УДК 621.431.73: 621.2.082.18

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ КАРЬЕРНЫХ АВТОСАМОСВАЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Ю.ОЛЬТ¹, В.В.МАКСАРОВ², В.А.КРАСНЫЙ²

¹ Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено возникновение фреттинг-коррозии на номинально неподвижных поверхностях высоконагруженных деталей горных машин и механизмов. Приведены примеры изнашивания и повреждений ответственных деталей, подшипниковых узлов двигателей карьерных автосамосвалов, в условиях фреттинга. Рассмотрены механизмы фреттинг-коррозии при использовании износостойких покрытий. Отмечено, что при выборе защитных тонкослойных покрытий, обеспечивающих повышение фреттинг-стойкости поверхностей плотно контактирующих деталей, необходимо учитывать как их износостойкость, так и способность сопротивляться сдвигу. При этом толщина таких покрытий позволяет сохранять в процессе эксплуатации предусмотренные при сборке натяги, не нарушая ремонтпригодности узлов. Приведены результаты исследований фреттинг-износа ряда покрытий на специальной установке. Изучены механизмы изнашивания ряда тонкослойных покрытий на основе фрикционно-механического латунирования, полимерной фторуглеродной композиции, твердосмазочного покрытия с применением методов растровой электронной микроскопии. Разработаны рекомендации по использованию изученных тонкослойных покрытий для высоконагруженных деталей горных машин, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

Целью работы являлось изучение влияния ряда тонкослойных покрытий на износ высоконагруженных соединений механизмов горных машин, в частности подшипниковых узлов карьерных автосамосвалов, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

Ключевые слова: износостойкие покрытия; фреттинг-коррозия; горные машины, подшипниковый узел; двигатель внутреннего сгорания; фрикционно-механическое латунирование; полимерная фторуглеродная композиция; твердосмазочное покрытие

Как цитировать эту статью: Ольт Ю. Исследование износостойкости подшипниковых узлов двигателей карьерных автосамосвалов, работающих в условиях фреттинг-коррозии / Ю.Ольт, В.В.Максаров, В.А.Красный // Записки Горного института. 2019. Т. 235. С. 70-77. DOI: 10.31897/PMI.2019.1.70

Введение. Повышение эксплуатационных свойств деталей машин следует рассматривать как весьма актуальную задачу, которая требует своего развития как для общего, так и для горного машиностроения, при этом в последние годы происходит существенное повышение мощности используемого в карьерах и шахтах горно-добывающего, транспортного и обогащательного оборудования, высокопроизводительных комплексных агрегатов, что сопровождается их эксплуатацией в условиях повышенных вибраций и нагрузок.

Оборудование большинства горно-обогащательных комбинатов, в частности карьерная техника, эксплуатируется на схожих режимах, хотя и нередко отличается в зависимости от дорожных и климатических условий. Вследствие цикличности нагрузки на автотранспорт при перемещении горной массы, обусловленной сменой режимов работы примерно 30-40 раз в час, эксплуатация дизельных двигателей происходит на неуставившихся режимах, что сопровождается динамическими нагрузками, приводящими к увеличению смещений, изгиба и скручивания сопрягаемых деталей.

Динамические нагрузки, возникающие при тяжелых и сложных режимах эксплуатации оборудования, в ряде случаев сопровождаются значительным износом рабочих поверхностей (схватыванием, заеданием, задирами, абразивным изнашиванием, фреттинг-коррозией), что приводит к повреждению механизмов. Чаще всего такие повреждения возникают в сопряжениях различных неразъемных и разъемных соединений (шарнирных, болтовых, заклепочных шлицевых и шпоночных), а также в зоне контакта нагруженных деталей зубчатых передач, подшипников качения, рессорных узлах, а также в деталях дизельных двигателей карьерных агрегатов [7].

В условиях повышенных знакопеременных нагрузок одним из видов изнашивания поверхностей является фреттинг-коррозия, которая часто проявляется при незначительных вибрациях плотно контактирующих номинально неподвижных деталей с малыми амплитудами трения. Возникающие продукты износа из-за малой амплитуды колебаний не могут покинуть зоны контакта соприкасающихся поверхностей, сосредотачиваются в локальной зоне, что сопровождается повышением давления и дополнительным разрушением поверхности [2, 8]. Нередко именно фрет-

тинг-коррозия является причиной снижения надежности эксплуатации, а в ряде случаев повреждений, ведущих к разрушению ряда ответственных деталей и узлов двигателей внутреннего сгорания. В наибольшей степени подобные явления встречаются в тяжело нагруженных узлах и механизмах большегрузных карьерных автосамосвалов, деталей буровой техники и других, подверженных вибрациям в процессе эксплуатации.

Фреттинг-коррозионные повреждения встречаются, в частности, на сопряжениях блока дизельных двигателей и боковой поверхности крышек коренного подшипника коленчатого вала карьерных автосамосвалов, на опорных поверхностях рубашки втулки рабочего цилиндра, на наружной поверхности («затылке») вкладышей и ряде других соединений, несмотря на создание высоких контактных нагрузок при их сборке [6, 7].

Можно утверждать, что, надежность работы горного оборудования и стабильность его эксплуатационных характеристик тесно связаны с выбором защитных износостойких покрытий рабочих поверхностей и методами их чистовой и отделочной обработки, оказывающими влияние на процессы, происходящие в поверхностной зоне контактирующих деталей.

Примером фреттинг-коррозионных повреждений при эксплуатации на перегрузочных режимах может служить сопрягаемая пара деталей двигателя карьерного автосамосвала: крышка коренного подшипника и блок. На рис.1 показана типовая конструкция крепления крышки коренного подшипника с поверхностями, подверженными фреттингу, на примере V-образного двигателя карьерного автосамосвала.

Наблюдаемое явление фреттинга на сопряженных поверхностях крышек двигателя позволяет констатировать, что первоначальный очаг образования фреттинга располагался в центре нижних площадок контакта крышки с остовом. Далее поверхность, подверженная фреттингу, увеличивается и распространяется в сторону нижней кромки крышки. На рис.2 показаны результаты фреттинг-износа крышек боковых поверхностей подшипников после наработки 10230 ч.

В литературе [1, 4, 5, 19] приводятся многочисленные примеры фреттинг-коррозионных повреждений различных деталей и узлов и способов защиты от фреттинг-коррозии. Однако единого взгляда на механизм фреттинг-коррозии и, соответственно, выбор мер по ее предотвращению, не выработано.

Для повышения фреттинг-стойкости обычно используют различного рода покрытия плотно контактирующих рабочих поверхностей деталей [1, 6, 11-13].

Выбор износостойких покрытий для защиты деталей от фреттинг-коррозии. Выбор защитных покрытий в рассматриваемом случае определяется рядом особенностей, характеризующих изнашивание в условиях фреттинг-коррозии. Среди особенностей фреттинг-коррозии, отличающих этот процесс от других видов изнашивания, следует выделить: малую амплитуду сдвига, при достижении которой одна из деталей пары трения начинает движение в обратную сторону; наличие воздушной среды, способствующей развитию коррозии; постепенное увеличение

Рис.1. Конструкция крепления крышки коренного подшипника двигателя карьерного автосамосвала (I – поверхности, подверженные фреттинг-изнашиванию)

Рис.2. Фреттинг на боковых поверхностях крышек коренных подшипников после наработки 10230 ч

Рис.3. Упрощенная схема механизма изнашивания при фреттинге

- 1, 2 – детали пары трения; 3 – точки первоначального контакта; 4 – мелкие каверны; 5 – образовавшаяся каверна; 6 – микротрещины; 7 – отколовшиеся частицы металла; 8 – отколовшиеся окисленные частицы металла с твердой структурой

площади контакта деталей. Следует особо отметить, что при малоамплитудном фреттинге продукты износа лишь частично выводятся из зоны контакта и выполняют в процессе трения и изнашивания роль «третьего тела» [3].

Упрощенно процесс фреттинг-износа в начальном периоде можно рассматривать в несколько стадий развития: возникновение сдвиговых деформаций поверхностей под действием переменных касательных напряжений с последующим окислением; последующее разрушение оксидных пленок; развитие участков схватывания с последующей коррозией поверхности металла.

Подобная схема механизма изнашивания при фреттинге представлена на рис.3 [2]. Первичный контакт происходит в локальных точках поверхности (рис.3, а). При малоамплитудной вибрации происходит разрушение оксидных пленок с образованием небольших каверн (рис.3, б). Постепенно оксидные пленки сосредотачиваются в кавернах, увеличиваются в размерах, образуя в дальнейшем одну большую каверну (рис.3, в). Малая амплитуда трения препятствует выходу окислов из зоны контакта, что приводит к образованию микротрещин. Далее трещины соединяются, вызывая откалывание частиц металла. При этом образуются продукты износа в виде твердых окислов, и происходит усиленное абразивное действие на сопрягаемые поверхности. В результате на поверхности трения

оказывают влияние повышенное давление и силы трения оксидных частиц при одновременном повышении давления в зоне контакта, сопровождаемым повышением температуры.

Очевидно, что с учетом приведенной схемы механизма фреттинг-коррозии следует производить и выбор материалов защитных покрытий, причем следует учитывать способность материала покрытия принимать на себя сдвиговую деформацию, препятствуя тем самым развитию усталостных повреждений. Это позволяет считать применение тонких износостойких покрытий перспективным. Использование тонкослойных покрытий также позволяет не нарушать ремонтпригодность узлов и сохранять в процессе эксплуатации создаваемые в процессе сборки натяги [2, 4].

В ряде случаев эффективные результаты при фреттинге показывают и специальные виды обработки, в частности, вибронакатывание с созданием на поверхности регулярного микрорельефа [12, 17, 18]. Значительное внимание в литературе уделяется также влиянию различных характеристик процесса трения, способствующих предотвращению фреттинг-коррозии и снижению износа [9-11, 13-16].

Целью работы являлось изучение влияния ряда перспективных тонкослойных покрытий (полимерной фторуглеродной композиции, фрикционно-механического латунирования, твердосмазочного покрытия) на износ высоконагруженных соединений механизмов горных машин, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

Материалы и методика эксперимента. На первоначальном этапе работы были проведены натурные исследования характера развития фреттинг-коррозионных повреждений боковых крышек рабочего подшипника двигателя карьерного автосамосвала. На рис.2 был показан характер фреттинг-износа после 10230 ч работы. На рис.4 представлены результаты исследования фреттинг-износа боковой поверхности крышки коренного подшипника после наработки 7640, 10830 и 12480 ч. Из рис.4 можно сделать вывод о характере развития фреттинг-коррозионных повреждений, соответствующему механизму изнашивания, описанному выше.

Рис.4. Фреттинг на боковой поверхности крышки коренного подшипника после наработки 7640 ч (а); 10830 ч (б); 12480 ч (в)

Рис.5. Схема установки для испытаний

1 – нижний неподвижный образец; 2 – верхний подвижный контробразец; 3 – емкость для технологической жидкой среды; 4 – нажимной шток; 5 – кулиса; 6 – ролик; 7 – эксцентрик; 8 – приводной вал; 9 – прижимной ролик; 10 – вилка; 11 – пружина

Проведение лабораторных испытаний для оценки эффективности применения рассматриваемых покрытий проводилось на стальных (сталь 15) и чугунных (серый чугун СЧ 25) образцах на специальной установке с использованием привода стандартной машины трения (рис.5). Во всех случаях покрытия наносились на неподвижные образцы, а подвижные контробразцы покрытий не имели. Методика испытаний соответствовала общепринятой, основанной на возвратно-поступательном трении образцов по кольцевому контакту.

Неподвижный образец (1) был выполнен в виде диска диаметром 35 мм и толщиной 7,5 мм. Подвижный контробразец (2) представлял полый цилиндр с внешним диаметром 25 мм и внутренними 20 мм, создавая кольцевой контакт площадью 0,5 см². За счет использования эксцентрика (7) с заданным эксцентриситетом и плеча, создаваемого кулисой (5), цилиндр совершал возвратно-вращательные колебания. Вдоль оси к нему прикладывались нагрузки, создававшие заданные нормальные давления на контакте. Установка позволяла варьировать амплитуду фреттинга на контактирующих поверхностях от 40 до 200 мкм, изменять нормальное давление от 10 до 50 МПа и создавать частоту колебаний от 200 до 1000 циклов/мин благодаря использованию привода машины трения. В качестве верхнего ролика при стандартной схеме испытаний «ролик-ролик» использовался эксцентрик, что позволяло получать возвратно-вращательные колебания подвижных контробразцов, а также использовать измерительные возможности машины трения (момент и коэффициент трения).

Обсуждение результатов исследований. В проведенных исследованиях изучалось изнашивание в условиях фреттинга образцов без покрытия и поверхностной обработки с образцами, имеющими различные покрытия. В качестве покрытий поверхности применяли полимерную фторуглеродную композицию, фрикционно-механическое латунирование, а также твердосмазочное покрытие. Ряд широко используемых методов нанесения защитных покрытий (лазерная обработка, электролитическое нанесение или вакуумное напыление покрытий и др.) технологически неприемлемы для крупногабаритных деталей сложной формы. В то же время технология нанесения рассматриваемых тонкослойных покрытий достаточно проста и в меньшей степени связана с габаритами и формой обрабатываемой поверхности.

Рис.6. Сравнительные результаты лабораторных испытаний: а – износ неподвижного образца (контурная линия – массовый, штриховая – линейный); б – износ подвижных контрообразцов; в – значения коэффициентов трения μ

Образцы и контрообразцы из стали 15 испытывали под давлением 25 МПа с частотой 900 циклов/мин в условиях возвратно-вращательного скольжения с амплитудой 100 мкм. Образцы из чугуна СЧ 25 в паре с контрообразцами из стали 15 испытывали под давлением 50 МПа и частоте 250 циклов/мин при амплитуде возвратно-вращательного скольжения 20 мкм. Число циклов испытаний для каждой пары образцов было принято 5×10^5 , что позволяло получать кольцевую дорожку трения на образце, пригодную для необходимых измерений. Для каждой серии испытаний исследовалось не менее четырех образцов. После испытаний образцы взвешивались с точностью до 0,1 мг, линейный износ определялся измерением по профилограмме дорожек трения. Коэффициенты трения определялись в соответствии с методикой, используемой при испытаниях на машине трения.

На рис.6, а приводятся результаты испытаний, оценивающие износ образцов (Ил – линейный износ, мкм; Им – износ по изменению массы образца, мг); на рис.6, б – износ контрообразцов; на рис.6, в – значения установившихся коэффициентов трения μ . На рис.6 представлены: 1-4 – значения для образцов из стали (1 – образец без покрытия, 2 – с обработкой фрикционно-механическим латунированием толщиной 3-5 мкм, 3 – с обработкой полимерной фторуглеродной композицией толщиной 5 мкм, 4 – с обработкой твердосмазочным покрытием толщиной 25 мкм); 5-8 – значения для чугунных образцов (5 – без покрытия, 6 – с обработкой фрикционно-механическим латунированием, 7 – с обработкой полимерной фторуглеродной композицией, 8 – с обработкой твердосмазочным покрытием).

Анализ результатов проведенных испытаний позволяет отметить снижение как массового, так и линейного износа для всех исследуемых вариантов покрытий.

При этом следует особо отметить, что полученные в испытаниях значения коэффициентов трения в условиях фреттинга не всегда коррелируют с данными об износе образцов и даже превосходят значения исходного базового образца. Можно предполагать, что подобное явление связано с тем, что испытания проводились при относительно небольшой площади контакта образцов ($0,5 \text{ см}^2$), в то время как давление и амплитуда выбирались с учетом реальных условий эксплуатации. Также следует отметить, что условия работы узлов трения при высоких нормальных нагрузках в условиях фреттинга по сравнению с обычным трением скольжения более жесткие.

Анализ литературных данных свидетельствует о том, что единого взгляда на механизм фреттинг-коррозии при использовании различных защитных покрытий не существует. В данной работе предпринята попытка изучения механизмов развития фреттинг-коррозии для тонкослойных покрытий, способствующих снижению износа. С этой целью дорожки трения образцов после испытаний изучались при помощи методов растровой электронной микроскопии.

На рис.7 представлены результаты исследований базовых стальных образцов без покрытия. Можно отметить наличие типичных для фреттинг-износа участков рельефа в виде каверн, заполненных окисленными частицами износа. Участки с окисленными частицами (рис.7, а) занимают сравнительно небольшую площадь, однако можно наблюдать и участки с частицами размером в несколько микрон без следов окисления, на которых заметны трещины хрупкого разрушения (рис.7, б).

Рис.7. Характер дорожки трения при фреттинге стального образца: а – каверны, заполненные частицами износа ($\times 160$); б – частицы износа на поверхности трения ($\times 2000$)

Рис.8. Характер дорожки трения при фреттинге образцов с полимерным покрытием: а – поверхность трения ($\times 200$); б – дисперсные частицы на поверхности трения ($\times 2000$)

Рис.9. Характер дорожки трения при фреттинге латунированных образцов: а – латунное покрытие на поверхности трения ($\times 150$); б – образующаяся сетка трещин в латунном покрытии ($\times 300$); в – структура поперечного излома образца в жидком азоте – пористое латунное покрытие на крупнозернистой стальной основе ($\times 400$); z – структура низкотемпературного излома латунного покрытия с мелкодисперсной структурой ($\times 7000$)

Рис.10. Характер дорожки трения на твердосмазочном покрытии: а – $\times 130$, б – $\times 1000$; в – участок дорожки трения на поверхности стального контр тела, $\times 500$

Нанесение полимерной фторуглеродной композиции на поверхность образца в виде раствора с последующей сушкой создавало на поверхности тонкую полимерную пленку, которая защищала поверхности трения от окисления и образования каверн (рис.8, а). Сравнивая рис.8, а, б, можно заметить, что использование такого рода покрытия несколько повышает дисперсность частиц и тем самым предотвращает механизм их хрупкого разрушения.

Поверхности трения образцов, обработанных фрикционным латунированием, приведены на рис.9. Заметно, что на стальном образце проявляются очень гладкие латунные слои с различной адгезионной связью с поверхностью, как с плохой, вплоть до их отслаивания (рис.9, а), так и с хорошей адгезией (рис.9, б). В последнем случае формирование сетки трещин не приводит к разрушению латунного покрытия, с чем, вероятно, и связана его эффективность. При последующем увеличении ($\times 400$) на рис.9, в можно заметить зерна стальной основы, на которых лежит пластичный слой латуни толщиной несколько микрометров с высоким содержанием пор. При еще более значительном увеличении ($\times 7000$) видно, что структура такого слоя состоит из отдельных сферических частиц с размерами около 1 мкм и меньше (рис.9, г). Очевидно, что в процессе фрикционного нанесения покрытия формируется мелкодисперсная структура, которая обеспечивает механизм деформирования под действием сдвиговых напряжений при фреттинге путем взаимного поворота и проскальзывания мелких элементов структуры.

Наилучшие результаты были получены при применении твердосмазочного покрытия. Износ образцов и контробразцов за время испытаний не превысил 5 мг. Указанный ярко выраженный противоизносный эффект, вероятно, связан с высокой дисперсностью покрытия, нанесенного на поверхность образца с последующим прогревом. На рис.10, а представлен вид дорожки трения при фреттинге, где на фоне исходной дисперсной структуры поверхность трения покрыта гладким слоем с зеркальным блеском и такой же сеткой неразрушающих микротрещин как на латунированной поверхности, но в отличие от латунирования таким слоем покрыта вся по-

верхность трения, а не отдельные участки. При больших увеличениях (рис.10, б) сквозь зеркальный слой как бы просвечивает подповерхностная мелкодисперсная структура с микронными и субмикронными размерами частиц. Такой же вид имеет поверхность стального контртела (рис.10, в), на которую в процессе трения перенеслось вещество покрытия.

Микрондовый рентгеноспектральный анализ поверхности трения, образовавшейся в результате фреттинга на образце с твердосмазочным покрытием, показал повышенное содержание углерода на дорожке трения по сравнению с исходным покрытием, что характерно при реализации механизма избирательного переноса [2].

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по технологии нанесения изученных покрытий для высоконагруженных деталей ряда горных машин и механизмов.

Заключение. 1. В результате проведенных испытаний установлено, что повышение износостойкости при фреттинге для покрытий на основе полимерной фторуглеродной композиции и фрикционно-механического латунирования связано со схожим механизмом образования кон-

тактного слоя мелкодисперсных частиц. Рассмотренные покрытия практически исключают или значительно нивелируют коррозионную составляющую при фреттинге. Размер дисперсных частиц (от долей микрометра до нескольких микрометров), образовавшихся в результате фреттинг-износа, соизмерим с длиной свободного пробега дислокаций, поэтому они, выходя на границы частиц, не образуют скоплений. Возникающая при этом сетка трещин на износостойких поверхностях при использовании указанных покрытий вследствие пористости материалов не приводит к изнашиванию путем отслоения или выкрашивания поверхностного слоя, что, вероятно, повышает диссипативные свойства поверхности.

2. Наилучшие результаты были получены при применении твердосмазочного покрытия, это, помимо его высоких триботехнических характеристик, возможно связано с повышенным содержанием углерода на дорожке трения по сравнению с исходным покрытием, что характерно при реализации механизма избирательного переноса.

3. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации по использованию предложенных тонкослойных покрытий для высоконагруженных деталей горных машин, работающих в условиях фреттинг-коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асланян И.Р. Фреттинг-коррозия электролитических NiP покрытий / И.Р.Асланян, Ж.П. Селис, Л.Ш.Шустер // Трение и износ. 2011. № 6. Т. 32. С. 556-561.
2. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н.Гаркунов, Э.Л.Мельников, В.С.Гаврилюк. М.: КНОРУС, 2013. 408 с.
3. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л.Голего, А.Я.Алябьев, В.В.Шевеля. Киев: Техника, 1974. 272 с.
4. Дроздов Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ и смазка) / Ю.Н.Дроздов, Е.Г.Юдин, А.И.Белов. М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.
5. Ольт Ю. Обеспечение адгезионной прочности газотермических покрытий поршневых колец двигателей карьерного транспорта / Ю.Ольт, В.В.Максаров, В.А.Красный // Записки Горного института. 2018. Т. 229. С. 77-83. DOI: 10.25515/PMI.2018.1.77
6. Основы эксплуатации горных машин и оборудования / А.В.Гилев, В.Г.Чесноков, Н.Б.Лаврова, Л.В.Хомич, Н.Н.Гилева, Л.П.Коростовенко / Сибирский федеральный университет. Красноярск. 2011. 276 с.
7. Островский М.С. Фреттинг как причина снижения надежности горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. Т. 3. № 12. С. 315-331.
8. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
9. Kubiak K.J. Interface roughness effect on friction map under fretting contact conditions / K.J.Kubiak, T.G.Mathia, S.Fouvry // Tribology International. 2010. 43(8). P. 1500-1507.
10. Fretting wear behavior of bulk amorphous steel / D.Huang, R.Li, L.Huang, V.Ji, T.Zhang // Intermetallics. 2011. 19 (10). P. 1385-1389.
11. Krasnyy V. Improving fretting resistance of heavily loaded friction machine parts using a modified polymer composition / V.Krasnyy, V.Maksarov, J.Olt // Agronomy Research. 2016. 14(S1). P. 1023-1033.
12. Krasnyy V. Increase of wear and fretting resistance of mining machinery parts with regular roughness patterns / V.Krasnyy, V.Maksarov, J.Olt // Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium, 2016. P. 151-156.
13. Maksarov V.V. Specific Features of Friction Mechanisms of Thin-film Coatings of Parts of Mining Machines Working in Fretting Corrosion / V.V.Maksarov, V.A.Krasnyy // AER-Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133 (Actual Issues of Mechanical Engineering AIME-2017). P. 445-451.
14. The effect of temperature on wear and friction of a high strength steel in fretting / S.R.Pearson, P.H.Shipway, J.O.Abere, R.A.A.Hewitt // Wear. 2013. Vol. 303. P. 622-631.
15. Ramesh R. Development of a fretting wear test rig and preliminary studies for understanding the fretting wear properties of steels / R.Ramesh, R.Gnanamoorthy // Materials and Design. 2006. № 27(2). P. 141-146.
16. Rybiak R. Fretting wear of stainless steels under variable temperature conditions: introduction of a 'composite' wear law / R.Rybiak, S.Fouvry, B.Bonnet // Wear. 2010. Vol. 268. P. 413-423.
17. Varenberg M. Different aspects of the role of wear debris in fretting wear / M.Varenberg, G.Halperin, I.Etsion // Wear. 2002. Vol. 252. № 11-12. P. 902-910.
18. Volchok A. The effect of surface regular microtopography on fretting fatigue life / A.Volchok, G.Halperin, I.Etsion // Wear. 2002. Vol. 253. № 3-4. P. 509-515.
19. Zhang W. Fretting wear characteristics of Ni/Cu multilayers electrodeposited on beryllium bronze substrate // W.Zhang, Q.Xue // Wear. 1998. Vol. 214. P. 23-29.

Авторы: Ю.Ольт, д-р техн. наук, профессор, ju.olt@etu.ee (Эстонский университет естественных наук, Тарту, Эстония), В.В.Максаров, д-р техн. наук, профессор, maks78.54@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), В.А.Красный, канд. техн. наук, доцент, vikras1955@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 8.06.2018.

Статья принята к публикации 17.10.2018.