

*Алисин Валерий Васильевич*

DOI 10.31483/r-74629

## **АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ФРЕТТИНГА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К РАЗРАБОТКЕ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МАШИН**

**Аннотация:** статья посвящена разработке направления работ по созданию качественно новых инновационных решений в обеспечении надежности соединений деталей машин. Формулируемые рекомендации основаны на анализе исследований процесса изнашивания неподвижных соединений деталей машин в процессе микроперемещений в контакте под воздействием вибрации в условиях высоких температур. Установлено, что физические и химические процессы, протекающие в области фактического контакта соединяемых деталей, отличаются разнообразием, и влияние температуры на трибологические характеристики фрикционного контакта является неоднозначным, с увеличением температуры возможно и снижение изношенного объема, и увеличение его. Для прогнозирования стойкости контакта к фреттингу необходимо проведение силового анализа на контакте и определение спектрального состава вибраций, действующих на фрикционный контакт.

**Ключевые слова:** фреттинг, трение, износ, вибрация, микроперемещения, высокие температуры.

**Abstract:** the article is devoted to the development of the direction of work on the creation of qualitatively new innovative solutions to ensure the reliability of connections of machine elements. The recommendations are based on the analysis of studies on wear process of the fixed joints of machine elements during microdisplacements in contact under the influence of vibration at high temperatures. It is established that physical and chemical processes occurring in the area of actual contact of the joint elements are varied and the effect of temperature on tribological

---

*characteristics of frictional contact is complex, since with an increase in temperature the reduction of worn-out volume can occur as well as increase of it. To predict the resistance of the contact to fretting, it is necessary to conduct a force analysis on the contact and determine the spectral composition of vibrations affecting the friction contact.*

**Keywords:** *fretting, friction, wear, vibration, microdisplacements, high temperatures.*

### *Введение*

Самые разнообразные машины, механизмы и их узлы в своем составе имеют неподвижные сопряжения или подвижные, но длительное время находящиеся в неподвижном состоянии. Такие сопряжения имеются в конструкциях железнодорожного подвижного состава, автомобилей, авиационной техники, узлах и деталях различных станков, строительных машин и других областей техники. Фреттинг как обособленный процесс заключается в том, что поверхности соприкосновения, являясь неподвижными, испытывают небольшое периодическое относительное движение, при котором имеет место проскальзывание приводящее к повреждению поверхности. Границы этого процесса очень условлены, подобно понятию наноразмерные частицы. Известны попытки обозначения этих границ на основе понятия пятна контакта, которые основываются на представлении, что образующие частицы износа не выходят из зоны контакта [1 с. 4]. В фундаментальном обзоре исследований в области фреттинга [2, с. 5] утверждается, что «большинство мнений сходится на том, что фреттинг характеризуется амплитудами менее 25 мкм, но определенно не более 130 мкм». Несмотря на то, что относительное перемещение деталей неподвижных сопряжений в процессе эксплуатации не предусматривается, оно может возникать в незначительных пределах под воздействием вибраций, периодического изгиба или скручивания сопрягаемых деталей, действия других знакопеременных нагрузок. Результатом этого является разрушение контактирующих поверхностей, что ограничивает ресурс работы машин. На

развитие процессов фреттинга в условиях высоких температур оказывает влияние много факторов, наиболее значимыми из которых являются: температура окружающей среды и ее коррозионная активность, амплитуда относительных перемещений, частота колебаний, условия нагружения, твердость и микрогеометрия контактирующих поверхностей [3, с. 156]. Наибольшая опасность фреттинг-износа в условиях высоких температур имеет место в атомной и авиационной промышленности, в органах управления авиационных двигателей.

Целью исследования является поиск в промышленности ниши для применения новых разрабатываемых лазерных технологий и покрытий.

### *1. Исследования закономерностей фреттинг-износа в условиях высоких температурах*

Практически все исследования в области влияния температуры на фреттинг-износ отмечают неоднозначное влияние температуры на трибологические характеристики. В этой связи представляют интерес ранние исследования Hurricks P.L. и Fshford K.S [4 стр. 170]. Установлено, что для испытанных материалов существует температура перехода в интервале 393–473°C. до этих температур скорость износа падает с повышением температуры, что объясняется образованием стабильной окисной пленкой, которая действует как твердая смазка. При разрушении окисной пленки износ материалов возрастает. Особенно это наблюдается в нейтральной среде – аргоне.

Исследованиям фреттинга уделяется много внимания. В работе A.M. Kirk, P. H. Shipway, W. Sun и др. [5, с. 699] отмечается, что повреждения при фреттинг-износе приводят к образованию твердой и хрупкой трибологически преобразованной структуры, которая может влиять как на износ, так и на усталость. В то время как существование и значение этой структуры было установлено в результате обширных исследований, лежащие в основе физические механизмы его формирования и их зависимость от условий фреттинга до сих пор не ясны. В этой работе испытания на фреттинг в режиме полного скольжения проводились с использованием самосопряженных

высокопрочных стальных пар, использующих геометрию цилиндр-на-плоскости для получения линейного контакта в диапазоне частот фреттинга. Характер частиц (как по размеру, так и по составу), выбрасываемых из контакта, не зависел от частоты.

В соответствии с относительными направлениями движения для контакта шарик-плоскость существует четыре основных режима изнашивания фреттинга – тангенциальный, радиальный, крутильный и вращательный режимы. Механизмы этих четырех основных режимов изнашивания фреттинга, в частности для последних трех режимов, были рассмотрены [6, с. 1378] на основе изучения результатов ранних работ. В работе Arman Ahmadi, Farshid Sadeghi, Steve Shaffer [7, с. 112] изучено влияния температуры ( $750^{\circ}\text{C}$ ) на коэффициент трения и скорость изнашивания инконеля 617 при фреттинг-износе в воздушной и гелиевой средах. Для непрерывного контроля изменения глубины износа во время испытания на износ фреттинга была разработана методика измерения износа фреттинга на месте. Было установлено, что по мере прогрессирования износа при фреттинге на воздухе скорость изнашивания демонстрировала билинейное поведение, включающее в себя вначале строгий режим приработки, а затем умеренный устойчивый режим изнашивания. Коэффициент трения уменьшался по мере увеличения температуры как для воздушной, так и для гелиевой среды. В воздушной среде скорость износа уменьшалась с повышением температуры. При  $750^{\circ}\text{C}$  гелиевая среда показала больший износ, чем в воздушной среде. Для определения относительной доли кислорода на образцах проводили сканирующую электронную микроскопию.

В работе S.R.Pearson и др. [8, с. 625] исследуется влияние температуры (от  $24^{\circ}\text{C}$  до  $450^{\circ}\text{C}$ ) на скорость изнашивания и коэффициент трения высокопрочной легированной стали при скольжении на воздухе. Было установлено, что при значительных потерях материала от контакта во время фреттинга при комнатной температуре общая потеря материала от контакта стала отрицательной даже при незначительном повышении температуры до  $85^{\circ}\text{C}$ . При температурах выше  $85^{\circ}\text{C}$  сохранялся отрицательный износ, при этом коэффициент трения монотонно

снижался с повышением температуры до 450°C. На рисунке 1 показано изображение следов износа при 25°C, 375°C и 750°C для шариков в воздушной среде.

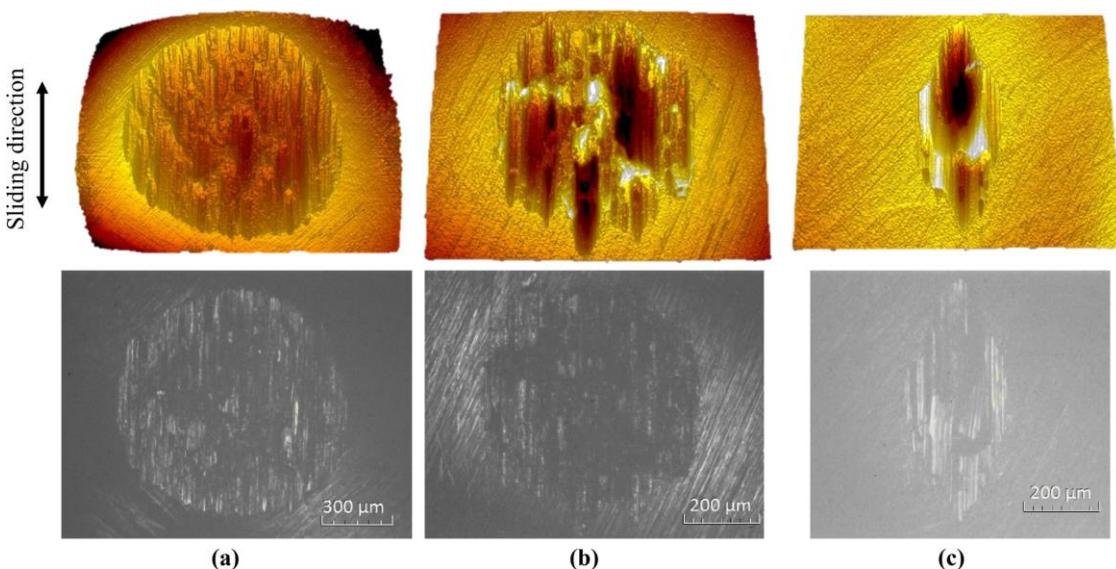


Рис. 1. Оптические микрофотографии и трехмерные изображения поверхности шаров в воздушной среде, полученные при 30 000 циклах:

а) комнатной температуре, б) 375°C, в) 750°C

Предполагается, что изменения скорости изнашивания и коэффициента трения были обусловлены изменением способа спекания частиц оксида с образованием защитного слоя твердых частиц, причем спекание частиц оксидных частиц при этих низких температурах стимулируется их размерностью, при которой образуются частицы оксидных частиц. Было показано, что след на шаре при комнатной температуре был больше и более однородной, чем был при более высоких температурах, он стал меньше и неоднородным, особенно при 750°C, который был более вытянутым в направление скольжения. Кроме того были частицы износа, которые прилипли к контактным поверхностям из-за высокой температуры и давления. Фреттинг-износ является разрушительным явлением, которое может ускорить образование трещин в вибрирующих компонентах, приводя к преждевременным катастрофическим отказам. Одной из наиболее важных характеристик фреттинга является переход от фреттинг-износа к скольжению из-за его пагубного влияния

на усталостную долговечность (C.H. Hagerjr., J.H. Sanders, S.Sharma [9, с. 501]). В настоящей работе проведено исследование, характеризующее критические нормальные нагрузки и перемещения сплава Ti6Al4V при комнатной температуре и 450°C (842°F). В настоящей работе проведено исследование, характеризующее критические нормальные нагрузки и перемещения сплава Ti6Al4V при комнатной температуре и 450°C (842°F). Следы износа показаны на рисунке 2. Экспериментальные исследования показывают, что существует зависимость между критической нагрузкой и перемещением, которая зависит от температуры. Испытания, проведенные при критических значениях нагрузки и смещения или вблизи них, показали сильное разрушение и признаки холодной сварки.

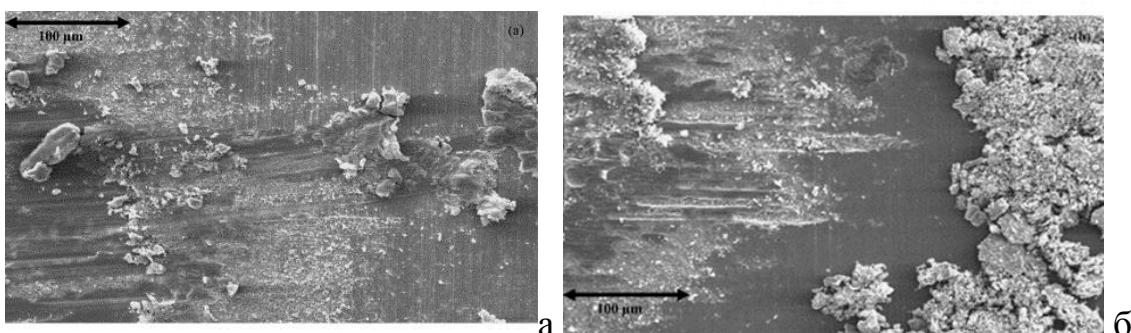


Рис. 2. SEM-микрофотография края следа износа на плоском диске (а) и эллиптическом штифте (б) после проведения испытания при 450°C с длиной хода 200 мкм и нормальной нагрузкой 50 Н в течение 7500 циклов

В работе L. Xin, B.B. Yang, J. Li, Y.H. Lu, T. Shoji [10, с. 75] исследовано износное повреждение сплава 690TT в режимах частичного и полного скольжения при температуре 320°C. Отделяемые в процессе фреттинг-износа частицы имеют различный размер. Полученные режимы фреттинга контролировались путем изменения амплитуды смещения. В режиме частичного скольжения основными механизмами износа являлись адгезионный износ и усталостная трещина. Отмечается, что наноструктурированная триботехническая трансформированная структура (ТТС) образовалась в результате неполной динамической рекристаллизации (ДРК) с наличием карбида

в ТТС. В режиме скольжения, окисление и расслоение доминировали в поведении фреттинг-износа. Образование слоя глазури приводило к уменьшению объема износа при 320°C. ТТС с меньшим размером зерен формировались за счет полного ДРК. Оксидный тип третьего слоя тела состоял из NiCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, независимо от режима скольжения.

Известно, что температура влияет на характер изнашивания металлов при фреттинге; как правило, наблюдается критическая температура, выше которой происходит существенное снижение скорости изнашивания, что связано с развитием защитных оксидных слоев в фреттинг контакте. В работе [11, с. 240] были выбраны пять марок стали с различными типичными микроструктурными особенностями. Оценивали влияние различных микроструктур на фреттинг-износ формулируя механизм износа. Результаты показывают, что микроструктурные особенности оказывают существенное влияние на износостойкость при фреттинге в зависимости от приложенных нагрузок. Результат позволяет предположить, что сочетание мягкого феррита и твердого мартенсита с аустенитом, имеющим низкую твердость, проявляет превосходную износостойкость при фреттинге. В работе [12, с. 411] приведены экспериментальные доказательства существования порога перехода от фреттинга к скольжению, которые представлены в виде данных о трении, скольжении и следах фреттинга. В работе [13, с. 283] с помощью наноиндентирования изучена эволюция механических свойств четырех металлических материалов (титановый сплав, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, медный сплав), индуцированная фреттингом. Показано, что трибологически трансформированная структура очень быстро формируется в пределах начальных циклов фреттинга, а ее механические свойства остаются практически постоянными в течение всего времени испытаний испытуемых материалов.

## *2. Аналитическое моделирование фреттинг-износа с учетом температуры.*

В работе представлен критический анализ методов определения коэффициента трения при фреттинге [14, с. 2]. Массовый обзор журналов по

трибологии показал, что 41% статей не указали используемый метод, а 37% использовали наименее эффективные методы, что указывает на необходимость ориентировать на поставленную задачу выбор лабораторной установки для исследования фреттинга. В работе X. Jin, P.H. Shipway, W. Sun [15, с. 104] было рассмотрено поведение фреттинга при микроскольжении нержавеющей стали в зависимости от объемной температуры и частоты колебаний (с изменениями частоты фреттинга). Была разработана аналитическая модель, которая позволила предположить, что при частоте 200 Гц можно ожидать повышения температуры контакта более чем на 70°C, связанного с высоким выделением тепла от трения на этой частоте (по сравнению с диссипацией энергии на частоте колебаний 20 Гц). При объемной температуре, либо при комнатной температуре, либо при температуре 275°C повышение контактной температуры не приводит к переходу через критическую температуру. В работе [16, с. 4] для количественного определения коэффициента трения и коэффициента износа в репрезентативных условиях нагружения разработана и используется испытательная установка для фреттинга. Сочетание локальной вычислительной методологии и экспериментальной характеристики материала бронированной проволоки под давлением позволяет разрабатывать карты фреттинга условий эксплуатации. В работах [17, с. 3] исследован фреттинг в условиях контактно-усталостного разрушения монокристаллического суперсплава на основе никеля в креплении типа «ласточкин хвост» при 600°C. Материал контактной поверхности окисляется при высокой температуре, и оксиды уплотняются на контактной поверхности. Контактная поверхность расслаивается и образуется много ям, что приводит к концентрации напряжений вблизи лунок износа и способствует возникновению трещин. Методом конечных элементов определены контактные напряжения и деформации, а рассчитанная максимальная площадь повреждения хорошо согласуется с экспериментальными результатами. Проведено [18, с. 4] более семисот наборов имитационных экспериментов с использованием семидесяти различных экспериментальных тестов, описанных ранее в литературе. Результаты исследования показывают, что метод управления сеткой

может быть распространен на проблемы фреттинга. В этом исследовании было получено значительное сокращение вычислительного времени до 97%. Таким образом, данное исследование предоставляет простой метод для проектирования сложных 3D промышленных компонентов, подверженных фреттингу. В исследованиях [19, с. 4] был успешно разработан гибкий метод петлевого анализа, основанный на простых векторных принципах, который способен количественно определять и характеризовать его составные части. В работе [20, с. 395] представлены численные расчеты напряжений в условиях фреттинг-усталости, полученные на основе уравнений Навье-Коши, которые управляют проблемой, решаются с помощью численных методов без сетки. Результаты сравниваются с решением, полученным из расчета, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ).

### *3. Исследования высокотемпературного фреттинга в атомной промышленности.*

В атомной промышленности исследования фреттинга при высоких температурах особенно актуальны, в частности в узлах крепления труб теплообменников [21, с. 405]. Фреттинг-износ, вызванный вибрацией, вызванной потоком, является одним из преобладающих трибологических режимов разрушения в атомных электростанциях и промышленности. В работе С. Lorenzo-Martin и др [22, с. 221] представлено экспериментальное исследование влияния на фреттинга на характеристики покрытий из оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), полученных методом атомно-слоевого осаждения (ALD) на Zirlo (сплав Zr), распространенному сплаве для оболочки ядерного топлива. Покрытие с равномерной толщиной около 750 нм было нанесено на плоскость Zirlo. Поскольку типичная толщина топливной оболочки составляет 1 мм, требуется ультратонкое покрытие. Твердость и модуль упругости покрытия ALD измерялись методами наноиндентирования. С конфигурацией контакта палец-плоскость в условиях малой амплитуды вибраций было изучено состояние фреттинг контакта для материала Zirlo,  $Al_2O_3$ -покрытия на Zirlo, и

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-покрытия на Zirlo с последующей термической обработкой. Результаты показали, что нанесенное покрытие Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> обеспечивает незначительное улучшение характеристик изнашивания при фреттинге. Вызванные потоком колебания могут привести к фреттинг- износу поверхностей плакированных ТВЭЛов (труб) относительно их опор на атомных электростанциях (Ping Lai, Hao Zhang, Lefu Zhang и др. [23, с. 55]). В работе [24, с. 625] для изучения влияния температуры, ударной нагрузки и скорости на износ. Были проведены испытания на ударный фреттинг-износ при комнатной температуре и температуре воды 290 °с, имитирующие относительное перемещение материала трубы парогенератора (сплав 690) относительно материала опорной плиты трубы (нержавеющая сталь 409). Изношенная поверхность наблюдалась с помощью SEM, а коэффициенты износа сплава 690 оценивались на основе модели скорости работы. Результаты показали, что коэффициенты фреттинг износа при ударе в условиях 290°C были больше, чем при комнатной температуре. Скорость износа в диапазоне 290°C была в 10 раз больше, чем в диапазоне комнатной температуры. Наблюдение за изношенными поверхностями показало, что при комнатной температуре в условиях ударного воздействия механизмами изнашивания фреттинга являются истирание и пластическая деформация, а при 290°с-адгезия, а при 290°C – адгезия и пластическая деформация. Модель износа для фреттинга плакированных ядерных топливных стержней представлена в работе Peter J. Blau [25, с. 754]. Поток теплоносителя может проходить в центре ядерных реакторов под давлением воды, что приводит к износу оболочки, утечке топливного материала и остановкам установки. Цель выполненной работы состояла в том, чтобы получить микроструктурную интерпретацию коэффициента износа фреттинга для использования в существующей многоступенчатой модели износа топливных стержней. Физически величина потерь (выраженная в единицах мм<sup>3</sup>/Н·м) отражает эффективность преобразования фрикционной работы в удаление материала при фреттинге между плакированными Циркалоем-4 ядерными ТВЭЛами и их опорными решетками из аналогичного или

разнородного материала. Трибосистемный анализ этой сложной ситуации включает в себя не только механические воздействия на износ оболочки, но и влияние температуры и трибокоррозию [26, с. 140]. Он предполагает, что скорость износа оболочки может изменяться с течением времени и происходит поэтапно в зависимости от эволюционирующей природы материалов. Вибрация трубопровода воздействует на уплотнительную поверхность прокладки в виде фреттинг-износа, снижая герметичность. Описано экспериментальное исследование фреттинг-износа и фрикционного механизма сопряжения спиральной намотанной прокладки с фланцем. Фреттинг-коррозия сплава 690 ТТ против нержавеющей стали 304 может происходить [27, с. 737] в парогенераторах атомной электростанции в условиях частичного скольжения. В данном исследовании гальваническая коррозия произошла до фреттинга, что привело к более быстрой коррозии.

#### *4. Исследования высокотемпературного фреттинга в авиационной промышленности.*

В работе M. Lavella, D. Botto изучается фреттинг-износ легированных сталей в креплениях лопаток паровых турбин [28, с. 737]. К области проблем высокотемпературного фреттинга относятся замковые крепления лопаток осевых турбин. Для уменьшения амплитуды резонансных колебаний лопаток в турбомашинах лопатки собираются со взаимной блокировкой в замке. Целью настоящего исследования является исследование механизма износа на контактной поверхности кожуха лопатки в паровых турбинах. Имеются экспериментальные данные, касающиеся механизма износа на стыках лопаток авиационных двигателей, в то время как литература, касающаяся такого же воздействия на паровые турбины, менее богата. Кроме того, перенос результатов с авиадвигателя на паровую турбину затруднен, поскольку материалы и условия работы различны. Для преодоления этого недостатка знаний была создана экспериментальная кампания по исследованию этого механизма износа в конкретных условиях и с использованием отличительных материалов, используемых в паровых турбинах. В работе M.H. Attia, N.S. D'Silva [29, с. 210]

исследовано влияние возвратно-поступательного движения, в отличие от случая одностороннего скольжения, на повышение температуры поверхности.

Концепция температуры вспышки рассмотрена в свете теории сопротивления тепловому воздействию для установления точности и ограничений существующих моделей и оценки чувствительности температуры поверхности к различным параметрам процесса, а именно к свойствам материала, оксидной пленке и шероховатости поверхности. Даны некоторые рекомендации для дальнейших исследований. В работе J. Wen, M.M. Khonsari [30, с. 517] исследовано изменения температуры на контакте в условиях фреттинг-износа. Нержавеющая сталь SAF 2507 super duplex (SAF 2507 SDSS) широко использована в промышленности. В работе [31, с. 144] исследован фреттинг в широком диапазоне температур от 25°C до 800°C при 20 Н и 50 Н. Установлено, что на фреттинг-износ влияют как температура, так и нагрузка. Повышенная температура вызывает как размягчение поверхности, так и образование оксидного слоя (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> и α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). По сравнению с 20 Н, оксидный слой при более высокой нагрузке 50 Н легче переносится на поверхность аналога под взаимосвязанным воздействием температуры нагрева и приложенной нагрузки, что в конечном итоге приводит к более высоким потерям массы при износе. В работе [32, с. 12] проведен тест на фреттинг крепления «ласточкин хвост». Эксперименты по фреттингу были проведены на монокристаллических суперсплавах на основе Ni (NBSX) при 600 и 700°C в двух вторичных ориентациях [110] и [010]. Исследовано влияние вторичной ориентации и температуры на фреттинг-усталостное поведение. Для исследования поля напряжений в области контакта было использовано моделирование методом конечных элементов пластичности кристаллов. В работе [33, с. 283] основное внимание уделяется фреттинг-износу линейного контакта материала Nimonic-80A (цилиндр на плоской поверхности) как при комнатной температуре, так и при высоких температурах. Испытания проводились при трех различных амплитудах смещения при комнатной температуре (РТ) и при высокой температуре (620°C) в течение 25 000 циклов. По результатам испытаний были

получены экспериментальные константы, такие как коэффициент износа ( $k$ ) и коэффициент трения ( $\mu$ ).

##### *5. Методы защиты от фреттинг-износа.*

В условиях высоких температур при фреттинге доминируют коррозионные процессы. Недостаточная изученность их природы, влияние большого числа факторов, определяющих активность этих процессов в каждом конкретном случае, затрудняет разработку методов защиты. Имеющиеся в различных источниках данные свидетельствуют о том, что борьба с этим видом разрушения возможна различными путями: подбором соответствующих пар контактирующих материалов, использованием различных гальванических и диффузионных покрытий, применением жидких и твердых смазок, неметаллических прокладок и покрытий и т. д. Запрессованные соединения должны быть прочными и надежными, и это относится, в частности, к соединениям, работающим в тяжелых условиях или непосредственно влияющим на безопасность, таким как колесные пары рельсовых транспортных средств. Поэтому следует предпринимать попытки устранения факторов, способствующих развитию износа. Применение PVD покрытий может быть способом повышения прочности соединения. В работе Sławomir Kowalski [34, с. 15] проведена оценка возможности применения PVD покрытий для смягчения развития фреттинг-износа в пресс-фитинговых соединениях. Испытания на износ проводились на примере соединения втулка / вал, работающего в условиях вращательного изгиба. Испытуемые образцы были разделены на две группы. В первую вошли образцы без покрытия, а во вторую на валы было нанесено многослойное покрытие CrN+OX. Исследование [35, с. 370] сообщает о положительных результатах при применении смазки сnanoалмазами. Изучен фреттинг и поведении износа тестовых пар сталь/медь, смазанных в наноалмазно-дисперсном масле при 106 Н после  $4 \times 10^4$  циклов фреттинга. Результаты показывают, что добавление 0,2 мас. % наноалмазов в масле уменьшает момент трения от 0,12 Нм чистого масла до 0,08 Нм. В частности, объем износа уменьшается на порядок по сравнению с испытанным в чистом

масле. Микроструктурные анализы показывают, что существенное снижение трения и износа связано с коллективными эффектами, включая образование прочных наноалмазных упрочненных трибопленок, вызванных износом двойных границ и хорошей механической связывающей поверхности между трибопленками и подложкой. Одним из возможных решений этой проблемы является использование оксидных покрытий. В работе [36, с. 736] были проведены эксперименты по тангенциальному фреттинговому износу в моделируемой первичной охлаждающей воде. Например, в реакторе с водой под давлением изучено влияния микродугового окисления на поведение фреттинг-износа циркониевого сплава реакторного класса, известного как ZIRLO™. Результаты показали, что микродуговое окисление улучшило износостойкость фреттинга трубы ZIRLO™. Имеется положительный опыт повышения фреттингостойкости контакта в условиях высоких температур применением плазменных газотермических покрытий [37, с. 311]. Изучено [38, с. 395] влияние на фреттингостойкость композитов из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненные несколькими углеродными материалами, включая углеродное волокно, графит, фторид графита, многостенные углеродные нанотрубки и оксид графена. Поведение композитов при фреттинговом износе оценивали с помощью тестовой машины «шар-на-пластина». Изучены также их термические и механические свойства. Имеется [39, с. 3] опыт защиты электрических контактов при повышенных температурах нанесением покрытия золотом. Отмечается [40, с. 190] перспективность применения методов индентирования для оценки механических свойств поверхностей при изучении фреттинга. В работе [41, с. 193] описаны проблема защиты титановых лопаток компрессора и роторов реактивных двигателей для определения механизмов, ответственных за разрушение защитных покрытий Cu-Ni-In. Результаты показали, что при рабочих температурах 221°C титан из непокрытого диска был перенесен в более мягкое Cu-Ni-In покрытие на лопатке. Это в свою очередь создало одноименную пару титан на титане и привело к фреттинг-износу. Установлено, что при более

высоких температурах 454°С выделение на поверхности меди, по-видимому, является доминирующим механизмом разрушения.

### *Заключение*

Результаты исследований за последние 50 лет в области высокотемпературного фреттинга свидетельствуют об неоднозначном влиянии температуры на трибологические характеристики фрикционного контакта. С увеличением температуры возможно и снижение изношенного объема, и увеличение его. Аналогичная картина наблюдается с увеличением нагрузки.

На развитие процессов фреттинга, в совокупности, оказывает влияние много факторов, наиболее значимыми из которых являются: амплитуда относительных перемещений, частота колебаний, условия нагружения, температура окружающей среды и ее коррозионная активность, влажность, твердость и микрогеометрия контактирующих поверхностей. Большое влияние на износ деталей при фреттинге оказывают строение и структура материалов деталей, зависящие от технологии получения заготовки; параметры операций изготовления влияющие на шероховатость; остаточные напряжения; погрешности геометрии детали; жесткость узла; изменения параметров внешней среды; электрохимические процессы; недетерминированный характер изменения фактической площади контакта; свойства продуктов изнашивания и т. д. Колебания при фреттинг-износе влияют на формирование деформационного рельефа контактируемых поверхностей, образование которого обусловлено, кроме величины давления, видом сопряжения, твердостью поверхности материалов и покрытий, условиями эксплуатации. Колебательные процессы в условиях фреттинга происходят также и в микрообъемах материала.

Для прогнозирования стойкости контакта к фреттингстойкости необходимо проведение силового анализа на контакте и определение спектрального состава вибраций, действующих на фрикционный контакт.

### *Список литературы*

1. Утерхауз Р.Б. Фреттинг-коррозия. – М.: Машиностроение. 1976. – 272 с.

- 
2. Голего Н.Л. Фреттинг-коррозия металлов / Н.Л. Голего, А.Я. Алябьев, Б.Б. Шевеля. – К.: Техника. 1974. – 271 с.
3. Xianglong Guo. Effects of sliding amplitude and normal load on the fretting wear behavior of alloy 690 tube exposed to high temperature water / Xianglong Guo, Ping Lai, Lichen Tang [et al.] // Tribology International. – 2017. – Vol. 116. – P. 155–163.
4. Hunicks P.L. The effect of temperature on the fretting wear of mild steel / P.L. Hunicks, K.S. Ashford // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1969. – Vol. 184. – №3. P. 165–175.
5. Kirk A.M. The effect of frequency on both the debris and the development of the tribologically transformed structure during fretting wear of a high strength steel / A.M. Kirk, P.H. Shipway, W. Sun // Wear. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 694–703.
6. Zhu M.H. On the mechanisms of various fretting wear modes / M.H. Zhu, Z.R. Zhou // Tribology International. – 2011. – Vol. 44. – №11. – P. 1378–1388.
7. Ahmadi A. In-situ friction and fretting wear measurements of Inconel 617 at elevated temperatures / A. Ahmadi, F. Sadeghi, S. Shaffer // Wear. – 2018. – Vol. 410–411. – P. 110–118.
8. Pearson S.R. The effect of temperature on wear and friction of a highstrength steel in fretting / S.R. Pearson, P.H. Shipway, J.O. Abere [et al.] // Wear. – 2013. – Vol. 303. – P. 622–631.
9. Hagerjr C.H. Effect of high temperature on the characterization of fretting wear regimes at Ti6Al4V interfaces / C.H. Hagerjr, J.H. Sanders, S. Sharma // Wear. – 2006. – Vol. 260. Issues 4–5. – P. 493–508.
10. Xin L. Wear damage of Alloy 690TT in partial and gross slip fretting regimes at high temperature / L. Xin, B.B. Yang, J. Li [et al.] // Wear. – 2017. – Vol. 390–391. – P. 71–79.
11. Чжэн Чжан. Fretting friction and wear behavior of spiral wound gasket (SWG) of the sealing surface / Чжэн Чжан, Дэгую Ван, Яньбао Го // Tribology International. – 2019. – Vol. 133. – P. 236–245.

- 
12. Mi X. Investigation on fretting wear behavior of 690 alloy in water under various temperatures / X. Mi, Z.B. Cai, X.M. Xiong [et al.] // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 100. – P. 400–409.
13. Kesavan D. High temperature fretting wear prediction of exhaust valve material / D. Kesavan, Vamshidhar Done, M.R. Sridhar [et al.] // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 100. – P. 280–286.
14. Zabala A. On the use of the theory of critical distances with mesh control for fretting fatigue lifetime assessment / A. Zabala, D. Infante-Garcí, E. Giner [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. Article 105985.
15. Jin X. The role of frictional power dissipation (as a function of frequency) and test temperature on contact temperature and the subsequent wear behaviour in a stainless steel contact in fretting / X. Jin, P.H. Shipway, W. Sun // *Wear*. – 2015. – Vol. 330–331. – P. 103–111.
16. O'Halloran S.M. A global-local fretting analysis methodology and design study for the pressure armour layer of dynamic flexible marine risers / S.M. O'Halloran, A.D. Connaire, A.M. Harte // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. Article 105967.
17. Shouyi Sun Fretting fatigue failure behavior of Nickel-based single crystal superalloy dovetail specimen in contact with powder metallurgy pads at high temperature / Sun Shouyi, Li Lei, Yue Zhufeng [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. – Article 105986.
18. Zabala A. On the use of the theory of critical distances with mesh control for fretting fatigue lifetime assessment / A. Zabala, D. Infante-Garcí, E. Giner [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. Article 105985.
19. Zabala A. Critical Analysis of Coefficient of Friction Derivation Methods for Fretting under Gross Slip Regime / A. Zabala, A. Aginagalde, W. Tato [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. Article 105988.
20. Kosec G. Weak and strong from meshless methods for linear elastic problem under fretting contact conditions / G. Kosec, J. Slak, M. Depolli [et al.] // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 138. – P. 392–402.

21. Mi X. Investigation on fretting wear behavior of 690 alloy in water under various temperatures / X. Mi, Z.B. Cai, X.M. Xiong [et al.] // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 100. – P. 400–409.
22. Lorenzo-Martin C. Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating on fretting wear performance of Zr alloy / C. Lorenzo-Martin, O. Ajayi, O. Hartman [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 219–227.
23. Ping Lai. Effect of micro-arc oxidation on fretting wear behavior of zirconium alloy exposed to high temperature water / Ping Lai, Hao Zhang, Lefu Zhang [et al.] // *Wear*. – 2019. – Vol. 424–425. – P. 53–61.
24. Pearson S.R. The effect of temperature on wear and friction of a highstrength steel in fretting / S.R. Pearson, P.H. Shipway, J.O. Abere [et al.] // *Wear*. – 2013. – Vol. 303. – P. 622–631.
25. Blau P.J. A microstructure-based wear model for grid-to-rod fretting of clad nuclear fuel rods // *Wear*. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 750–759.
26. Hongliang Ming. Effect of normal force on fretting-wear resistance of Inconel 690 TT against 304 stainless steel in simulated secondary pressurized reactor water / Hongliang Ming, Xingchen Liu, Zhiming Zhang [et al.] // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 126. – P. 133–143.
27. Wade A. Novel numerical method for parameterising fretting contacts / A. Wade, R. Copley, A.A. Omar [et al.] // *Tribology International*. – 2020. – Vol. 142. Article 105826.
28. Lavella M. Fretting wear of alloy steels at the blade tip of steam turbines / M. Lavella, D. Botto // *Wear*. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 735–740.
29. Attia M.H. Effect of mode of motion and process parameters on the prediction of temperaturer in fretting wear / M.H. Attia, N.S. D'Silva // *Wear*. – 1985. – Vol. 106. – P. 203–224.
30. Wen J. Transient temperature involving oscillatory heat source with application in fretting contact / J. Wen, M.M. Khonsari // *J. Tribol.* – 2007. – Vol. 129. – P. 517.

31. Mengjiao Wang. Interrelated effects of temperature and load on fretting behavior of SAF 2507 super duplex stainless steel / Mengjiao Wang, Yunxia Wang, Hao Liu [et al.] // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 136. – P. 140–147.
32. Yue Su. Effects of secondary orientation and temperature on the fretting fatigue behaviors of Ni-based single crystal superalloys / Yue Su, Qi-Nan Han, Cheng-Cheng Zhang [et al.] // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 130. – P. 9–18.
33. Kesavan D. High temperature fretting wear prediction of exhaust valve material / D. Kesavan, V. Done, M.R. Sridhar [et al.] // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 100. – P. 280–286.
34. Kowalski S. Assessment of the possibility of the application of a CrN+OX multi-layer coating to mitigate the development of fretting wear in a press-fit joint // *Wear*. – 2018. – Vol. 398–399. – P. 13–21.
35. Ding H.H. Low-friction study between diamond-like carbon coating and Ti6Al4V under fretting conditions / H.H. Ding, V. Fridrici, J. Geringer // *Tribology International*. – 2019. – Vol. 135. – P. 368–388.
36. Lavella M. Fretting wear of alloy steels at the blade tip of steam turbines / M. Lavella, D. Botto // *Wear*. – 2019. – Vol. 426–427. – P. 735–740.
37. Barman K. The role of a thermally sprayed CuNiIn underlayer in the durability of a dry-film lubricant system in fretting – A phenomenological model. / K. Barman, P.H. Shipway, K.T. Voisey // *Tribology International*. – 2018. – Vol. 123. – P. 307–315.
38. Qiufeng Wang. The influences of several carbon additions on the fretting wear behaviors of UHMWPE composites / Qiufeng Wang, Hongling Wang, Yunxia Wang [et al.] // *Tribology International*. – 2016. – Vol. 93. – P. 390–398.
39. Wan-bin Ren. Effects of temperature on fretting corrosion behaviors of gold-plated copper alloy electrical contacts / Wan-bin Ren, Peng Wang, Yinghua Fu // *Tribology International*. – 2015. – Vol. 83. Article 101976.
40. Liskiewicz T. Nano-indentation mapping of fretting-induced surface layers / T. Liskiewicz, K. Kubiak, T. Comyn // *Tribology International*. – 2017. – Vol. 108. – P. 186–193.

41. Freimanis A.J. The influence of temperature on the wear mode and deterioration of coatings used for titanium aircraft engine components / A.J. Freimanis, A.E. Segall, J.C. Conway // Tribology Transactions. – 2002. – Vol. 45. Issue 2. – P. 193–198.

---

**Алисин Валерий Васильевич** – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН», Москва, Россия

---