

## Разработка методик для неразрушающего контроля трибосопряжений при граничном трении

С.В. КОРОТКЕВИЧ<sup>1</sup>, В.Г. ПИНЧУК, Е.А. КОВАЛЕВ<sup>2</sup>

В работе дано обоснование использованию параметров контактной электропроводности для исследования механических и фрикционных свойств граничных смазочных слоев (ГСС) нанометрового диапазона толщины. Осуществлена оценка толщины ГСС (0,5–1,5 нм) в области контактных давлений  $\approx 6,5$  МПа–5,8 ГПа. Показана возможность использования контактного сопротивления для оценки толщины ГСС при трении, когда под действием нагрузки изменяется фактическая площадь контакта.

Экспериментально установленный критерий может лечь в основу создания датчиков диагностики состояния поверхности раздела сопряженных металлов непосредственно в условиях работы узлов трения (узлов трансмиссии, цилиндро-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и т. д.), что важно для контроля и управления режимами их эксплуатации.

**Ключевые слова:** контактное сопротивление, граничный смазочный слой, толщина смазочного слоя, электрофизическое зондирование, смазочные материалы.

In the work justification of the use of parameters of a contact electrical conductivity for research of mechanical and frictional characteristics of the boundary lubricating layers (BLL) of nanometer range of thickness is given. The assessment of thickness of BLL (0,5–1,5 nanometers) in the field of contact pressure  $\approx 6,5$  MPa–5,8 GPa is carried out. Possibility of the use of contact resistance for assessment of thickness of BLL is shown at sliding friction when under the influence of loading the actual contacting area changes.

Experimentally established criterion can form the basis for creation of sensors for diagnostics of the interface status of the conjugate metals immediately in operating conditions of clusters of a sliding friction (clusters of transmission, tsilindro-piston group of internal combustion engines etc.). It is important for monitoring and management of modes of their operation.

**Key words:** contact resistance, boundary lubricating layer, thickness of a lubricating layer, electro physical probing, lubricants.

**Введение.** В настоящее время в странах СНГ отмечается снижение качества производимых пластичных смазочных материалов (ПСМ) и масел различного функционального назначения по сравнению с уровнем до 1990 г. [1]. Например, критическая нагрузка задира для пластичных смазочных материалов ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) и Литол-24 (ГОСТ 21150-75), производимых до 1990 г. и ПСМ с тем же товарным знаком, но производимых в настоящее время в РБ выше почти на порядок. Перед потребителем встает проблема выявления некачественной или контрафактной продукции. Отсутствие входного контроля у потребителя и полное доверие техническим характеристикам, заявленным в паспорте, на выпускаемую продукцию приводят к тому, что некачественный ПСМ закладывается в узел трения, что значительно снижает надежность, срок эксплуатации узлов трения и увеличивает расходы на межремонтные неплановые работы. Проблема выявления некачественной продукции заключается и в том, что физико-химические характеристики: объемно-механические свойства, химическая стабильность, устойчивость к внешним физическим воздействиям, коллоидная стабильность – ПСМ могут соответствовать заявленным в паспорте, а эксплуатационные свойства, которые напрямую зависят от технологии производства (наличие качественного базового масла, загустителя, условий формирования дисперсионной среды, добавление антиокислительных, антифрикционных и противозадирных присадок и т. д.), проверить фактически невозможно [2]–[4]. Паспортные данные (нагрузка сваривания, критическая нагрузка, индекс задира), приведенные на продукцию, соответствуют нормативным показателям ГОСТа 9490-75. Однако анализ результатов сравнительной оценки противозадирных и эксплуатационных свойств ПСМ различных лет выпуска определяет существенное отличие.

Ввиду этого актуализируется вопрос о разработке новых критериев комплексной оценки триботехнических характеристик смазочных материалов, которые бы вне зависимости

от схем и методов испытаний адекватно прогнозировали их эксплуатационные показатели. Необходимо отметить, что речь не идет об отказе от выполнения требований ГОСТа 9490-75, который позволяет оценивать ряд параметров и триботехнических характеристик масел, как правило, после разборки узла трения. Эффективность противоизносных свойств смазочных сред при этом определяется по диаметру пятна износа. На практике доведение сопряженных поверхностей до задира и схватывания и выход узла трения из эксплуатации является недопустимым. Поэтому необходимо контролировать толщину и состояние смазочного слоя между сопряженными поверхностями. Существенную информацию о свойствах смазочных материалов, в частности, их противозадирной стойкости, термоокислительной стабильности и уровне эксплуатационных свойств может дать комплексный анализ параметров электрической проводимости, момента трения, нагрузки и температуры [5].

Цель работы – создание с использованием параметров электрофизического зондирования методик для неразрушающего контроля трибосопряжений при граничном трении.

**Материалы и методика эксперимента.** Объектом исследования являлись поверхностные слои металлов. Исследовались адсорбируемые на них граничные смазочные слои различной природы. Использовались зонды различной конфигурации из следующих материалов: платина Пл. 99,93, золото Зл. 999,9, сталь ШХ-15, Ст 45, Ст 65Г и др. В качестве объектов исследования смазочных сред использовались трансмиссионные, моторные, гидравлические, редукторные масла, смазочная среда (концентрат сульфонат кальциевых соединений производства СООО «ЛЛК-НАФТАН») и пластичные смазочные материалы Литол-24 (ГОСТ 21150-87); ЦИАТИМ-201 (ГОСТ21150-75) [5].

Оценка прочностных свойств граничных смазочных слоев (ГСС) осуществлялась с использованием установок «КСН-1» («контактно-силовое нагружение – 1»), «КСН-2» («контактно-силовое нагружение – 2») и машины трения СМТ-1 по следующим схемам: шар – плоскость, ролик – плоскость и ролик – сегмент в статике при нормальном нагружении зонда или сегмента на подложку [6]. Противоизносные свойства смазочных слоев исследовались с использованием микротрибометра «ММТ» («микро-механический трибометр») при возвратно-поступательном движении зонда по подложке при фиксированной нагрузке [5], [7]. Оценка противозадирных свойств масел и пластичных смазочных материалов осуществлялась по кинетике формирования и разрушения ГСС, с использованием машины трения СМТ-1. Применялись схемы испытаний: ролик – сегмент, ролик – плоскость и ролик – шар при ступенчатом нагружении контртела на подложку. На каждом шаге нагрузки осуществлялась регистрация параметров (нагрузка, момент трения, температура, падение напряжения, скорость) с датчиков в течение  $\approx 300$  с. Данное время необходимо для стабилизации протекания физико-химических реакций между химически активными присадками, содержащимися в ГСС, и поверхностями ролика и сегмента, что выражалось в стабилизации момента трения, температуры и падения напряжения. Исследовались зависимости контактного сопротивления, момента трения, температуры от давления.

Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении исследовалась при модельных фрикционных испытаниях никеля с использованием разработанного спектрометра ферромагнитного резонанса (ФМР) [8].

Известно, что величина контактного сопротивления более чувствительна к структурным изменениям, протекающим в ГСС и на поверхности раздела металлов, по сравнению с коэффициентом трения [5]. Использование параметров контактного сопротивления позволяет исследовать кинетику формирования, динамического равновесия и разрушения ГСС, что позволяет прогнозировать наступление режима «сухого», или обедненного смазочным материалом режима трения, с последующим наступлением задира, схватывания поверхностей и выхода узла трения из эксплуатации. Преимущество использования разработанных методов электрофизического зондирования на практике состоит в простоте технической реализации и интерпретации полученных результатов. Однако существует относительная сложность использования методов электрофизического зондирования, связанная с расчетом фактической площади контакта для каждой из реализуемых схем. Соотношения теории Герца [9] дают возможность рассчитать в статике площадь контакта для любой схемы, реализуемой на практике,

и оценить нижнюю границу площади контакта, которая увеличивается при трении. С учетом рассчитанной нижней границы площади контакта для случая «сухого» контакта сопряженных тел осуществлялась оценка значения сопротивления стягивания, достижение которого означает наличие схватывания и заклинивания трибосопряжения [5]. Цель проведения этого неразрушающего контроля трибосопряжения на ранней стадии испытаний состоит в предотвращении наступления аварийного режима при эксплуатации узла трения. Поэтому для данной конкретной схемы испытаний в статике измеряется уровень контактного сопротивления сопряженных тел в отсутствие смазки. Как правило, он составляет  $\approx 0,1-0,5$  Ом для схем шар – плоскость (точечный контакт) или ролик – сегмент (множественный контакт) [5]. Снижение уровня контактного сопротивления до данного уровня означает начало разрушения мономолекулярной составляющей ГСС и переход к обедненному (или «сухому») режиму трения со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Методика эксперимента основывается на моделях поверхности раздела, которые могут иметь место с учетом наличия на поверхности металлов оксидных пленок [10]. Рассмотрены три возможных варианта контакта: 1) «сухой» металлический контакт (ГСС отсутствует); 2) проводимость через фактические пятна касания, возникающие при разрыве ГСС на выступах сопряженных поверхностей («ситочная» проводимость); 3) сплошной ГСС толщиной  $d$  (рисунок 1).

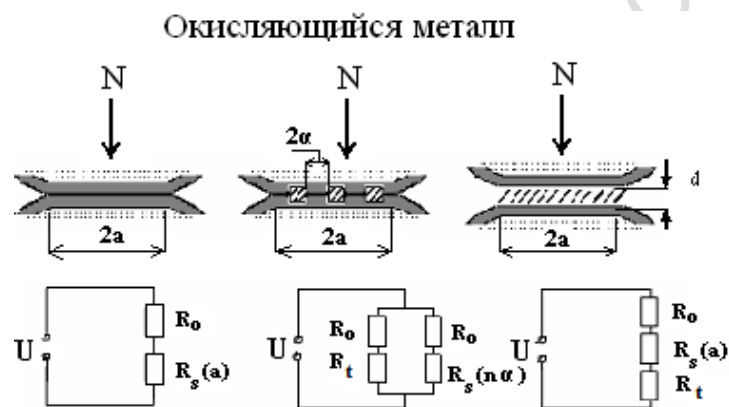


Рисунок 1 –  $R_s(a)$  – сопротивление стягивания;  $R_s(n, \alpha)$  – «ситочное» сопротивление;  $R_0$  – сопротивление с учетом наличия оксидной пленки;  $R_t$  – туннельное сопротивление  
 Модели поверхности раздела и схемы замещения точечного смазанного контакта

При наличии в зоне контакта сплошной смазочной прослойки толщиной  $d$  его сопротивление определяется в основном туннельной проводимостью:

$$R_t = \left( \frac{10^{-14} d}{a^2 \varphi^2} \right) \exp \left( 10,24 \varphi^{\frac{1}{2}} d \right), \quad (1)$$

где  $\varphi$  – эффективная работа выхода электрона. При более точном расчете необходимо учитывать сопротивление, обусловленное наличием оксидной пленки и сопротивление стягивания линий тока к фактическому пятну контакта (рисунок 1). Величина туннельного сопротивления намного порядков может превысить величину сопротивления с учетом наличия оксидной пленки и сопротивление стягивания линий тока к фактическому пятну контакта, поэтому при расчете толщины ГСС двумя последними величинами сопротивлений можно пренебречь.

При наличии в зоне контакта не сплошной, а ситочной проводимости с малыми пятнышками металлического контакта общая проводимость определяется одновременно двумя параллельно включенными ветвями проводимости (рисунок 1), одна из которых определяется суммой проводимостей через оксидную пленку и туннельной проводимости через смазочный слой, а другая ветвь определяется суммой проводимостей через оксидную пленку и проводимости стягивания линий тока к пятнышкам металлического контакта.

При наличии в зоне металлического контакта его проводимость определяется суммой проводимостей через оксидную пленку и проводимостью стягивания линий тока к фактическому пятну контакта радиусом  $a$ .

**Результаты и обсуждение.** Экспериментально установлено (с учетом того, что среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  поверхности шероховатости контактных тел составляет  $\approx 11$ – $12$  класс), что снижение величины регистрируемого контактного сопротивления до уровня  $\approx 0,1$ – $0,5$  Ом для пары трения сталь – сталь (Ст. 45) по схеме ролик – сегмент означает начало разрушения мономолекулярной составляющей ГСС и нарушение нормального режима смазывания и изнашивания трибосопряжений. Это позволяет на ранней стадии испытания с высокой достоверностью определять переход к аварийному режиму эксплуатации узлов трения. В этом плане для каждой из схем испытаний экспериментально установлено пороговое значение контактного сопротивления ( $R_s$ ). Например, снижение величины регистрируемого контактного сопротивления до уровня  $\approx 1$  МОм для схемы испытаний ролик – плоскость (таблица 1) означает разрушение ГСС и оксидной пленки, что предшествует задиру и схватыванию сопряженных поверхностей. Данные расчета параметров контакта при оценке противозадирных свойств СМ и масел приведены в таблице 1. Значение модуля упругости ( $E$ ) стали составляло  $\approx 2,6 \cdot 10^{11}$  Па. Радиус ролика и его ширина составляли соответственно  $\approx 25 \cdot 10^{-3}$  м и  $\approx 10^{-2}$  м. Радиус шарика составлял  $\approx 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Таблица 1 – Расчет параметров контакта для схемы ролик – сегмент (/), ролик – плоскость (/) и ролик – шар

$N, Н$	$a \cdot 10^{-6}, м$	$p_{cp}, МПа$	$R_s, МОм$	$R_{ок}, МОм$	$R_c, МОм$
20	155/ 15,7/ 71	6,5/ 64/ 1300	1/ 9,6/ 2,1	0,3/ 3,2/ 63	1,3/ 12,8/ 65
100	346/ 35/ 122	14,5/ 143/ 2100	0,4/ 4,3/ 1,2	0,1/ 1,4/ 21,4	0,5/ 5,7/ 22,6
200	490/ 49,5/ 154	20,4/ 202/ 2700	0,3/ 3/ 0,9	0,1/ 1/ 13,5	0,4/ 4/ 14,4
400	693/ 70/ 194	28,9/ 286/ 3400	0,2/ 2,1/ 0,8	0,07/ 0,7/ 8,5	0,27/ 2,8/ 9,3
600	849/ 85,7/ 222	35,3/ 350/ 3900	0,18/ 1,8/ 0,7	0,06/ 0,6/ 6,5	0,24/ 2,4/ 7,2
800	980/ 99/ 244	40,8/ 404/ 4300	0,15/ 1,5/ 0,6	0,05/ 0,5/ 5,4	0,20/ 2,0/ 6
1000	1100/ 111/ 263	45,7/ 452/ 4600	0,14/ 1,4/ 0,57	0,04/ 0,45/ 4,6	0,18/ 1,9/ 5,2
1200	1200/ 121/ 279	50,0/ 495/ 4900	0,13/ 1,2/ 0,54	0,04/ 0,04/ 4,1	0,17/ 1,2/ 4,6
1400	1300/ 131/ 294	54,0/ 535/ 5200	0,12/ 1,15/ 0,51	0,04/ 0,04/ 3,7	0,16/ 1,2/ 4,2
1600	1390/ 140/ 307	57,7/ 571/ 5400	0,11/ 1,1/ 0,49	0,04/ 0,04/ 3,4	0,15/ 1,1/ 3,9
1800	1470/ 149/ 319	61,2/ 606/ 5600	0,10/ 1/ 0,47	0,03/ 0,03/ 3,1	0,13/ 1,1/ 3,6
2000	1550/ 157/ 331	64,5/ 639/ 5800	0,10/ 1/ 0,45	0,03/ 0,03/ 2,9	0,13/ 1/ 3,4

Примечания. Радиус фактического пятна контакта ( $a$ ), фактическая величина среднего ( $p_{cp}$ ), контактное сопротивление стягивания ( $R_s$ ), контактное сопротивление оксидной пленки ( $R_{ок}$ ) и величина регистрируемого контактного сопротивления ( $R_c$ ). В каждой строке столбца приведены через косую черту три цифры. Первая цифра соответствует схеме ролик – сегмент, вторая цифра соответствует схеме ролик – плоскость и третья цифра соответствует для схемы ролик – шар.

Величина регистрируемого контактного сопротивления ( $R_c$ ) при проведении эксперимента равна сумме сопротивления стягивания  $R_s$  и  $R_{ок}$ . Рассчитанные значения сопротивлений приведены в таблице 1. Регистрируемые значения  $R_c$  для исходной “сухой” поверхности несколько выше приведенных значений в таблице 1, что связано с влиянием шероховатости поверхностей трения. Область значений среднего фактического контактного давления в границах следующая: 6,5–64,5 МПа – для схемы ролик – сегмент; 64–639 МПа – для схемы ролик – плоскость; 1,3–5,8 ГПа – для схемы ролик – шар.

Электрическая схема для измерения контактного сопротивления, приведенная на рисунке 2, содержит магазин сопротивлений  $R_2$ , последовательно соединенный с регистрируемым контактным сопротивлением  $R_c$ , состоящим в общем случае из внешнего электрода с нанесенным смазочным материалом (ПСМ) и подвижного электрода. Максимальное напряжение между разомкнутыми электродами составляет 50 мВ, что исключает пробой ГСС и изменение его физико-механических свойств [5]. Под контактным сопротивлением  $R_c$ ,

обозначенным в виде прямоугольника на рисунке 2, подразумевается сопротивление для контактной пары одной из схем испытаний (ролик – сегмент, ролик – плоскость, ролик – шар или подшипник качения или скольжения). Ранее [11] показана инвариантность полученных результатов оценки эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов относительно направления прохождения электрического тока, что существенно упрощает реализацию электрической схемы для реальных трибосопряжений, например, для диагностики буксовых узлов железнодорожных вагонов или других опор качения или скольжения.

Электрическая схема (рисунок 2) работает следующим образом. Задаем на источнике постоянного тока величину постоянного значения тока (50 мА) и подаем с калибровочной катушки сопротивлением  $R_1 = 1$  Ом на исследуемую контактную пару или трибосопряжение напряжение 50 мВ. Регистрируем падение напряжения и в зависимости от величины  $R_2$  рассчитываем значение контактного сопротивления  $R_c$ .

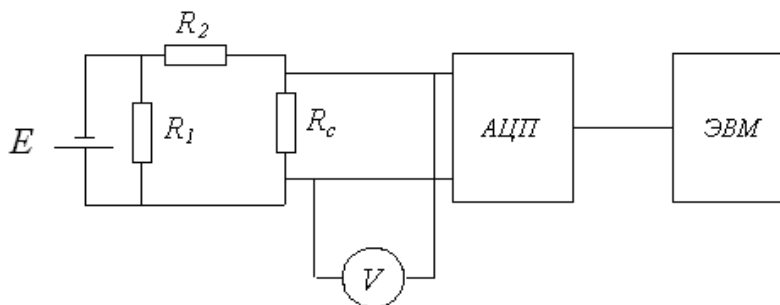


Рисунок 2 – Электрическая схема измерения контактного сопротивления

Точность регистрации контактного сопротивления определяется значением калибровочного сопротивления  $R_2$  (1; 10; 100; Ом; 1; 10; 100; 1000 кОм), выставяемого на магазине сопротивлений. При испытаниях регистрируют величину падения напряжения, а значение сопротивления пересчитывают исходя из параметров электрической схемы. Для повышения точности измерения контактного сопротивления уровень регистрируемого  $R_c$  должен быть того же порядка, что и выставяемое на магазине сопротивлений  $R_2$  (рисунок 2). Толщина ГСС до 1,5 нм оценивается путем увеличения на порядки значения  $R_2$ . Необходимо отметить, что точность оценки толщины ГСС коррелирует с точностью ее оценки методом послойного травления в среде аргона и анализа химического состава поверхностного слоя с использованием рентгенофотоэлектронной спектроскопии [5].

Снижение регистрируемого на эксперименте контактного сопротивления  $R_c$  до уровня значений, характерных для сопротивления стягивания  $R_s$  (см. таблицу 1), означает разрушение граничного смазочного слоя на пятнах фактического контакта и наличие «сухого» металлического контакта с последующим схватыванием сопряженных поверхностей.

Известно, что изнашивание определяется толщиной пленки ГСС. ГСС эффективно разделяет сопряженные поверхности и локализует поле сдвиговых напряжений в тонком смазочном слое за счет своих высоких антифрикционных свойств. В работе [12] показано, что период накопления повреждений с последующим чешуйчато-послойным разрушением поверхности металла может увеличиться в четыре раза при введении в базовый пластичный материал (ЦИАТИМ-201) присадки политрифторхлорэтилена (Фт-3М), обладающей высокими антифрикционными свойствами. В зависимости от класса шероховатости поверхности и состояния ГСС флуктуации регистрируемого контактного сопротивления могут достигать значительной величины (сотни тысяч Ом), но существенный вклад в разделении сопряженных поверхностей ГСС вносит именно его нижняя граница, так как именно она показывает толщину смазочного слоя на пятнах фактического контакта. Поэтому при проведении экспериментов регистрировали нижнюю границу падения напряжения и по ней определяли величину контактного сопротивления и толщину ГСС.

Применение расчетных соотношений теории стягивания и туннельной проводимости [5, с. 10] к анализу экспериментально полученных значений контактного сопротивления позволяет оценивать толщины промежуточных пленок нанометрового диапазона. В таблице 2

приведены значения регистрируемого в процессе проведения эксперимента падения напряжения и соответствующие им значения туннельного сопротивления в зависимости от толщины ГСС ( $d$ ).

Эффективная работа выхода электрона  $\phi$  при толщинах ГСС 0,5–1,4 нм составляет 2,025 эВ, а при 1,5–2,0 нм–1,8 эВ [7], [10].

Оценка толщины ГСС осуществлялась исходя из расчетов, приведенных в таблице 2.

Таблица 2 – Регистрируемые значения напряжения ( $U$ ) и соответствующие им значения туннельного сопротивления ( $R_t$ ) при различных толщинах ГСС ( $d$ ) для схемы ролик – сегмент ( $/$ ), ролик – плоскость ( $/$ ) и ролик – шар

$d$ , нм	$R_t$ , Ом	$U$ , мВ при $R_2 = 1$ Ом
0,5	0,0033/ 0,33/ 0,0155	0,1/ 12/ 1
0,6	0,0063/ 0,63/ 0,0504	0,5/ 19/ 2,5
0,7	0,029/ 2,9/ 0,3	1,2/ 37/ 11
0,8	0,132/ 13,2/ 1,7	6/ 46,5/ 31,5
0,9	0,785/ 78,5/ 11,5	22/ > 49,0/ 46
1,0	5,2/ 521/ 84	42/ > 49,0/ > 49,0
1,1	36,2/ 26 359/ 635	48,5/ > 49,0/ 49,0
1,2	264/ 36 177/ 4 876	> 49,0/ > 49,0/ > 49,0
1,3	1 948/ 194 793/ 37 930	> 49,0/ > 49,0/ > 49,0
1,4	14 579/ 1 457 940/ 297 061	> 49,0/ > 49,0/ > 49,0
1,5	110 490/ 11 048 948/ 2 341 828	> 49,0/ > 49,0/ > 49,0

Примечания. В каждой строке столбца приведены через косую черту три цифры. Первая цифра соответствует схеме ролик – сегмент, вторая цифра соответствует схеме ролик – плоскость и третья цифра соответствует схеме ролик – шар.

Анализ зависимости расчета туннельного сопротивления от толщины ГСС и площади фактического контакта показывает, что при увеличении нагрузки почти на два порядка площадь фактического контакта изменяется на порядок, а вклад от толщины ГСС в расчетное значение  $R_t$  на 10 порядков, т.е. на  $10^{10}$ . Основной вклад в расчетное значение туннельного сопротивления вносит толщина ГСС, а не площадь фактического контакта. Именно поэтому оценку толщины ГСС можно осуществлять не только в статике, но и при трении, когда под действием нагрузки изменяется фактическая площадь контакта.

**Заключение.** Дано обоснование использования параметров контактной электропроводности для исследования механических и фрикционных свойств граничных смазочных слоев (ГСС) нанометрового диапазона толщин. Осуществлена оценка толщины ГСС (0,5–1,5 нм) в области контактных давлений  $\approx 6,5$  МПа–5,8 ГПа. Показана возможность использования контактного сопротивления для оценки толщины ГСС при трении, когда под действием нагрузки изменяется фактическая площадь контакта.

Созданы электрические схемы, оборудование, программное обеспечение и разработаны простые в технической реализации методики для изучения поверхности раздела смазанного контакта металл – металл, позволяющие оценивать не только прочностные, антифрикционные, противоизносные и эксплуатационные характеристики ГСС различной природы, но и их триботехническую эффективность.

Впервые дано обоснование использования параметров электрофизического зондирования для проведения неразрушающего контроля трибосопряжений, в том числе опор качения и скольжения. Достижение регистрируемого в процессе испытания значения контактного сопротивления до уровня значения  $R_c$ , характерного для исходной поверхности подложки, означает разрушение ГСС, а снижение  $R_c$  до уровня сопротивления стягивания  $R_s \approx 1$  мОм предшествует задиру и схватыванию сопряженных поверхностей. Экспериментально установленный критерий может лечь в основу создания датчиков диагностики состояния поверхности раздела сопряженных металлов непосредственно в условиях работы узлов трения (узлов трансмиссии, цилиндра-поршневой группы двигателей внутреннего сгорания и т. д.), что важно для контроля и управления режимами их эксплуатации.

### Литература

1. Булатников, В.В. Проблемы выявления контрафактной продукции при закупке смазочных материалов / В.В. Булатников, А.М. Данилов // Мир нефтепродуктов. – № 9. – 2012. – С. 5.
2. Международный транслятор современных масел и смазок в стандартах разных стран и фирм. Под ред. проф. И.П. Ксеновича. – М. : Наука и техника, 1994. – 503 с.
3. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости / под редакцией В.М. Школьников, М. : Химия –1989. – 431 с.
4. Сеницын, В.В. Подбор и применение пластичных смазок / В.В. Сеницын. – М. : Химия, 1974. – 414 с.
5. Короткевич, С.В. Износостойкость металлов при граничном трении / С.В. Короткевич, В.Г. Пинчук, С.О. Бобович. – Гомель : УО ГГУ им. Ф. Скорины, 2011. – 237 с.
6. Кончиц, В. В. Исследование прочности граничных смазочных слоев в зазорах молекулярного масштаба / В. В. Кончиц, С. В. Короткевич // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – № 6. – С. 1010–1019.
7. Konchits, V.V. Formation and frictional properties of boundary lubricating and surface-modified layers at elevated temperatures / V.V. Konchits, S.V. Korotkevich, C.K. Kim // Lubrication Science 14–4, August 2002. – P. 455–469.
8. Пинчук, В.Г. Исследование дислокационной структуры ферромагнетиков методом ферромагнитного резонанса / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, С.О. Бобович // Приборы, инструменты, материалы. – 2010. – Т. 15, № 4. – С. 108–112.
9. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.
10. Кончиц, В.В. Электропроводность точечного контакта при граничной смазке / В.В. Кончиц // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 3. – С. 465–475.
11. Короткевич, С.В. Структурная самоорганизация поверхностей подшипников качения при граничном трении / С.В. Короткевич, О.В. Холодилов, В.Г. Пинчук, В.В. Кравченко // Ремонт, восстановление и модернизация. – 2013. – № 1. – С. 15–27.
12. Пинчук, В.Г. Микроструктура и разрушение металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич, В.В. Свиридова. – Гомель : УО ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. – 150 с.

---

<sup>1</sup> РУП “Гомельэнерго”

<sup>2</sup> Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины