

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора
Куксеновой Лидии Ивановны
на диссертационную работу ДУБИНОВОЙ ОЛЬГИ БОГДАНОВНЫ
«Фреттинг-изнашивание вибронагруженных фланцевых соединений»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата технических наук по специальности
2.5.3. Трение и износ в машинах

1. Актуальность темы исследований

Актуальность темы диссертационной работы Дубиновой О.Б. определяется необходимостью повышения работоспособности узлов трения, эксплуатация которых сопровождается износом в условиях фреттинга. Эти условия характерны для вибронагруженных фланцевых соединений. Фланцевые соединения широко применяются в установках комплексной подготовки газа, на компрессорных станциях, в системе магистрального транспорта газа и на газораспределительных станциях. Увеличение объемов и скорости транспортировки газа в настоящее время приводит к возрастанию количества отказов по причине фреттинга – механического изнашивания и соответственно разгерметизации фланцевых соединений. Многоцикловое перемещение уплотнительных поверхностей фланцевого соединения, возникающее в результате фреттинга при наложении вибрационных воздействий, приводит к постепенному разрушению поверхностного слоя уплотнительного материала. При этом регламентированный расчет фланцевых соединений на прочность и герметичность не учитывает вибрационных воздействий, являющихся одним из наиболее существенных факторов накопления повреждаемости в соединении сталь–уплотнительный материал.

Следовательно, изучение влияния параметров вибрации на развитие процесса фреттинг-изнашивания уплотнительных поверхностей фланцевых соединений с целью увеличения наработки трубопроводных обвязок и оборудования газопроводных систем, безусловно, относится к актуальному научному и перспективному направлению с точки зрения решения важных практических задач.

2. Научная новизна исследований, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации

В результате анализа полученных автором диссертации Дубиновой О.Б. результатов экспериментальных и теоретических исследований процесса развития фреттинг-изнашивания в зоне контакта фланец–уплотнение и его влияния на разгерметизацию фланцевых соединений можно выделить следующие наиболее значимые научные результаты:

1. Сформулированы новые представления об условиях повышения коэффициента трения покоя в зоне контакта стальной фланец–неметаллическое уплотнение. Показано, что значения молекулярных констант трения покоя (τ_0 и β) определяются твердостью уплотнительного материала и параметром шероховатости R_a стальной поверхности фланца. Угол при вершине выступов профиля является

комплексным параметром шероховатости поверхности фланца, уменьшение которого приводит к росту коэффициента трения покоя. Для исследуемых неметаллических уплотнительных материалов разработаны аналитические зависимости, учитывающие параметр шероховатости R_a уплотнительной поверхности фланца, позволяющие определять молекулярные константы трения покоя.

2. Показано, что на этапе развития фреттинга, связанном с трением скольжения, шероховатость стального фланца является наиболее значимым фактором. Коэффициент трения скольжения при перемещении поверхности фланца по уплотнительному материалу достигает максимума при значениях параметра шероховатости R_a стальной поверхности в диапазоне от 3,41 мкм до 5,23 мкм.

3. Разработан комплексный показатель фреттинга, включающий величину контактного давления и виброскорость при оценке интенсивности изнашивания материала уплотнения во фланцевом соединении. Получена совокупность теоретико-экспериментальных зависимостей, позволяющих оценить изменение герметичности вибронагруженных фланцевых соединений в зависимости от контактного давления в процессе износа материала уплотнения, от скорости вибрации и рабочего давления в трубопроводе.

3. Связь диссертационной работы с НИР и НИОКР

Основные научные положения диссертационной работы Дубиновой О.Б. реализованы в Методике определения предельно допустимых режимов эксплуатации трубопроводов и оборудования ГРС по договору № 7053-308-19-9 от 22.11.2019 с ПАО «Газпром», принятого к внедрению в 2023 г.

4. Обоснованность научных положений и достоверность результатов исследований

Обоснованность выводов, научных положений, расчетных зависимостей и рекомендаций подтверждается сходимостью теоретических и экспериментальных результатов в пределах 4–10 %. Достоверность полученных диссертантом результатов исследований обеспечивается корректной постановкой, техническим обеспечением экспериментальных исследований, повторяемостью значений, полученных на 3-5 параллельно выполненных испытаниях с применением стандартизированных средств измерений (прошедших государственную поверку), и обработкой в соответствии с классическими положениями математической статистики. Сформулированные рекомендации по снижению потерь на трение и износ соответствуют общим положениям и законам трибологии.

5. Личный вклад соискателя в получении результатов исследования

Диссертация представляет собой самостоятельный научный труд автора, что подтверждается обсуждением ее отдельных результатов и работы в целом на профильных специализированных конференциях. Личный вклад автора в диссертационную работу заключается в самостоятельном проведении экспериментальных триботехнических испытаний и исследований выбранных сопряжений; в разработке расчетных зависимостей, описывающих влияние шероховатости и твердости материала уплотнения на условия зарождения и

развития фреттинга; в разработке методики прогнозирования ресурса фланцевых соединений, подверженных фреттинг-изнашиванию, которая учитывает влияние вибрационных и нагрузочных параметров, а также механические свойства уплотнительного материала. В публикациях в составе авторского коллектива личный вклад автора диссертации состоит в обобщении теоретических положений, обработке экспериментальных исследований и графической интерпретации полученных результатов.

6. Значимость результатов исследования для науки и практики

Полученные автором новые научные результаты существенно дополняют и расширяют трибологические знания об особенностях процесса фреттинг-изнашивания вибронегруженных соединений. Выполненные экспериментальные и теоретические исследования сопряжения сталь–уплотнительный материал–сталь создали основу для комплекса расчетных зависимостей, позволяющих не только оценивать изменение герметичности вибронегруженных фланцевых соединений, но и прогнозировать ресурс их безаварийной работы при разных условиях эксплуатации.

В результате исследований предложено техническое решение для повышения наработки вибронегруженных фланцевых соединений. ПАО «Газпром» принята к внедрению Методика определения предельно допустимых режимов эксплуатации трубопроводов и оборудования газораспределительных станций.

7. Подтверждения опубликованных результатов диссертации в научной печати

Основные научные результаты диссертации опубликованы в 12 работах, в том числе 3 публикации – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 1 работа – в издании, включенном в базу данных Web of Science и Scopus. Кроме этого, результаты исследований прошли апробацию на 8 международных и всероссийских научно-практических конференциях. Имеются ссылки на авторов и источники заимствования. Содержание автореферата в полной мере отражает результаты диссертационной работы.

8. Структура, направленность диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных литературных источников из 119 наименований и 5 приложений, в числе которых представлен разработанный на основании результатов исследований нормативный документ «Методика определения предельно допустимых режимов эксплуатации трубопроводов и оборудования газораспределительных станций». Общий объем работы составляет 158 страниц текста, включает 47 рисунков и 36 таблиц.

Во введении представлена общая характеристика диссертационной работы, обосновывается актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, степень разработанности, охарактеризованы объект и предмет исследований, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Отмечается, что характерное для настоящего времени увеличение объемов и скорости транспортировки газа приводит к росту количества отказов, связанных с

разгерметизацией фланцевых соединений, связанных с высоким уровнем вибрации, сопровождающей их эксплуатацию. Эта сложная научно-техническая проблема положена в основу диссертационной работы Дубиновой О.Б.

В первой главе дается обзор современного состояния исследований российских и зарубежных ученых по теме диссертации, анализ работ в области изучения причин отказов на объектах нефтегазовой отрасли, вызванных воздействием высокого уровня вибрации, нарушением герметичности резьбовых и фланцевых соединений технологических трубопроводов. Отмечается, что вибрация способствует развитию фреттинга в уплотнительных элементах фланцевых соединений, снижению усилия затяжки резьбовых соединений и соответственно самопроизвольному развинчиванию болтовых и шпилечных соединений фланцев.

Следует отметить высокий уровень описания разносторонних взглядов на природу фреттинга. Сформулированы основные представления молекулярной и адгезионной теорий процесса развития фреттинга; описаны стадии фреттинга: формирования оксидных пленок, накопления продуктов износа с их последующей циклической деформацией и интенсивным окислением, повторный рост уровня адгезионного взаимодействия; после чего наступает его минимальное значение. Подробно рассмотрена усталостная модель фреттинга на реальных примерах и описания фреттинга с позиций построения карт механизмов фреттинга.

На основе глубокого рассмотрения публикаций, отражающих рассматриваемую в диссертации проблему, автором делается вывод, что процесс фреттинга во фланцевых соединениях следует рассматривать как три последовательных этапа: формирование условий предварительного микросдвига, микросдвиг, многоцикловые реверсивные микроперемещения.

Вторая глава посвящена описанию материалов и методик исследования. На основе сформулированных задач работы автором представлена структурная схема исследований, описывающая основные этапы процесса зарождения и развития фреттинга во фланцевом соединении. Для триботехнических исследований выбраны неметаллические уплотнительные материалы: паронит, фторопласт, терморасширенный графит (ТРГ), полиуретан. В качестве материала фланца – сталь 20. Подробно описаны характеристики механических свойств исследуемых уплотнительных материалов и использованные методики их определения. Оценивались наиболее важные характеристики: твердость по Шору, пределы прочности и текучести при растяжении, удлинение при разрыве, сжимаемость, восстанавливаемость. Для проведения испытаний поверхность стальных образцов из стали 20 подвергалась механической обработке, в результате которой формировался микрорельеф с разной шероховатостью. Четко описаны методики и оборудование для определения коэффициента трения покоя и трения скольжения; метод и средства для испытаний при фреттинге; стенд для испытаний фланцевых соединений в условиях повышенных вибраций, позволяющий оценивать изменения момента затяжки фланцевого соединения.

Материал, представленный во второй главе, отличает обоснованное соответствие возможностей экспериментального решения поставленных задач достижению цели диссертационной работы.

Третья глава представлена результатами моделирования и экспериментального исследования трехстадийного процесса зарождения и развития фреттинга на поверхностях фланцев при наличии вибрации. Первый этап – это этап неподвижного контакта уплотнения с фланцем, для которого рассмотрены условия формирования трения покоя. Детально описано геометрическое моделирование внедрения единичного выступа шероховатости в упругое полупространство. Показано, что наиболее значимым для этих условий параметром шероховатости стальной поверхности является угол при вершине выступов профиля и молекулярные константы трения. Уменьшение угла при вершине выступов профиля шероховатости при полном внедрении стальной поверхности в уплотнительный материал способствует увеличению коэффициента трения покоя. При неполном внедрении шероховатости стальной поверхности в уплотнительный материал наибольшее влияние на рост коэффициента трения покоя оказывает увеличение площади контакта микронеровностей с уплотнительным материалом, а рост среднего шага выступов шероховатости снижает этот показатель. Описания представлений о формировании силы трения покоя и определяющих факторов проверены и обобщены на основе большого количества экспериментальных данных, выполненных по методике ISO 8295-2004 с использованием стальных образцов с разной шероховатостью. Совокупность результатов моделирования и триботехнических экспериментов позволили автору разработать аналитические выражения для оценки и прогнозирования величины молекулярных констант трения и коэффициента трения покоя для исследуемых пар трения: полиуретан–сталь 20, ТРГ–сталь 20, фторопласт–сталь 20, паронит–сталь 20.

Для описания второго этапа зарождения и развития фреттинга проведено моделирование трения скольжения стальной поверхности фланца по уплотнению. Для этого рассмотрена схема скольжения шероховатой стальной поверхности фланца по поверхности уплотнения, вызывающая первичную упругопластическую деформацию его поверхностных слоев. Результаты моделирования показали, что толщина слоя уплотнительного материала, подвергающаяся пластической деформации, с ростом параметра шероховатости стальной поверхности R_a увеличивается. Применение уплотнительных материалов с низкими значениями отношения коэффициента трения к критическому контактному давлению $f_{ск}/p_{кр}$ дает возможность уменьшить глубину слоя, подвергающегося пластическому деформированию. Результаты моделирования так же, как и для случая трения покоя, были проанализированы с позиций данных экспериментальной оценки коэффициента трения скольжения при разных контактных давлениях и шероховатости стальной поверхности. На основе большого количества экспериментальных данных достоверно показано, что для достижения наименьшего коэффициента трения скольжения для пар сталь 20 с фторопластом, паронитом, ТРГ рекомендуется применять фланцы с $R_a=0,394$ мкм или $R_a=6,621$ мкм. В случае использования полиуретана рекомендуется шероховатость стальной поверхности $R_a=3,41$ мкм и выше не зависимо от давления на контакте. С использованием полученных значений коэффициента трения скольжения автором было оценено изменение единичной толщины деформированного слоя для исследуемых пар трения в диапазоне заданных контактных давлений. Показано, что толщина

пластически деформированного слоя в основном зависит от двух параметров: R_a и $f_{ск}/p_{кр}$ – отношения коэффициента трения к предельно допустимому контактному давлению уплотнительного материала. При снижении этих параметров толщина деформированного слоя уменьшается, что влияет на уровень изнашивания уплотнения.

Третий этап фреттинга, связанный с многоцикловыми реверсивными микроперемещениями, автор исследовал в условиях многоциклового нагружения при возвратно-поступательном перемещении стального образца по материалу уплотнения в соответствии с модифицированной методикой ГОСТ 23.211-80. Для обработки и обобщения полученных экспериментальных данных Дубиновой О.Б. предложен комплексный показатель фреттинга, характеризующий кинетическую энергию вибрации, отнесенную к единице площади контактной поверхности образцов. Разработаны аналитические выражения для оценки интенсивности изнашивания уплотнительных материалов от комплексного показателя фреттинга. Экспериментально показано, что для пар трения сталь 20–сталь 20 имеет место возрастающий характер изменения интенсивности изнашивания, для пары трения полиуретан–сталь 20 интенсивность изнашивания снижается по мере роста комплексного показателя фреттинга, а при использовании уплотнений из ТРГ интенсивность изнашивания не зависит от его величины. Испытания пары трения паронит–сталь 20 показали экспоненциальный характер роста интенсивности изнашивания по мере увеличения комплексного показателя фреттинга, а пары трения фторопласт–сталь 20 – степенной характер изнашивания с тенденцией к небольшому росту значений. Важным практическим результатом, полученным диссертантом, является тот факт, что с увеличением давления на контакте количество этапов, за которое происходит разрушение эксплуатационного слоя, уменьшается. При этом число циклов деформирования на каждом этапе увеличивается для всех исследуемых материалов, кроме паронита. Для последнего максимальное число этапов разрушения и меньшее количество циклов деформирования на каждом этапе наблюдается при контактных давлениях 0,04 и 0,72 МПа. Автором подчеркивается, что использование комплексного показателя фреттинга представляется возможной оценка скорости разрушения уплотнения фланцевого соединения при разных условиях вибрации.

В четвертой главе представлены результаты исследования параметров затяжки фланцевых соединений трубопровода при разных величинах момента затяжки и их изменения при воздействии вибраций. На основе экспериментальных данных, полученных в условиях стендовых испытаний на участке трубопровода, эксплуатация которого проходит в условиях вынужденных колебаний, получены аналитические соотношения для оценки скорости снижения момента затяжки шпилек и болтов в зависимости от накопленного количества циклов вибрации. После проведения испытаний в течение 50 млн циклов проведено раскрытие фланцевого соединения, проанализированы повреждения в результате износа и оценен их уровень. Эта часть работы подтвердила правомочность разработанных автором расчетных соотношений оценки износа фланцевых соединений. Проведенные дополнительные модельные испытания также подтвердили сопоставимость экспериментальных значений коэффициента трения покоя и его аналитических оценок.

На основании результатов проведенных исследований разработана методика определения наработки фланцевых соединений, эксплуатируемых в условиях вибрации, которая достаточно подробно и в доступной технической форме описана в диссертационной работе. Сформулированы рекомендации по повышению наработки фланцевых соединений, эксплуатация которых сопровождается вибрациями. Работа завершается приложением, включающим методику определения предельно допустимых режимов эксплуатации трубопроводов и оборудования газораспределительных станций.

9. Соответствие паспорту научной специальности

Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах в части следующих областей исследования:

- **п.2.** Механика контактного взаимодействия при трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом качества поверхностного слоя;
- **п.3.** Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения;
- **п.10.** Физическое и математическое моделирование трения и изнашивания.

10. Замечания по работе

1. В работе изучаются триботехнические свойства четырех неметаллических уплотнительных материалов: паронит, фторопласт, терморасширенный графит, полиуретан, обладающие существенно разными характеристиками механических свойств, разным составом и структурой и соответственно разными нормативными требованиями к условиям их эксплуатации. Поэтому для усиления методологического аспекта работы следовало бы проанализировать все особенности материалов и четко выявить наиболее значимые характеристики для триботехнических свойств, что позволило бы с позиций основ фрикционного материаловедения рекомендовать условия выбора материалов, стойких против фреттинг-изнашивания.

2. Работа содержит элементы математического и экспериментального моделирования. Автором показано, что процесс фреттинг-изнашивания является функцией многих переменных: давления, амплитуды скольжения, шероховатости поверхности, частоты вибраций, числа циклов нагружения и др., при этом реализуются разные режимы процесса. Поэтому для возможности более широкого использования в реальных соединениях рекомендаций работы целесообразно было бы привести широко используемые карты фреттинга. Тем более что в работе есть данные как для построения карт методом исследования реакции материалов, так и исследования условий работы материалов.

3. В описании диссертационной работы имеется ряд недостатков оформления: в тексте нет ссылок на литературные источники [81] и [119]; на рис. 2.4 *а* и *б* не соответствуют обозначения 1 и 2; в обобщающем положении по результатам части 3.4 речь идет об износе, хотя экспериментальных данных для этого нет; не ясно, что значат разные плотности одного и того же материала в табл. 3.9; принципиальное различие зависимостей на рис. 3.13 требует пояснений; кривые на рис. 4.1

проведены не корректно в диапазоне количества циклов 0 – 3000000 и 0 – 10000000; рис. 4.2 вероятнее всего иллюстрирует массоперенос материала уплотнения на поверхность фланца, а не следы фреттинга; в части 4.1. не понятно, как оценивались количественные значения момента затяжки.

11. Заключение

Отмеченные недостатки не снижают высокого научного уровня рассматриваемой работы. На основании изложенного считаю, что диссертационная работа Дубиновой Ольги Богдановны «Фреттинг-изнашивание вибронагруженных фланцевых соединений» актуальна, содержит научную новизну, имеет теоретическую и научную значимость, она отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с п.п. 9-14 Постановления Правительства РФ «О порядке присуждения ученых степеней».

Диссертация является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, в которой на высоком научно-техническом уровне исследован процесс развития фреттинга в зоне контакта фланец–уплотнение.

Диссертационная работа обладает внутренним единством, содержит новые результаты и положения, выдвигаемые для публичной защиты, и свидетельствует о личном вкладе автора в науку о трении и износе в машинах.

На основании выполненных исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научно обоснованные технические решения в проблеме повышения эффективности эксплуатации вибронагруженных фланцевых соединений, работающих в условиях фреттинга, а ее автор – Дубинова Ольга Богдановна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Официальный оппонент:

Куксенова Лидия Ивановна, доктор технических наук по специальностям: 05.02.01 – Материаловедение в машиностроении и 05.02.04 – Трение и износ в машинах. Главный научный сотрудник лаборатории Методов и технологий упрочнения (отдел Конструкционного материаловедения) ФГБУН Института машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)

Куксенова Лидия Ивановна

« 13 » 05 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А.Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)
101000, Москва, м.Харитоньевский пер., 4.
Тел. +7 (910)426-08-56

Подпись д.т.н., проф. Куксеновой Л.И. заверяю

Ученый секретарь ИМАШ
В.Ф. Юшкене

