

К оценке износостойкости тонких покрытий

В. В. Тарасов¹, С. Ю. Лоханина²

¹ Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

² Удмуртский государственный университет, Россия, 426034, Ижевск, ул. Университетская, 1

Аннотация. Современные способы упрочнения контактирующих поверхностей, работающих в сложных условиях эксплуатации (высокие контактные давления, агрессивные среды, жесткие температурные режимы и т.д.), основываются на технологиях получения достаточно тонких защитных покрытий малой толщины, не превышающих уровень 5-10 мкм. Это в частности в значительной мере осложняет контроль эксплуатационных характеристик при оценке износостойкости таких покрытий. В работе рассматриваются особенности трибологических испытаний тонких покрытий (изнашивание по закрепленному абразиву). Оценка износа производится по потере массы испытуемого образца (массовый износ) на заданном пути трения при фиксированной нагрузке и скорости перемещения образца по абразивной поверхности. Авторами предложена методика испытаний на износостойкость с расширенными функциональными возможностями, применимая к покрытиям малой толщины за счет приема искусственного "увеличения суммарной изнашиваемой площади образца", позволяющая проводить испытания без использования высокоточного оборудования и квалифицированного персонала при обеспечении высокой точности измерений.

Ключевые слова: износостойкость, абразивное изнашивание, тонкие покрытия, точность измерения.

✉ Валерий Тарасов, e-mail: tvv@udman.ru

About Assessment of the Wear Resistance of Thin Coatings

Valeriy V. Tarasov¹, Svetlana Yu. Lokhanina²

¹ Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

² Udmurt State University (1, Universitetskaya St., Izhevsk, 426034, Russian Federation)

Summary. Modern methods of hardening contacting surfaces operating in difficult operational conditions (high contact pressures, aggressive environments, severe temperature conditions, etc.) are based on technologies for obtaining sufficiently thin protective coatings of small thickness, not exceeding the level of 5-10 μm . This, in particular, greatly complicates the monitoring of performance characteristics in assessing the wear resistance of such coatings. Studies of tribological and mechanical properties using modern control methods are a scientific task, without the solution of which it is impossible to create new materials. An important performance characteristics of materials is their wear resistance. As a rule, the reduction in the service life of parts is due to the destruction of the surface layers of the working surfaces. In practice, an increase in the wear resistance of structural materials is achieved with the use of protective (wear-resistant) coatings and various methods of hardening and modification of surface layers. Here we consider the features of tribological tests of thin coatings (wear on a fixed or monolithic abrasive, on an abrasive cloth). Wear is estimated from the loss of the mass of the tested sample (mass wear) at a given friction path, fixed load and the sample movement speed across the abrasive surface. The objects of the tests can also be various structures and inclusions of small thickness (units of micrometers); in particular, the described approach can be adapted for layer-by-layer study of the wear resistance of transition zones of hardened materials of different nature (metals, composite materials, etc.). In a simplified version, it is also applicable to the assessment of the wear of massive materials with increased wear resistance. In the present paper, a method with advanced functionality is proposed for testing wear resistance applicable to coatings of small thickness due to the introduction of an artificial "increase in the total wear area of the sample". It is important that the proposed technique allows testing without the use of high-precision equipment and qualified personnel while ensuring high accuracy of measurements.

Keywords: wear resistance, abrasive wear, thin coatings, measurement accuracy.

✉ Valeriy Tarasov, e-mail: tvv@udman.ru

ВВЕДЕНИЕ

Современные способы упрочнения контактирующих поверхностей, работающих в сложных условиях эксплуатации (высокие контактные давления, агрессивные среды, жесткие температурные режимы и т.д.), основываются на технологиях получения достаточно тонких защитных покрытий малой толщины, не превышающих уровень 5 – 10 мкм. Это в частности в значительной мере осложняет контроль эксплуатационных характеристик при оценке износостойкости таких покрытий.

Исследования триботехнических и механических свойств с использованием современных методов контроля – научная задача, без решения которой невозможно создание новых материалов. Важной эксплуатационной характеристикой материалов является их износостойкость. Как правило, сокращение срока службы деталей обусловлено разрушением поверхностных слоёв рабочих поверхностей. На практике увеличение износостойкости конструкционных материалов достигается за счет использования защитных (износостойких) покрытий и различных способов упрочнения и модификации поверхностных слоёв.

Важность и актуальность вопросов методического и метрологического обеспечения измерений относительной износостойкости упрочнённых слоёв и покрытий определяется необходимостью получения объективной и достоверной информации непосредственно при измерениях, а также требованиями обеспечения корректной сопоставимости результатов, полученных при решении задач контроля качества материалов. [1]

Так, например, применительно к изучению износостойкости металлов и сплавов в свое время распространение получил способ испытаний на абразивное изнашивание, предложенный М. М. Хрущевым [2], согласно которому испытания проводятся путем истирания об абразивную поверхность (закрепленный абразив, абразивная шкурка) монолитных образцов из испытуемого и эталонного материалов на равных путях трения с последующим сравнением износа по потере их массы или уменьшению длины образцов:

$$\varepsilon = \frac{\Delta m_s}{\Delta m_w} \left(\frac{d_s}{d_w} \right)^2,$$

где ε – относительная абразивная износостойкость материала или покрытия, отнесенная к стандартному (эталонному) материалу; Δm_s , Δm_w – абсолютный износ эталонного и испытуемого материала по массе; d_s , d_w – фактический диаметр эталонного и испытуемого образцов.

Однако, стандарт, основанный на этом способе [3], специально не оговаривает возможности испытания покрытий, хотя массивные покрытия (до нескольких мм) могут контролироваться им без существенной корректировки методики.

Для покрытий малой толщины (0.1 мм и менее) такой вариант испытаний исключен, что может быть обусловлено относительной скоротечностью процесса изнашивания. В этой ситуации, возможный износ образца превышает толщину покрытия и расчетная зависимость теряет физический смысл. Поэтому прямой перенос стандартной методики [3] на изнашивание тонких покрытий невозможен из-за сложности фиксации момента полного истирания покрытия.

Этот недостаток устраняется изменением схемы испытаний и простым пересчётом, изложенным в материалах патента [4]. Здесь, в отличие от стандартного, испытуемое покрытие наносится на образец, изготовленный из эталонного материала. Кроме того, в испытании учтено, что изнашивание покрытия и эталонного материала могут проводиться на разных путях трения. При этом сам цикл испытания предусматривает обязательное гарантированное превышение толщины покрытия, после чего испытанию подвергается материал эталона при тех же режимах.

Расчет относительной износостойкости покрытия ε по отношению к эталону ведется по следующей зависимости

$$\varepsilon = \frac{S_1(m_1 - m_2) - S_2(m_0 - m_1)}{S_2 m_C} \cdot \frac{\rho_C}{\rho_S},$$

где S_1 и S_2 – пути трения при изнашивании покрытия и материала основы (эталонного материала) соответственно, мм; m_0 , m_1 и m_2 – массы образцов после приработки материала основы (эталона) перед нанесением покрытия, после изнашивания испытуемого покрытия и после изнашивания материала основы соответственно, г; m_C – масса материала покрытия после приработки, г; ρ_S , ρ_C – плотности эталонного материала и испытуемого покрытия соответственно.

Однако этот метод испытаний имеет ограничения, согласно ГОСТ 173647-71. Так, использование образцов диаметром 2 мм для покрытий толщиной слоя от 12 до 30 мкм и плотностью от 6 до 13 г/см³ могут быть измерены с достаточной точностью на весах второго класса точности с погрешностью 0.5 мг. При этом целый ряд гальванических покрытий не попадает в указанный диапазон, в связи с тем, что в некоторых случаях масса покрытия становится сопоставимой с погрешностью измерения весов, это делает невозможным определение износостойкости с достаточной точностью.

Таким образом, для реализации методики [4] необходимо увеличить толщину покрытия и/или увеличить площадь его нанесения на образец. Оба варианта имеют очевидные технологические и конструктивные ограничения.

Известен также "Способ оценки относительной износостойкости материала" [5], согласно которому при оценке относительной износостойкости используют два идентичных образца, причем один из них непосредственно подвергается изнашиванию, а другой служит для определения толщины упрочненного слоя и собственно в испытаниях на изнашивание не участвует. Контролируемым параметром в обоих случаях являются линейные размеры, но проводить прецизионные линейные измерения еще методически и инструментально сложнее, чем весовые процедуры.

Решение указанных ограничений заключается в искусственном "увеличении площади" контролируемого образца путем набора его из нескольких единичных "двойников", изготовленных по единой технологии [6]. Предлагаемый способ контроля реализуется следующим образом:

1. Определяют количество образцов N в партии (группе). Расчет приведен далее.
2. Формируют партию идентичных образцов N (одинаковой формы и размеров, изготовленных по единой технологии из одного эталонного материала).
3. Прирабатывают рабочие поверхности всех образцов.
4. Производят одновременное взвешивание всей партии приработанных образцов и определяют ее суммарную исходную массу M_0 до нанесения покрытия.
5. Последовательно по заданной технологии наносят испытуемое покрытие на рабочую поверхность каждого из образцов партии. В допустимых случаях, исходя из технологических условий, нанесение покрытия может производиться одновременно.

5а*. Прирабатывают поверхность нанесенного покрытия на всех образцах партии. Операция может быть исключена в том случае, когда толщина нанесенного покрытия соизмерима с шероховатостью рабочей поверхности образцов в партии. Обычно это касается тонких покрытий (менее 2 – 3 мкм).

6. Производят одновременное взвешивание всей партии образцов и определяют ее массу после нанесения покрытия

$$M_{0C} = M_0 + M_C. \quad (1)$$

7. Определяют (рассчитывают) суммарную массу нанесенного покрытия:

$$M_C = M_{0C} - M_0.$$

8. Последовательно и отдельно производят изнашивание каждого из образцов партии при заданных режимах (сила нагружения образца, скорости его перемещения по изнашивающей поверхности (поступательная и вращательная), температура, влажность,

среда испытаний и т.п. по необходимости). Изнашивание реализуют с превышением толщины нанесенного (тестируемого) покрытия.

9. Производят одновременное взвешивание всей партии изношенных образцов и определяют ее суммарную массу после испытаний – M_1 .

10. Последовательно и отдельно изнашивают материал основы каждого образца. Измеряют суммарную массу всех образцов после истирания материала основы – M_2 .

11. Рассчитывают относительную износостойкость материала покрытия по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{S_1 \cdot (M_1 - M_2) - S_2 \cdot (M_0 - M_1)}{S_2 M_C} \cdot \frac{\rho_C}{\rho_S}, \quad (2)$$

где M_0 , M_1 и M_2 – суммарные массы образцов после приработки материала основы перед нанесением покрытия, после изнашивания испытуемого покрытия и после изнашивания материала основы соответственно, г; M_C – суммарная масса нанесенного (испытуемого) покрытия, г.

Для реализации предлагаемого способа и расчета количества образцов для испытуемой партии N необходимо предварительно рассчитать суммарную площадь всех образцов группы A_N , исходя из следующих исходных данных:

из априорных данных – ориентировочно толщина наносимого (испытуемого) покрытия – h_C . Устанавливается (рассчитывается) исходя из опыта работы на технологическом оборудовании с учетом известных режимов обработки.

Таким же образом принимается (выбирается) плотность материала покрытия ρ_C , наносимого на рабочую поверхность каждого образца группы – она задается на основе технологических режимов нанесения покрытий. При этом принимается минимальная величина из предполагаемого набора значений.

Очевидно, что погрешность средства измерения массы партии образцов Δx_{ME} должна быть пренебрежимо мала (незначима) по сравнению с измеряемыми величинами, т.е. ее значение не должно превышать $1/3$ от разности значений потери суммарной массы образцов на любом этапе испытания согласно метрологическим нормативам [7].

Таким образом, исходя из выше сказанного, погрешность средства измерения Δx_{ME} на этапе измерения толщины покрытия может быть выражена следующим неравенством:

$$\Delta x_{ME} \leq \frac{1}{3} A_N h_C \rho_C, \quad (3)$$

где A_N – суммарная рабочая площадь всех образцов группы N ; h_C – предполагаемая толщина испытуемого покрытия в партии.

Правая часть неравенства (3) представляет собой массу испытуемого материала, нанесенного на образцы из эталонного материала. Левая часть – минимальную чувствительность (точность) средства измерения (аналитических весов) для корректного измерения указанной массы.

Для оценки величины единичного образца $A_U = \frac{A_N}{N}$, перепишем (3) в виде

$$A_U \geq \frac{3 \cdot \Delta x_{ME}}{N h_C \rho_C}. \quad (4)$$

Для проведения испытаний по предлагаемому способу необходимо сформировать группу идентичных образцов, количеством N , геометрические характеристики которых определяются с учетом конструктивных параметров экспериментальной установки (машины трения), исходя из размеров базовых элементов и установочных приспособлений.

Важным фактором выбора формы и размеров образцов является технология их изготовления и способ нанесения испытуемого покрытия, которые могут накладывать дополнительные ограничения на геометрию образцов.

Определяющим моментом подготовки испытаний будет обеспечение воспроизводимых режимов обработки, обеспечивающих идентичность параметров наносимого покрытия на всех образцах группы. В некоторых случаях технологически допускается одновременное нанесение покрытий для всей партии образцов (например, гальваническое осаждение покрытий и т.п.).

Выбрав размеры, форму единичного образца и зная его рабочую площадь (A_U), можно рассчитать общее количество образцов N в группе:

$$N \geq \frac{3 \cdot \Delta x_{ME}}{A_U h_C \rho_C}. \quad (5)$$

Очевидно, что полученная из (3) величина N , округляется до ближайшего большего целого числа. Таким образом могут быть рассчитаны все конструктивно-технологические и метрологические параметры проведения испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводилась экспериментальная проверка предложенной методики.

Испытательное оборудование – машина трения SRV-III Test System (Германия). Материал эталонных образцов – сталь 45. Шероховатость поверхности не выше 1.2 мкм по Ra (среднее арифметическое отклонение профиля), размеры образцов после приработки $\varnothing 3 \times 16$ мм.

Измерения массы образцов на различных этапах испытаний проводились с точностью до 0.5 мг ($\Delta x_{ME} = 0.0005$ г) на весах лабораторных ВЛ-210 специального класса точности. В процессе испытаний оценивалась износостойкость никелевого покрытия, нанесенного электроосаждением из раствора сульфата никеля (с концентрацией 250 г/дм³), в присутствии хлорида натрия ($C = 15$ г/дм³) и борной кислоты в количестве 32 г/дм³ для создания кислотности среды равной 5.20 единиц рН, при температуре 40 °С и плотности тока 2.0 А/дм².

1. Определялось минимальное количество испытуемых образцов исходя из неравенства (5) при $A_U = \frac{1}{4} \pi D^2 \approx 7.065$ мм² ($D = 3$ мм – диаметр образца).

Испытуемое покрытие – никель (Ni) $h_C = 0.012$ мм (12 мкм), плотность которого по справочным данным составляет $\rho_C = 0.0089$ г/мм³. После подстановки в (3) получили $N \geq 1.98$.

Поэтому для испытаний были подготовлены 2 образца из стали 45 ($\rho_s = 0.0078$ г/мм³) с указанными выше характеристиками.

2. Далее проводилась приработка образцов.

3. Определялась суммарная масса двух, подготовленных к нанесению покрытия, которая составила $M_0 = 1.2764$ г.

4. На торцевые поверхности образцов наносилось никелевое покрытие с последующей приработкой. Завершение приработки оценивалось визуально на оптическом микроскопе МБС-1 (50^x) по равному блеску поверхности при исчезновении следов предварительной обработки.

5. После нанесения и повторной приработки поверхности покрытия производилось измерение общей массы двух образцов $M_{0C} = 1.2969$ г. Далее по результатам взвешивания вычислялась масса покрытия $M_C = M_{0C} - M_0 = (1.2969 - 1.2764)$ г = 0.0205 г.

6. Последовательно и отдельно производили изнашивание каждого образца на машине трения SRV-III по схеме диск (с абразивной шкуркой K180) – палец. Испытания проводились при трении торца цилиндрического образца (пальца) по поверхности абразивной шкурки по спирали Архимеда в направлении от центра к периферии:

- радиальная подача образцов на каждый оборот диска равна диаметру образцов исследуемого материала (изнашивание по свежему следу);

- скорость вращения абразивного круга постоянна на протяжении всего испытания и равна 60 мин^{-1} ;

- испытания проводились при статической нагрузке 4 Н (относительная погрешность нагрузки не превышала $\pm 1 \%$);

- изнашивание испытуемых образцов проводились на одном и том же листе абразивной шкурки (из одного рулона);

- каждый подготовленный круг абразивной шкурки использовался только 1 раз; после проведения испытаний образцы подвергали вакуумной очистке в течение 5 минут (для удаления с торцевой поверхности продуктов изнашивания и абразивных частиц).

7. После истирания покрытия и части эталонных образцов на пути трения $S_1 = 1300 \text{ мм}$ производилось измерение их суммарной массы $M_1 = 1.2848 \text{ г}$.

8. Затем испытание было продолжено на контрольной части эталонных образцов с последующим измерением $M_2 = 1.2753 \text{ г}$, после прохождения пути трения $S_2 = 1300 \text{ мм}$.

9. Подставив измеренные величины в формулу (2) для расчета относительной износостойкости материала покрытия и сократив длину пути (так как $S_1 = S_2$), получили относительную износостойкость никелевого покрытия равную: $\varepsilon = 0.993$.

Для измерений относительной износостойкости по изменению массы в результате абразивного изнашивания при трении о закрепленные абразивные частицы в диапазоне от 0.5 до 1.5 для материалов покрытий с известной или экспериментально определяемой плотностью, и износостойкости упрочнённых слоёв в диапазоне значений от 0.5 до 10.0 может, быть использована аттестованная методика измерений (МИ № 88-16366-132-2011) [8]. Установлены ее метрологические характеристики: показатели прецизионности, правильности и точности.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчет значения систематической составляющей погрешности величины износостойкости никелевого покрытия относительно стали 45 при экспериментальном установлении плотности испытуемого образца и покрытия осуществляется по формуле (2) как погрешность косвенных определений:

$$\Delta\varepsilon = \sqrt{\left[\frac{\rho_c^2}{\rho_s^2} \cdot \frac{(M_1 - M_2)^2}{S_2^2 M_c^2} \cdot \left(\frac{S_1^2 + S_2^2}{S_2^2} \right) \right] (\Delta S)^2 + \left[\frac{\rho_c^2}{\rho_s^2} \cdot \frac{2S_1^2 + 2S_2^2 + 2S_1 S_2}{S_2^2 \cdot M_c^2} \right] \cdot (\Delta x_{ME})^2 + \left(\frac{\varepsilon \cdot \Delta \rho_s}{\rho_s} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon \cdot \Delta \rho_c}{\rho_c} \right)^2} \quad (2^*)$$

Если величины ρ_s, ρ_w являются табличными значениями, то погрешность результата от них не зависит, и последний член суммы подкоренного выражения принимается равным нулю. В этом случае выражение (2*) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon &= \sqrt{\left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial S_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial S_2} \right)^2 \right] \cdot (\Delta S)^2 + \left[2 \cdot \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial M_c} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial M_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial M_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial M_2} \right)^2 \right] \cdot (\Delta x_{ME})^2} = \\ &= \sqrt{\left[\frac{\rho_c^2}{\rho_s^2} \cdot \frac{(M_1 - M_2)^2}{S_2^2 M_c^2} \cdot \left(\frac{S_1^2 + S_2^2}{S_2^2} \right) \right] \cdot (\Delta S)^2 + \left[\frac{\rho_c^2}{\rho_s^2} \cdot \frac{2S_1^2 + 2S_2^2 + 2S_1 S_2}{S_2^2 \cdot M_c^2} + 4 \cdot \frac{\varepsilon}{M_c^2} \right] \cdot (\Delta x_{ME})^2} \end{aligned}$$

При расчете систематической составляющей погрешности в случае оценки масс в случае применения двух образцов, значение систематической составляющей равно: $\Delta \varepsilon_R = 0.048$, что в относительных процентах ($\Delta \varepsilon_R / \varepsilon$) составил: 4.9 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложена методика испытаний на износостойкость с расширенными функциональными возможностями, применимая к покрытиям малой толщины за счет приема искусственного "увеличения суммарной изнашиваемой площади образца", позволяющая проводить испытания без использования высокоточного оборудования и квалифицированного персонала при обеспечении высокой точности измерений.

Объектами испытаний могут быть различные структуры и включения малой толщины (от единиц микрометров). В упрощенном варианте методика также применима к оценке износа массивных материалов, обладающих повышенной износостойкостью.

Исследования выполнены с использованием оборудования ЦКП "Центр физических и физико-химических методов анализа, исследования свойств и характеристик поверхности, наноструктур, материалов и изделий" УдмФИЦ УрО РАН в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (№ гос. регистрации АААА-А19-1190131900021-4).

Studies were performed using equipment of Core shared research facilities "Center of physical and physical-chemical methods of analysis, investigations of properties and characteristics surface, nanostructures, materials and samples" of UdmFRC UB RAS within the framework of the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (state registration number АААА-А19-1190131900021-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лоханина С. Ю., Тарасов В. В. Аспекты выбора методики испытаний материалов покрытий (упрочненных слоев) на износостойкость при абразивном изнашивании // Химическая физика и мезоскопия. 2018. Т. 20, № 4. С. 543-548.
2. Хрущев М. М., Бабичев М. А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 251 с.
3. ГОСТ 17367-71. Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы. 1973.
4. А.с. СССР № 1377669 А1, 1988. Способ испытания покрытий на абразивное изнашивание / Тарасов В. В., Бурнышев И. Н., Махнев Е. С.
5. Патент РФ № 2315284 С1, 2008. Способ оценки относительной износостойкости материала / Тарасов В. В., Чуркин А. В., Черепанов И. С., Лоханина С. Ю.

REFERENCES

1. Lokhanina S. Yu., Tarasov V. V. Aspekty vybora metodiki ispytaniy materialov pokrytiy (uprochnennykh sloev) na iznosostoykost' pri abrazivnom iznashivani [Aspects of the choice of methods for testing coating materials (hardened layers) for wear resistance in abrasive wear]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2018, vol. 20, no. 4, pp. 543-548. (In Russian).
2. Khrushchev M. M., Babichev M. A. *Abrazivnoe iznashivanie* [Abrasive wear]. Moscow: Nauka Publ., 1970. 251 p.
3. *GOST 17367-71*. Metally. Metod ispytaniya na abrazivnoe iznashivanie pri trenii o zakreplennye abrazivnye chastitsy [Metals. Test method for abrasive wear when rubbing against fixed abrasive particles]. 1973.
4. *Author's certificate SU 1377669 A1, 1988*. Sposob ispytaniya pokrytiy na abrazivnoe iznashivani [Method for testing coatings for abrasive wear]. Tarasov V. V., Burnyshev I. N., Makhnev E. S.
5. *Patent RU 2315284 C1, 2008*. Sposob otsenki otnositel'noy iznosostoykosti materiala [Method of evaluation of relative wear resistance of materials]. Tarasov V. V., Churkin A. V., Cherepanov I. S., Lokhanina S. Yu.

6. Патент РФ № 2716496 С1, 2020. Способ оценки износостойкости материала / Тарасов В. В., Лоханина С. Ю.

7. ГОСТ Р 8.736-2011 ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения, 2013.

8. Тарасов В. В., Лоханина С. Ю., Игнатенкова Л. А. МИ № 88-16366-132-2011. Относительная износостойкость материалов покрытий. Методика измерений относительной износостойкости по изменению массы в результате абразивного изнашивания при трении о закрепленные абразивные частицы, ФР.1.28.2012.11833. Екатеринбург, 2011. 9 с.

6. Patent RU 2716496 C1, 2020. Sposob otsenki iznosostoykosti materiala [Method for evaluating the wear resistance of a material]. Tarasov V. V., Lokhanina S. Yu.

7. GOST R 8.736-2011 GSI. Izmereniya pryamye mnogokratnye. Metody obrabotki rezul'tatov izmereniy. Osnovnye polozheniya [Direct measurements are multiple. Methods of processing measurement results. Highlights], 2013.

8. Tarasov V. V., Lokhanina S. Yu., Ignatenkova L. A. MI № 88-16366-132-2011. Otnositel'naya iznosostoykost' materialov pokrytiy. Metodika izmereniy otnositel'noy iznosostoykosti po izmeneniyu massy v rezul'tate abrazivnogo iznashivaniya pri trenii o zakreplennye abrazivnye chastitsy [Relative wear resistance of coating materials. Method for measuring relative wear resistance by mass change as a result of abrasive wear when rubbing against fixed abrasive particles]. FR.1.28.2012.11833. Ekaterinburg, 2011. 9 p.

*Поступила 11.04.2022; принята к опубликованию 12.05.2022
Received 11 April 2022; accepted 12 May 2022*

Информация об авторах

Тарасов Валерий Васильевич, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: tvv@udman.ru

Лоханина Светлана Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры Фундаментальной и прикладной химии УдГУ, Ижевск, Российская Федерация

Information about the authors

Valeriy V. Tarasov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: tvv@udman.ru

Svetlana Y. Lokhanina, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Fundamental and Applied Chemistry of Udmurt State University, Izhevsk, Russian Federation