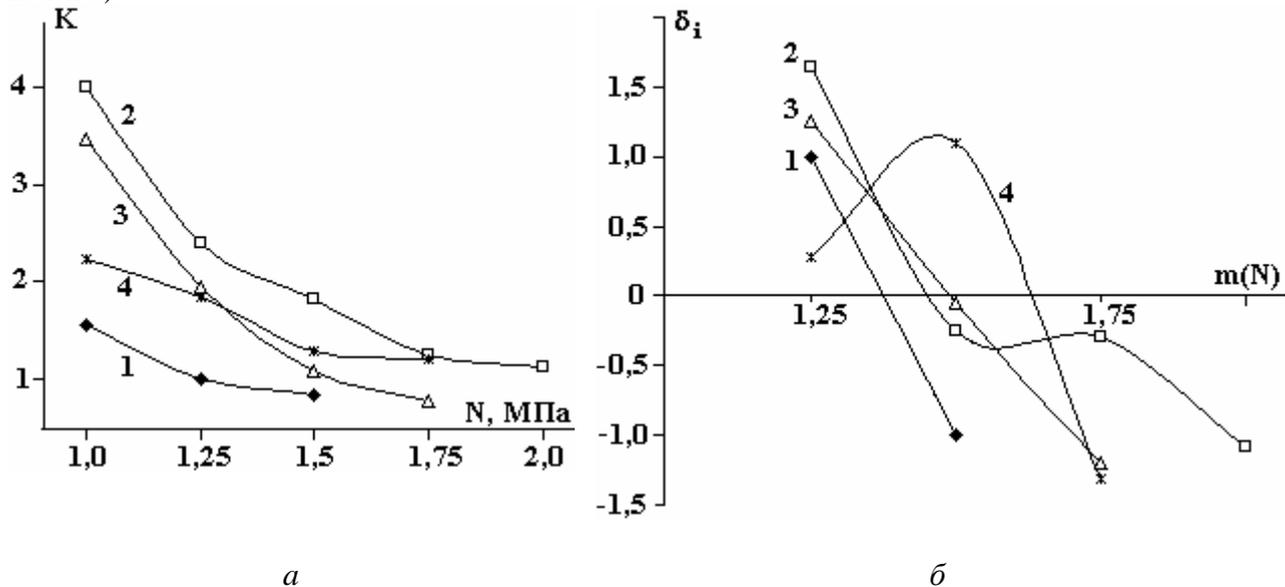


Рис. 1. Зависимость износостойкости  $K$  от нагрузки  $N$  (а) и относительных отклонений  $\delta_i$  (б) от интервала нагрузки  $m$  для Ст.45(1), сплава Fe-Co(2), сплава Fe-Ni(3) и Fe (4)

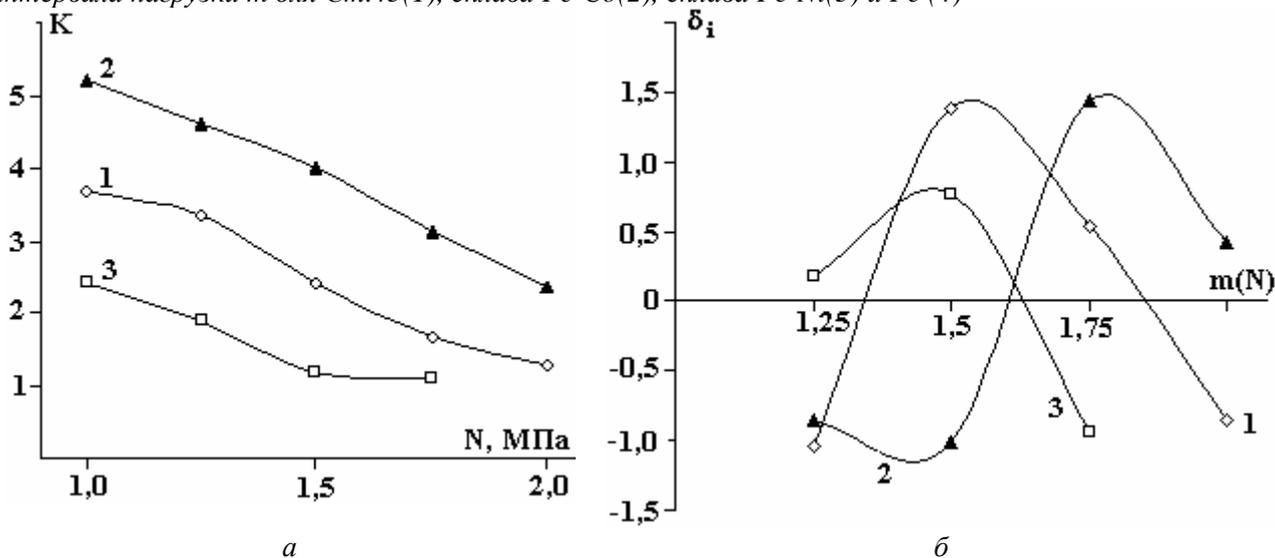


Рис. 2. Зависимость износостойкости  $K$  от нагрузки  $N$  (а) и относительных отклонений  $\delta_i$  (б) от интервала нагрузки  $m$  для ЭКМ на основе железа при концентрации частиц окиси алюминия зернистостью М7(в % масс.) 3,46;(1), 17,9 (2); 22,1(3)

Очевидно, что согласно предложенному методу с ростом нагрузок испытания в поверхностных слоях данных материалов преобладают упрочняющие процессы, а их вклад в значения сопротивления изнашиванию возрастает.

При трении железных осадков (см. рис. 1,б, кривая 4) в области низких нагрузок (до  $N=1,5$  МПа) значения  $\delta_j$  возрастают. В данной области нагружения в поверхностных слоях преобладают разупрочняющие процессы. В области более высоких нагрузок значения  $\delta_j$  снижаются, что указывает на преобладание упрочняющих процессов. В точке смены направления изменения значений  $\delta_j$  на кривой 4 вклады процессов упрочнения и разупрочнения в значения сопротивления изнашиванию уравниваются.

Для железокобальтовых осадков (см. рис. 1,б, кривая 2) вклад упрочняющих процессов при трении доминирует во всем диапазоне нагрузок. Однако в области нагрузок  $N=1,5-1,75$  их значения уравниваются с разупрочняющими процессами.

Анализ результатов испытания композиционных осадков показал, что их сопротивление изнашиванию зависит от зернистости ( $M$ ) и концентрации (%) дисперсной фазы, а также от интервала  $t$  нагрузок испытания  $N$  (см. рис. 2,а – 4,а).

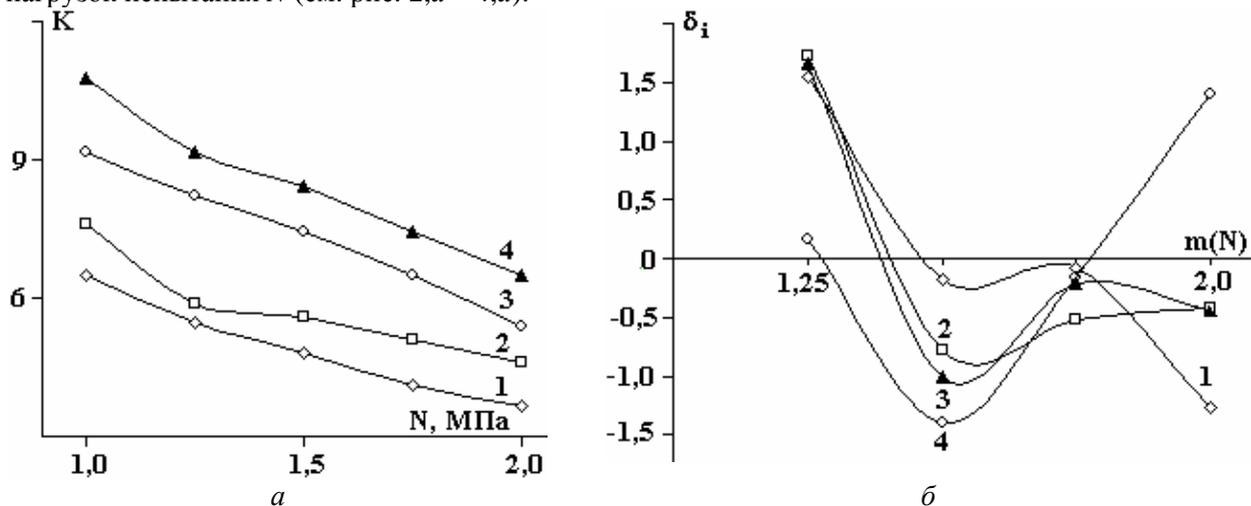


Рис. 3. Зависимость износостойкости  $K$  от нагрузки  $N$  (а) и относительных отклонений  $\delta_i$ (б) от интервала нагрузки  $t$  для ЭКМ на основе железа при концентрации частиц окиси алюминия зернистостью  $M14$ (в %) 1,8(1), 17,9 (2); 14,2 (3) и 19,5 (4)

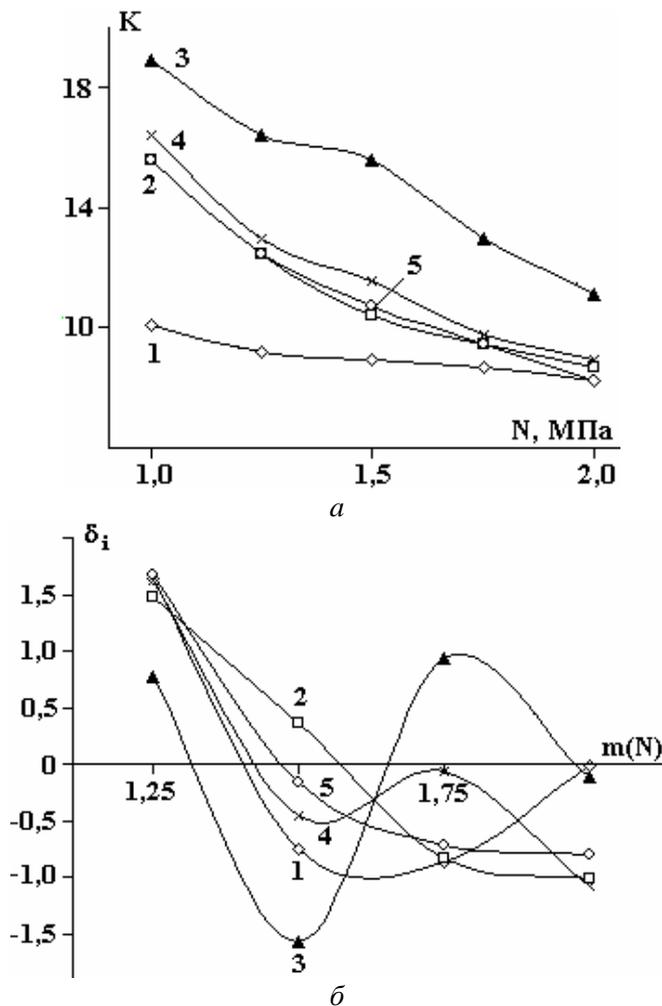


Рис. 4. Зависимость износостойкости  $K$  от нагрузки  $N$  (а) и относительных отклонений  $\delta_i$ (б) от интервала нагрузки  $t$  для ЭКМ на основе железа при концентрации частиц окиси алюминия зернистостью  $M20$  (в %) 7,0 (1), 9,6(2), 14,5(3), 18,2 (4) и 20,3(5)

Высококонтрированные композиции с частицами дисперсной фазы (ДФ) 22,1% масс. и зернистостью М7 (см. рис.2,а, кривая 3) имели сопротивление изнашиванию  $K$  на уровне железных осадков (рис. 1,а, кривая 4). Для низкоконтрированных композиций с частицами М7 3,46% характерны более высокие значения сопротивления изнашиванию  $K$  (см. рис. 2,а, кривая 1), чем для высококонтрированных (кривая 3). Наибольшее сопротивление изнашиванию имеют композиции с концентрацией частиц ДФ 17,9% (кривая 2).

Зависимость относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$  от интервала  $m$  нагрузок испытания  $N$  для композиций с частицами М7 показывает, что для низкоконтрированных (см. рис. 2,б, кривая 1) и высококонтрированных осадков (кривая 3) в области нагрузок  $N=1-1,5$  МПа в приповерхностных слоях преобладают разупрочняющие процессы. А при дальнейшем увеличении нагрузки испытания преобладают упрочняющие процессы. Для композиций с самыми высокими значениями сопротивления изнашиванию (см. рис. 2,а, кривая 2) выявлена цикличность в преобладании в приповерхностных слоях процессов упрочнения и разупрочнения.

У композиций с частицами зернистостью М14 отмечено наибольшее сопротивление изнашиванию при концентрации 14,2% (см. рис. 3,а, кривая 3), а наименьшее – при 1,8% (кривая 1).

Характер изменения относительных отклонений  $\delta_i$  сопротивления изнашиванию от интервала нагрузок испытания  $m$  для композиций с частицами М14 неоднозначен (см. рис. 3,б). Для исследуемых композиций с частицами М14 при трении отмечено преобладание упрочняющих процессов в диапазоне нагрузок 1–1,5 МПа. Дальнейшее повышение нагрузки испытания (1,5–2,0 МПа) композиций с 19,5% частиц в поверхностных слоях преобладают разупрочняющие процессы (см. рис. 3,б, кривая 4). При трении композиций с наибольшим сопротивлением износу поверхностным слоям характерно цикличное преобладание процессов упрочнения и разупрочнения (см. рис. 3,б, кривые 1 и 3).

Для испытуемых материалов наиболее высокое сопротивление изнашиванию отмечено у композиции с частицами зернистостью М20 (см. рис. 4,а). Кроме этого, у композиции с концентрацией 7,0% отмечены и наиболее стабильные значения износостойкости в зависимости от нагрузки (см. рис. 4,а, кривая 1). Композиционный материал с концентрацией 14,5% частиц дисперсной фазы зернистостью М20 имеет наивысшую износостойкость (см. рис. 4,а, кривая 3).

Исследование зависимости относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$  интервала  $m$  нагрузок испытания  $N$  для композиций с частицами М20 показывает, что композиции с 7% дисперсной фазы характеризуются поверхностными слоями, у которых при малых нагрузках преобладают процессы упрочнения, а при более высоких нагрузках – процессы разупрочнения (см. рис. 4,б, кривая 1). Композиции с более высокими концентрациями характеризуются в основном поверхностными слоями, у них при трении преобладают процессы упрочнения во всем диапазоне нагрузок (см. рис. 4,б, кривые 2 и 5) или явления цикличности процессов упрочнения и разупрочнения (см. рис. 4,б, кривые 3 и 4).

Отметим, что для композиций с частицами дисперсной фазы М7, М14, М20 и с концентрациями, близкими к оптимальным [8], проявляется аналогичный характер поведения упрочняющих и разупрочняющих процессов (см. рис. 2,б–4,б), то есть в испытуемом диапазоне нагрузок эти материалы при трении характеризуются цикличностью процессов упрочнения и разупрочнения поверхностных слоев.

По результатам исследования можно сделать заключение, что, применяя способ испытания материалов на изнашивание с равномерным рядом нагрузок и метод оценки относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$  сопротивления материалов на износ, можно оценить степень и направление преобладания процессов упрочнения или разупрочнения в их поверхностных слоях. В этом случае отпадает необходимость в применении косвенных способов исследования физико-механических свойств гальванических осадков.

### **Выводы**

1. Экспериментально установлено, что, задавшись условиями трения, определяемыми рядом нормальных нагрузок с одинаковым интервалом значений, установившимся режимом и количественным показателем изнашивания, можно выявить неоднородность изменения сопротивления на износ металлических материалов.

2. Выявлено, что степень и направленность неоднородного изменения сопротивления изнашиванию металлического материала можно установить и оценить на основе анализа значений относительных отклонений рядомстоящих единиц  $\delta_j$  статистической совокупности экспериментальных ре-

зультатов изнашивания. При этом вклад упрочняющих и разупрочняющих процессов в значение сопротивления изнашиванию можно оценить по закономерности изменения значений относительных отклонений рядомстоящих единиц статистической совокупности значений сопротивления изнашиванию.

3. Установлено, что при изнашивании сплавов гальванических железных осадков вклад упрочняющих и разупрочняющих процессов в сопротивление износу зависит от состава сплава и нагрузки испытания. При изнашивании композиций на основе железа с частицами окиси алюминия и с концентрациями, близкими к оптимальному составу, вклад упрочняющих и разупрочняющих процессов характеризуется цикличностью и зависит от нагрузки в сопряжении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гологан В.Ф., Аждер В.В., Жавгурян В.Н. Повышение долговечности деталей машин износостойкими покрытиями. Кишинев: Штиинца, 1979. 112 с.
2. Гурьянов Г.В. Электроосаждение износостойких композиций. Кишинев: Штиинца, 1985. 240 с.
3. Тененбаум М.М. Износостойкость конструкционных материалов и деталей машин при абразивном изнашивании. М.: Машиностроение, 1966. 332 с.
4. Волков Ю.В., Волкова З.А., Кайгородцев Л.М. Долговечность машин, работающих в абразивной среде. М.: Машиностроение, 1964. 220 с.
5. Григоркин В.И. Аустенитная марганцовистая сталь и рельсовая проблема. // *Металловедение, термообработка и физические свойства металлов и сплавов*. Липецк: МИСИС, 1970. Ч. 1. Вып. 7. С. 159–169.
6. Борцой Т.В. Статистические методы оценки связи между параметрами электрохимической системы с рассредоточенными значениями на электроде // *Электронная обработка материалов*. 2006. № 4. С. 24–36.
7. Борцой Т.В. Возможности развития статистических методов оценки рассредоточенных параметров электрохимических осадков на макроуровне // *Электронная обработка материалов*. 2007. № 5. С. 67–74.
8. Андреева Л.Н. Электроосаждение сплава железо-кобальт // В кн. Восстановление и упрочнение деталей машин износостойкими покрытиями. Кишинев: Штиинца, 1995. С. 9–16.
9. Borțoi T. Procedeu de încercare la uzură abrazivă și metodă de determinare a concentrației fazei disperse a materialului compozițional cu rezistență maximă la uzură. В.І. MD, nr. 3087. ВOPI nr.6/2006.
10. Борцой Т.В. Износостойкость и оптимальный состав гальванических композиций // *Электронная обработка материалов*. 2005. № 4. С. 19–23.

*Поступила 22.10.07*

## Summary

The method of revealing and estimation of hardened and lossed of strength processes in galvanic deposits on the basis of iron at wear process by their friction by sliding is submitted. Thus the contribution hardened and lossed of strength processes in values of resistance of wear process can be estimated on law of change of values of relative deviations row standing units of statistical set of values of resistance of wear process. It is established, that at wear process of alloys of galvanic iron deposits the contribution hardened and lossed of strength processes in resistance to deterioration depends on structure of an alloy and loading of test. At wear process of compositions on the basis of iron, with particles aluminium oxide and with concentration close to optimum structure, the contribution hardened and loss of strength processes is characterized by cyclicity and depends on loading in interface.