

*В.В. Максаров, В.А. Красный*

## **МЕХАНИЗМЫ ТРЕНИЯ ТОНКОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ**

*M.V. Maksarov, V.A. Krasnyy*

### **THE MECHANISMS OF FRICTION OF THIN-LAYER COATINGS UNDER CONDITIONS OF FRETTING-CORROSION**

Рассмотрено применение нанопокровтий на основе полимерной фторуглеродной композиции и фрикционно-механического латунирования для защиты высоконагруженных сопряжений деталей машин, работающих в условиях фреттинг-коррозии. Изучены механизмы трения нанопокровтий, позволяющие значительно снизить фреттинг-износ механизмов трения в изделиях машиностроения.

ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИЯ; НАНОПОКРЫТИЯ; ФТОРУГЛЕРОДНАЯ ПОЛИМЕРНАЯ КОМПОЗИЦИЯ; ФРИКЦИОННО-МЕХАНИЧЕСКОЕ ЛАТУНИРОВАНИЕ; МЕЛКОДИСПЕРСНАЯ СТРУКТУРА.

The prospects of application of nano-coatings based on polymeric fluorocarbon composition and friction-mechanical brass plating for protection of heavily loaded mates machine parts operating under conditions of fretting corrosion. We studied the mechanisms of friction of nano-coatings that significantly reduce fretting wear. When choosing materials protective coatings of parts of high load of mates from fretting should pay attention not only to their durability, but also on the sensitivity to shear, i.e. the ability of a material to assume the shear deformation without the initiation of fatigue damage processes. It is known that this property have a thin enough coating, convenient and also those that do not violate the maintainability of components and allow you to keep in operation the tightness provided in the Assembly.

FRETTING CORROSION; NANOCOATING; FLUOROCARBON POLYMERIC COMPOSITION; OF A FRICTION-MECHANICAL BRASS; FINE STRUCTURE.

#### **Введение**

Фреттинг-коррозия нередко является причиной выхода из строя ряда ответственных узлов двигателей внутреннего сгорания, в частности большегрузных карьерных автосамосвалов, деталей буровой техники и др., работающих в условиях вибраций и высоких контактных нагрузок. Фреттинг характерен для номинально неподвижных сочленений конструкций (например, в местах скрепления деталей и т. п.) и возникает, как правило, при вибрациях, приводящих к различного рода колебательным относительным перемещениям и деформациям. Часто фреттинг сопровождается химическими процессами на поверхностях трения (фреттинг-коррозия). Из-

нашивание при фреттинге проявляется в «выедании» материала в местах скрепления деталей конструкции. Характерной особенностью фреттинга, в отличие от других видов трения скольжения, является малая амплитуда относительных смещений контртел, сопоставимая с расстоянием между вершинами микронеровностей на поверхности трения, что затрудняет удаление продуктов износа из зоны контакта. Продукты износа при этом начинают играть роль абразива, что приводит к дополнительному изнашиванию [1, 2].

При выборе материалов покрытий, защищающих от фреттинг-коррозии детали высоконагруженных сопряжений, следует обращать вни-

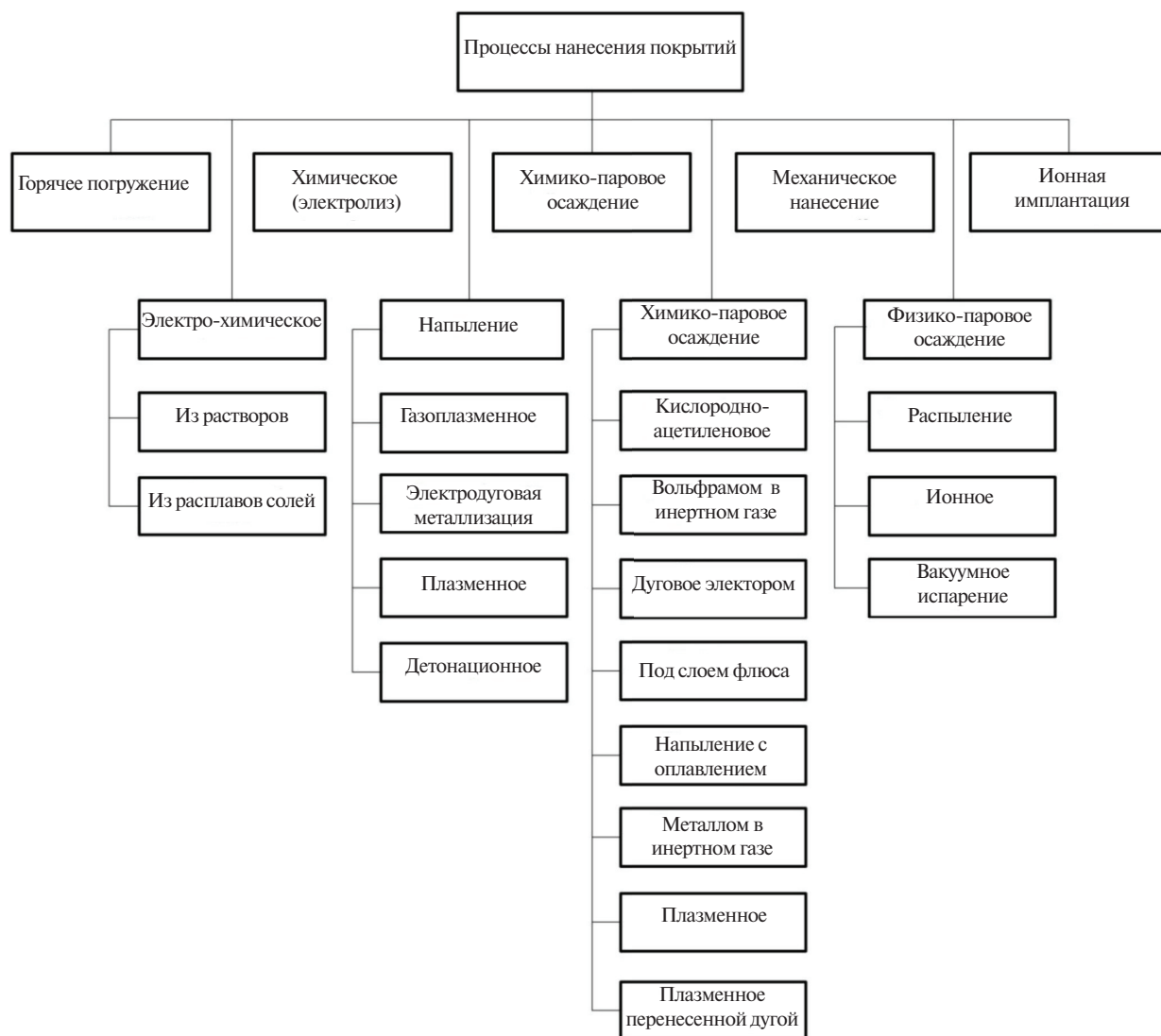


Рис. 1. Классификация процессов нанесения покрытий

мание не только на их износостойкость, но и на чувствительность к сдвигу, т. е. способность материала принимать на себя сдвиговую деформацию без инициирования процессов усталостного повреждения. Известно, что таким свойством обладают достаточно тонкие покрытия, удобные также и тем, что не нарушают ремонтпригодность узлов и позволяют сохранять в процессе эксплуатации натяги, предусмотренные при сборке [3, 4].

Целью работы было исследование механизмов фреттинг-коррозии нанопокровтий на основе полимерной фторуглеродной композиции и фрикционно-механического латунирования

применительно к условиям работы высоконагруженных сопряжений.

#### Основные виды покрытий для защиты от фреттинг-коррозии

Покровтий триботехнического назначения — огромное количество, причем разнообразных видов и технологических способов их формирования. Существуют различные классификации покрытий.

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три вида покрытий: защитные, применяемые для защиты изделий от коррозии



в разных средах (атмосфера, агрессивные и т. д.); защитно-декоративные — для декоративной отделки изделий с одновременной защитой их от коррозии; специальные, или функциональные, для придания поверхности изделий специальных свойств (твердость, износостойкость, антифрикционные свойства и др.). Выбор типа покрытий определяется условиями эксплуатации деталей. На рис. 1 приведена классификация современных видов и способов нанесения износостойких и защитных покрытий.

Необходимо отметить различия в механизме трения при непрерывном скольжении и при фреттинге (скольжение с очень малыми колебаниями и динамической нагрузкой). Особенности механизма изнашивания покрытий в условиях фреттинга, обусловленные малыми амплитудами номинально неподвижных соединений, связаны с сохранением в зоне контакта продуктов изнашивания, которые в процессе эксплуатации играют роль «третьего тела» и могут как усиливать изнашивание, сопровождая его коррозионными процессами, так и ослабить.

Изнашивание покрытий в условиях фреттинга характеризуется следующими особенностями: трение скольжения происходит в условиях возвратно-поступательного движения;

фреттинг осуществляется на воздухе;

при достижении заданной амплитуды сдвига контртело начинает движение в обратную сторону;

контртело жестко закреплено в державке и непрерывно находится в контакте с покрытием при постоянной заданной нагрузке;

контртело в процессе трения в результате изнашивания увеличивает свою площадь касания с покрытием;

каждый участок поверхности трения покрытия подвергается прерывисто-симметричному циклу взаимодействия с контртелом;

по мере увеличения площади касания контртела ширина участка трения покрытия также увеличивается;

продукты износа лишь частично уносятся из зоны контакта и активно участвуют в процессе трения и изнашивания.

При фреттинг-изнашивании под действием сил трения кристаллическая решетка поверхностных слоев при циклических тангенциальных смещениях расшатывается и разрушается [3]. Процесс разрушения представляет собой дис-

пергирование поверхности без удаления продуктов изнашивания.

Оторвавшиеся частицы металла и ювенильные участки поверхности трения подвергаются быстрому окислению кислородом воздуха. Дополнительным источником повреждения поверхностей может стать возникающее в отдельных местах касания пар трения схватывание.

Упрощенная схема процесса фреттинг-изнашивания в начальной фазе такова: перемещение и деформация поверхностей под действием переменных касательных напряжений — окисление — разрушение оксидных пленок — обнажение чистого металла и местами схватывание — разрушение очагов схватывания и адсорбция кислорода на обнаженных участках.

Механизм изнашивания при фреттинге в упрощенном виде показан на рис. 2 [3]. Первоначальное контактирование деталей происходит в отдельных точках поверхности (см. рис. 2, а). При вибрации оксидные пленки в зоне фактического контакта разрушаются, образуются небольшие каверны, заполненные оксидными пленками (рис. 2, б), которые постепенно увеличиваются в размерах и сливаются в одну большую каверну (рис. 2, в). В ней повышается давление окисленных частиц металла, образуются трещины. Некоторые трещины сливаются, и происходит откалывание отдельных объемов металла. Частицы оксидов производят абразивное воздействие. В результате действия повышенного давления и сил трения частиц оксидов повышается температура, и происходит образование белых твердых нетравящихся структур в отколовшихся частицах и на поверхности каверн.

В ряде исследований предложены различные варианты износостойких защитных покрытий, эффективно работающих в условиях фреттинга и фреттинг-коррозии, например медно-никелевые [5], медно-фосфорные [6] и другие, наносимые электролитическим способом, покрытия из фуллерена  $C_{60}$  [7], полимерные (эпилам-фолекс) покрытия, кремний и молибден содержащие покрытия [8] и др.

Во многих случаях эффективные результаты при фреттинге дают и специальные виды обработки, в частности вибронакатывание с созданием на поверхности регулярного микрорельефа [9].

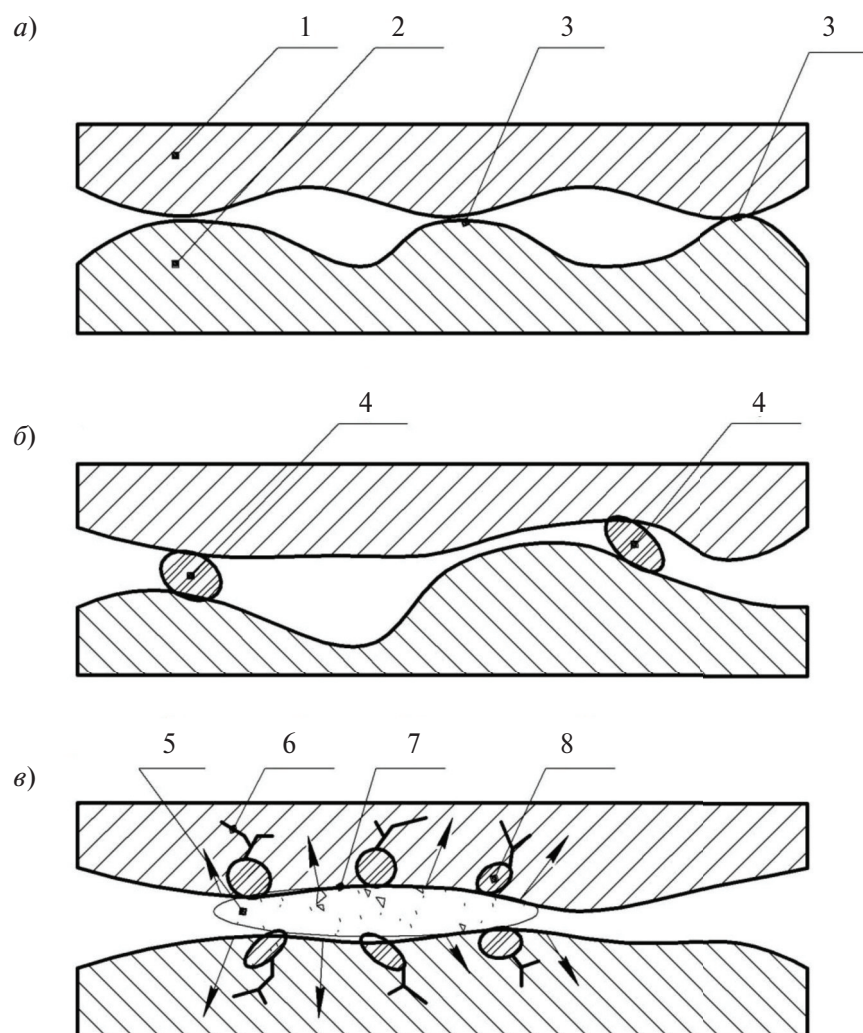


Рис. 2. Механизм изнашивания покрытий при фреттинге:  
1, 2 – контактирующие детали; 3 – точки контакта поверхностей; 4 – мелкие за-  
рождающиеся каверны; 5 – общая большая каверна; 6 – трещины; 7 – отколов-  
шиеся объемы металла; 8 – отколовшиеся частицы с твердой структурой

В нашей работе исследованы тонкослойные покрытия на основе полимерной фторуглеродной композиции и фрикционно-механического латунирования в условиях высоких контактных нагрузок, характерных для крупногабаритных соединений тепловозных и судовых дизелей, а также двигателей карьерных автосамосвалов.

#### Испытания на изнашивание в условиях фреттинга

Исследовалось изнашивание в условиях фреттинга модельных образцов из стали 15 и серого чугуна СЧ25 с покрытиями, применение которых перспективно для крупногабаритных деталей сложной конфигурации, когда такие

традиционно используемые методы защиты, как электролитическое нанесение или вакуумное напыление покрытий, а также лазерная обработка поверхности деталей, оказываются технологически неприемлемыми. Исследовались поверхности трения образцов после обработки полимерной фторуглеродной композицией и фрикционно-механического латунирования по сравнению с исходными образцами без покрытий и поверхностной обработки. Все виды покрытий использовались для поверхностей трения неподвижных деталей пар трения. Подвижные кольцевые контробразцы из стали 15 покрытий не имели.

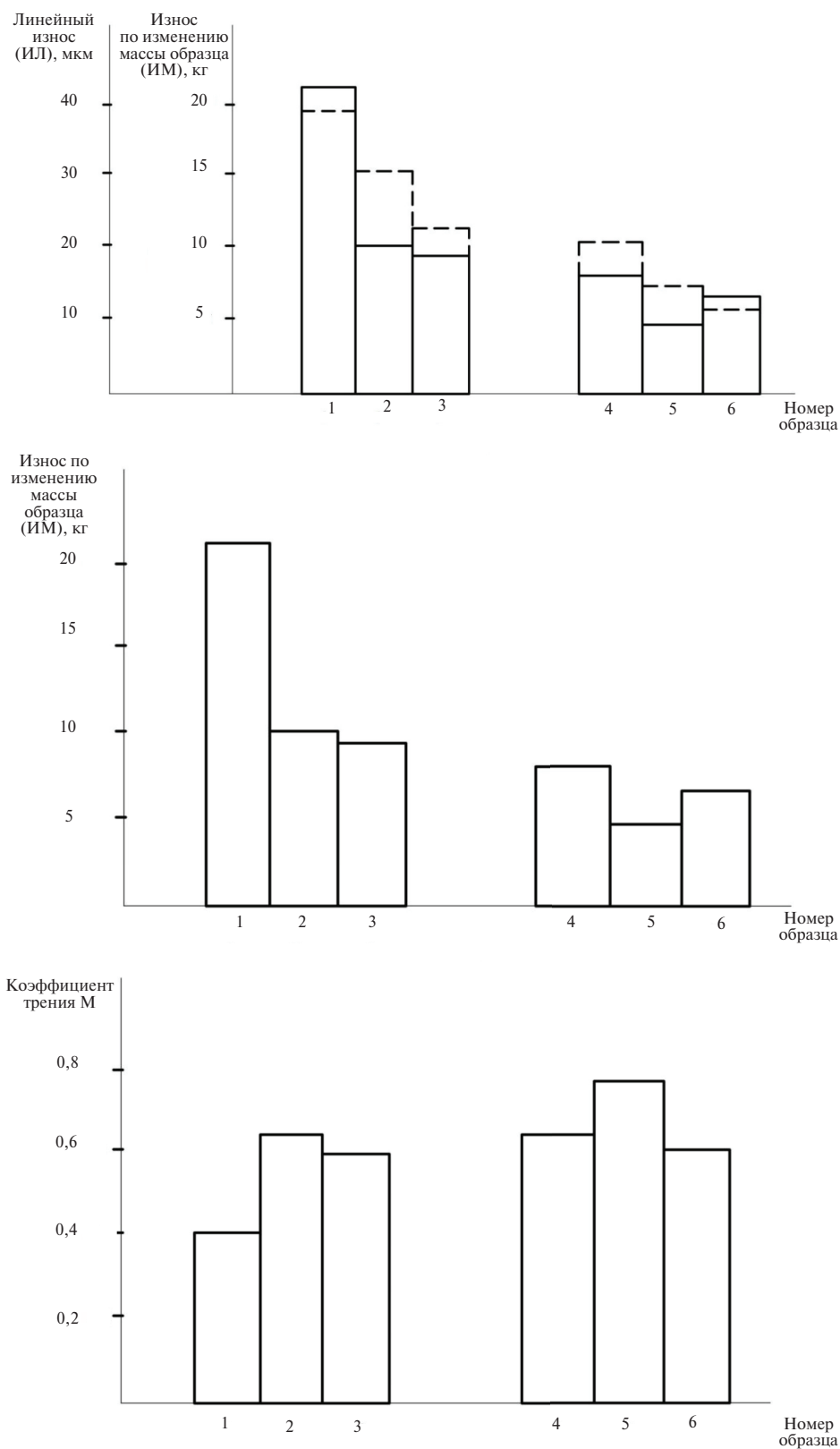


Рис. 3. Результаты испытаний при фреттинге: а) изнас образцов (контурная линия — массовый, штриховая — линейный); б) изнас контробразцов; в) значения установившихся коэффициентов трения

Испытания на изнашивание в условиях фреттинга проводились на стандартных образцах по методике [10] в двух режимах. Первая серия образцов и контробразцов из стали 15 испытывалась в условиях возвратно-вращательного скольжения с амплитудой 100 мкм при давлении 25 МПа и частоте 900 циклов/мин. Вторая серия испытаний проводилась на образцах из чугуна СЧ25 и контробразцах из стали 15 при амплитуде смещений 20 мкм, частоте 250 циклов/мин и давлении 85 МПа. Число циклов нагружения для каждой пары образцов было  $5 \times 10^5$ , для каждого варианта покрытий испытывалось не менее 4 образцов. Оценка износа после испытаний проводилась по изменению массы образцов с точностью до 0,1 мг, а линейного износа — по профилограмме дорожек трения.

Коэффициент трения определялся по тарировочным графикам согласно показаниям тензорезистора. Результаты испытаний при фреттинге описанных выше образцов приведены на рис. 3 в сравнении с данными для образцов без покрытий. На рис. 3, *а* — износ образцов (ИЛ — линейный износ, мкм; ИМ — износ по изменению массы образца, мг), на рис. 3, *б* — износ контробразцов и на рис. 3, *в* — значения установленных коэффициентов трения  $\mu$ . При этих исследованиях образцы с номерами 1–3 были из стали (1 — образец без покрытия; 2 — образец с фрикционно-механическим латунированием толщиной 3–5 мкм; 3 — образец с полимерной фторуглеродной композицией толщиной 5 мкм). Номера с 4 по 6 соответствуют чугунным образцам (4 — без покрытия, 5 — с фрикционно-механическим латунированием; 6 — с полимерной фторуглеродной композицией).

Как видно из рис. 3, для всех исследуемых вариантов покрытий в несколько раз снижается массовый (ИМ) и линейный (ИЛ) износ образцов в условиях фреттинга, при этом полученные в испытаниях значения коэффициентов трения в условиях фреттинга не коррелируют с данными об износе образцов. В рассматриваемых случаях коэффициент трения даже выше, чем у исходного базового образца. Причиной этого может быть как специфика работы узлов трения при высоких нормальных нагрузках в условиях фреттинга по сравнению с обычным трением скольжения, так и характер микроструктурных изменений в поверхностных слоях деталей

сопряжений. Кроме того, при модельных испытаниях относительно небольшая площадь контакта образцов (0,5 см<sup>2</sup>) при сохранении реальных нагрузок и амплитуд смещения, характерных для условий эксплуатации, приводит к более жестким условиям фреттинга, чем в реальных сопряжениях, что также может сказаться на увеличении коэффициента трения в несколько раз по сравнению с коэффициентом трения в условиях скольжения.

### Металлографический анализ поверхности износа

Для выявления механизмов, способствующих снижению фреттинг-износа при использовании успешно проявивших себя покрытий, проведено исследование поверхностей трения методом растровой электронной микроскопии [11, 12].

На поверхностях трения базовых стальных образцов наблюдаются типичные для фреттинг-износа участки рельефа в виде каверн, заполненных окисленными частицами износа. Об окислении свидетельствует специфический эффект накопления заряда на плохо проводящей поверхности окисленных частиц, что ухудшает контрастность изображения и создает впечатление «свечения» под действием электронного пучка. Поскольку на остальной поверхности трения такого эффекта не наблюдается, можно полагать, что окисление частиц износа происходит уже после их образования в результате взаимодействия кислорода с активированной в процессе трения поверхностью мелких частиц, т. е. к самому механизму фреттинг-износа процесс коррозии, вероятно, не имеет прямого отношения, тем более что участки с окисленными частицами (рис. 4, *а*) занимают сравнительно небольшую площадь общей поверхности трения. На дорожке фреттинг-износа стали 15 довольно часто встречаются и участки, покрытые частицами размером в несколько микрометров без следов окисления (рис. 4, *б*), на которых хорошо видны трещины хрупкого разрушения. По-видимому, эти частицы являются карбидными или другими характерными для сталей включениями, результатом разрушения в процессе трения перлитных прослоек и т. п.

Нанесение полимерной фторуглеродной композиции в виде раствора с последующей суш-

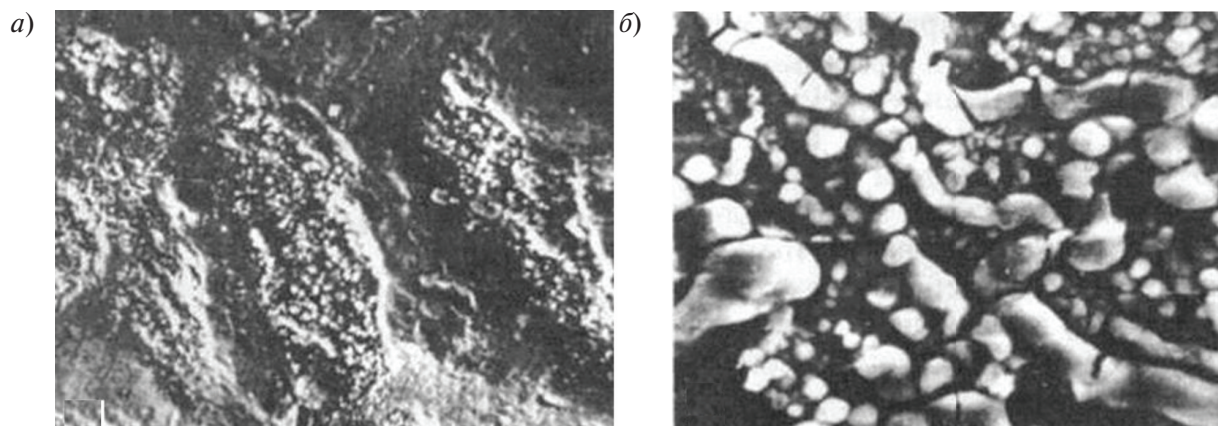


Рис. 4. Поверхность износа при фреттинге стали:  
*а* – каверны с частицами износа ( $\times 160$ ); *б* – частицы на поверхности трения ( $\times 2000$ )

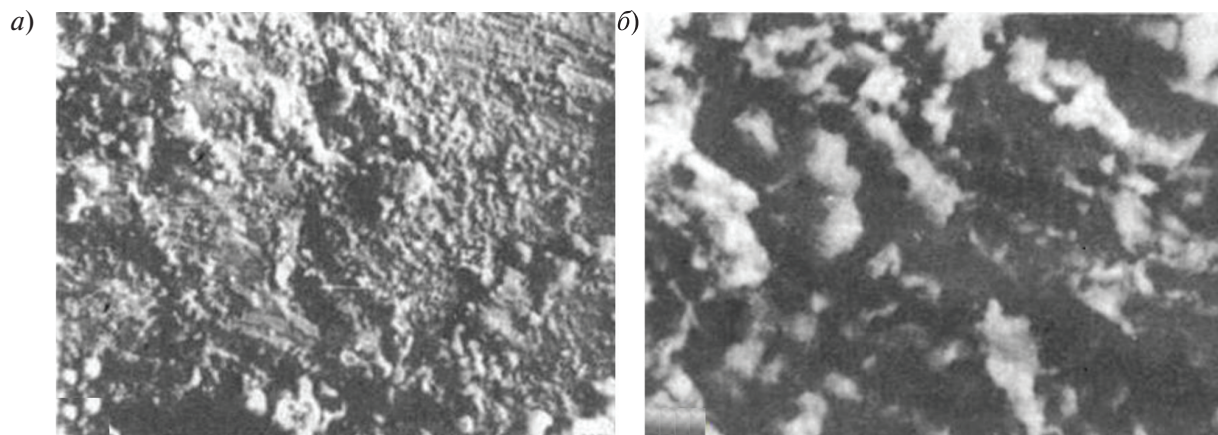


Рис. 5. Поверхность износа при фреттинге стали с фторуглеродным покрытием:  
*а* – участок поверхности трения ( $\times 200$ ); *б* – дисперсные частицы на поверхности трения ( $\times 2000$ )

кой создает на поверхности тонкую полимерную пленку, которая защищает поверхности трения от окисления и образования каверн (рис. 5, *а*), а также несколько повышает дисперсность частиц, видимых на поверхности, и исключает механизм их хрупкого разрушения (см. рис. 5, *а* в сравнении с рис. 5, *б*).

В этом случае микрочастицы в полимерной пленке, образованной модификатором, могут, вероятно, играть роль дисперсного наполнителя в полимерной матрице, формируя пленку покрытия композитного типа. Полимерные композиционные материалы хорошо зарекомендовали себя в качестве противоизносных и антифрикционных покрытий. Наиболее эффективны в снижении износа как раз композитные покрытия с мягкой матрицей и более твердыми

частицами наполнителя, что и реализуется в рассматриваемом нами случае.

Несколько иначе выглядят поверхности трения фрикционно-латунированных образцов.

Латунирование приводит к появлению на поверхности стального образца очень гладких латунных слоев, имеющих местами плохую адгезионную связь с поверхностью, где наблюдается их отслаивание на дорожке трения при фреттинге (рис. 6, *а*), но чаще с такой хорошей адгезией, что даже формирование сетки трещин не приводит к отслаиванию и выкрашиванию латунного покрытия (рис. 6, *б*), с чем, по-видимому, и связана его эффективность. Поперечный излом образца при низкотемпературном ударном разрушении в жидком азоте позволяет выявить структуру материала в приповерхност-

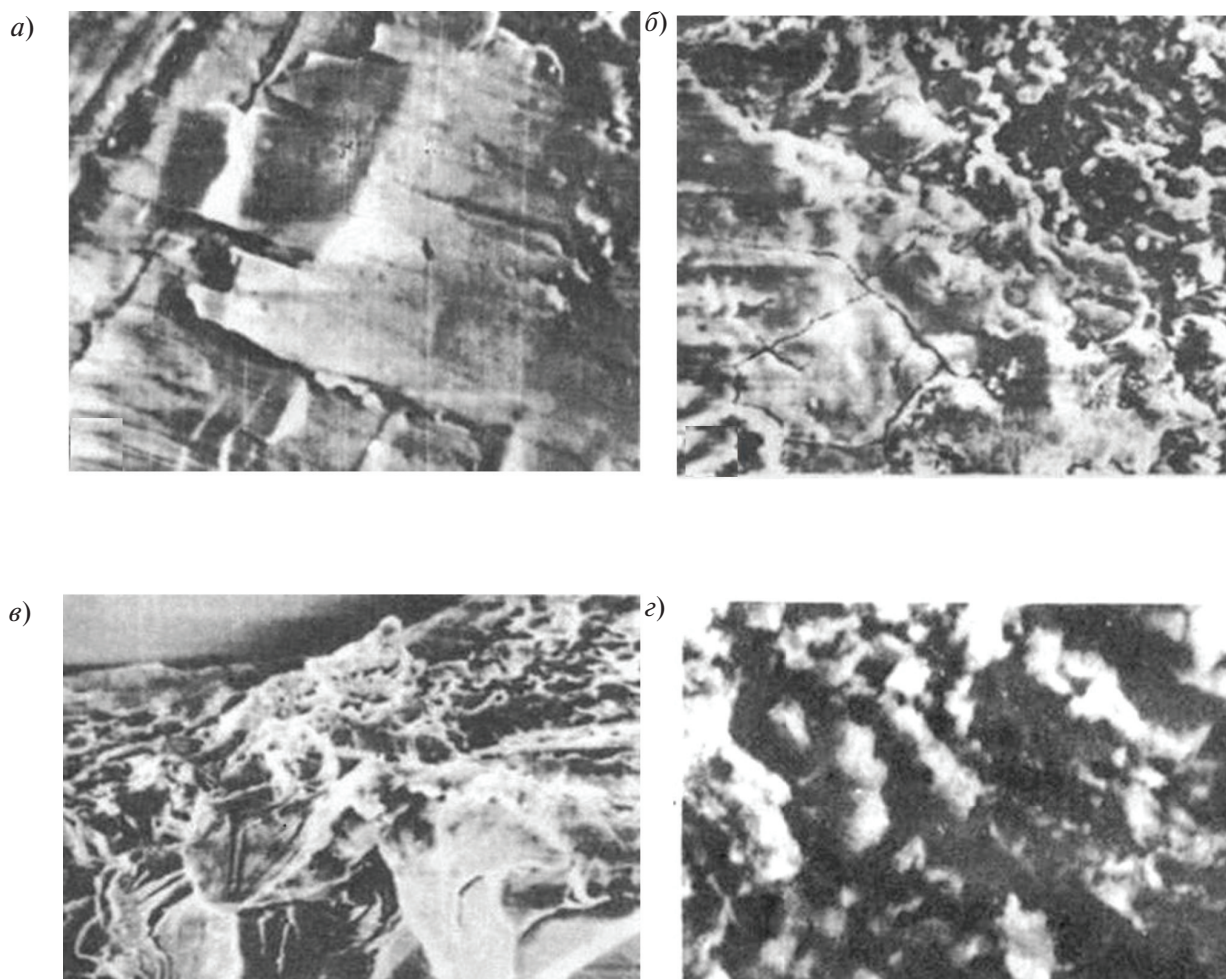


Рис. 6. Поверхность износа при фреттинге стали с фрикционно-механическим латунированием: *а* — слой латунного покрытия на поверхности трения ( $\times 150$ ); *б* — сетка трещин в латунном покрытии после фреттинга ( $\times 300$ ); *в* — поперечный излом образца с покрытием в жидком азоте — рыхлое пористое латунное покрытие на крупнозернистой стальной основе ( $\times 400$ ); *г* — фрагмент низкотемпературного излома латунного покрытия с мелкодисперсной структурой ( $\times 7000$ )

ных слоях у поверхности трения. Обычные методы изготовления шлифов за счет краевого эффекта и сильных механических воздействий в процессе пробоподготовки такие слои деформируют, в то время как хрупкая трещина при низкотемпературном ударном разрушении вскрывает структуру у поверхности трения, как правило не искажая ее. На рис. 6, *в* на изломе видны зерна стальной основы, на которых лежит пластичный слой латуни толщиной несколько микрометров с высоким содержанием пор. При больших увеличениях видно, что структура такого слоя состоит из отдельных сферических частиц размерами около 1 мкм и меньше (рис. 6, *г*). При этом мелкодисперсная структура слоя,

сформированная в процессе фрикционного нанесения покрытия при высоких напряжениях и скоростях скольжения, обеспечивает механизм деформирования под действием сдвиговых напряжений при фреттинге путем взаимного поворота и проскальзывания мелких элементов структуры. Это, вероятно, позволяет осуществлять интенсивное деформирование тонких приповерхностных слоев материала по бездислокационному механизму, не приводящему к разрушению и изнашиванию. Реализация такого механизма трения даже на отдельных участках поверхности контакта может уменьшить общий износ.

Наблюдаемые в латунном слое микротрещины (см. рис. 6, *б*), которые не приводят, как это



видно, к разрушению путем отслаивания или выкрашивания покрытия, возможно, являются дополнительным каналом диссипации энергии трения в поверхностном слое не только в результате затраты энергии на образование свободной поверхности трещины, но и благодаря повышению подвижности поверхностных слоев. Образование таких трещин, вероятно, связано с «раскачиванием» при фреттинге приповерхностных зерен стальной основы. Размер областей, ограниченных трещинами на рис. 6, б, соизмерим с размером выявленных в изломе (рис. 6, в) зерен стальной структуры и составляет десятки микрометров.

Мелкодисперсная структура фрикционных латунных слоев, видимая на рис. 6, г, может быть результатом структурной самоорганизации материала в процессе фрикционной обработки вследствие фрагментации, характерной для высоких степеней деформации материалов на основе меди. Наличие в контакте при трении сферических частиц с высокой дисперсностью в виде металлических порошков, геомодификаторов и т. п., как правило, снижает износ. Это, вероятно, связано с диссипацией энергии трения при взаимном перемещении частиц, что защищает от силовых воздействий нижележащие слои материала. На этом же принципе основано и положительное влияние на фрикционные свойства композитных покрытий с мягкой матрицей и более твердыми частицами наполнителя.

### Выводы

1. Установлено, что во всех исследованных высоконагруженных сопряжениях деталей машин с использованием для защиты нанопокровов на основе полимерной фторуглеродной композиции и фрикционно-механического латунирования имеет место единый механизм повышения износостойкости при фреттинге в зоне контактного слоя мелкодисперсных частиц благодаря использованию тонкослойных покрытий. Их присутствие может быть обусловлено либо структурной самоорганизацией материала покрытия в процессе фрикционного латунирования, либо формированием композиционной структуры полимерного покрытия с мелкими частицами износа при использовании полимерной композиции. При этом рассмотренные защитные нанопокровы практически исключают коррозионный компонент механизма фреттинг-изнашивания.

2. Дисперсная структура поверхностных слоев мешает реализации обычного дислокационного механизма деформационного упрочнения поверхностных слоев материала с последующим разрушением, когда исчерпывается пластичность в результате передвижения дислокаций в плоскостях скольжения и под действием дислокационных скоплений начинается процесс зарождения трещин, приводящих к износу. Размер дисперсных частиц (от долей микрометра до нескольких микрометров) соизмерим с длиной свободного пробега дислокаций, поэтому они, выходя на границы частиц, не могут образовывать скоплений.

3. Зарождение несплошностей между структурными элементами в этом случае приводит к повышению пористости материала, но компенсируется процессом структурной аккомодации при перемещении мелких частиц, поэтому на таких порах нет повышенной концентрации напряжений и разрушения. Характерно, что даже сетка трещин на износостойких поверхностях не приводит к изнашиванию путем отслоения или выкрашивания поверхностного слоя и, возможно, вносит вклад в повышение диссипативных свойств поверхности. Не исключено, что и образование таких трещин может быть вызвано не только «раскачкой» элементов структуры исходного материала под покрытием: в рамках синергетических представлений о самоорганизации структуры в процессе трения эти трещины можно рассматривать как границы ячеек диссипативной в синергетическом смысле структуры.

4. Исследование поверхностей трения образцов с тонкослойными нанопокровыми показало, что практически во всех случаях снижение износа в испытаниях в режиме фреттинга связано с наличием в зоне контакта мелкодисперсных частиц, что позволяет осуществлять деформирование поверхностных слоев по механизму взаимного поворота и проскальзывания элементов структуры под действием сдвиговых напряжений без разрушения, приводящего к изнашиванию поверхности. Представления о возможности реализации такого «безыносного» механизма при трении позволяют более осознанно подходить к выбору оптимальных материалов для покрытий поверхностей трущихся деталей и в случае фреттинга высоконагруженных сопряжений деталей машин.

Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием № 9-2642-2014/К от 10 июля 2014 г

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. Киев: Техника, 1974. 272 с.
2. Уотерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
3. Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Гаврилюк В.С. Триботехника. М.: КНОРУС, 2013. 408 с.
4. Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ и смазка). М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.
5. Zhang W., Xue Q. Fretting wear characteristics of Ni/Cu multilayers electrodeposited on beryllium bronze substrate // *Wear*. 1998. Vol. 214. P. 23–29.
6. Асланян И.Р., Селис Ж.П., Шустер Л.Ш. Фреттинг-коррозия электролитических NiP покрытий // *Трение и износ*. 2011. Т. 32. № 6. С. 556–561.
7. Гинзбург Б.М. Красный В.А., Козырев Ю.П., Булатов В.П. Снижение фреттинг-износа металлов под действием фуллерена C60 // *Трение и износ*. 1997. Т. 18, №4. С. 523–526.
8. Потапов С.И., Федоров А.Б., Булатов В.П., Красный В.А., Седакова Е.Б., Козырев Ю.П. Применение тонкослойных полимерных покрытий для защиты от фреттинг-коррозии крышек коренных подшипников ДВС // *Двигателестроение*. 1996. № 2. С. 31–33.
9. Bulatov V.P., Krasnyy A., Shneider Y.G. Basics of machining methods to yield wear- and fretting-resistive surfaces, having regular roughness pattern // *Wear*. 1997. Vol. 208. P. 132–137.
10. ГОСТ 23.211-80. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при фреттинге и фреттинг-коррозии. М., 1980.
11. Булатов В.П. Красный В.А., Киреев О.Ф., Попов И.Н. Исследование фреттинг-коррозии в условиях высоких контактных нагрузок // *Трение и износ*. 1994. Т. 15, №1. С. 101–108.

## REFERENCES

1. Golego N.L., Alyabyev A.Ya., Shevelya V.V. Fretting-korroziya metallov. Kiyev: Tekhnika, 1974. 272 s.
2. Uoterkhauz R.B. Fretting-korroziya. L.: Mashinostroyeniye, 1976. 272 s. (rus.)
3. Garkunov D.N., Melnikov E.L., Gavriluk V.S. Tribotekhnika. M.: KNORUS, 2013. 408 s. (rus.)
4. Drozdov Yu.N., Yudin Ye.G., Belov A.I. Prikladnaya tribologiya (treniye, iznos i smazka). M.: Eko-Press, 2010. 604 s. (rus.)
5. Zhang W., Xue Q. Fretting wear characteristics of Ni/Cu multilayers electrodeposited on beryllium bronze substrate. *Wear*. 1998. Vol. 214. P. 23–29.
6. Aslanyan I.R., Selis Zh.P., Shuster L.Sh. Fretting-korroziya elektroliticheskikh NiP pokrytiy. *Treniye i iznos*. T. 32, № 6. 2011. S. 556–561. (rus.)
7. Ginzburg B.M. Kozyrev Yu.P., Bulatov V.P. Snizheniye fretting-iznosa metallov pod deystviyem fullerena C60. *Treniye i iznos*. 1997. T. 18, №4. S. 523–526. (rus.)
8. Potapov S.I., Fedorov A.B., Bulatov V.P., Krasnyy V.A., Sedakova Ye.B., Kozyrev Yu.P. Primeneniye tonkosloynnykh polimernykh pokrytiy dlya zashchity ot fretting-korrozii kryshek korennykh podshipnikov DVS. *Dvigatelistroyeniye*. 1996. № 2. S. 31–33. (rus.)
9. Bulatov V.P., Krasnyy V.A., Shneider Y.G. Basics of machining methods to yield wear- and fretting-resistive surfaces, having regular roughness pattern. *Wear*. 1997. Vol. 208. P. 132–137.
10. GOST 23.211-80. Obespecheniye iznosostoykosti izdeliy. Metod ispytaniy materialov na iznashivaniye pri frettinge i fretting-korrozii. M., 1980. (rus.)
11. Bulatov V.P. Krasnyy V.A., Kireyenko O.F., Popov I.N. Issledovaniye fretting-korrozii v usloviyakh vysokikh kontaknykh nagruzok. *Treniye i iznos*. 1994. T. 15, №1. S. 101–108. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**МАКСАРОВ Вячеслав Викторович** — доктор технических наук профессор Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.

E-mail: maks78.54@mail.ru

**MAKSAROV Viacheslav V.** — National Mineral Resources University.

2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106.

E-mail: maks78.54@mail.ru

**КРАСНЫЙ Виктор Адольфович** — кандидат технических наук доцент Национального минерально-сырьевого университета «Горный».

199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2.

E-mail: vikras1955@yandex.ru

**KRASNIY Viktor A.** — National Mineral Resources University.

2, line 21 V.O., St. Petersburg, Russia, 199106.

E-mail: vikras1955@yandex.ru