

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»
(ПНИПУ)**

614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29.

Тел.: 8(342) 219-80-67. Факс: 8(342) 219-89-27

E-mail: rector@pstu.ru; <http://www.pstu.ru>

ОКПО 02069065 ОГРН 1025900513924 ИНН/КПП 5902291029/590201001

«УТВЕРЖДАЮ»



Проректор по науке и инновациям
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический
университет» (ПНИПУ)

Швейкин А.И.

04 2025 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) на диссертационную работу Загорских Ольги Анатольевны на тему «Формирование упрочненного слоя на поверхности труб из аустенитной нержавеющей стали для защиты от фреттинг-коррозии», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.1. – **Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов**

Диссертация Загорских О.А. нацелена на решение вопросов обеспечения длительного ресурса оборудования авиационных двигателей, в частности, разработке параметров поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали для упрочнения и повышения ее стойкости к фреттинг-коррозии (ФК) и фреттинг-усталости (ФУ). Учитывая перспективы развития Российской промышленности, тема диссертации является актуальной и практически значимой.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, 6 глав, общих выводов, списка литературы из 96 наименований. Текст диссертации включает 143 страницы, 42 рисунка и 18 таблиц. Цель работы: «Разработка режимов упрочняющей поверхностной обработки изделий (труб) из аустенитной нержавеющей стали для повышения ее стойкости к ФК и ФУ» обоснована литературным обзором.

Во введении показана степень разработанности темы диссертации и уровень развития техники, обоснована актуальность диссертационной работы. Приведены цель и задачи,

научная новизна, а также теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов. Описан личный вклад автора диссертации Загорских О.А.

В первой главе диссертации проведен анализ литературных источников и выполнен анализ имеющихся на сегодняшний день сведений о механизмах развития ФК и способов её предотвращения. Приведен опыт многих исследователей о разработке основ теории повышения стойкости к ФК и ФУ поверхности металлических материалов, подверженных циклическим нагрузкам в условиях трения при вибрации. Обоснована целесообразность упрочнения поверхности для повышения стойкости к ФК и ФУ труб из нержавеющей стали 12X18H10T в условно неподвижных соединениях. Логически выстроен подход к формулированию цели и задач диссертационного исследования.

Во второй главе описаны использованные в работе методы исследований, оборудование, на котором проводили эксперименты, и материалы, из которых изготавливали экспериментальные образцы. Подробно описаны особенности применения аттестованных методик, реализованных на поверенном оборудовании, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

В частности, определение уровня остаточных напряжений на упрочненных стеклянной дробью образцах и образцах, обдутых электрокорундом сравнительно с исходным шлифованным состоянием в осевом направлении двумя методами: рентгеновским на установке X-STRESS 3000 Robot (неразрушающим методом) и методом Давиденкова на установке МерКулОН «Тензор-3» (механический/разрушающий метод, основан на вырезке из детали образца).

В третьей главе приведены экспериментальные результаты по оценке стойкости к ФК образцов труб из стали 12X18H10T после различных режимов и видов поверхностной обработки. Таких, как гидродробеструйная обработка (ГДО) стеклянной дробью, гидроабразивная обработка (ГАО) электрокорундом в сравнении с исходным шлифованным состоянием.

Рентгеновским методом и методом Давиденкова показано, что минимальные сжимающие остаточные напряжения наблюдаются у исходных шлифованных образцов. Средние значения остаточных напряжений образцов после ГАО, обдутых электрокорундом по режимам 1 и 3, соответственно, остались на уровне исходного шлифованного состояния образцов. Повышение остаточных напряжений (более чем на 50 % относительно исходного шлифованного состояния) наблюдается только на образцах, после обдува электрокорундом по режиму 2 - при увеличенном давлении воздуха.

Построены эпюры распределения остаточных напряжений, анализ которых показывает, что у шлифованных серийных образцов (группа А) максимальные сжимающие напряжения (-25) кгс/мм² находятся на расстоянии 5-10 мкм от поверхности. У шлифованных образцов (группа Б) остаточные напряжения неравномерны по длине и окружности трубы: на отдельных участках трубы сжимающие напряжения до 50 кгс/мм² наблюдаются вблизи поверхности, на других участках максимальные сжимающие напряжения до -10 кгс/мм² на глубине до 20 мкм, у поверхности переходящие в растягивающие напряжения не более 5 кгс/мм².

ГДО позволила улучшить микрогеометрию и шероховатость наружной поверхности труб из стали 12X18H10T, устранить грубые кольцевые риски глубиной до 20 мкм, являющиеся очагами усталостного разрушения, и сформировать на поверхности измененный слой (глубиной 80 мкм) с микротвердостью HV_{0.025} до 346 кгс/мм² (на глубине 0,02 мм) и

средним уровнем остаточных сжимающих напряжений, определенных на установке X-STRESS 3000 Robot, порядка (-482) МПа. Степень наклепа поверхности в исследованных сечениях составила 65,5 %. Сформированный ГДО слой обладает также повышенным пределом выносливости и повышает стойкость к фреттинг-коррозии (относительно исходного материала).

В четвертой главе выполнены сравнительные вибро/усталостные испытания образцов труб с разными вариантами финишной обработки поверхности. Для определения эффективности использования дополнительной обработки поверхности труб (изменения остаточных напряжений в поверхностном слое и шероховатости) на повышение фреттинго-стойкости и усталостной прочности трубопроводов в сравнении с исходным (шлифованным) состоянием. Выполнен анализ результатов циклических испытаний сочлененных деталей из стали 12X18H10T.

Показано, что в условиях возникновения поверхностной деформации при ГДО образцов труб стеклянной дробью при заданном режиме, в поверхностном слое упрочненных образцов произошел фазовый переход ГЦК-ОЦК с образованием мартенсита деформации (α'), процентное содержание которого в измененном слое составило ~27%.

Установлена зависимость фреттинг-коррозионной и фреттинг-усталостной прочности шлифованных труб ($\varnothing 8 \times 1$) мм из стали 12X18H10T, а также, что наиболее эффективна финишная обработка ГДО стеклянной дробью с вращением образцов по программе ЧПУ, с расстоянием от среза сопла до обрабатываемой поверхности 35 мм, углом наклона струи 90° , при давлении сжатого воздуха 0,1 МПа, в течение 30 сек, рабочая жидкость: вода техническая, стеклянная дробь фракцией (0,3-0,4) мм, концентрация рабочего материала (дроби) в суспензии - 30 %.

В пятой главе приведены данные фрактографического анализа и определено, что очаговые зоны развития усталостных трещин на шлифованных образцах, разрушенных при усталостных испытаниях, совпадали с отдельными кольцевыми рисками на поверхности труб, образовавшимися на операциях круглой шлифовки при изготовлении труб у поставщиков. При микрорентгеноспектральном анализе в локальных участках ФК на поверхности испытанных образцов труб на сканирующем электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 в продуктах ФК всех образцов труб выявлено повышенное содержание кислорода (до 34%), железо и легирующие элементы, входящие в марку 12X18H10T, при этом количество хрома и никеля в продуктах ФК значительно ниже (более чем в 2 раза), чем в основном материале трубы.

В выводах по диссертации Загорских О.А. отражены основные результаты работы. Сами выводы достаточно обоснованы. Диссертация имеет практическую значимость. Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам, обладает внутренним единством. Материал изложен логично, иллюстрирован рисунками и таблицами. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и результатов состоит в следующем:

Достоверность экспериментальных результатов и выводов диссертации Загорских О.А. обеспечена согласованностью результатов, полученных с использованием разнообразных стандартных методов исследования структуры, фазового состава и свойств нержавеющей сталей аустенитного класса, сертифицированного аналитического и испытательного оборудования и подтверждена результатами статистической обработки результатов экспериментов.

- Теоретически обосновано повышение стойкости к ФК и ФУ труб из нержавеющей аустенитной стали, подверженной циклическим нагрузкам в условно неподвижном соединении при упрочняющей поверхностной обработке.

- Экспериментально показано, что создание на поверхности труб из нержавеющей аустенитной стали упрочненного слоя повышает устойчивость материала к ФК и ФУ.

- Методом наименьших квадратов автором получена зависимость для прогнозирования влияния шероховатости поверхности, уровня остаточных напряжений и микротвердости поверхности на изменение времени до разрушения образцов труб из нержавеющей аустенитной стали в условиях вибрации и ФК.

Значимость для науки и практики полученных автором диссертационных результатов заключается в следующем:

- Практически подтверждена целесообразность применения упрочняющей поверхностной обработки труб из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т, эксплуатируемых в условиях ФК;

- По результатам испытаний в АО «ОДК-ПМ» выпущены протоколы испытаний, технические справки, технические акты.

- Результаты диссертационной работы внедрены в экспериментальную базу АО «ОДК-ПМ» и АО «ОДК-Авиадвигатель». Начата подконтрольная эксплуатация упрочненных стеклянной дробью трубопроводов (по местам крепления втулками), имеющих годные результаты замеров на специальной контрольно-измерительной машине (до и после проведения упрочняющей обработки ГДО), на ГГ.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Все выводы и рекомендации, сделанные автором работы, достаточно обоснованы, так как достоверность и обоснованность результатов диссертации Загорских О.А. подтверждается комплексным подходом и применением аттестованных методик исследования влияния упрочняющей поверхностной обработки труб из стали 12Х18Н10Т на стойкость к ФК и ФУ;

Обоснованность, также, подтверждается публикациями полученных Загорских О.А. результатов в ведущих рецензируемых научных журналах, а также апробацией работы на российских и международных конференциях/симпозиумах.

Личный вклад автора заключается в анализе литературы, в постановке цели и задач исследования, проведении и интерпретации результатов экспериментов, формулировании научных положений и выводов, а также – в непосредственном проведении испытаний и обработке результатов экспериментальных исследований по определению влияния ГДО на ФК и ФУ.

Полнота опубликования основных результатов диссертационной работы

Основные результаты диссертации Загорских О.А. доложены на 4 российских и международных конференциях, опубликованы в 5 статьях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus, РИНЦ, 4 из которых рекомендованы ВАК при Минобрнауки России для опубликования результатов кандидатских и докторских диссертаций.

Замечания по диссертации

По содержанию и оформлению диссертационной работы имеются следующие замечания и вопросы:

1. Необходимо пояснить, исходя из какого принципа выбирали метод упрочняющей обработки.

2. В работе отсутствуют пояснения почему остаточные напряжения измеряли только в осевом направлении.

3. Из текста работы неясно, каким образом автор рассчитывал степень наклёпа.

4. В работе не ясно, при каких практически рекомендуемых значениях качественных параметров поверхностного слоя обеспечивается наибольшее сопротивление к ФК и наибольшая долговечность.

5. Предложенная в работе математическая модель учитывает микротвердость поверхности, глубину измененного слоя, величину сжимающих напряжений и шероховатость. Являются ли эти параметры взаимозависимыми?

Приведенные выше вопросы и замечания не могут изменить общей положительной оценки представленной диссертации; считаем необходимым отметить, что диссертация написана грамотным техническим языком, достигнута цель работы – предложен эффективный метод повышения предела выносливости материала в условиях ФК.

Заключение о соответствии диссертации и автореферата критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Представленная диссертационная работа отвечает требованиям пп. 9 – 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Загорских Ольга Анатольевна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.6.1. – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов.

Отзыв рассмотрен и утвержден на расширенном заседании кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов механико-технологического факультета ФГАОУ ВО ПНИПУ, протокол № 36 от 03 июля 2025 года.

Доктор технических наук, декан механико-технологического факультета
ФГАОУ ВО ПНИПУ Песин Михаил Владимирович
научная специальность: 2.5.6 Технология машиностроения.

Доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» ФГАОУ ВО ПНИПУ Белова Светлана Анатольевна
научная специальность 05.02.01 Материаловедение (машиностроение).

Согласны на включение наших персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку.

«22» июля 2025 г.

«22» июля 2025 г.

Подписи Песина М.В. и Силиной О.В.



Удостоверение
политех
УПРАВЛЕНИЕ
КАДРОВ

Специалист по персоналу УК
Е.И. Овчинникова