

УДК 620.178.162.4; 620.194.3
DOI: 10.12737/20239

Е.А.Памфилов, Я.С.Прозоров, С.В.Кузнецов, С.В.Лукашов

ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Дана краткая характеристика коррозионно-механического вида изнашивания. Рассмотрены схемы для его исследования в условиях трения скольжения. Выделены основные группы методов исследования коррозионно-механического изнашивания: гальванические, потенциодинамические, потенциостатические и электрохимическая импедансная спектроскопия. Приведено описание каж-

дой группы методов и сделан их краткий сравнительный анализ.

Ключевые слова: коррозионно-механическое изнашивание, трение скольжения, трибокоррозия, трибоэлектрохимическая ячейка, электрохимическая импедансная спектроскопия.

E.A. Pamfilov, Ya.S. Prozorov, S.V. Kuznetsov, S.V. Lukashov

INVESTIGATION PECULIARITIES OF MECHANOCHEMICAL WEAR UNDER CONDITIONS OF SLIDING FRICTION

Mechanochemical wear (tribocorrosion) is metal destruction caused by a simultaneous action of friction and corrosion. In many cases the interference of mechanical and chemical phenomena (synergism) is manifested as a result of which the situation of wear can change considerably. Tribocorrosion occurs in a wide spectrum of combined mechanical and chemical effect. The regularities of the interference manifestation of mechanical and chemical factors in tribocorrosion have been studied insufficiently neither theoretically, nor experimentally. For the analysis of tribocorrosion properties of materials under conditions of sliding friction there is offered the use of the system allowing the

exposition of a sample simultaneously to tribological and corrosion processes.

There are emphasized and described merits and demerits of the basic groups of methods for the investigation of mechanochemical wear: galvanic, potention-dynamic and electro-chemical impedance spectroscopy.

It is defined that at the investigation of tribocorrosion it should be purposeful to use electro-chemical methods inasmuch as they allow modeling many chemical properties of corrosion environment at the simultaneous mechanical effect.

Key words: mechanochemical wear, sliding friction, tribocorrosion, triboelectrochemical cell, electrochemical impedance spectroscopy.

Коррозионно-механическое изнашивание (трибокоррозия) представляет собой разрушение материала в результате одновременного действия трения и коррозии. При этом во многих случаях проявляется взаимовлияние механических и химических явлений (синергизм), в результате чего картина изнашивания может существенно изменяться. Трибокоррозия происходит в широком спектре совместных механических и химических воздействий. Механическое изнашивание при этом возникает в результате фрикционного контакта твердых тел (трение скольжения и качения, фреттинг), воздействий потока жидкости (кавитация) и абразивных частиц (эрозия). Коррозия возникает вследствие присутствия в зоне контакта химически

агрессивных жидких сред или окисляющих газов. Эксплуатация в подобных условиях характерна для металлургического оборудования, техники химической, деревообрабатывающей, строительной и нефтяной отраслей промышленности.

К сожалению, закономерности проявления взаимовлияния механического и химического факторов трибокоррозии пока недостаточно изучены как теоретически, так и экспериментально. Это связано с тем, что для изучения коррозионно-механического изнашивания необходимо одновременное воспроизведение механических и химических составляющих процессов изнашивания. В последнее время в зарубежной и отчасти отечественной практике исследования коррозионно-

механического изнашивания используются методы, применяемые при изучении коррозии. С их помощью можно понять, как механическое изнашивание влияет на кинетику реакций коррозии, а также оценить влияние этих реакций на механические характеристики фрикционного контакта [1].

Поэтому необходима разработка методики использования экспериментов для исследования коррозионно-механического изнашивания и их стандартизация. В результате выполнения указанных работ в 2004 году был создан стандарт США ASTM G119 [2], описывающий порядок вычленения компонентов коррозионно-механического-изнашивания и исследования взаимодействия между ними. Европейские исследователи предложили собственный экспериментальный подход к исследованию трибоккоррозии [3-5]. Оба этих подхода основаны на объединении электрохимических и трибологических нагрузок и могут быть выполнены с помощью одного и того же экспериментального оборудования. Однако G119 включает изнашивание при анодной и катодной поляризации для исследования взаимодействия между износом и коррозией, а европейский подход предусматривает изнашивание в условиях равновесного потенциала E_{oc} .

Для изучения трибоккоррозионных характеристик материалов в условиях трения скольжения предлагается использовать систему, позволяющую подвергать исследуемый образец одновременно трибологическим и коррозионным процессам [6]. При этом возможно применение стандартизованных как в России, так и за рубежом схем «палец - диск» и «сфера - плоскость». В настоящее время для проведения таких исследований применяется большое количество установок, в том числе и серийного изготовления.

При создании стендов для исследования коррозионно-механического изнашивания должны быть обеспечены следующие основные требования:

1. Зона фрикционного контакта должна быть полностью погружена в раствор электролита. При этом в целях безопасности образец желательно выполнять

неподвижным со скользящим поверх него контробразцом.

2. Образец должен быть электрически подключен к потенциостату и выполнять функции рабочего электрода. Таким образом, он является элементом трибоэлектрохимической ячейки, включающей в себя также вспомогательный и противоэлектрод, которые позволяют контролировать электрохимические параметры воздействия на образец при проведении экспериментов. Схема трибоэлектрохимической ячейки представлена на рис. 1.

3. Для изготовления контробразца желательно использовать диэлектрические материалы (например оксид алюминия или диоксид циркония), что позволяет предотвратить гальваническую связь между образцом и контробразцом. Если это невозможно, тогда он должен быть изолирован от остальной части устройства.

4. Держатель контробразца также должен быть изготовлен из непроводящего ток материала, чтобы предотвратить электрический контакт между электролитом и аппаратурой.

Для оценки устойчивости материалов к коррозии возможно использование различных электрохимических методов, а именно гальванических, потенциодинамических, потенциостатических и электрохимической импедансной спектроскопии. Эти методы могут активно использоваться в трибоккоррозионных экспериментах для оценки взаимосвязи между механическим и химическим компонентами износа.

При выполнении исследований трибоккоррозии наибольшее распространение получили подходы, объединяющие в себе электрохимические и трибологические испытания: 1) исследование процессов в зоне трения скольжения при накладываемом внешнем потенциале электрохимической ячейки [2]; 2) изучение трения в условиях равновесного потенциала системы [3; 5].

Метод наложения внешнего потенциала предполагает проведение исследований в 4 этапа. Параметры проведения экспериментальных исследований определяются на основе анализа условий эксплуатации: параметры трения, нормальная нагрузка P , путь трения L , скорость сколь-

жения V , свойства контробразца, вид электролита, его температура, кислотность, накладываемый анодный потенциал. Площадь поверхности образца, подверженной воздействию электролита, обозначается A_o и обычно имеет определенное значение. Эта площадь включает две зоны: область изнашивания в пределах дорожки трения A_w и неизношенную поверхность $A_o - A_w$.

Эксперимент проводится в следующем порядке: вначале осуществляется очистка и промывка образца, после чего он погружается в раствор электролита. После погружения образца необходимо дождаться стабилизации значения равновесного потенциала ячейки E_{oc} .

Общая потеря массы материала M_{tot} в условиях коррозионно-механического изнашивания может быть выражена как $M_{tot} = M_{mech} + M_c + M_{syn}$, где M_{mech} - потеря массы за счет механического износа в отсутствие коррозии; M_c - потеря массы из-за коррозии в отсутствие изнашивания; M_{syn} - потеря массы за счет взаимодействия между износом и коррозией. M_{syn} можно представить в виде суммы двух слагаемых: M_{w-c} и M_{c-w} , где M_{w-c} - увеличение коррозионных потерь из-за механических воздействия (индуцированная трением коррозия), M_{c-w} - увеличение механического износа вследствие коррозии (индуцированный коррозией износ). Поэтому предыдущее уравнение может быть выражено следующим образом:

$$M_{tot} = M_{mech} + M_c + M_{c-w} + M_{w-c}. \quad (1)$$

Потеря массы образца в результате электрохимических реакций может быть определена по закону Фарадея:

$$M = \frac{i_a M_a t}{nF},$$

где M (кг) – потеря массы металла в результате химических реакций за время t (с); i_a (А) - сила анодного тока; M_a (кг/моль) - атомная масса; n — число валентных электронов; F - постоянная Фарадея.

Для чистых металлов показатель n обычно известен. Для сплавов n получают с учетом их составных элементов (при условии что все они участвуют в процессе окисления) по формуле

$$n = \sum X_j n_j,$$

где X_j и n_j - часть и число электронов валентности элемента j соответственно.

На *первом этапе* определяется суммарный износ M_{tot} , измеряемый как потеря массы образцов до и после единичных испытаний в условиях коррозионно-механического изнашивания.

Второй этап экспериментов (анодная поляризация) проводится в тех же условиях, что и первый, но между металлическим образцом (рабочим электродом) и электродом сравнения дополнительно задается фиксированный потенциал, поддерживаемый за счет тока между рабочим электродом и противозлектродом (рис. 1).

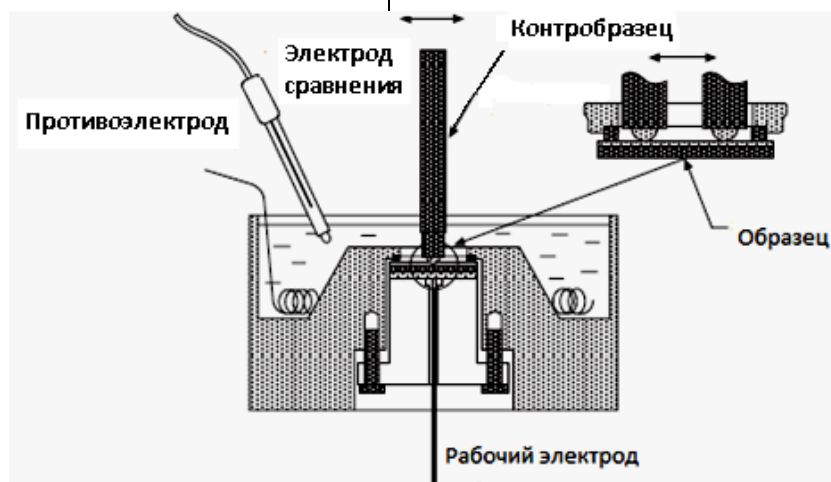


Рис. 1. Трибоэлектрохимическая ячейка для исследования двунаправленного трения скольжения

Когда ток достигает стабильного значения i_a , в добавление к коррозионной нагрузке образец вступает во фрикционный контакт с контрообразцом. Измеряемый анодный ток в условиях трения обозначается i_w (рис. 2). Сила тока измеряется при фиксированном потенциале в зависимости от времени. Таким образом, возможно проследить изменения электрохимической кинетики реакций окисления и восстановления, происходящих в зоне фрикционного контакта образца и контрообразца. Потери материала из-за коррозии M_c и индуцированной трением коррозии M_{w-c} определяются следующим образом:

$$M_c = \frac{i_a M_a t}{nF};$$

$$M_{w-c} = \frac{(i_w - i_a) M_a t}{nF}.$$

Следует отметить, что M_c рассматривается только для области локализации износа A_w для сравнения его значения с M_{w-c} . Площадь износа A_w определяется после трибокоррозионного испытания. Для пассивных материалов M_c пренебрежимо мало по сравнению с M_{w-c} , поскольку разрушение защитных пассивирующих пленок ведет к значительному ускорению растворения металла.

На данном этапе испытаний определяются значения стационарного потенциала E_{cor} , поляризационного сопротивления R_p и постоянных Тафеля β_a и β_c , а также вычисляются величины i_w и M_{w-c} .

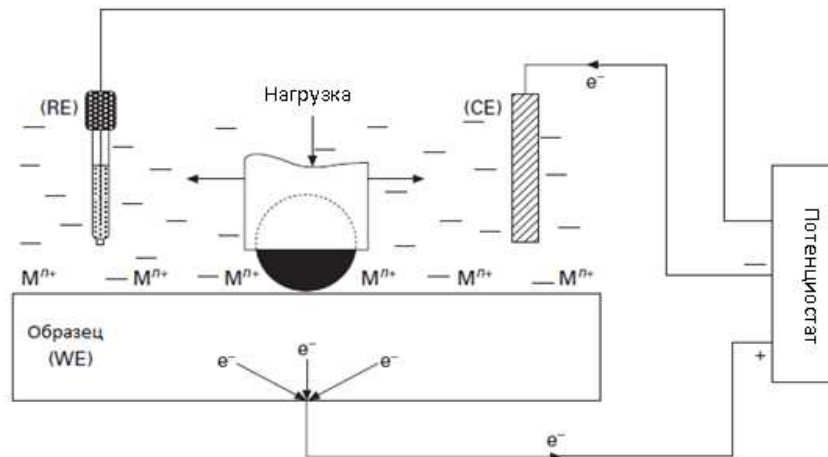


Рис. 2. Механизм коррозионно-механического изнашивания при наложенном внешнем потенциале

На **третьем этапе** испытаний определяют механический компонент износа M_{mech} , для чего добиваются минимизации химического воздействия на образец. Стандарт ASTM G119 для этого предлагает применять катодную защиту (рис. 3) в размере $-1V$ от равновесного потенциала ячейки E_{oc} . Европейские исследователи рекомендуют использовать нейтральную среду с $pH=7$. В некоторых исследованиях используются сразу два подхода [2;3].

Четвертый этап представляет собой вариацию классического измерения коррозионной стойкости материала образца при отсутствии фрикционного контакта, при котором образец из исследуемого

материала помещается в электролит на заданное время. По результатам испытаний определяется M_c .

После определения M_{tot} , M_{w-c} , M_{mech} и M_c значение M_{c-w} вычисляется из приведенного уравнения (1). Отметим, что значение M_{c-w} может быть положительным в случаях, когда химические реакции способствуют смазыванию или уменьшают механический износ.

Основным преимуществом данной методики является возможность количественной оценки компонентов износа после серии экспериментальных тестов. Однако необходимость задания катодной защиты на одном из этапов эксперимента может

привести к наводороживанию образцов. С другой стороны, наличие как катодной защиты, так и нейтральной среды не всегда приводит к полной остановке коррозии и

химических реакций в зоне фрикционного контакта, что свидетельствует об отсутствии универсальности у данного подхода.

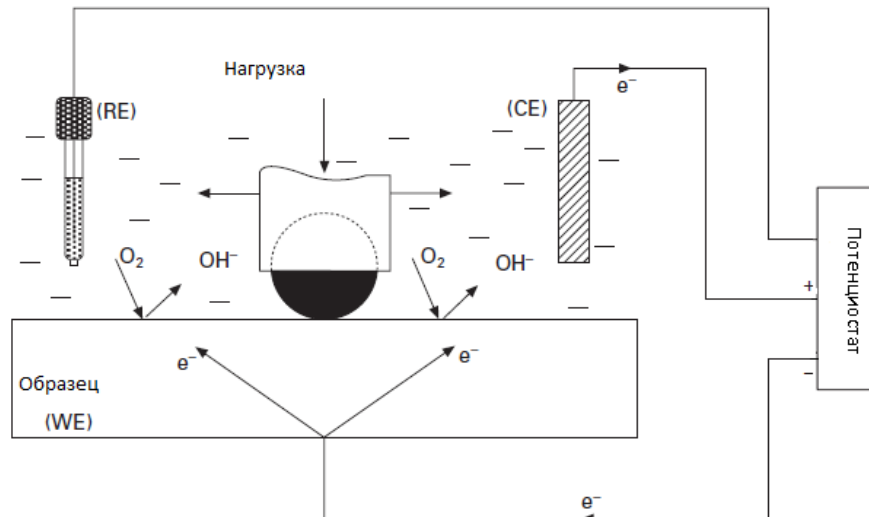


Рис. 3. Механизм коррозионно-механического изнашивания в условиях катодной защиты

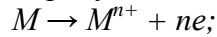
Методика исследования коррозионно-механического изнашивания в условиях равновесного потенциала системы заключается в исследовании трения скольжения образца, погруженного в заданный электролит, без наложения внешнего потенциала. В указанной методике выделяют три подгруппы методов: мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc} , исследование вольт-амперных характеристик и электрохимическая импедансная спектроскопия.

Мониторинг значения равновесного потенциала E_{oc} — простой в реализации метод, главным недостатком которого является невозможность дать количественную оценку механического и химического компонентов трибокоррозии. Равновесный потенциал системы E_{oc} — потенциал, установившийся между рабочим электродом и электродом сравнения, при котором в электрохимической системе «образец — электролит» имеют место анодные и катодные реакции. Этот параметр позволяет определить химическую активность материала образца в заданном электролите. Низкое значение E_{oc} показывает, что материал подвержен активному растворению,

тогда как высокое значение E_{oc} свидетельствует о пассивности материала. Сущность метода заключается в фиксации изменений значения потенциала E_{oc} до, в течение и после приложения к образцу фрикционной нагрузки. Перед началом испытаний следует дождаться стабилизации значения потенциала. Во время трения образца его поверхность становится неоднородной, между изношенной областью A_w (внутри дорожки трения) и неизношенной областью $A_o - A_w$ (вне дорожки трения) возникают гальванические связи, что приводит к изменению значения потенциала электрода (рис. 4). После окончания процесса трения в результате стабилизации формируется новое значение электродного потенциала E_{oc} , характер изменения которого определяет способность материала восстанавливаться после трибологической нагрузки.

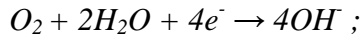
Для пассивных металлов, таких как нержавеющая сталь и титановые сплавы, резкое снижение потенциала E_{oc} обычно наблюдается в начале трения и объясняется воздействием ювенильной поверхности металла на электролит из-за разрушения оксидного пассивирующего слоя на поверхности дорожки трения. Металл в этой

зоне окисляется, образуя растворимые ионы и/или твердые продукты:

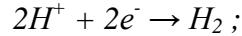


Образовавшиеся электроны должны быть вовлечены в катодную реакцию для продолжения окислительных реакций:

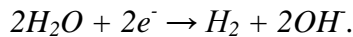
- в условиях наличия кислорода:



- в условиях отсутствия кислорода, $pH < 7$:



- в условиях отсутствия кислорода, $pH \geq 7$:



Значение потенциала E_{oc} во время трения зависит от коррозионных потен-

циалов изношенной и неизношенной областей образца, кинетики химических реакций в зоне трения, а также от отношения r площадей анодной (изношенной) и катодной областей образца. Если изношенной становится вся функциональная поверхность образца, то r стремится к единице и значение потенциала E_{oc} приближается к значению потенциала металла в контакте с его ионом E_{M/M^+} . При отсутствии износа поверхности ($r = 0$) потенциал E_{oc} практически не меняется. Таким образом, значения потенциала E_{oc} пассивных материалов при трибокоррозии варьируются в диапазоне от максимального (до приложения фрикционной нагрузки) до минимального ($E_{oc} = E_{M/M^+}$).

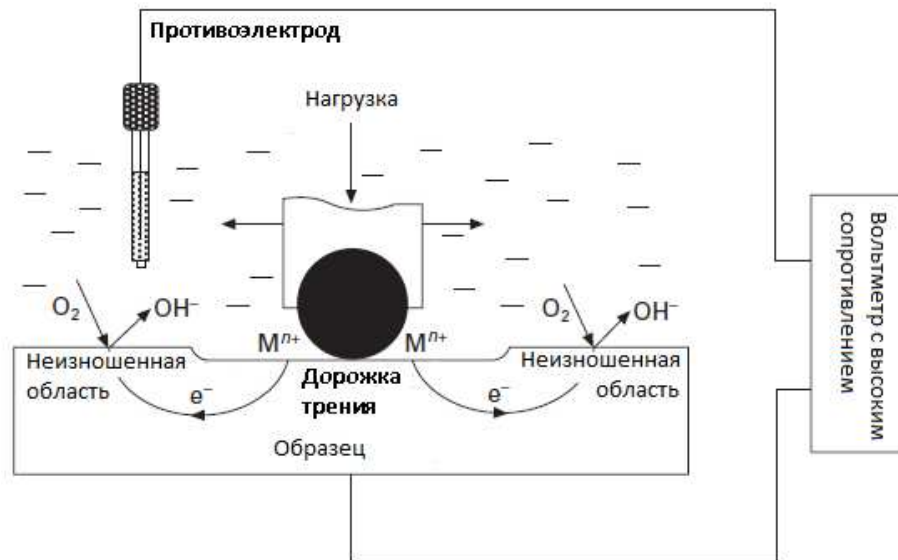


Рис. 4. Возникновение гальванических связей при испытаниях в условиях равновесного потенциала системы

Для количественной оценки трибокоррозионного износа предлагается схема измерения вольт-амперных характеристик между двумя электродами из одинакового материала. Первый электрод используется как образец, а второй служит противозлектродом (рис. 4). Два электрода связаны через амперметр, измеряющий гальванический ток. Перед приложением фрикционной нагрузки к образцу гальванический ток равен нулю, так как электроды имеют одинаковое значение потенциала E_{oc} . В условиях трения потенциал образца сдвигается, между образцом и контрэлектродом создается гальваническая ячейка. Возникающий гальванический ток измеряется

амперметром. Этот метод применяется в тех случаях, когда изношенная область поверхности образца генерирует электроны в процессе окисления металла, а катодная реакция на неизношенной области задействует эти электроны. Изменение значения протекающего тока объективно характеризует влияние трения на процесс коррозии.

Стоит отметить, что не все электроны, порожденные реакцией окисления металла, проходят через амперметр. Поэтому данный метод показывает скорее тенденцию, но не дает репрезентативного количественного результата. Для определения точной количественной оценки либо изолируют поверхность образца от электроли-

та (за исключением изношенной области) с целью снизить катодные реакции на поверхности образца, либо увеличивают размер вспомогательного электрода. Преимуществами этого метода являются его

простота и доступность, недостатками – квазиобъективная количественная оценка влияния трения на процесс коррозии и отсутствие возможности определить влияние коррозии на изнашивание.

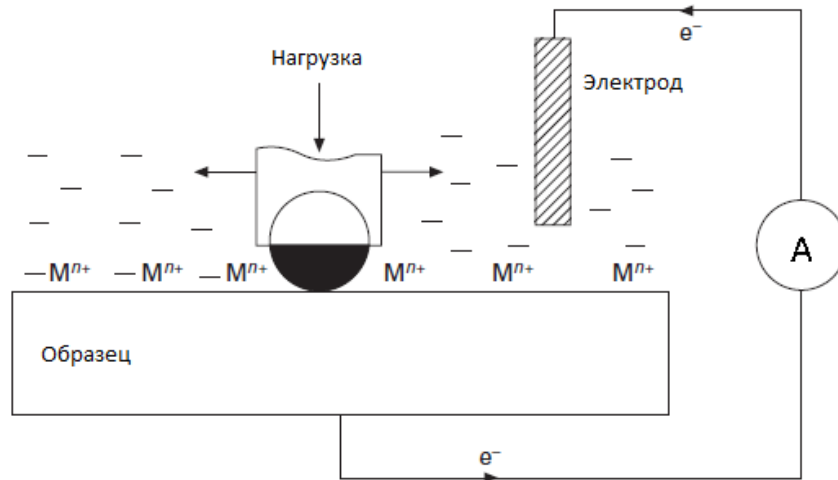


Рис. 5. Схема измерения вольт-амперных характеристик гальванической связи между электродом и контрэлектродом

Сущность метода электрохимической импедансной спектроскопии (EIS) состоит в получении отклика в виде изменения силы тока при воздействии потенциальных колебаний (обычно с медианным значением E_{oc}) с амплитудой E_a и частотой f на электрохимическую систему. Электрохимический импеданс Z , являющийся отношением потенциала к току, вычислен по выбранному частотному диапазону для получения спектра импеданса. Последний моделируется с использованием эквивалентного электродного потенциала исследуемой системы.

Необходимым условием для генерации спектра сопротивления является стабильность электрохимической системы с точки зрения электродного потенциала. В целом колебания потенциала E_{oc} должны быть менее 1 мВ/мин, что в условиях коррозионно-механического изнашивания труднодостижимо. На текущий момент метод успешно применяется только для пассивных материалов, подвергающихся однонаправленной нагрузке трением скольжения.

Согласно применяемой методике, делается предположение, что дорожка трения на образце состоит из двух отдельных зон: активной площадки A_{act} , где исходный

пассивирующий слой был удален; и пассивной площади A_{repass} , где оксидный слой либо не был удален, либо уже восстановился. Площадь поверхности дорожки износа A_{tr} рассматривается как площадь поверхности, измеренной в конце испытания в условиях трения скольжения:

$$A_{tr} = A_{act} + A_{repass}.$$

Потеря массы материала в дорожке трения W_{tr} состоит из компонентов, связанных с различными зонами износа на дорожке износа:

$$W_{tr} = W_{act}^c + W_{act}^m + W_{repass}^c + W_{repass}^m,$$

где W_{tr} – суммарная потеря массы материала в дорожке износа; W_{act}^c – потеря массы материала в результате коррозии материала в активной площади; W_{act}^m – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в активной площади; W_{repass}^c – потеря массы материала в результате коррозии материала в пассивной площади; W_{repass}^m – потеря массы материала в результате механического изнашивания материала в пассивной площади.

Величина W_{repass}^c находится путем измерения EIS до износа (после стабилизации потенциала E_{oc}). Поляризационное сопротивление пассивного материала определяется по формуле

$$R_{repass} = R_0 A_0,$$

где R_0 – поляризационное сопротивление пассивной области образца, измеренное при помощи EIS; A_0 – площадь поверхности образца.

Плотность тока через пассивную область может быть выражена следующим образом:

$$i_{repass} = \frac{B}{r_{repass}}, \quad (2)$$

где B – константа, обычно в диапазоне между 13 и 35 мВ для металлических материалов (для проведения экспериментов рекомендуется использовать значение 24 мВ).

Потеря массы материала в результате коррозии пассивной области на дорожке износа определяется законом Фарадея:

$$W_{repass}^c = i_{repass} A_{repass} \frac{M}{nFd} t. \quad (3)$$

В условиях постоянного трения скольжения предполагается, что на дорожке трения активная площадь преобладает (времени для репассивации поверхности металла недостаточно). Можно считать, что $A_{tr} = A_{act}$ (A_{repass} пренебрежимо мало) и $W_{tr} = W_{cat}^m + W_{act}^m$. Электрохимическая импедансная спектроскопия выполняется в процессе приложения фрикционной нагрузки к образцу. Таким образом, по аналогии с формулой (3) можно найти W_{act}^m для активной площади:

$$W_{act}^c = i_{act} A_{act} \frac{M}{nFd} t. \quad (4)$$

Потеря массы материала в результате механического износа активного материала вычисляется по формуле

$$W_{act}^m = W_{tr} - W_{act}^c. \quad (5)$$

Для формирования репассивирующего слоя на изношенной поверхности образца после приложения фрикционной нагрузки делают перерыв, достаточный для образования этого слоя. Считается, что доля поверхности, покрытой репассивирующим слоем, A_{repass}/A_{tr} должна быть пропорциональна отношению времени t_{lat}/t_{reac} , где t_{lat} – промежуток времени между приложениями нагрузки, а t_{reac} – время, необходимое для формирования пассивного слоя и достижения стабилизации потенциала E_{oc} .

В этом случае W_{act}^c и W_{act}^m вычисляются из уравнений (4) и (5).

$$A_{act} = \left(1 - \frac{t_{lat}}{t_{reac}}\right) A_{tr}.$$

При этом W_{repass}^c рассчитывается из уравнения (2) и во всех уравнениях $t = N t_{lat}$, где N – количество циклов скольжения.

Суммарную потерю материала в результате механического износа пассивного слоя получаем по формуле

$$W_{repass}^m = W_{tr} - W_{act}^c - W_{act}^m - W_{repass}^c.$$

Достоинствами данного метода являются проведение испытаний при равновесном электродном потенциале E_{oc} без искусственного изменения электрохимических параметров системы и определение количественных оценок различных компонентов коррозионно-механического износа материала. К недостаткам метода можно отнести возможность применения только для пассивных материалов, возможность проведения исследования только в условиях однонаправленного трения скольжения, а также наличие ряда допущений (использование одинакового значения параметра B для пассивной и активной поверхностей металла, предположение об одинаковых электрохимических свойствах пассивной площади на дорожке трения и в исходной пассивной области).

Анализируя рассмотренные методы, можно сделать следующие выводы:

- При исследовании коррозионно-механического изнашивания целесообразно использовать электрохимические методы, поскольку они позволяют моделировать многие химические характеристики коррозионной среды при одновременном механическом воздействии, что дает возможность оценить вклад коррозии в суммарный износ. Это достигается путем измерения силы тока и последующего расчета по известным достоверным зависимостям.

- Вместе с тем электрохимические методы имеют ряд недостатков. В частности, реальный потенциал в зоне фрикционного контакта может существенно отличаться от накладываемого потенциала вследствие омического падения напряжения. Кроме того, принятие анодного тока

как меры износа образца за счет химического воздействия может быть правомерно только при отсутствии других значимых, кроме коррозионных, химических реакций, приводящих к разрушению или модификации материала образца.

• Несмотря на общность подходов к исследованию электрохимических методов, при их применении возникают серьезные затруднения при выявлении синергиз-

ма, интерпретации результатов и формулировании выводов, для чего необходим дополнительный анализ характеристик контактирующих поверхностей и продуктов износа. Для унификации и повышения точности исследований требуется более широкое использование международных и создание отечественных стандартов в части изучения коррозионно-механического изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Памфилов, Е.А. К вопросу моделирования коррозионно-механического изнашивания / Е.А.Памфилов, Я.С.Прозоров // Трение и износ. – Минск, 2012. – Т.33.- № 3. – С. 288-297.
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion // Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. Mischler, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation / S. Mischler // Tribology International. - 2008. - Vol. 41. - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. -

Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.

5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. Pamfilov, E.A. Mechanochemical Fracture of the Components of Wood-Cutting Equipment / E.A.Pamfilov, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155.

1. Pamfilov, E.A. On problem of mechano-chemical wear modeling / E.A. Pamfilov, Ya.S. Prozorov // Friction and Wear. – Minsk, 2012. – Vol.33.- № 3. – pp. 288-297.
2. ASTM standard G119. Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion // Annual Book of ASTM Standards. - USA, 2001. -Vol.03.02.
3. Mischler, S. Triboelectrochemical techniques and interpretation methods in tribocorrosion: a comparative evaluation / S. Mischler // Tribology International. - 2008. - Vol. 41. - № 7. - P. 573–583.
4. Tribocorrosion of passive metals and coatings / edited by Dieter Landolt and Stefano Mischler. -

Woodhead Publishing Limited, Cambridge UK, 2011. – 579 p.

5. Tribocorrosion properties of metallic materials and effects of metal release // Ph. D. Thesis by Morten Stendahl Jellesen. - Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University of Denmark (DTU), 2007.
6. Pamfilov, E.A. Mechanochemical Fracture of the Components of Wood-Cutting Equipment / E.A.Pamfilov, S.V. Lukashov, Ya.S. Prozorov // Material Science. - 2014. - Vol.50. - № 1. - P.148-155.

Статья поступила в редколлегию 10.03.2016.

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета

Киричек А.В.

Сведения об авторах:

Памфилов Евгений Анатольевич, д.т.н., профессор кафедры «Машиностроение и материаловедение» Брянского государственного технического университета, тел.: (4832)74-16-46, e-mail: pamfilov@bgita.ru.

Прозоров Ярослав Сергеевич, к.т.н., старший преподаватель кафедры «Информационные технологии» БГИТУ, тел.: (4832)68-85-41, e-mail: prozorov@bgita.ru.

Кузнецов Сергей Викторович, к.х.н., доцент, заведующий кафедрой «Химия» БГУ им. акад. И.Г.Петровского, тел.: (4832) 66-65-38, e-mail: pas-sivoxid@mail.ru.

Лукашов Сергей Викторович, к.х.н., доцент кафедры «Химия» БГИТУ, тел.: (4832) 64-96-29, e-mail: SergeLukashov@yandex.ru.

Pamfilov Eugene Anatolievich, D.Eng., Prof. of the Dep. “Mechanical Engineering and Material Science” Bryansk State Technical University, Phone: (4832)74-16-46, e-mail: pamfilov@bgita.ru.

Prozorov Yaroslav Sergeevich, Can.Eng., Senior lecturer of the Dep. “Innovation Technologies” BSITU, Phone: (4832)68-85-41, e-mail: prozorov@bgita.ru.

Kuznetsov Sergey Victorovich, Can.Sc.Chem., Assistant Prof., Head of the Dep. “Chemistry”, Academician Petrovsky BSU, Phone: (4832) 66-65-38, e-mail: pas-sivoxid@mail.ru.

Lukashov Sergey Victorovich, Can.Sc.Chem., Assistant Prof. of the Dep. “Chemistry” of BSITU, Phone: (4832) 64-96-29, e-mail: SergeLukashov@yandex.ru.